



HAL
open science

Analyse comparative des méthodes dites “ multicritère ” dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 2 : méthodologie d'évaluation des dommages

Philomène Favier, Guillaume Piton, I. Ousset, Jean-Marc Tacnet

► To cite this version:

Philomène Favier, Guillaume Piton, I. Ousset, Jean-Marc Tacnet. Analyse comparative des méthodes dites “ multicritère ” dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 2: méthodologie d'évaluation des dommages. [Rapport de recherche] Commissariat général au développement durable (CGDD); IRSTEA - Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères. 2019. hal-02132546

HAL Id: hal-02132546

<https://hal.science/hal-02132546v1>

Submitted on 28 May 2019

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

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

Méthodes d'aide à la décision pour les plans d'action et de prévention

ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES
DITES «MULTICRITERES» DANS LE CONTEXTE
DU RISQUE TORRENTIEL

RAPPORT DE PHASE 2 : METHODOLOGIES
D'EVALUATION DES DOMMAGES

28 MAI 2019

**PHILOMENE FAVIER, GUILLAUME
PITON, ISABELLE OUSSET, JEAN-
MARC TACNET**

Université Grenoble Alpes, Irstea – ETNA
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d' Hères



Institut national
de recherche en sciences
et technologies
pour l'environnement

Contenu

1	Avertissement au lecteur	4
2	Synthèse opérationnelle	5
3	Rappel des objectifs.....	7
3.1	Contexte de la demande	7
3.2	Objectifs.....	7
3.3	Contenu et méthodologie	7
3.3.1	Phase 1	7
3.3.2	Phase 2	8
3.4	Objet de la présente note.....	8
4	Guide de lecture.....	9
5	Possibilités d'application des ACB et AMC fluviales au cas torrentiel.....	10
5.1	Rappel succinct sur les ACB et AMC dans le contexte fluvial	10
5.2	Aperçu du potentiel et des modalités d'adaptation pour le torrentiel	11
5.2.1	Etape 1 : Définir le problème et identifier les différentes solutions	11
5.2.2	Etape 2 : Identifier le périmètre de l'étude	18
5.2.3	Etape 3 : Caractériser l'aléa sur le territoire.....	19
5.2.4	Etape 4 : Caractériser l'occupation du territoire	25
5.2.5	Etape 5 : Caractériser les coûts et les bénéfices d'un projet	25
5.2.6	Etape 6 : Interpréter les résultats	28
5.2.7	Etape 7 : Analyser l'incertitude et la sensibilité des résultats	28
5.3	Synthèse des possibilités, verrous et modalités d'adaptation du fluvial au torrentiel	29
6	Enjeux et critères spécifiques au contexte torrentiel	31
6.1	Caractère multivarié de l'aléa torrentiel.....	31
6.2	Capacité destructrice des phénomènes.....	33
6.3	Nouveaux enjeux et dommages indirects	36
6.3.1	Vulnérabilité et dommages aux réseaux	36
6.3.2	Intérêt des méthodes et pistes de développement	38
6.3.3	Autres Dommages indirects	38
6.3.4	Ouvrages d'art.....	39
6.3.5	Ouvrages de protection	40
7	Evaluation des dommages.....	41
7.1	Nature, provenance et disponibilité des données de dommages	41
7.2	Approches opérationnelles vues à l'étranger	41
7.2.1	Dans un contexte d'aide à la décision.....	41
7.2.2	Dans un contexte de zonage.....	45
7.3	Approches scientifiques : état de l'art	48
7.3.1	Approches exprimant un ratio de pertes	48
7.3.2	Approches exprimant une probabilité d'atteinte d'un niveau de dommage	49
8	Quelques pistes de développement.....	51

8.1	Améliorer les retours d'expérience sur les évènements	51
8.2	Se référer aux travaux développés à l'étranger ou dans la littérature scientifique	52
8.2.1	Construire les courbes selon les classes d'aléas PPR	52
8.2.2	Construire les courbes directement sur les intensités d'aléas	52
8.3	Développer des approches numériques mécanistiques pour mieux caractériser les dommages structuraux	53
8.3.1	Action de flottaison du fluide	53
8.3.2	Action d'affouillement du fluide.....	54
8.3.3	Action hydrostatique, hydrodynamique et impact ponctuel.....	56
9	Conclusions et recommandations.....	57
10	Bibliographie.....	58
	Annexes	62

Auteurs et contributeurs

Rédaction de

- Philomène FAVIER, IRSTEA, ETNA
- Guillaume PITON, IRSTEA, ETNA
- Isabelle OUSSET, IRSTEA, ETNA
- Jean-Marc TACNET, IRSTEA, ETNA

Avec la contribution de

- Simon CARLADOUS, ONF - Département Risques Naturels
- Yann QUEFFÉLÉAN, ONF - Département Risques Naturels
- Pauline Bremond, IRSTEA, UMR G-EAU
- Frédéric Grelot, IRSTEA, UMR G-EAU

1 Avertissement au lecteur

Ce rapport constitue la seconde partie d'une mission qui a été confiée par le CGDD à l'IRSTEA Grenoble. Cette mission s'inscrit dans le cadre plus général des travaux développés par le groupe de travail AMC inondation et qui consistent notamment :

- à élaborer la méthodologie nationale de référence pour l'évaluation socio-économique des axes 6 et 7 des programmes d'actions de prévention des inondations
- et à développer des outils qui en facilitent la mise en œuvre par les porteurs de ces projets.

Ce rapport de phase II donne des orientations sur les travaux à conduire dans les mois à venir afin d'être en mesure de faire des recommandations pertinentes pour conduire une AMC inondation adaptée aux crues torrentielles. Ces orientations sont basées sur un état de l'art des connaissances à un instant donné. Elles sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure de l'avancement des travaux et des progrès dans la connaissance des phénomènes torrentiels.

Ce document complète le rapport de phase I qui constitue un état de l'art des connaissances sur la caractérisation physique des phénomènes torrentiels, préalable indispensable à la réalisation d'une telle évaluation socio-économique. Les principales conclusions de ce rapport de phase I ont d'ores et déjà été intégrées sous forme de recommandations dans la dernière version du guide AMC inondation publiée en mars 2018.

2 Synthèse opérationnelle

La programmation d'actions de lutte contre les risques inondations comporte aujourd'hui systématiquement une étape de justification de l'efficacité du projet, c'est-à-dire de la balance entre son efficacité à réduire les dommages économiques et le contrôle des coûts d'investissement et d'entretien. Une analyse coût-bénéfice (ACB) est mise en œuvre et alimente une analyse multicritère (AMC). L'expérience montre que les méthodes développées dans le contexte des inondations liées aux crues des rivières de plaine s'appliquent mal aux crues torrentielles. Par exemple, il a été observé que les dommages dus aux crues torrentielles sont souvent sous-estimés lorsque la quantification des dommages est faite sous l'hypothèse d'une crue de plaine.

Un rapport de phase 1 s'est attaché à :

- Clarifier les phénomènes qui relèvent des crues torrentielles ;
- Détailler les mécanismes d'endommagement des enjeux lors de la manifestation de crues torrentielles ;
- Proposer une approche d'identification de l'intensité de ces crues torrentielles ;
- Apporter quelques éléments sur la prise en compte des ouvrages de protection afin d'estimer les bénéfices liés aux projets.

Ce rapport de phase 2 constitue la seconde partie du travail. Quatre activités ont été développées :

- Identifier les éléments méthodologiques de la méthode AMC fluviale actuelle pouvant être adaptés au torrentiel et ses limites (Section 0) ;
- Définir les enjeux de montagne spécifiques tels que l'accessibilité des villages de montagne qui ne sont actuellement pas pris en compte dans l'AMC (Section 6) ;
- Fournir un état de l'art opérationnel et scientifique de l'évaluation des dommages dans le contexte des crues torrentielles (Section 1) ;
- Donner quelques pistes méthodologiques pour la production de fonctions de dommages spécifiques aux crues torrentielles (Section 8).

Chaque activité a été divisée en plusieurs sous-activités qui correspondent chacune à une sous-section du rapport (Tableau 1).

Les principales conclusions de ce rapport peuvent être synthétisées comme suit :

- Les **ouvrages de protection** contre les crues torrentielles les plus classiques dans les programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) ont été identifiés comme étant des ouvrages de protection rapprochée (e.g., entonnement, digues, protections de berges et plages de dépôt) et la façon de les prendre en compte dans les ACB a été clarifiée. La complexité des processus sources nous amène par contre à recommander de ne pas tenter d'inclure dans les ACB les ouvrages relevant de la correction torrentielle à la source et des forêts de protection. Ces types d'ouvrages sont par ailleurs rarement portés par les collectivités locales et donc intégrés aux PAPI.
- Les **méthodes de caractérisation des aléas** ont fait l'objet d'une revue fournissant les préconisations de leurs usages dans l'état actuel des connaissances. On relève toutefois que de nombreuses incertitudes persistent sur les domaines d'utilisation des outils disponibles par manque de cas pratiques de validation. A moyen terme, un travail de collecte massive de données quantitatives sur les crues torrentielles doit être fait et doit servir au calage et à la validation de modèles numériques. Ce travail permettrait de proposer des recommandations plus claires quant aux outils de modélisation à utiliser, de mieux définir l'aspect multivarié des phénomènes torrentiels, et d'aider à proposer une liste des scénarios à opter pour les ACB. Dans une perspective plus court terme, la caractérisation des aléas selon des gammes discrètes Fort/Moyen/Faible peut être réalisée.

- **L'estimation des dommages** liés aux crues torrentielles a été largement étudiée. On relève des dommages indirects liés au contexte montagnard qu'il serait nécessaire d'inclure aux AMC sous la forme de critères additionnels. Les méthodes de calcul des dommages utilisées à l'étranger dans le contexte opérationnel et scientifique ont fait l'objet d'une synthèse. Cette synthèse a permis de mettre en lumière une possible adaptation au cas français :
 - Proposer, comme cela est réalisé en Suisse, des classes d'endommagements liées aux classes d'aléas Fort/Moyen/Faible sur la base d'un travail de rétro-analyse d'évènements passés. Ce travail pourrait s'effectuer à court-moyen terme ;
 - Développer des courbes continues reliant intensité d'aléas à valeur d'endommagement en combinant l'approche à dire d'expert utilisée dans le contexte fluvial avec une description des dommages structuraux basée sur une approche mécaniste. Ce travail pourrait s'effectuer à moyen-long terme.

3 Rappel des objectifs

3.1 Contexte de la demande

Les programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) ont pour objectif de mettre en œuvre une politique globale définie à l'échelle du bassin de risque et sont subventionnés au titre du fonds Barnier. Le cahier des charges demande depuis 2011 une évaluation socio-économique des projets les plus coûteux (i.e., projet visant à la prévention des inondations dont le coût dépasse 2 millions d'euros ou tout projet dont le coût représente plus de 25% du montant global du PAPI jusqu'à la directive PAPI2, puis seulement projet visant à la prévention des inondations dont le coût dépasse 2 millions d'euros selon la directive PAPI3). Des méthodes d'analyse coûts-bénéfices (ACB) puis d'analyse multicritères (AMC) ont été mises en place pour répondre à cette demande du cahier des charges PAPI. La prévention des crues torrentielles peut faire partie d'un PAPI et ainsi être subventionnée par le fonds Barnier. Actuellement, la méthode d'analyse coûts-bénéfices proposée présente des difficultés d'application au domaine torrentiel. Plusieurs difficultés ont été a priori soulevées :

- Les analyses coûts-bénéfices reposent sur des modèles d'évaluation de l'endommagement basés sur des caractéristiques des phénomènes telles que la hauteur d'eau et la durée de submersion. Ces caractéristiques, typiques du domaine fluvial, sont peu pertinentes pour l'évaluation de la vulnérabilité face à des crues torrentielles ;
- Les analyses coûts-bénéfices reposent également sur une évaluation quantifiée de l'efficacité des ouvrages en termes d'effets sur les phénomènes. L'efficacité des ouvrages reste partiellement quantifiable ou complexe dans le cas de la protection contre les crues torrentielles ;
- Les analyses coûts-bénéfices reposent sur une évaluation quantifiée des dommages encourus en cas de crues. Les crues torrentielles sont plus destructrices que les crues de plaine, donc de nouvelles fonctions de dommages adaptées au cas torrentiel doivent être développées.

3.2 Objectifs

La mission confiée à IRSTEA consistait à restituer l'état des connaissances sur les phénomènes torrentiels et à proposer les premières recommandations pour la construction d'une méthode d'analyse multicritères (AMC) pour l'évaluation socio-économique des projets de protection contre les crues torrentielles s'inscrivant dans le cadre des PAPI. L'étude globale se décline en trois principaux objectifs :

- Donner les premières recommandations concernant la caractérisation des phénomènes torrentiels pour la réalisation d'une évaluation socio-économique des projets ;
- Identifier les éléments des méthodes existantes qui pourront être adaptés en se basant notamment sur une étude bibliographique ;
- Identifier les causes, les types et les classes d'intensité des dommages et donner les premières pistes méthodologiques pour la construction ou l'adaptation des fonctions de dommages existantes.

Sur ces bases, cette étude et les rapports associés visent à :

- Faire des recommandations pour la caractérisation du phénomène traduit en aléa (effet, intensité, fréquence) et pour la détermination des conséquences sur les enjeux exposés ;
- Faire une analyse comparative critique et synthétique des approches de type PAPI dans le contexte torrentiel et lister les verrous de manière synthétique.

3.3 Contenu et méthodologie

La mission s'est décomposée en deux phases.

3.3.1 Phase 1

Cette phase a consisté en l'établissement d'une liste des recommandations sur la caractérisation des phénomènes torrentiels nécessaires pour la réalisation d'une analyse multicritère dans l'esprit de celles préconisées dans le guide CGDD (2018). Cette phase se décline en 4 actions :

- Action 1 - Clarifier les phénomènes qui relèvent des crues torrentielles:
 - Définir les spécificités des crues torrentielles par rapport aux crues de plaine ;
 - Caractériser les problématiques de transport solide (e.g., laves torrentielles, charriage) et la probabilité de changement de lit du cours d'eau ;

- Donner des éléments pour distinguer les crues torrentielles, du ruissellement et des crues rapides notamment en termes d'effets physiques associés ;
- Expliciter l'état des connaissances disponibles et les capacités des divers outils de modélisation dans le cadre d'application à des problématiques d'hydraulique torrentielle.
- Action 2 - Donner une vue d'ensemble des mécanismes d'endommagement des enjeux lors de la manifestation de crues torrentielles : le travail consistait en l'identification des dynamiques de production des dommages réversibles et irréversibles dus aux crues torrentielles.
- Action 3 - Proposer une approche d'identification de l'intensité de ces crues torrentielles : le travail consistait en la mise en place d'une méthodologie pour l'identification de zones d'intensité faible/moyenne/forte pour les relier aux dommages potentiels pouvant en résulter (e.g., échelles quantitatives et qualitatives, cinétique).
- Action 4 - Apporter quelques éléments sur la prise en compte des ouvrages de protection afin d'estimer les bénéfices liés aux projets : le travail consistait en la définition des typologies d'ouvrages de protection, et l'identification de leurs rôles et modes d'effets.

3.3.2 Phase 2

La phase 2, objet du présent rapport, vise à proposer une méthodologie en vue d'évaluer quantitativement et/ou qualitativement les dommages. Il s'agit notamment de :

- Action 1 - Identifier les éléments méthodologiques et les limites de la méthode AMC fluviale actuelle pouvant être adaptés au torrentiel ;
- Action 2 - Définir les enjeux de montagne spécifiques tels que l'accessibilité des villages de montagne qui ne sont actuellement pas pris en compte dans l'AMC ;
- Action 3 - Fournir un état de l'art opérationnel et scientifique de l'évaluation des dommages dans le contexte des crues torrentielles;
- Action 4 - Donner des premiers éléments méthodologiques pour la production de fonctions de dommages spécifiques aux crues torrentielles.

3.4 Objet de la présente note

Cette note apporte des éléments de réponse à la phase 2 par :

- 1) Une analyse des ACB et AMC fluviales actuelles et leurs limites d'application au cas torrentiel ;
- 2) L'établissement de la liste des enjeux et critères spécifiques au torrentiel ;
- 3) Une revue bibliographique des études opérationnelles et scientifiques d'évaluation des dommages dus au torrentiel ;
- 4) Quelques développements visant à illustrer le potentiel développement de courbes de dommages sur la base de considérations mécanistes qui viseraient à compléter les approches existantes basée sur les données à dire d'experts.

Ce rapport porte notamment sur l'amélioration des courbes d'endommagement dans le cadre des risques torrentiels. Ce point est un des verrous de l'analyse des risques pour deux raisons : 1) la compréhension et la quantification des effets physiques des crues torrentielles restent insuffisantes ; 2) l'évaluation du coût des dommages est peu ou pas documentée. De plus, de nombreuses étapes restent imparfaitement connues et il est important d'identifier les imprécisions et incertitudes de chaque étape afin de propager ces imperfections et incertitudes dans les processus d'analyse et de décision.

La méthodologie proposée repose sur le déroulement des étapes suivantes :

- Une analyse des ACB et AMC fluviales actuellement en application ;
- La mise en exergue des limites opérationnelles pour leur application au cas torrentiel ;
- L'établissement d'une liste des enjeux et critères spécifiques au torrentiel ;
- Une synthèse bibliographique des applications opérationnelles vues à l'étranger et de la connaissance scientifique dans le domaine des dommages torrentiels ;
- Quelques dérivations et recommandations pour l'adaptation des ACB fluviales au torrentiel.

4 Guide de lecture

Le présent rapport présentant un certain nombre des réflexions portant sur des sujets en lien avec les analyses multicritères et les projets de protection contre les crues torrentielles, il a semblé utile de fournir un tableau pour aider le lecteur à trouver les informations qu'il cherche. Le Tableau 1 résume donc les actions et recommandations identifiées à l'issue de ce rapport.

Tableau 1 : Synthèse des activités et identification des sections correspondantes pour proposer des pistes de méthodologies d'évaluation quantitative et/ou qualitative des dommages liés aux crues torrentielles – phase 2

Activités	Sous-activités	Sous-sections
Identifier les éléments méthodologiques et les limites de la méthode AMC fluviale actuelle pouvant être adaptés au torrentiel (Chapitre 5)	Présenter d'un point de vue général les approches ACB et AMC actuelles	5.1
	Détailler en suivant le guide AMC et qualifier les possibilités et limites de l'application des AMC fluviales vers le contexte torrentiel	5.2
	Préciser les limites scientifiques et techniques d'ordre plus général	5.3
	Proposer une synthèse des possibilités et limites directes analysées	5.4
Définir les enjeux de montagne spécifiques tels que l'accessibilité des villages de montagne qui ne sont actuellement pas pris en compte dans l'AMC (Chapitre 6)	Rappeler que, contrairement aux crues de plaine, l'intensité des crues torrentielles ne se réduit pas à une hauteur d'eau mais à un caractère multivarié	6.1
	Montrer que les crues torrentielles ont une capacité destructrice	6.2
	Exposer la diversité des enjeux et dommages observés	6.3
Fournir un état de l'art opérationnel et scientifique de l'évaluation des dommages dans le contexte des crues torrentielles (Chapitre 7)	Etablir l'ensemble des données de dommages disponibles et révéler la difficulté d'accessibilité	7.1
	Mettre en avant les approches opérationnelles recensées à l'étranger	7.2
	Mettre en avant les approches scientifiques recensées dans la littérature	7.3
Donner des premiers éléments méthodologiques pour la production de fonctions de dommages spécifiques aux crues torrentielles (Chapitre 8)	Proposer des pistes pour pallier au manque de données disponibles et aller vers des méthodes de quantification des dommages empiriques	8.1
	Mettre en valeur la possibilité d'utilisation des approches opérationnelles et scientifiques pour une quantification des dommages basée sur l'expertise cumulée de ces approches	8.2
	Développer des exemples simples d'approches numériques pour montrer leur potentiel dans l'estimation des probabilités de ruine structurale.	8.3

5 Possibilités d'application des ACB et AMC fluviales au cas torrentiel

5.1 Rappel succinct sur les ACB et AMC dans le contexte fluvial

L'AMC inondation proposée dans le guide publié par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) en 2018 est définie comme une « ACB étendue ». Elle se différencie des méthodes multicritères d'aide à la décision classiques par le fait que, si plusieurs indicateurs sont évalués, ils ne donnent pas lieu à l'évaluation de critères d'abord pondérés puis agrégés suivant des méthodes d'agrégation totale, donnant un indicateur final, ou un indicateur de sur-classement. Elle se distingue également d'une « ACB classique » car elle intègre des impacts monétarisés et non monétarisés. L'AMC inondation a deux objectifs principaux :

1. Diagnostiquer et comparer des solutions ou alternatives pour la gestion du risque inondation en phase d'élaboration d'un projet à une échelle locale ;
2. Juger la pertinence du projet in fine retenu et prioriser les subventions à l'échelle nationale.

L'AMC n'est pas, par nature, un outil d'évaluation de tous les aspects d'un projet de protection contre les inondations, mais seulement des aspects socio-économiques au travers de l'analyse des dommages qu'elle permet d'éviter et des coûts globaux associés.

L'AMC inondation prend en compte les dommages – directs ou indirects – tangibles via l'ACB et les dommages – directs ou indirects – intangibles via des indicateurs non monétaires. Elle définit de ce fait des indicateurs élémentaires : 8 indicateurs élémentaires monétaires (i.e., #1 : les dommages directs aux habitations, #2 : les dommages directs aux entreprises, #3 : les dommages directs aux activités agricoles, #4 : les dommages directs aux établissements publics, #5 : les dommages indirects aux réseaux de transports routiers ; #6 : les coûts d'investissement du projet étudié, #7 : les coûts annuels différés du projet étudié, #8 : les coûts environnementaux) et 11 indicateurs non monétaires d'enjeux liés à la santé humaine, l'économie, l'environnement et le patrimoine culturel (CGDD 2018). Ces indicateurs élémentaires sont ensuite utilisés pour quantifier des indicateurs synthétiques, comme par exemple le « rapport des dommages évités moyens annuels sur les dommages moyens annuels en situation de référence ».

L'AMC inondation se décompose en 7 étapes :

1. Définir le problème et identifier les différentes solutions ;
2. Identifier le périmètre de l'étude ;
3. Caractériser les aléas nécessaires à l'étude ;
4. Caractériser l'occupation du territoire ;
5. Caractériser les coûts et les bénéfices du projet ;
6. Analyser les résultats ;
7. Analyser l'incertitude et la sensibilité des résultats.

Les premières applications de la méthode à des contextes torrentiels ont mis en évidence des difficultés d'application de cette méthode et des besoins d'adaptation¹. La section suivante s'intéresse au contexte torrentiel pour chacune de ces 7 étapes : il s'agit soit d'identifier si l'adaptation est possible et analyser comment elle peut être faite, soit d'indiquer que l'adaptation est difficile voire impossible sauf à imaginer de lourds développements.

Un code couleur dénotant le degré d'adaptabilité au domaine torrentiel est instauré pour chaque étape de l'AMC en fonction de l'adaptabilité des sous-étapes qui la composent et repris dans le tableau de synthèse du chapitre page 29 :

	Vert	<i>Adaptable directement</i> : outil existant compatible avec le contexte torrentiel ;
	Orange	<i>Assez adaptable</i> : pas de verrous techniques et scientifiques décelés, nécessité de transfert ou de développement de méthodes dont les démarches sont déjà identifiées ;
	Rouge	<i>Adaptabilité complexe</i> : nécessité de réaliser un travail de recherche sur la question ;
	Noir	<i>Inadaptable</i> dans l'état actuel des connaissances.

¹ Une autre discussion indépendante du contexte dans lequel la méthode AMC inondation s'applique (i.e. fluvial versus torrentiel) est proposée par les auteurs en annexe C, page 64. Elle s'inscrit dans une perspective d'amélioration continue des pratiques et méthodes d'évaluation que les auteurs de ce rapport encouragent.

5.2 Aperçu du potentiel et des modalités d'adaptation pour le torrentiel

5.2.1 Etape 1 : Définir le problème et identifier les différentes solutions

Adaptabilité

5.2.1.1 *Le diagnostic de vulnérabilité du territoire*

Cette sous-étape, que l'on assimilera plutôt à un diagnostic du potentiel d'« exposition » du territoire, consiste à recenser les enjeux via une représentation cartographique du territoire concerné. On ne parle pas ici d'étude de l'aléa, mais de définition du périmètre d'un problème constaté et de l'identification des différentes options pour tenter de le résoudre. Cette étape se veut qualitative et non quantitative. Suivant l'AMC inondation, les différentes cartographies doivent comporter : les enjeux de santé humaine, les enjeux économiques, les enjeux environnementaux et les enjeux patrimoniaux. Il n'est pas détecté de verrous techniques empêchant l'adaptation de cette sous-étape du domaine fluvial au torrentiel (Guide Plan de Prévention des Risques (PPR) cours d'eaux torrentiels, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire - MTES, *en préparation*). Un enjeu est considéré comme exposé s'il est soumis à un niveau d'intensité non nul pour au moins un des scénarios analysés et un effet du phénomène sur la zone géographique où il est situé.

5.2.1.2 *Les différentes options de protection contre les crues torrentielles*

Il n'est ici abordé que les protections qui correspondent aux axes du PAPI qui nécessitent une évaluation socio-économiques pour leur implémentations, i.e., l'« Axe 6 : La gestion des écoulements (ex. rétention des eaux à l'amont) » et l'« Axe 7 : La gestion des ouvrages de protection hydrauliques (ex. travaux relatifs aux systèmes d'endiguement) ». Par exemple, il n'est pas traité des mesures dites « individuelles » qui sont intégrées au bâti pour réduire sa vulnérabilité (e.g., création de zone refuge, évacuations équipées de clapets, protection rapprochée ou déportée des fondations contre l'affouillement, renforts de pieds de murs aux angles du bâti, liaisons ou chaînages des parties structurantes, reprises en sous-œuvre ou ajouts à l'existant, protection des réseaux enterrés, protection des ouvertures par parois défectives ou huisseries particulières).

A *Les mesures de protection*

La première mesure de protection qui devrait venir à l'esprit est la **délocalisation**. Cette stratégie n'est pas limitée aux risques torrentiels. Certains sites menacés par des crues cévenoles (temps de montée trop rapide pour envisager une évacuation, exemple des crues des Alpes Maritimes en octobre 2015) mènent à bien des stratégies de délocalisation. C'est surtout sur le littoral où les réflexions et le nombre d'enjeux concernés est plus important que cette option est encouragée. La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte 2012–2015, est par exemple sous-titrée « vers la relocalisation des activités et des biens » à travers des solutions dites de recul stratégique (MEDTL 2012), terme modifié en « recomposition spatiale » dans la version 2017-2019 de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (MEEM 2017). Cette option de protection dépassant le cadre du contexte torrentiel, elle ne fait pas l'objet de développement dans le cadre du présent rapport. Nous soulignons simplement qu'elle doit être systématiquement envisagée.

En complément ou alternative des stratégies de délocalisations, d'autres moyens sont mis en œuvre. La protection contre les crues torrentielles s'appuie sur une diversité de mesures à plusieurs échelles. Le système de protection des enjeux exposés est composé d'un ou plusieurs dispositifs de protection localisés en différents points du bassin versant avec une fonction propre. Chaque dispositif peut être composé d'un ou plusieurs ouvrages. À titre d'exemple, le système de protection peut être composé de plusieurs dispositifs de correction torrentielle, d'une plage de dépôt et d'un chenal sur le cône de déjection. Le dispositif de correction torrentielle est lui composé d'une série de barrages dits « RTM » pouvant avoir une ou plusieurs fonctions (e.g., consolidation, stabilisation, régulation).

Carladous (2013 p. 115) présente une liste des ouvrages et dispositifs de protection, dite « collective », et de leurs fonctions avec l'objectif d'analyser leur efficacité. Cette liste a été enrichie des effets escomptés sur les crues, des capacités des ouvrages et des facteurs d'influence de leurs capacités par Carladous et al. (2016). Ce travail a été repris dans le rapport de phase 1. Il est mis à jour dans le Tableau 2 avec la terminologie pour les ouvrages filtrants unifiée à l'occasion de l'inventaire national des plages de dépôt synthétisé par Brachet (2018).

Il était rappelé dans le rapport de phase 1 et ici dans le Tableau 2 que la fonction des digues (au sens large et non réglementaire) et protections de berge est unique. Cependant, plusieurs fonctions potentielles sont possibles pour d'autres ouvrages, e.g. barrages de correction torrentielle, plages de dépôts. L'analyse détaillée de plans de prévention des risques récents incluant une problématique torrentielle montre que les chargés d'études prennent régulièrement en compte les modifications apportées par des ouvrages de protection sur les aléas (Philippe et al. 2015) mais les hypothèses et les raisonnements mis en place restent peu traçables. Les propositions d'aménagements de protection contre les crues torrentielles devraient ainsi systématiquement comprendre une cartographie précise des dispositifs, une description détaillée et justifiée de leurs fonctions, capacités et effets distants et des méthodes et hypothèses utilisées pour les définir (Philippe et al. 2015).

B L'évaluation de l'efficacité des ouvrages

Les AMC réalisées dans le cadre des PAPI devront intégrer ces descriptions. La prise en compte dans les plans de prévention du risque inondation (PPRI) récent est variable selon le type d'ouvrage :

- La prise en compte de l'effet des dispositifs est directe et classique pour les digues, les dispositifs dits de « chenalisation » et les protections de berges, qui doivent souvent être associés à des ouvrages complémentaires parafouille (e.g. bêche, poutre, recharge ou sabot) ou de maintien du profil en long (seuils, épis, radiers, pavage). Leur effet réside principalement dans la réduction des divagations des cours d'eau torrentiels (e.g. modification des cheminements d'écoulements, réduction de l'emprise de la bande active), voire la limitation des risques de débordements lorsqu'il y a une digue. Les spécificités de ces dispositifs dans le contexte torrentiel sont rappelées dans Tacnet and Degoutte (2013a) et dans Quefféléan et al. (2019).
- Quelques exemples existants et les travaux récents sur les plages de dépôt devraient faciliter leur prise en compte dans la cartographie des aléas dans un futur proche (Piton and Recking 2016a, 2016b, Brachet 2018, Piton et al. 2018a).

On retrouve dans les deux points précédents l'ensemble des ouvrages de protection structurale pour lesquels il est actuellement possible de caractériser des changements de l'intensité de l'aléa. Il s'agit des protections situées à proximité des enjeux. Leur rôle est de diminuer la probabilité de dépassement d'un certain niveau d'intensité en un point spatial, pour un scénario de magnitude donnée. Les dispositifs de protection dans la zone de départ, aussi appelé protection active, visant à réduire les phénomènes érosifs à la source sont donc exclus. Ces mesures structurales de protection collective ont pour rôle d'agir sur la probabilité de dépasser un certain niveau de magnitude, par exemple, la fréquence d'apparition d'une lave torrentielle d'un certain volume est diminuée par des barrages de correction torrentielle (S. Carladous, *pers. com.*). La prise en compte de l'effet distant des dispositifs de protection en zone de départ sur les enjeux, situés en général dans la partie basse des cônes de déjection, est beaucoup plus complexe (Carladous 2017). Les effets distants dus aux forêts de protections, aux opérations de stabilisation et consolidation de versants, de drainage et aux barrages de correction torrentielle, même s'ils sont indéniables, restent en effet généralement très compliqués à quantifier de manière précise en l'état des connaissances actuelles.

L'évaluation de l'efficacité des dispositifs de protection torrentielle des torrents repose encore en partie sur des analyses à dire d'experts. Des approches permettant de tracer ces raisonnements et de propager les incertitudes liées ont récemment été développées (Tacnet et al. 2014, Carladous 2017, Carladous et al. 2019). Ces difficultés à quantifier les effets distants des protections en zone de départ ne doivent évidemment pas conduire à conclure à leur inefficacité : on admet simplement notre actuelle grande incertitude à les caractériser finement à travers des études d'ingénierie classique.

Des travaux scientifiques explorant les effets et performances des protections en zone de départ existent mais restent souvent très spécifiques à des contextes d'études sans possibilité d'en généraliser les résultats d'un point de vue quantitatif. Piton et al. (2019b) rappelle par exemple l'état d'avancement des travaux sur les fonctions des barrages de correction torrentielle :

- La capacité de rétention des sédiments est pilotée par la production sédimentaire totale du bassin versant sur une durée généralement longue (i.e. années à dizaines d'années), des travaux

s'intéressent à ces questions depuis longtemps (Peteuil 2010, Peteuil et al. 2012, Piton and Recking 2017).

- L'effet de régulation du transport solide lié aux dispositifs de correction torrentielle est reconnu depuis longtemps (Gras 1857, Nishimoto 2014). Il est cependant compliqué à appréhender du fait des connaissances limitées des dynamiques sédimentaires sur de faibles échelles temporelles. Les travaux quantifiant cet effet se reposent sur des suivis topographiques de long terme (Astrade et al. 2011, Theule et al. 2012, 2015) et des outils de modélisation de flux sédimentaire avancés (Remaître et al. 2008, Mertin 2018).
- Quantifier finement la capacité de stabilisation du lit est vraisemblablement encore hors de portée. On ne peut que constater à travers les approches historiques et géomorphologiques que l'activité torrentielle a diminué depuis le début des opérations de restauration des terrains de montagne. La stabilisation des lits torrentiels est fortement conditionnée par la topographie du lit des torrents, ainsi que par l'érosion potentielle événementielle (Hungar et al. 1984, Theule et al. 2012, 2015) et les tendances générales à l'incision des lits dans les tronçons corrigés des torrents (Hungar 2005, Takahashi 2007).
- L'effet de consolidation des versants au droit de grands glissements de terrains peut parfois être évalué à travers des analyses géomécaniques avancées couplées à une construction de scénarios torrentiels. Nous ne connaissons pas d'exemple publié mais des études d'ingénierie utilisent cette démarche.
- La littérature portant sur l'effet de réduction de la pente du lit des torrents est ancienne et abondante (Kostadinov 1993, Porto and Gessler 1999, Ferro and Porto 2011, Kostadinov and Dragovic 2013). L'étape suivante qui consiste à estimer le changement dans la capacité du torrent à transporter de gros blocs reste en revanche peu étudiée.

En termes de perspectives d'amélioration, il pourrait être envisagé de caractériser l'efficacité liée aux fonctions de rétention et de régulation sur la base de jeux de données pertinents et de retours d'expérience. Les autres fonctions relèvent encore du domaine de la recherche scientifique.

C Suggestion de prise en compte des ouvrages dans les AMC/ACB type PAPI.

Pour chaque type de dispositif, le Tableau 2 rappelle ses fonctions et capacité locale puis définit s'il peut être pris en compte dans les ACB et AMC dans le domaine des crues torrentielles. Cette analyse se base sur l'état des connaissances actuelles et sur notre capacité à appréhender les effets distants ou non des dispositifs. Les fonctions pour lesquelles la maturité des modèles et/ou le nombre de cas de validation sont trop faibles ont été exclues des suggestions d'insertion dans les ACB et AMC de ce Tableau 2.

Il faut noter que les difficultés à caractériser l'efficacité des ouvrages de protection en zone de départ dans le cadre des AMC PAPI ne concerneront probablement pas un grand nombre de projets de PAPI. À de très rares exceptions près, les opérations de ce type ont historiquement été portées par l'Etat. Les projets de protection contre les crues torrentielles portés par les collectivités locales concernent en majorité des dispositifs de protection rapprochée.

Dans ce contexte, les plages de dépôts occupent une place intermédiaire. Elles sont souvent situées à la limite entre les terrains domaniaux gérés par l'Etat et les zones où les collectivités interviennent. L'inventaire des 310 plages de dépôts réalisé en 2018 montre toutefois que seulement 23% sont gérés par l'ONF/RTM pour le compte de l'Etat propriétaire, 77% étant gérés par les collectivités et, à la marge, par quelques acteurs privés gestionnaires d'infrastructure. Dans tous les cas, en application de l'instruction Ministérielle de 1969 (MA 1969), les investissements portant sur de nouvelles plages de dépôts ne seront pas portés par l'Etat mais principalement par les collectivités, voire à la marge par des acteurs privés.

Nous proposons de ne pas intégrer aux ACB et AMC les mesures non structurelles de protection, de re-végétalisation et de reforestation qui peuvent s'appuyer sur des opérations de petite correction de versant. Comme pour les mesures structurelles de protection en zone de départ, les connaissances sont trop limitées pour permettre l'évaluation de leur effet distant.

Afin de donner un exemple de prise en compte dans une cartographie des aléas des modifications apportées par la présence des ouvrages, un encadré est fourni à la suite du tableau sur un cas pratique.

Tableau 2 : Ouvrages de protection contre les crues torrentielles : effets, fonction, capacité et capacité à caractériser le lien direct avec une modification de l'aléa en l'état actuel des connaissances

Ouvrage et désignation variante de l'ouvrage	Effets escomptés sur les crues	Fonction	Capacité : mesure (physique) de l'effet local	Prise en compte dans la cartographie des aléas	
				Mode d'estimation de l'effet sur le processus de crue	Possibilité de caractériser le lien direct entre ouvrage et modification de l'aléa
Radier de mise en vitesses, carénage,...	Amélioration des conditions d'entonnement dans un ouvrage couvert	Faciliter l'écoulement et prévenir les obstructions	Accélération et stabilisation locale de l'écoulement	Diminution des probabilités de dysfonctionnement	Oui
Digue, berge, ouvrage de déviation, dérivation	Diminution de la probabilité de débordement	Maintenir l'écoulement dans un cheminement donné, sans débordement	Niveau maximal d'écoulement (solide + liquide)	Par modification de la répartition des flux liquides et solides entre lit mineur et lit majeur	Oui
Protection de berges, ouvrage de chenalisation	Diminution des érosions latérales	Éviter les divagations hors d'une zone donnée	Longueur et profondeur de zone protégée	Par suppression d'une zone de divagation probable	Oui
Plage de dépôts, piège à blocs, piège à flottants, filet pare-lave et pare-flottants, piège à graviers, zone de dépôt régulièrement curée, zones de régulation du transport solide	Piégeage de la charge solide grossière : graviers, blocs et parfois flottants	Piéger des matériaux solide jusqu'au curage	Volume piégé par l'ouvrage	Par réduction du volume d'apport solide de l'évènement à l'aval de l'ouvrage	Oui
	Piégeage des gros blocs transportés dans les fronts granulaires et déstructuration de la bouffée de lave torrentielle	Piéger les blocs dépassant une taille critique, briser les fronts de lave torrentielle	Dimension des gros blocs piégés	Par diminution des probabilités d'obstruction* d'ouvrages critiques en aval (ponts, section étroite)	Oui
	Piégeage des flottants grossiers	Piéger les gros flottants	Diminution en nombre et en taille des gros flottants transportés	Idem	Oui
	Diminution de l'intensité du pic de débit solide	Réguler le transport solide	Diminution des débits solides instantanés	Par modélisation avancée** de l'effet tampon lié à l'ouvrage	Possible mais compliqué

*Les probabilités d'obstruction sont définies au sein des différents scénarios envisagés : pour chacun des scénarios envisagés en termes de probabilité annuelle de dépassement d'une magnitude d'événements (voir guide CGDD (2018 p. 34), les probabilités d'obstruction sont celles correspondant aux dysfonctionnements potentiels des ouvrages hydrauliques : obstruction de ponts par les flottants, etc. (Piton et al. 2018b). Le Guide PPR « cours d'eau torrentiels » intègre cette notion à travers l'utilisation, pour chaque « classe d'aléas donnée » (fort/moyen/faible), d'une « probabilité d'atteinte des enjeux » qui dépend de ces dysfonctionnements (5 classes de forte à nulle). Les méthodes pertinentes de transformation de ces notions qualitatives en probabilités conditionnelles doivent encore faire l'objet de réflexions avant une utilisation systématique, même si des pistes prometteuses ont été explorées par Mazzorana and Fuchs (2010) et Mazzorana et al. (2011, 2012).

**Par « modélisation avancée », on entend modélisation numérique et/ou physique faisant appel à une procédure rigoureuse de calibration/validation et une approche par scénarios intégrant les probabilités de manifestation de processus divers, d'obstruction de ponts, d'avulsions et de défaillances des ouvrages hydrauliques, etc.

Suite Tableau 2 : Ouvrages de protection contre les crues torrentielles : effets, fonction, capacité et capacité à caractériser le lien direct avec une modification de l'aléa en l'état actuel des connaissances

Ouvrage et désignation variante de l'ouvrage	Effets escomptés sur les crues	Fonction	Capacité : mesure (physique) de l'effet local	Prise en compte dans la cartographie des aléas	
				Mode d'estimation de l'effet sur le processus de crue	Possibilité de caractériser le lien direct entre ouvrage et modification de l'aléa
Barrages et seuils de correction torrentielle	Piégeage durable des sédiments jusqu'à remplissage	<i>Rétention</i> : Piéger définitivement les sédiments	Volume total piégé par l'ouvrage	Par prise en compte de la réduction des apports en aval sur le temps long*	Non**
	Diminution des intensités de transport solide	<i>Régulation</i> : Réguler le transport solide	Volume tamponné par l'ouvrage	Possible par modélisation avancée*** hydro-sédimentaire sur le temps long*	Non
	Diminution de la production de sédiment sur le long terme, facilitation de la reprise de la végétation	<i>Stabilisation</i> : Stabiliser le lit du torrent	Volume de sédiment potentiellement érodé par incision et érosion de berge	Idem + potentiel d'incision sur le long terme	Non
	Prévention de la fourniture d'un volume sédimentaire localisé trop massif	<i>Consolidation</i> : Consolider les versants instables	Volume d'instabilité maintenu dans le versant	Idem + couplage avec modélisation géomécanique avancée**	Non
	Diminution des capacités de transport de gros blocs	<i>Réduction des pentes</i> : Diminuer les pentes du torrent	Diminution de capacité de transport des blocs	Vraisemblablement trop complexe	Non
Forêts de protection, petite correction de versants et drainage	Réduction des apports liquides et solides	Limiter les ruissellements et le transport de matériaux solides : sédiments et flottants	Multivarié (voir Carladous et al. 2016 pour plus de détails)	Trop complexe	Non

*Par "temps long", on entend en utilisant/modélisant des chroniques temporelles complètes d'apports hydro-sédimentaires permettant d'estimer le transfert et les stockages liés aux crues fréquentes jusqu'à rares.

**Les barrages de rétention sédimentaires ont été beaucoup utilisés jusqu'à l'avènement des plages de dépôt ; ce n'est désormais plus le cas. Si un nouvel ouvrage de rétention sédimentaire venait à être proposé dans le cadre d'un PAPI, il pourrait éventuellement être pris en compte de la même manière qu'une plage de dépôt de rétention mais sans comptabiliser les coûts de curage. Sa durée de vie doit par contre être étudiée en détail. La non prise en compte de ces ouvrages dans les ACB tel que proposé dans le tableau concerne donc principalement les vieux ouvrages existants, remplis en totalité et à l'effet actuel généralement marginal, très subtil à estimer et que l'on propose donc de négliger.

*** Par « modélisation avancée », on entend modélisation numérique et/ou physique faisant appel à une procédure rigoureuse de calibration/validation et une approche par scénarios intégrant les probabilités de manifestations de processus divers, d'obstruction de ponts, d'avulsions et de défaillances des ouvrages hydrauliques, etc.

D Exemple de prise en compte d'ouvrages de protection sur un cas pratique virtuel

Cette partie vise à illustrer les concepts développés dans le Tableau 2. L'objectif est ici de donner un exemple des types de considérations que le chargé d'étude devrait être amené à fournir dans la justification des modifications apportées à la carte des aléas dans l'état projet. Un site réel sert d'exemple d'application. Le projet d'aménagement est virtuel mais réaliste. Il n'a pas été réellement étudié par modélisation mais le travail imaginé est réaliste. Les aléas sont multivariés (érosion, engrèvement et submersion) mais nous n'avons pas décliné plusieurs classes d'intensité pour rester concis et par manque d'éléments disponibles. N'ayant pas réalisé réellement les modélisations et analyses d'intensité, nous ne sommes pas en mesure de détailler plus les modifications apportées aux intensités d'aléas.

La Figure 1 présente deux cartes des aléas, la première dans l'état de référence pour un scénario d'évènement donné ; la seconde avec prise en compte des aménagements. Les justifications des modifications sont fournies à la suite.

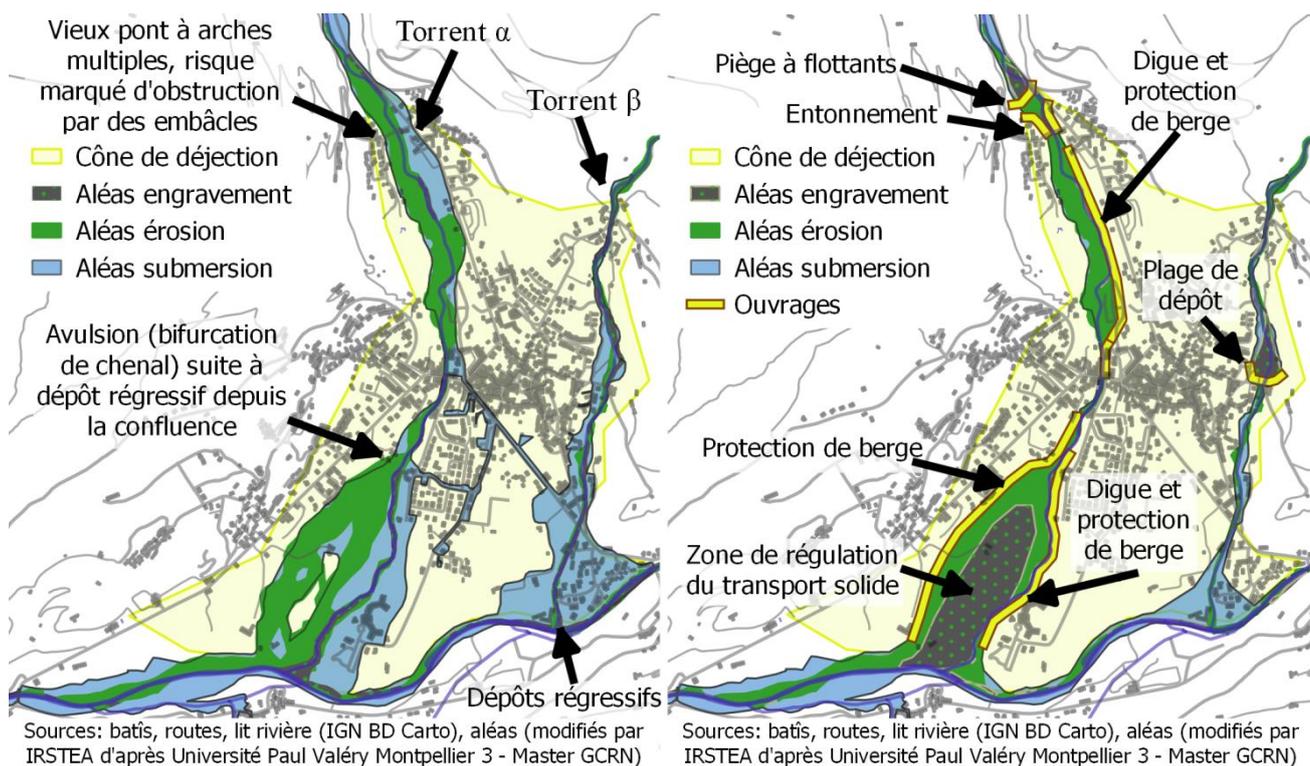


Figure 1 : Carte des aléas sur un site d'étude virtuel : (a) dans un état initial sans aménagement et (b) avec prise en compte des aménagements de protection contre les crues torrentielles et délocalisations

Aléas dans l'état initial

Le site correspond à un grand cône de déjection alimenté par deux torrents alimentant une rivière torrentielle (située sur le bas de la carte). Le premier torrent, nommé α , situé sur la gauche des cartes, a un bassin versant plus grand que le second, nommé β . Les analyses des aléas, basées principalement sur des traces morphologiques et des archives historiques, complétées d'approches hydrauliques par modélisations numérique 1D hydro-sédimentaire, ont permis de dresser la description suivante du fonctionnement du site :

- Le vieux pont à arches situés sur le torrent α dans la partie sommitale du cône de déjection est très sensible aux embâcles et présente de mauvaises conditions d'entonnements générant des pertes de charges et une tendance à la divagation en amont.
- En aval, le torrent peu profond a tendance à divaguer sur son cône de déjection et peut être amené à déborder ponctuellement sur les routes transférant des écoulements vers le torrent β .
- La traversée urbaine est correctement canalisée en aval de cette zone de divagation.
- La zone terminale du lit des deux torrents est assez étroite et les confluences avec la rivière torrentielle manquent de place pour absorber les volumes solides totaux potentiellement transportés pendant des épisodes cycloniques longs. Il s'en suit la formation de bancs de graviers aux confluences qui font rapidement obstacles à l'écoulement et au transport solide des torrents. Des dépôts régressifs sont alors générés remontant assez loin en amont dans le lit des torrents. Les écoulements débordent alors largement sur le cône de déjection.

- Sur le torrent α , ces écoulements peuvent être amenés à se concentrer dans des chenaux fossiles présents sur la rive droite. Une avulsion (bifurcation totale de l'écoulement) et des érosions marquées sur la zone des anciens chenaux sont vraisemblables.

Effets des ouvrages (*Mode d'estimation de l'aléa identifié en italique*)

Sur le torrent α , le dispositif de protection contre les risques torrentiels se compose de :

- Un piège à embâcle associé à un radier de mise en vitesse au niveau de l'entonnement du pont à arches multiples. Ces aménagements *diminuent la probabilité d'obstruction partielle du pont par les flottants* et permettent d'améliorer les conditions d'entonnement *en réduisant les pertes de charges et niveaux d'écoulements en amont du pont*. L'extension latérale de la carte des aléas submersion est ainsi réduite, l'écoulement étant mieux confiné. Un aléa d'engravement a par contre été ajouté dans le piège à flottants où des dépôts sédimentaires sont probables.
- En amont et en aval de la traversée urbaine, *l'extension latérale des zones de divagations a été réduite par la mise en place de protections de berges*. Ces dernières sont équipées de protections parafouille adaptées.
- *Les points bas dans le profil en long des berges ont été supprimés par la mise en place de digues*. Le risque d'avulsion est ainsi écarté pour cet événement en amont et en aval de la traversée urbaine.
- Une large zone de régulation du transport solide, assimilable à une plage de dépôt sans ouvrage de fermeture, a été mise en place dans la partie terminale du cône de déjection *afin de prévenir les dépôts régressifs*. *La capacité d'absorption de cette zone permettra de tamponner les apports solides du torrent et de prévenir la remontée du fond du torrent et l'augmentation des niveaux d'écoulements induit sur les digues en amont*. A noter que deux enjeux situés dans cette zone de régulation sont à délocaliser.

Sur le torrent β , une simple plage de dépôt à la fonction de *réretention (sédimentaire et flottants)* permet de *supprimer le risque d'obstruction des ponts mais surtout prévient l'aléa d'engravement en aval*. *Une importante zone de dépôt est créée en conséquence en amont*. *Un transport solide partiel à travers l'ouvrage est toutefois possible et la capacité du chenal dans sa partie terminale reste insuffisante pour contenir l'ensemble des écoulements*. *Des débordements et écoulements d'eau claire sont donc probables dans la zone proche de la confluence*.

5.2.2 Etape 2 : Identifier le périmètre de l'étude

5.2.2.1 *Le scénario de référence*

Selon la définition donnée dans le guide AMC inondation, le scénario de référence correspond au scénario d'évolution du territoire sans nouveau projet (CGDD 2018 p. 41). Les évolutions qui semblent irrémédiables doivent nécessairement être intégrées dans la projection, comme par exemples les difficultés prévisibles de maintien du niveau de protection assuré par certains ouvrages existants pour des raisons de conditions de maintenance ou autre accroissement prévisible de certains coûts. Sur le fond, il n'est pas détecté de verrous techniques empêchant l'adaptation de cette sous-étape du domaine fluvial au torrentiel – hormis la question des incertitudes qui est traitée à la sous-section 5.2.7. Il faut néanmoins signaler que l'analyse des conditions et modalités de maintenance des ouvrages de protection contre les risques torrentiels ne fait pas l'objet de méthodologies clairement établies en comparaison avec tout le corpus technique développé pour la maintenance des digues : diagnostic et études de danger, visites régulières, visites techniques approfondies, fréquence de visites. Ceci constitue un axe de développement important d'un point de vue scientifique, technique et opérationnel et des réflexions sont actuellement menées par les services RTM sur ce point.

5.2.2.2 *La portée de l'analyse ou le problème de statut*

La question posée concerne la limite, l'échelle territoriale à laquelle les gains et pertes doivent être pris en compte. Lors d'une ACB, l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) rappelle que « la règle de base veut qu'il soit tenu compte des bénéfices et des coûts enregistrés par tous les ressortissants du pays concerné ». L'analyse doit donc avoir, à minima, une portée nationale. Ce cadre définissant la portée de l'analyse n'est pas détecté comme un verrou technique empêchant l'adaptation de cette sous-étape du domaine fluvial au torrentiel. La plupart des bassins versants étudiés en torrentiel sont de plus petite taille et sont rarement transfrontaliers ; les reliefs et lignes de crête constituant souvent des frontières. Quelques bassins versants Pyrénéens, tel que celui de la Garonne ou Alpains, tels que celui de la Roya, font exception.

5.2.2.3 *L'échelle d'analyse – le périmètre géographique*

Dans le cas des dommages directs, il est préconisé par l'AMC inondation de définir l'aire d'étude comme étant l'aire concernée par l'emprise maximale de l'aléa pour les différentes inondations considérées. La description de l'intensité de l'aléa d'une crue torrentielle est par nature multivariée. Il faudra donc prendre en compte l'emprise de l'aléa selon son caractère multivarié : elle devra comprendre à la fois les zones soumises à des processus morphogènes d'érosions et de dépôts et les zones plus lointaines soumises à de simples submersions.

Une problématique complémentaire est celle des effets distants liés à la cascade sédimentaire. Des ouvrages ayant un effet sur le transport solide d'un bassin versant peuvent entraîner des conséquences en cascade sur le système fluvial aval. Par exemple, jusqu'à très récemment, les plages de dépôt, qui visent à retenir les matériaux solides lors d'un scénario de fréquence plutôt rare (e.g. centennale), piégeaient aussi les petites crues qui ne menacent pas les enjeux. Il a alors été souvent observé un effet négatif de rétention des matériaux sur les crues de fréquence plus courante, qui a parfois entraîné une incision à l'aval (Brochot et al. 2003, Carlados et al. 2016), éventuellement étendue au-delà du torrent dans la rivière principale. Des dommages distants pourraient ainsi émerger en situation avec projet alors qu'ils étaient absents en situation de référence. Des recommandations existent désormais pour concevoir des ouvrages limitant ces problèmes (Piton et al. 2019a) et doivent être pris en compte pour limiter l'échelle spatiale d'analyse.

En synthèse, le périmètre géographique de l'analyse AMC PAPI torrentielle devra intégrer l'ensemble de la zone où l'influence hydraulique et géomorphologique des aménagements est non négligeable. Les aménagements de plages de dépôts feront l'objet d'une attention particulière sur ce point.

Dans le cas des dommages indirects, un expert AMC doit être consulté pour délimiter l'aire d'étude. La définition du périmètre géographique pour l'analyse des dommages indirects reste difficile, tant en fluvial qu'en torrentiel. La spécificité torrentielle s'exprime ici au travers des types de dommages causés aux infrastructures critiques, réseaux notamment (Carlados et al. 2016, Tacnet et al. 2017).

5.2.2.4 L'horizon temporel de l'étude

Dans l'AMC fluviale, l'horizon temporel correspond à la durée sur laquelle sont considérés les flux de coûts et de bénéfices associés au projet. Il est préconisé de considérer une analyse sur un horizon temporel de 50 ans. Il n'est pas détecté de verrous techniques empêchant l'adaptation de cette sous-étape du domaine fluvial au torrentiel.

5.2.3 Etape 3 : Caractériser l'aléa sur le territoire



Il s'agit dans cette étape de cartographier le niveau d'intensité pour chaque scénario d'aléa (couple magnitude – probabilité annuelle de dépassement).

Pour chaque scénario d'aléa, plusieurs sous-scénarios peuvent être définis pour prendre en compte des défaillances ou variations locales telles que l'obstruction d'un pont ou la ruine d'une digue. La difficulté s'accroît avec la période de retour, e.g. périodes de retour supérieures à 100 ans, où l'incertitude est grande. Du fait de l'incertitude inhérente à la caractérisation des scénarios d'aléa, il est souligné l'importance d'une étude de sensibilité sur les entrées des modèles. De même, le choix des scénarios d'aléa devra garder une cohérence avec les scénarios d'aléa proposés dans les guides PPR. En effet, on désigne à la fois le nombre de "temps de retour" traité et le nombre de scénario de crues à temps de retour donné mais aux caractéristiques différentes (plus ou moins chargée sédiments) ou générant des dysfonctionnements différents (obstruction ou non d'un pont, etc.). Cette variabilité de l'extension spatiale des aléas à période de retour donnée est rappelée dans le Guide PPR torrent (MTES, à paraître) mais il n'est pas encore proposé de cadre d'analyse standard de cette variabilité. Ces dernières remarques représentent les verrous techniques entravant l'adaptation de cette sous-étape du domaine fluvial au torrentiel

Vis-à-vis de la méthode pour caractériser l'aléa, l'Annexe 5 du guide AMC inondation reportée dans le Tableau 3 suivant, différentes méthodes (i.e., méthodes naturalistes, historiques, par formule de simple débit, par modélisation numérique) peuvent mener à la cartographie de l'aléa inondation de plaine en fonction des paramètres physiques à cartographier pour déterminer les indicateurs de dommages (i.e., l'emprise de la zone inondable, la hauteur d'eau, la durée de submersion, la vitesse d'écoulement, le temps de montée des eaux, et le temps d'arrivée de l'onde).

Tableau 3 : Méthodes de caractérisation de l'aléa inondation fluvial et paramètres de sorties (cf. Annexe 5 du guide AMC inondation, CGDD 2018)

		Emprises de la zone inondable	Période de retour	Hauteur d'eau	Durée de submersion	Vitesse de l'écoulement	Temps de montée des eaux	Temps d'arrivée de l'onde
Approches naturalistes		√						
Méthode historique		(√)	(√)	(√)				
Formule simple de débit		√	√	√				
Modélisation hydraulique	Modèle 1D	√	√	√	(√*)	√	√*	√*
	Modèle 1D casiers	√	√	√	(√*)	√	√*	√*
	Modèle 2D	√	√	√	(√*)	√	√*	√*

√ méthode adaptée pour fournir le paramètre en sortie de modèle

√* méthode adaptée pour fournir le paramètre si le modèle est utilisée en régime transitoire

(√) méthode permettant dans certains cas de fournir le paramètre

Le Tableau 4, assez semblable ; est proposé ci-dessous pour les applications au domaine torrentiel. Il présente les méthodes utiles pour cartographier l'aléa torrentiel en termes de paramètres à prendre en compte pour évaluer les indicateurs de dommages. Un certain nombre d'indicateurs ont été supprimés par rapport au Tableau 3 car soit peu adaptés à la problématique torrentielle (e.g., durée de submersion), soit considérés comme non discriminants dans la génération des dommages en plus d'être généralement trop incertains et

dépendants des évènements pour être caractérisés assez précisément (e.g., temps de montée des eaux, temps d'arrivée de l'onde).

Par ailleurs, le Tableau 4, adaptation du Tableau 3 au domaine torrentiel, ne précise pas si l'utilisation des modèles se fait en calcul transitoire ou en calcul permanent, la caractérisation de l'aléa sur un site complexe faisant souvent appel à l'utilisation croisée de modèles différents (cf. Quefféléan et al. 2019) :

- Toute étude doit, de base, en contexte torrentiel, comporter une analyse historique et géomorphologique. L'utilisation croisée de données historiques, d'hypothèses géomorphologiques et de modèle en calcul en permanent permet de caractériser la capacité d'un chenal en considérant une géométrie fixe incluant ou non des dépôts, et d'aider à identifier des points préférentiels de débordements. Les résultats de calculs étant très fortement liés aux hypothèses de dépôts, leur interprétation demande une solide expertise.
- Les utilisations avancées intégrant du transport solide sont par contre réalisées en transitoire : elles tentent de représenter l'évolution des dépôts et des érosions à l'échelle de l'évènement. Le Tableau 4 montre toutefois qu'il existe une incertitude sur l'utilisation de ces modèles dans certains contextes. Aussi, ces modèles de calcul en transitoire sont à utiliser avec précaution.
- De manière générale, le chargé d'étude devra toujours justifier ses hypothèses et ses choix.

La pertinence et la nécessité de faire appel à des outils de modélisation avancée de l'aléa torrentiel dépendent de deux aspects géomorphologiques: le confinement du cours d'eau et l'hypothèse de forme du lit majeur (concave ou convexe). Au final, trois contextes sont distingués et illustrés en Figure 2 :

- Dans le cas d'un chenal d'écoulement du **torrent**, la bande active est généralement confinée, le torrent est contraint latéralement par les versants. Lors d'évènements morphogènes (mais pas forcément extrêmes) et en l'absence d'ouvrages de protection, sa bande active peut donc potentiellement occuper tout le fond de vallée. Les crues morphogènes, qui changent la forme du lit latéralement et longitudinalement, s'expriment aussi bien dans la dimension verticale en altimétrie (par érosion, affouillement, dépavage, aggradation - dépôt de plusieurs mètres) que dans la dimension horizontale en planimétrie (par érosions latérales). Des crues extrêmes peuvent ainsi modifier la morphologie de certains tronçons, souvent suite à des effondrements massifs ou des glissements de versants.
- Sur un **cône de déjection**, le confinement latéral disparaît et la forme générale de la topographie est convexe ou mal définie. Un écoulement débordant du lit ne retourne pas nécessairement vers le lit mineur et peut créer un nouveau chenal, phénomène appelé « avulsion ». Il existe une incertitude forte sur les cheminements empruntés en fonction par exemple, des points de débordement, des obstacles à l'écoulement (e.g. flottants, infrastructures), des obstructions de ponts. Toute la bande active potentielle n'est toutefois pas empruntée à chaque crue. Tous les enjeux implantés sur le cône sont potentiellement menacés quelle que soit leur localisation, mais pas avec la même probabilité d'atteinte.
- En bordure de **rivière torrentielle**, la topographie est globalement concave du fait de l'action passée des glaciers. A l'exception de quelques crues extrêmes, la bande active n'occupe pas l'ensemble du fond de vallée. Les dimensions de la vallée sont assez grandes pour que la remobilisation de volumes solides transportés et l'aspect morphogène des crues se manifestent plus dans la dimension horizontale par des divagations latérales du chenal que dans la dimension verticale par des incisions/aggradations pluri-métriques généralisées. De très rares cas présentent un dépôt marqué en amont immédiat de zone de contraction du lit et/ou de la vallée, comme ça a été le cas du Guil à Château Queyras avec un dépôt de plusieurs mètres en 1957. En dehors des zones de verrous ou de gorges rocheux, le lit mineur n'est généralement pas confiné par les versants sur ses deux rives mais coule entre, ou le long, des terrasses alluviales. Les dommages structuraux sont en conséquence principalement liés aux érosions de berges touchant ces terrasses alluviales qui résultent en l'affouillement des enjeux qui y sont situés.

Il est entendu que ces contextes ne sont pas des catégories absolues et qu'ils cherchent simplement à relier trois situations géomorphologiques types à leur contexte le plus classique. On remarquera toutefois que des rivières torrentielles passant dans des gorges correspondent plutôt au contexte torrentiel. De même, la confluence des certaines rivières torrentielles avec une rivière encore plus grande a souvent une forme de delta

ou de cône de déjection et entre alors plutôt dans le contexte du même nom (Le Drac et l'Isère historiquement par exemple). Enfin, un torrent s'écoulant dans une large vallée au passif glaciaire ressemble parfois beaucoup au contexte dit de rivière torrentielle. Dans l'usage de la terminologie torrent/cône de déjection/rivière torrentielle présentée ci-dessus et le lien avec les modèles présentés ensuite, il faudra garder à l'esprit qu'on se rapporte au contexte géomorphologique et non à une catégorie absolue.

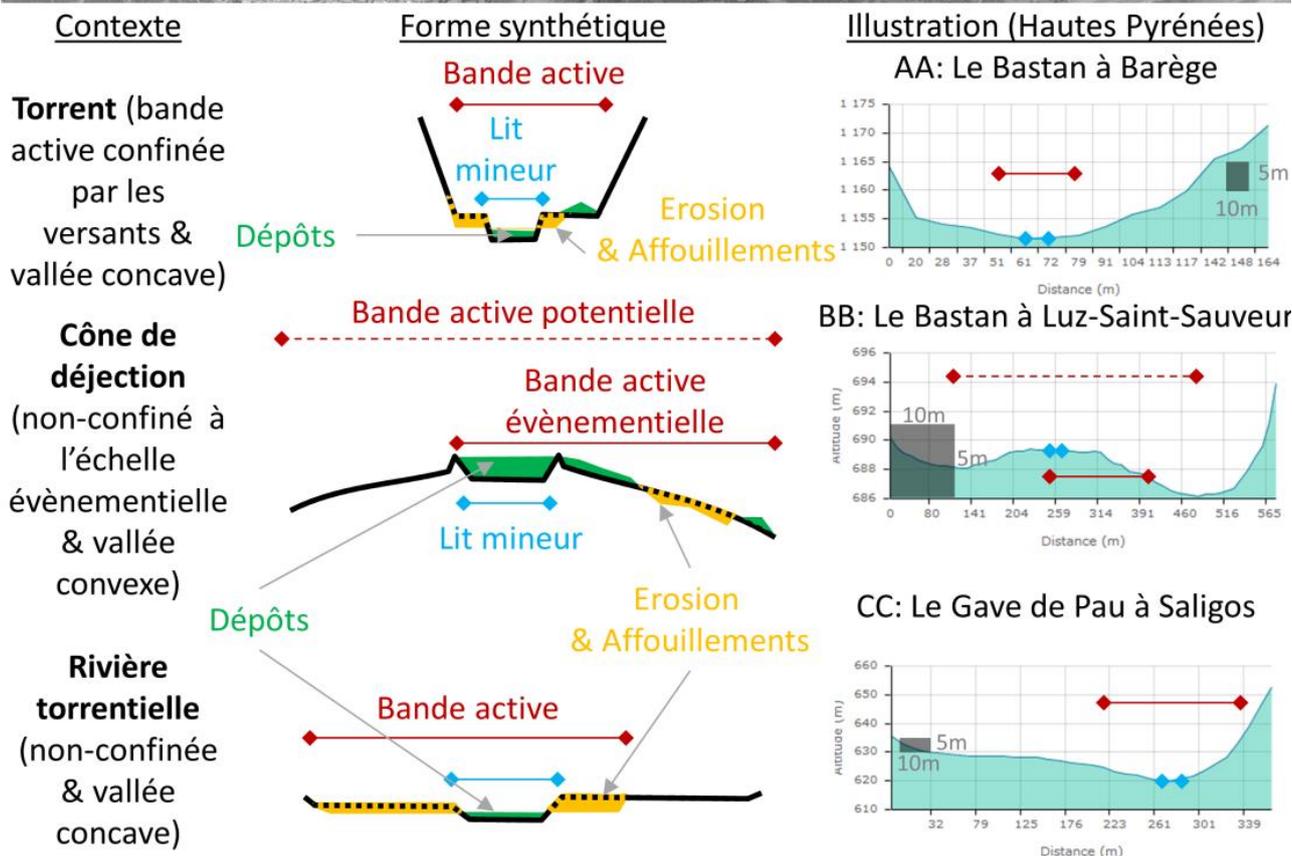


Figure 2 : Contextes géomorphologiques torrentiels : confinement, concavité et convexité ; illustration du Bastan et du Gave de Pau dans les Hautes Pyrénées (source photo aérienne et profils en travers : geoportail.fr)

Les indicateurs présentés dans le Tableau 4 ont été définis dans le rapport de phase 1 et sont analysés en détail plus loin dans ce rapport en les croisant avec les méthodes d'estimations potentielles.

Tableau 4: Proposition de méthodes de caractérisation de l'aléa torrentiel et paramètres de sortie dans l'état des connaissances actuelles

Méthode		Paramètres généraux aléas torrentiels								Spécifique laves torrentielles		flottants
		Emprises de la zone inondable	Points de débordements	Zone de concentration des écoulements	Hauteur d'écoulement	Vitesse des écoulements	Hauteur de dépôt solide	Emprise de la bande active (chenal principal)	Profondeur d'affouillement	Emprise de la zone de transit des laves torrentielles	Emprise de la zone d'étalement des laves torrentielles	
Approche géomorphologique		∇.	∇.	∇.			∇.	∇.	∇.	T. & C.	T. & C.	
Approche historique		∇.	∇.	∇.	R.		∇.	∇.	∇.	T. & C.	T. & C.	∇.
Formule simple de débit			∇.		T. & R.	T.		T. & C.				
Modélisation hydraulique pure	1D (+casiers) fond fixe	Flu.	Flu.		Flu.	Flu.						T. & R.
	2D fond fixe	∇.	∇.	∇.				∇.				T. & R.
	3D fond fixe (+flottants)	R.	R.	R.	R.	R.						R.
	2D fond fixe (+ flottants)	∇.	∇.	∇.				∇.				C. & R.
Modélisation hydro-sédimentaire (équations adaptées au contexte)	1D fond mobile	T.	T.	C. & R.		T.	T.	T.		T.		T. & C.
	2D fond mobile	C. & R.	C. & R.	C. & R.	C. & R.	C. & R.	C. & R.	C. & R.	C. & R.			∇.
Modèle physique à fond mobile (charriage)		∇.	∇.	∇.	∇.	∇.	∇.	∇.	∇.			∇.
Modélisation fluides complexes (laves torrentielles)	1D fond fixe	T.	T.		T.	T.				T.		T.
	1D fond mobile	T.	T.		T.	T.	T.		T.			
	2D fond fixe	C.	C.	C.	C.	C.	C.	C.		C.	C.	∇.
	3D fond fixe	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.			T. & C.	T. & C.	∇.
	Physique à fond fixe	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.	T. & C.		T. & C.	T. & C.	T. & C.

Légende

Applicabilité de la méthode :

Inadaptée pour qualifier la variable d'intérêt

Inadaptée pour qualifier la variable d'intérêt, mais dont les résultats **peuvent/doivent alimenter les réflexions de l'expert**

Généralement **adaptée** pour qualifier la variable d'intérêt

Théoriquement adaptée mais manquant de cas d'étude de validation rigoureuse : la calibration et l'usage souffrent en l'état des connaissances de fortes incertitudes.

Application **réservée aux cas les plus critiques et les mieux renseignés.**

Existante mais **réservée à des travaux de recherche** dans l'état des connaissances actuelles, très complexes à calibrer.

Considération restreinte au contexte:

- T.** Approche adaptée en contexte des **torrents** (voir texte)
- C.** Approche adaptée en contexte de **cône de déjection** (voir texte)
- R.** Approche adaptée en contexte de **rivière torrentielle** (voir texte)
- ∇.** Approche adaptée aux trois **contextes torrentiels** (ci-dessus)
- Flu.** Approche inadaptée en contexte de rivière torrentielle et **réservée au contexte fluvial**

Les jugements sur les possibilités d'adaptation des méthodes sont présentés ci-dessous, approche par approche : A. *Approches naturalistes et historiques* ; B. *Modèles crues + charriages* ; C. *Modèles fluides complexes : laves torrentielles* ; D. *Modèles physiques*.

A *Approches naturalistes et historiques*

- Les approches géomorphologiques et historiques sont plus importantes et nécessaires dans le cas torrentiel que dans le cas fluvial : le paysage et les archives gardent de nombreuses traces des événements majeurs (Cœur et al. 1998, Lang et al. 1998, D'Agostino 2013, Kaitna and Hübl 2013). Ces données permettent aussi de mieux caler les modèles et de mieux interpréter leurs résultats des modèles.

B *Modèles crues + charriages*

- Les approches basées sur l'application de formule simple de débit au droit d'un profil en travers donné, dites parfois « OD », permettent de caractériser des ordres de grandeurs du fonctionnement hydro-sédimentaire des tronçons caractéristiques, en particulier quand des calculs de flux solides sont menés en parallèle (Recking et al. 2013). Elles restent cependant insuffisantes pour caractériser les variations des profils en long ou en travers ;
- Les modèles 1D (éventuellement à casiers) à géométrie fixe sont réservés au domaine fluvial. Le domaine torrentiel est en effet, par nature, un contexte dans lequel le transport solide est un facteur prépondérant et essentiel des processus susceptibles de modifier grandement la géométrie des sections d'écoulement, ou indirectement, via le comblement du lit entraînant des débordements. L'hypothèse de fond fixe est alors très souvent déraisonnable ;
- Les modèles 2D à fond fixe, éventuellement couplés avec du transport de flottants (Ruiz-Villanueva et al. 2014), ne donnent qu'une idée des zones de concentration d'écoulement avant occurrence des dépôts et surtout érosions. Ils peuvent alimenter une lecture experte des zones de forte probabilité d'affouillement mais ne les calculent pas directement.
- La problématique des flottants commence à être abordée par des modèles 3D (Kimura and Kitazono 2018), mais leur utilisation courante est encore réservée à la recherche ;
- Les modèles 1D hydro-sédimentaires sont déjà utilisés de façon courante dans des torrents où les hypothèses 1D restent valables. Il est primordial que les modèles utilisés dans le contexte torrentiel intègrent des équations de transport solides adaptées aux fortes pentes. La formule de Meyer Peter & Muller doit par exemple être évitée : Recking et al. (2013 p. 133) ont démontré ses très faibles performances dans les cours d'eau raides à granulométrie grossière ; d'autres formules plus adaptées au domaine torrentiel dans des conditions de fort transport sont proposées. Plus récemment, Recking et al. (2016) et Piton and Recking (2017) ont proposé des approches complémentaires capables de caractériser les intensités de transport fortes et faibles dans des contextes montagneux;
- Il pourrait paraître surprenant que nous considérons les modèles 1D hydro-sédimentaires comme peu adaptés aux rivières torrentielles. Ils restent des outils subtils mais intéressants pour de la gestion des flux courants et des tendances de long terme. C'est plutôt pour des événements paroxysmiques générant des changements de lit hors de la bande active normale que nous considérons leur utilisation comme sujette à caution.
- Les modèles 1D hydro-sédimentaires font en général une hypothèse de répartition moyenne des dépôts et érosions dans la section : ajout/suppression d'une épaisseur de sédiment uniforme au fond du profil. Cette approche néglige le fait que sur des lits larges et divagants, les écoulements ne s'étalent pas forcément sur toute la largeur, mais se concentrent dans un ou plusieurs bras ayant chacun leur propre dynamique hydro-sédimentaire (Recking 2013). Aussi, elle ne permet pas de modéliser les processus de comblement et/ou de migrations latérales de ce(s) bras « vif(s) » qui est (sont) en constante évolution et responsable(s) des érosions et affouillements des berges et digues. Dans les rivières torrentielles, le processus qui se rapproche le plus de l'hypothèse 1D est celui de l'aggradation généralisée. Elle peut être due à un apport solide amont qui excède la capacité du tronçon ou à la formation d'un remous liquide aval qui piège la charge solide (comme à l'entrée dans une retenue hydraulique) ou à la zone d'influence d'un pont obstrué ou trop étroit. L'utilisation de ces modèles n'est donc pas à écarter dans l'absolu mais elle doit s'appuyer sur une expertise et une nécessaire interprétation fine et éclairée des résultats. Une approche simplifiée est parfois utilisée et consiste à res-

treindre le rapport de la largeur d'écoulement sur sa hauteur dans une gamme probable, afin de déterminer une enveloppe des niveaux potentiels atteints (Quefféléan et al. 2019).

C *Modèles fluides complexes : laves torrentielles*

- Les Japonais utilisent de façon courante des modèles 1D lave torrentielle (Nakatani et al. 2008, Liu et al. 2013, 2015) mais leurs bases théoriques sont issues des travaux de Takahashi (2007) qui se limitent aux laves torrentielles granulaires. Il serait intéressant de réaliser des tests sur quelques cas français de laves torrentielles issues de massifs par exemple granitiques. Des adaptations ont été proposées pour les cas de lahars (i.e. laves torrentielles observées sur les milieux volcaniques ayant une rhéologie particulière liée à la présence de cendres) avec des applications potentielles dans les territoires d'Outre-Mer (Nakatani et al. 2009). Cependant, dans les Alpes, les laves torrentielles sont souvent de type boueux. Les quelques modèles de laves boueuses 1D à fond mobile sont encore réservés à la recherche (Remaître et al. 2008).
- Les modèles 2D hydro-sédimentaires sont prometteurs. Cependant, les cas de validation rigoureuse de leur capacité à estimer correctement les dépôts et surtout les érosions dans des contextes torrentiels sont trop rares. En l'absence d'un jeu de données permettant d'éprouver et de démontrer la capacité d'un modèle à reconstituer les modifications géomorphologiques liées à un épisode connu, ou de recommandations claires issues de tels travaux, leur utilisation est à l'heure actuelle à proscrire.
- Les modèles 2D lave torrentielle à fond fixe sont par contre utilisés régulièrement pour estimer les zones d'étalement des laves boueuses (Recking et al. 2013 p. 200).

D *Modèles physiques*

- Les modèles physiques (i.e. modèles réduits en laboratoire), bien que rarement développés, sont des outils utilisés pour l'expertise des problèmes torrentiels tant en charriage qu'en laves torrentielles (Couvert and Lefebvre 1994, Koulinski and Richard 2008). Leur mise en place est contrainte par de fortes limites d'utilisation qui sont : un développement pouvant être très spécifique et technique, un grand espace d'installation, un fort coût financier, un coût en temps et la nécessité d'avoir des agents hautement qualifiés pour la manipulation des modèles et l'interprétation des résultats.

Les propositions reportées dans le Tableau 4 correspondent à l'état de l'art prévalant à l'heure de la rédaction de ce rapport². Les avancées scientifiques et techniques sont susceptibles de modifier à moyen terme cette analyse.

La règle d'application des méthodes n'est pas généralisable. Par exemple, certains bassins versants ont fait l'objet de recueils de données très approfondis et leur analyse dans le cadre d'un PAPI par des experts du domaine peut être faite avec des modèles que nous considérons comme réservés à la recherche pour le moment. La cohérence globale du niveau de complexité des méthodes doit être assurée. Dans certains cas d'étude, les phases initiales d'analyses géomorphologique et historique sont menées trop succinctement et il semble alors peu pertinent d'utiliser des modèles numériques puisque leur calage et les scénarios qui y seront étudiés reposeront inmanquablement sur des données initiales de mauvaise qualité.

Il est primordial de croiser les approches géomorphologiques et historiques avant de sélectionner les données et outils adéquats en fonction de la variété des problèmes hydro-géomorphologiques rencontrés sur le tronçon, tels que l'obstruction par de blocs et flottants, l'existence de capacités de transfert insuffisantes, le manque de volume tampon, les directions préférentielles de bifurcation du chenal, d'avulsion, des érosions de berges, etc. (Piton et al. 2018b).

² Novembre 2018

5.2.4 Etape 4 : Caractériser l'occupation du territoire

Adaptabilité

Cette étape n'est pas décrite de façon détaillée dans le guide AMC inondation et renvoie à l'étape 1, sous-étape « Diagnostic de vulnérabilité du territoire ». Pour une plus grande clarté, on pourrait imaginer de décrire ici la typologie des enjeux présents (e.g., géométrie du bâti, type de construction) via une représentation spatiale ou via une analyse statistique des caractéristiques des enjeux.

5.2.5 Etape 5 : Caractériser les coûts et les bénéfices d'un projet

Adaptabilité

5.2.5.1 Les coûts associés à un projet

Dans l'AMC inondation, les coûts associés à un projet sont présentés selon trois grandes catégories : 1) les coûts d'investissement ; 2) les coûts annuels différés ; 3) les coûts environnementaux.

Les coûts d'investissement rassemblent l'ensemble des dépenses engagées par le maître d'ouvrage public depuis l'origine du projet jusqu'à la mise en service de l'aménagement. Ils sont calculés comme la somme des coûts du foncier, des coûts d'études, et des coûts des travaux et équipements.

Les coûts annuels différés sont calculés comme la somme des coûts d'entretien, des coûts de réparation, des coûts des dommages ajoutés par le nouvel aménagement ou projet. Les coûts des dommages ajoutés doivent être vus comme des coûts positifs. Pour les coûts d'entretien et de réparation, trois cas se distinguent :

- si le projet consiste en la construction d'un aménagement nouveau, les coûts d'entretien et de réparations seront positifs par rapport aux coûts associés à la situation de référence sans le projet ;
- si le projet consiste en la suppression d'un aménagement existant, les coûts d'entretien et de réparation seront négatifs par rapport aux coûts associés à la situation de référence sans le projet ;
- si le projet consiste en la modification d'un aménagement existant, les coûts d'entretien et de réparation pourront être positifs ou négatifs par rapport aux coûts associés à la situation de référence sans le projet.

Les coûts environnementaux consistent en la prise en compte des impacts positifs ou négatifs du projet sur l'environnement lors de sa mise en place ou de son fonctionnement. Ces impacts peuvent être évités, réduits ou compensés par des mesures correctives. Dans le guide de l'AMC inondation, une grille des ratios des coûts environnementaux est proposée en fonction du type de mesures mises en place. Si le projet induit des bénéfices environnementaux, les coûts correspondants seront négatifs et leur quantification devra être argumentée.

Une étude des coûts de protection contre les inondations torrentielles a été menée par les services ONF-RTM par Boncompain and Quefféléan (2013). Le calcul des coûts d'un projet d'aménagement dans le contexte torrentiel s'avère différent par rapport au contexte fluvial pour deux raisons :

- La construction en montagne impose des contraintes techniques que l'on ne retrouve pas en plaine et qui engendrent des coûts d'investissement plus importants en torrentiel qu'en fluvial. Par exemple, le contexte de haute montagne nécessite la mise en place d'un cadre de sécurité spécifique et l'emploi de technologies adaptées au milieu montagnard (e.g. hélicoptages, ouverture de pistes d'accès dans les versants), pouvant être source de coûts importants ;
- Les crues torrentielles sont caractérisées par leur capacité à mobiliser d'importants volumes solides : sédiments et flottants. Des opérations ponctuelles de remise en état des ouvrages et de nettoyage des embâcles doivent être intégrées aux coûts de la gestion du risque inondation. Les mesures de protection telles que les plages de dépôts doivent être curées afin de garder leur fonctionnalité dans le cas d'un nouvel épisode de transport solide. Dans ce cas, le calcul des coûts de curage doit intégrer celui des dépôts annuels potentiels liés aux crues courantes et celui associé aux apports événementiels plus rares. L'analyse doit alors être menée en coût moyen annuel, calculé grâce aux coûts et probabilités associés aux différents événements à prendre en compte.

La démarche globale d'analyse des coûts d'investissement, d'entretien et de réparation peut évidemment être appliquée au contexte torrentiel. Ce sont les données synthétiques et formalisées qui font pour l'instant défaut.

5.2.5.2 Les bénéfiques associés à un projet

Selon l'AMC inondation, les bénéfiques d'un projet sont comptabilisés selon deux quantités : 1) le nombre d'enjeux qui ne sont plus en zone inondable grâce au projet ; 2) le montant monétaire des dommages évités grâce au projet.

Le nombre d'enjeux qui ne sont plus en zone inondable grâce au projet se calcule grâce au croisement des cartes d'enjeux avec le zonage aléa avant (i.e. situation sans projet) et après projet. Le montant monétaire des dommages moyens évités grâce au projet se calcule comme la différence des dommages moyens monétaires avant (i.e. situation sans projet) et après projet. Les enjeux dans le cas de l'inondation sont : les logements, les entreprises, les activités agricoles, les établissements publics, et les dommages indirects liés aux coupures des réseaux de transports routiers clés. Le calcul des dommages se fait à travers l'utilisation de courbes de dommages.

La méthodologie de calcul des bénéfiques demeure applicable au domaine torrentiel. Trois points paraissent cependant critiques en vue d'une mise en œuvre de cette même méthodologie au contexte torrentiel :

1. L'établissement de courbes de dommages doit intégrer l'expression de l'intensité de l'aléa qui prenne en compte la spécificité torrentielle. L'intensité de l'aléa est un paramètre primordial pour exprimer les courbes de dommages, car l'expression de cette intensité se retrouve en abscisse des courbes de dommages. Dans le cas torrentiel, d'autres variables que la hauteur d'eau et le temps de submersion doivent être pris en compte pour caractériser l'intensité des aléas à l'origine des potentiels dommages structuraux. L'intensité d'aléa doit être repensée pour le torrentiel (e.g., un indice d'intensité exprimé comme le produit de la vitesse et de la hauteur de l'écoulement, $h \times v$, ou un indicateur de la force de l'écoulement exprimé comme étant la vitesse au carré multipliée par la hauteur de l'écoulement, $h \times v^2$). Certains indicateurs, fonction de h et v , peuvent être utilisés pour quantifier l'aléa en bordure de rivière torrentielle là où l'utilisation des modèles numériques 2D est adéquat (i.e. pente inférieure à $\approx 2\%$). Cependant, ces indicateurs ne sont plus pertinents pour quantifier les dommages structuraux qui résultent des phénomènes d'affouillement des fondations des bâtiments.
2. L'établissement de courbes de dommages doit prendre en compte le caractère plus destructeur des crues torrentielles. Les dommages structuraux pris en compte dans les courbes de dommages aux inondations de plaine restent marginaux. Ce n'est plus le cas dans le contexte torrentiel : ils doivent être quantifiés et pris en compte dans les courbes de dommages liées à cet aléa. De plus, l'expérience montre que des enjeux ayant subi d'importants dommages liés à un événement torrentiel sont rarement reconstruits. Dans l'analyse économique, le coût des dommages aux enjeux ne prend en compte qu'un coût de réparation dans le cas du fluvial ; dans le cas torrentiel, il faudra distinguer les valeurs économiques liées :
 - A des coûts de réparation,
 - A des coûts de reconstruction ou de délocalisation si le risque est considéré trop important et que l'enjeu ne peut rester sur place.

Par exemple dans le cas des ouvrages d'art, les inondations fluviales endommagent parfois les aménagements de protection lors d'une surverse (engendrant un besoin de réparation), mais les emportent ou les détruisent très rarement, contrairement aux crues torrentielles (engendrant un besoin de reconstruction ou relocalisation). La façon dont doivent être pris en compte dans l'analyse économique les enjeux délocalisés (*pre-* ou *post*-crue) est à clarifier.

3. La diversité des enjeux endommagés par une crue torrentielle augmente par rapport à celle considérée des enjeux endommagés lors d'une inondation de plaine. Il a été noté que les crues torrentielles endommagent en particulier : les ouvrages d'art (e.g., ponts emportés par des crues torrentielles, passages à gué endommagés) ; les routes (e.g., dommages physiques dus à l'érosion des remblais routiers ou de l'enrobé) ; les réseaux linéaires (e.g., rupture des réseaux d'eaux potables et usées, des réseaux de télécommunications, des réseaux d'approvisionnement en énergie) ; les ouvrages de protection en bordure de cours d'eau (e.g., aménagements de protections de berges dégradés).

5.2.5.3 Vers l'analyse synthétique

Les bénéfiques monétaires et non-monétaires sont à quantifier via le calcul d'indicateurs. Ces indicateurs sont calculés pour le scénario de dimensionnement. Pour l'analyse dite « synthétique », parfois nommée « multi-scénarios », deux indicateurs non-monétaires (i.e., P1 : nombre de personnes habitant en zone inondable et part communale et P7 : nombre d'emplois en zone inondable) et cinq monétaires (i.e., M1 : dommages aux

habitations, M2 : dommages aux entreprises, M3 : dommages aux activités agricoles, M4 : dommages aux établissements publics, M5 : dommages indirects aux réseaux) sont quantifiés pour quatre scénarios. Les quatre scénarios d'aléa sont, textuellement :

1. le scénario d'aléa de premiers dommages ;
2. le scénario de dimensionnement du projet ;
3. un scénario d'aléa pour lequel l'ouvrage ou le système a un impact hydraulique limité ;
4. un scénario d'aléa extrême, de période de retour au moins 1 000 ans.

Il est précisé dans le guide que la définition de ces scénarios s'inscrit dans la Directive Inondations qui impose de caractériser au moins : un scénario d'inondation « fréquente » (e.g., période de retour entre 10 ans et 30 ans), un scénario d'inondation « moyenne » (e.g. période de retour entre 100 ans et 300 ans) et un scénario d'inondation « extrême » (e.g. période de retour supérieure ou égale à 1 000 ans).

Les indicateurs synthétiques utilisent les indicateurs P1, P7, M1-5 et les coûts précédemment calculés. Ils sont calculés suivant la table suivante (Tableau 5).

Tableau 5: Indicateurs synthétiques de l'AMC inondation

Indicateurs synthétiques	Méthode ou équation
Nombre moyen annuel d'habitants protégés par le projet (NEMA ³ habitants)	Croisement de carte d'enjeux et d'inondation pour chaque scénario et intégration sur l'ensemble des scénarios (p123 de l'AMC inondation)
Rapport du nombre moyen annuel d'habitants protégés par le projet sur le nombre moyen annuel d'habitants dans la zone inondable en situation de référence	Rapport entre NEMA habitants dans la zone inondable en situation de projet et Nombre Moyen Annuel (NMA) d'habitants dans la zone inondable en situation de référence
Nombre moyen annuel d'emplois protégés par le projet (NEMA emplois)	Croisement de carte d'enjeux et d'inondation pour chaque scénario et intégration sur l'ensemble des scénarios (p123 de l'AMC inondation)
Rapport du nombre moyen annuel d'emplois protégés par le projet sur le nombre moyen annuel d'emplois dans la zone inondable en situation de référence	Rapport entre NEMA emplois dans la zone inondable en situation de projet et NMA emplois dans la zone inondable en situation de référence
Rapport des dommages évités moyens annuels (DEMA) sur les dommages moyens annuels (DMA) en situation de référence	Equation : p120 (DMA) et 122 (DEMA) de l'AMC inondation
Coût équivalent moyen annuel du projet par habitant protégé grâce au projet	Equation : p135 de l'AMC inondation et division par NEMA habitants
Coût équivalent moyen annuel du projet par emploi protégé grâce au projet	Equation : p135 de l'AMC inondation et division par NEMA emplois
Valeur Actualisée Nette du projet	Equation : p137 de l'AMC inondation
Ratio des bénéfices générés par le projet sur le coût du projet	Equation : p138 de l'AMC inondation

A noter que cette étape se heurte à la difficulté de définir des scénarios d'aléa abordée § 5.2.3.

³ NEMA pour « Nombre Evité Moyen Annuel » que l'on interprétera plus facilement par « Nombre d'Enjeux protégés Moyen Annuel ». Le complément après « NEMA » caractérise le type d'enjeu. Par exemple, la variable « NEMA habitants » doit se lire comme « Nombre moyen annuel d'habitants protégés ».

5.2.6 Etape 6 : Interpréter les résultats

Adaptabilité

Cette étape d'analyse est décomposée en deux sous-étapes : l'analyse des indicateurs élémentaires et l'analyse des indicateurs synthétiques. Cette étape correspond à l'analyse et la discussion des résultats quantitatifs précédemment obtenus. Il n'est pas détecté de verrous techniques empêchant l'adaptation de cette étape du domaine fluvial au torrentiel.

5.2.7 Etape 7 : Analyser l'incertitude et la sensibilité des résultats

Adaptabilité

Cette étape suggère de conduire une analyse de sensibilité de l'AMC inondation en propageant les incertitudes connues sur les paramètres d'entrées jusqu'aux résultats de l'AMC inondation. Cette étape présente des verrous techniques entravant son adaptation du domaine du fluvial au torrentiel, e.g. la connaissance des probabilités de rupture/défaillance des systèmes potentiellement touchés par la crue, les coûts associés aux dommages pour construire les courbes de vulnérabilité, la quantification des incertitudes inhérentes à la définition de scénarios d'aléa de période de retour donné. De manière générale, ces quantifications reposent souvent sur des informations imparfaites (imprécises, incertaines) provenant de sources inégalement fiables. Les enjeux de l'analyse d'incertitude et de sensibilité portent à la fois sur le développement et la mise à disposition de méthodologies et d'outils que sur la collecte d'éléments de traçabilité des raisonnements (Tacnet 2009) : quelles sont les données, hypothèses, méthodes utilisées à l'instant t pour réaliser l'analyse ? Dans le contexte torrentiel, certaines données sont plus difficilement accessibles. On souligne notamment que les incertitudes classiques liées à la caractérisation des scénarios d'aléa, de leur probabilité d'occurrence et de l'évaluation de leurs effets sont plus fortes dans le domaine torrentiel que dans le domaine fluvial. Il est donc fortement recommandé d'effectuer une analyse d'incertitude adaptée à la nature des données disponibles et aux types d'imperfection rencontrés. Il s'agira notamment de proposer une liste des paramètres incertains d'entrée et de sortie à étudier (e.g. en distinguant les incertitudes aléatoires et épistémiques), une description des techniques de propagation d'incertitude envisagée et les prioriser des plus simples aux plus complexes.

5.3 Synthèse des possibilités, verrous et modalités d'adaptation du fluvial au torrentiel

Sur la base des éléments décrits plus haut, le Tableau 7 synthétise les possibilités d'adaptation de l'AMC du contexte fluvial au contexte torrentiel pour les 7 étapes de l'AMC. L'analyse porte sur la faisabilité de l'adaptation. Une couleur est associée à 4 niveaux d'adaptabilité et leurs correspondances sont définies dans le Tableau 6 suivant.

Tableau 6 : Code couleur utilisé dans le chapitre

Couleur	Qualification de l'adaptabilité
Vert	Adaptable directement : étape AMC compatible avec le contexte torrentiel, outils déjà disponibles ;
Orange	Assez adaptable : pas de verrous techniques et scientifiques décelés, nécessité de développement de méthodes dont les démarches sont déjà identifiées, mise en place d'un transfert technologique, demande du temps mais pas de nouvelles réflexions théoriques ;
Rouge	Adaptabilité complexe : étape AMC nécessitant un niveau de développement en recherche avec potentiellement de nouvelles démarches à inventer, peut être coûteux en temps ;
Noir	Inadaptable dans l'état actuel des connaissances : approche très peu réaliste dans la mesure des moyens mis en œuvre, inenvisageable dans l'état actuel des connaissances.

Tableau 7 : Synthèse des possibilités, verrous et modalités d'adaptation du fluvial au torrentiel

Etape de l'AMC inondation (Guide AMC 2018) et code couleur en fond	Commentaires sur l'adaptabilité	Possibilités, verrous, phasage d'adaptation vers le contexte torrentiel
1-Définir le problème et identifier les différentes solutions;	Adaptabilité possible et directe seulement sur la gamme d'ouvrages classiques des PAPI : digues, protections de berges, plages de dépôt dans une certaine mesure. Travaux nécessaires pour préciser notre capacité à identifier l'efficacité des autres ouvrages pouvant potentiellement apparaître dans les PAPI.	Les actions d'adaptation au contexte torrentiel sont : <ul style="list-style-type: none"> définir la(les) fonction(s) de protection des mesures de protections contre les crues torrentielles, et quantifier l'effet des protections retenues au Tableau 2 p. 14 ; lister les mesures de protection pour lesquelles les fonctions ou les effets sont mal connus et proposer des axes de recherches ou du transfert technologique.
2-Identifier le périmètre de l'étude ;	Adaptabilité directe.	Aucun verrou, i.e. principes de l'AMC inondation applicables, considérer les influences à la fois hydrologiques mais aussi sédimentaires des aménagements.

Suite Tableau 7 : Synthèse des possibilités, verrous et modalités d'adaptation du fluvial au torrentiel

Etape de l'AMC inondation (Guide AMC 2018) et code couleur en fond	Commentaires sur l'adaptabilité	Possibilités, verrous, phasage d'adaptation vers le contexte torrentiel
<p>3-Caractériser les aléas sur le territoire ;</p> <p>- Par gamme d'intensité : fort/moyen/faible</p>	<p>Adaptabilité possible rapidement pour des gammes d'aléas de type « Fort – Moyen – Faible »</p>	<p>Les praticiens réalisent déjà des cartes des gammes d'intensité d'aléas et doivent être capables de les modifier en prenant en compte les fonctions et capacités des ouvrages. Il faut simplement atteindre un niveau de transparence fort dans la justification des modifications apportées aux cartes. Les actions d'adaptation pour atteindre une description continue des intensités :</p> <ul style="list-style-type: none"> • analyser et prendre en compte les différents effets du phénomène (submersion, impact, érosion, dépôt, déjaugeage) avec les modèles adéquats ; • définir les intensités d'aléas retenues ; • lister les techniques quantitatives qui permettraient de quantifier ces intensités (e.g. modélisation numérique, approche géomorphologie) ; • analyser la capacité des techniques quantitatives proposées à quantifier chaque intensité de l'aléa torrentiel.
<p>3-Caractériser les aléas sur le territoire ;</p> <p>- Par variables continues d'intensités</p>	<p>Possible avec des paramètres descripteurs des aléas après validation des modèles sur des cas connus.</p>	<p>• analyser et prendre en compte les différents effets du phénomène (submersion, impact, érosion, dépôt, déjaugeage) avec les modèles adéquats ;</p> <p>• définir les intensités d'aléas retenues ;</p> <p>• lister les techniques quantitatives qui permettraient de quantifier ces intensités (e.g. modélisation numérique, approche géomorphologie) ;</p> <p>• analyser la capacité des techniques quantitatives proposées à quantifier chaque intensité de l'aléa torrentiel.</p>
<p>4-Caractériser l'occupation du territoire;</p>	<p>Adaptabilité directe.</p>	<p>Aucun verrou, i.e. principes de l'AMC inondation applicables.</p>
<p>5- Caractériser les coûts et les bénéfices du projet;</p>	<p>Adaptabilité possible moyennant plusieurs efforts et développements techniques (recherche des coûts, établissement de courbes, définition des scénarios d'aléas).</p> <p>Si les développements techniques nécessaires sont connus, le temps alloué pour les mettre en place est plus incertain.</p>	<p>Les actions d'adaptation au contexte torrentiel sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • adapter les coûts associés du projet pour le cas du torrentiel (e.g. coût des mesures de protection torrentielle, coût des travaux en milieu montagnard) ; • établir de nouvelles courbes de dommages qui prennent en compte 1) les nouveaux enjeux typiques du cas torrentiel, 2) la capacité destructrice des événements torrentiels, 3) de nouvelles intensités typiques du torrentiel ; • prendre en compte, évaluer les dommages indirects (définir/valider les méthodologies, développer/maintenir les outils, réaliser les analyses socio-économiques, formater les données relatives aux réseaux à étudier, échelles, finesse) ; • définir quantitativement des scénarios d'aléa, notamment pour des périodes de retour supérieures à 100 ans.
<p>6- Analyser les résultats (p. 54) ;</p>	<p>Adaptabilité directe.</p>	<p>Aucun verrou, i.e. principes de l'AMC inondation applicables.</p>
<p>7- Analyser l'incertitude et la sensibilité des résultats (p.62).</p>	<p>Adaptabilité qui se heurte à la limite des connaissances. De fortes incertitudes résident dans les connaissances et modèles utilisés. Un effort de recherche est nécessaire.</p>	<p>Les actions d'adaptation au contexte torrentiel sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • mettre en place un cadre d'étude identifiant les paramètres d'entrée et les variables d'intérêt clés à étudier dans le contexte torrentiel ; • quantifier les incertitudes ; • proposer des méthodologies et outils opérationnels de propagation de l'imperfection de l'information (imprécision et incertitude).

6 Enjeux et critères spécifiques au contexte torrentiel

Cette section rappelle d'abord les caractéristiques de l'intensité de l'aléa torrentiel. En second lieu, la sévérité des dommages rencontrés lors de phénomènes torrentiels est décrite comparée à celle des dommages liés aux phénomènes fluviaux. Enfin, un aperçu des nouveaux enjeux et dommages indirects est donné.

6.1 Caractère multivarié de l'aléa torrentiel

En se référant à la thèse de Carlados (2017), les types d'effets principaux induits par une crue torrentielle ou une lave torrentielle sont : la submersion, le dépôt, l'affouillement, l'impact direct, et la poussée. La Figure 3 permet de relier ces types d'effets à des exemples de critères d'intensité.

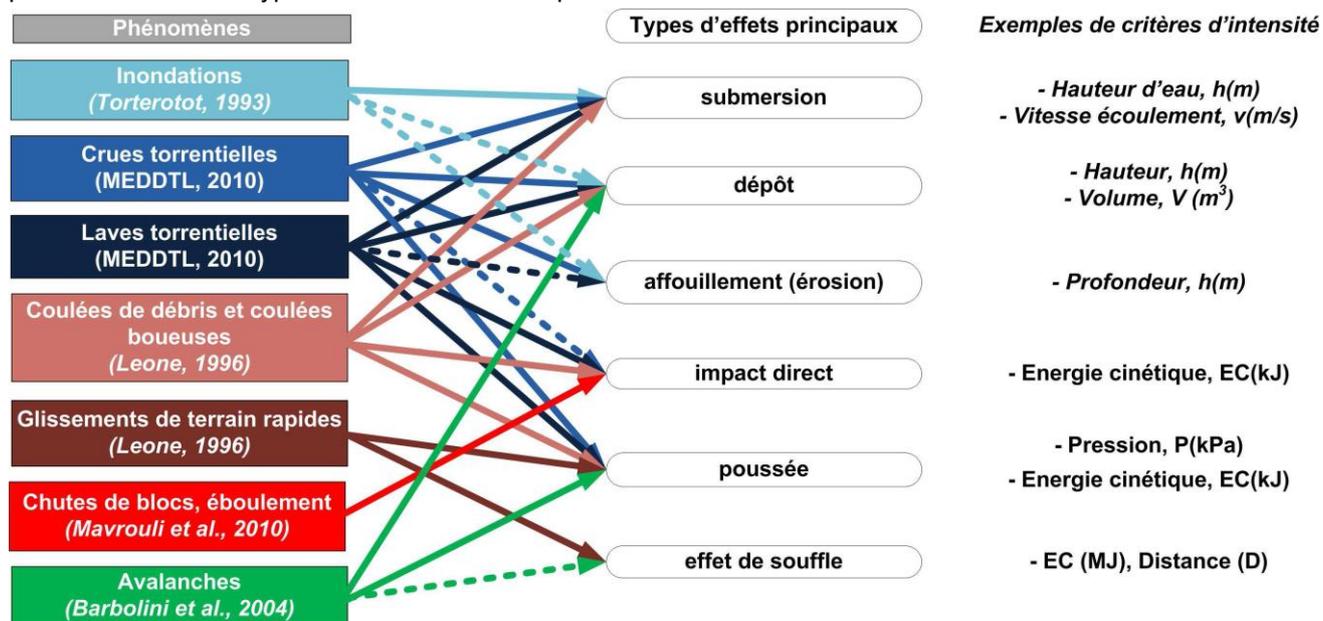


Figure 3 : Les phénomènes typiques des montagnes, leurs effets sur les bâtis et une proposition de paramètres descripteurs (p.17, Carlados (2017))

Selon un rapport du centre scientifique et technique du bâtiment (Salagnac et al. 2014), les actions des inondations sur le bâti peuvent se diviser en trois catégories : 1) le contact avec l'eau (e.g., contamination, capillarité) ; 2) les effets hydrostatiques, 3) les effets dynamiques dus à la vitesses de l'écoulement, les vagues générées, les objets flottants et les matériaux en suspension. Kelman and Spence (2004) liste les différents types d'actions dues aux inondations de tous types (e.g. crue avec charriage, crue de plaine) sur le bâti :

- Actions hydrostatiques (e.g., action de pression latérale, remontées par capillarité) ;
- Action hydrodynamiques dues à la vitesse de l'écoulement, à la vitesse aux niveaux des coins des structures, à la turbulence de l'écoulement, aux effets de vagues ;
- Action, phénomène d'érosion ;
- Action de flottaison ;
- Action d'impact des débris ;
- Action non-physique (e.g., chimique, biologique).

Les actions non-physiques d'une crue torrentielle ne seront pas étudiées dans la suite de ce rapport. Les actions hydrostatiques et hydrodynamiques induisent des efforts de poussée sur les structures. Les actions hydrostatiques se calculent sur la base de la hauteur de l'écoulement ($h [m]$), et la densité de l'écoulement ($\rho [kg.m^{-3}]$). Les actions hydrodynamiques se calculent à partir de la hauteur de l'écoulement ($h [m]$), la densité de l'écoulement ($\rho [kg.m^{-3}]$) et la vitesse de l'écoulement ($v [m.s^{-1}]$). L'action ou phénomène d'érosion n'est pas au sens propre une action. Elle induit une modification des conditions d'appui par suppression des appuis en fondation : elle se calcule ou se mesure sous la forme d'une profondeur d'érosion ou d'affouillement ($p_a [m]$) d'une largeur et longueur d'érosion ou d'affouillement ($L_a [m], l_a [m]$). La caractérisation de l'érosion est parfois approchée qualitativement en fonction des rapports entre la largeur du cours d'eau ($L [m]$) et la profondeur du cours d'eau ($H [m]$), et la vitesse de l'écoulement (Tableau 8 tiré de Duchene (2015)).

Tableau 8 : Evaluation d'un indicateur de risque de changement de lit ou de destruction de berges (Duchene 2015)

	$v < 3 \text{ m.s}^{-1}$	$3 \text{ m.s}^{-1} < v < 5 \text{ m.s}^{-1}$	$v > 5 \text{ m.s}^{-1}$
$\frac{L}{H} < 15$	Fort	Fort	Fort
$15 < \frac{L}{H} < 30$	Moyen	Moyen	Fort
$\frac{L}{H} > 30$	Faible	Faible	Faible

L'action de flottaison d'un objet non ancré de masse et volume donnés se calcule à partir de la hauteur de l'écoulement (h [m]) et de la densité de l'écoulement (ρ [kg.m^{-3}]). L'action (impact) des débris est décrit à la fois par la force d'impact et par le volume de dépôt engendré: on peut calculer l'énergie cinétique des blocs transportés (E_c [kJ]) ou le dépôt engendré via sa hauteur (h_d [m]) ou son volume (V [m^3]). En résumé, les effets et actions d'une crue torrentielle peuvent se synthétiser selon le Tableau 9.

Tableau 9 : Synthèse des effets, actions et intensités des crues torrentielles

Effets : la crue torrentielle...	Actions associées	Intensités à quantifier
affouille ou creuse	Action d'érosion	p_a [m], l_a [m], v [m.s^{-1}], L [m], H [m]
exerce une pression surfacique	Action hydrostatique (pression en présence d'eau), action hydrodynamique (vitesse du fluide)	h [m], ρ [kg.m^{-3}], v [m.s^{-1}]
impacte ponctuellement	Action des débris	E_c [kJ]
fait flotter	Action de flottaison du fluide	h [m], ρ [kg.m^{-3}]
submerge	Action d'inondation	h [m]
dépose	Action des débris	h_d [m], V [m^3]

Attention à ne pas mélanger les termes d'intensité et de magnitude. La magnitude d'un événement de crue torrentielle se quantifie via les hydrogrammes de crue (i.e., débit liquide Q_L [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] en fonction du temps) et les sédimentogrammes (i.e., débit solide Q_S [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] en fonction du temps) pour les crues de charriage ou les hydrogrammes de lave (i.e., débit de lave Q_{lave} [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] en fonction du temps) pour les laves torrentielles.

Une étude de Kreibich et al. (2009) montre que la hauteur d'eau et la charge hydraulique (i.e., $h + \frac{v^2}{2g}$ où g est l'accélération de la gravité) sont de bons paramètres pour approcher les dommages structuraux du bâti résidentiel. Dans la même veine, Il est montré que la vitesse de l'écoulement, l'indice de force de l'écoulement (i.e., $h \times v^2$) ou l'indice d'intensité (i.e., $h \times v$) sont de bons paramètres pour approcher les dommages structuraux des infrastructures comme les routes.

6.2 Capacité destructrice des phénomènes

La capacité destructrice des phénomènes torrentiels – par crue avec charriage ou lave torrentielle – est empiriquement largement observée mais rarement statistiquement rapportée. De ce fait, les phénomènes de destruction décrits ci-dessous proviennent de rapports techniques à dire d'experts. Selon un rapport technique de Givry and Peteuil (2011) et selon les retours d'expérience de plusieurs experts du domaine torrentiel, l'affouillement des fondations causé par l'érosion des berges est supposé être la cause principale des dégâts structuraux aux bâtiments lors des crues à charriage. La destruction des murs par impacts est assez rare, les murs détruits sans affouillement des fondations sont rares et correspondent presque toujours à de très gros impacts de blocs ou de flottants (Givry and Peteuil 2011).

Le phénomène de flottaison est plus largement observé dans les pays où le bâti préfabriqué est répandu (e.g., USA, Canada) et n'est pas mentionné dans le document technique de Givry and Peteuil (2011). Ce phénomène de flottaison est, en France, plus souvent rapporté dans le cas de crues torrentielles ou fluviales survenant dans des campings. Le phénomène de flottaison est responsable, dans les campings notamment, de pertes physiques, de perte d'activité économique et de pertes humaines.

A l'intérieur des bâtis, les dommages non-structuraux et de contenus sont globalement semblables dans le cas torrentiel et dans le cas fluvial, sauf pour l'engravement qui induit des coûts de nettoyage, comme par exemple les coûts liés à l'évacuation des matériaux. La remise en état de l'extérieur immédiat des bâtis et l'évacuation des dépôts induit aussi des surcoûts dans le cas des affouillements, des engravements et des laves torrentielles.

Le Tableau 10 synthétise les dommages structuraux et non-structuraux au bâti en reprenant certaines informations sur les effets, actions et intensités du Tableau 9.

Tableau 10 : Synthèse des dommages structuraux et non-structuraux au bâti.

Effets : la crue torrentielle...	Actions associées	Intensités à quantifier	Dommages structuraux selon Givry, 2011 (*non mentionné par Givry, 2011)	Dommages non-structuraux et de contenus selon Givry, 2011
submerge	Action d'inondation	$h [m]$	Aucun recensé	Souillage (salissure) et humidification par envahissement de la construction
fait flotter	Action de flottaison du fluide	$h [m]$, $\rho [kg.m^{-3}]$	Dommages sur du bâti léger (e.g., mobile home)*	Flottaison d'objets
affouille	Action d'érosion	$p_a [m]$, $l_a [m]$, $v [m.s^{-1}]$, $L [m]$, $H [m]$	Affouillement des fondations, menace de la stabilité externe et interne du bâti	Aucun recensé
exerce une pression surfacique	Action hydrostatique (pression en présence d'eau), action hydrodynamique (vitesse du fluide)	$h [m]$, $\rho [kg.m^{-3}]$, $v [m.s^{-1}]$	Dommages sur un élément porteur (e.g. mur porteur, colonne ou poteau porteur)	Destruction des ouvertures (portes et fenêtres)
impacte ponctuellement	Action des débris	$E_c [kJ]$	Dommages sur un élément porteur (e.g. mur porteur, colonne ou poteau porteur)	Destruction des ouvertures (portes et fenêtres)
dépose	Action des débris	$h_d [m]$, $V [m^3]$	Aucun recensé	Engravement

On note que les deux premières lignes du Tableau 10 (i.e. les effets de submersion et de flottaison) sont semblables au cas fluvial, les lignes suivantes sont spécifiques aux phénomènes torrentiels.

D'après nos discussions avec les développeurs des courbes d'endommagement liées aux inondations fluviales, les pertes totales dues aux dommages directs sont la somme de plusieurs postes de coûts dus au nettoyage, à la perte du mobilier, à l'endommagement au second œuvre et au gros œuvre (Figure 4).

Fluvial

Coûts liés aux dommages dus à la submersion

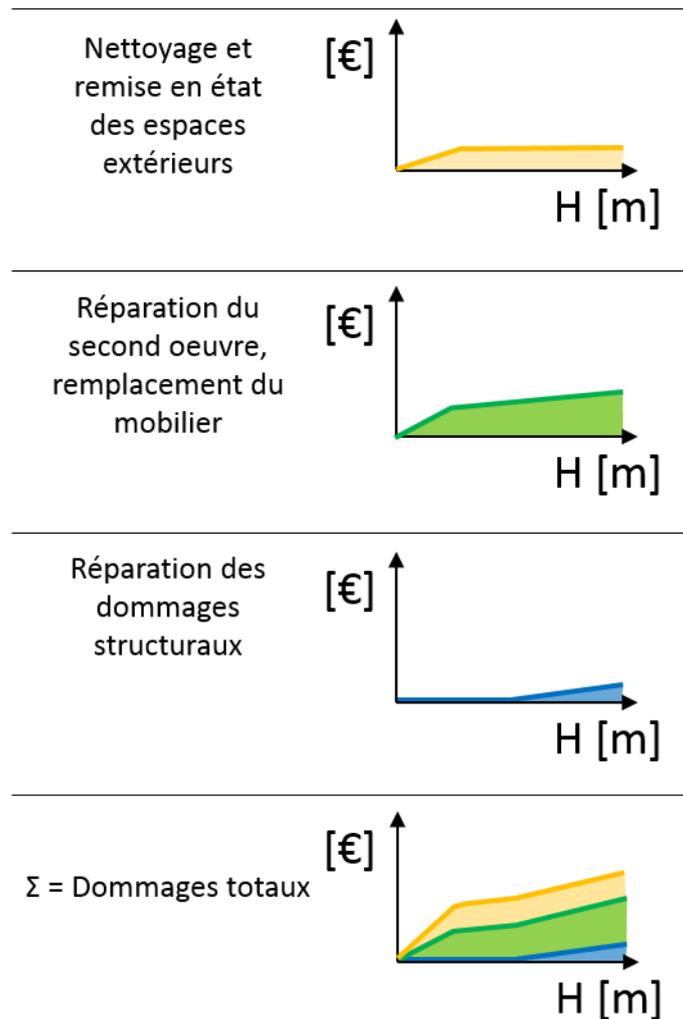


Figure 4 : Schéma conceptuel de calculs des coûts d'endommagement dans le cas fluvial : les dommages totaux sont la somme des dommages non structuraux (coûts de nettoyage et remise en état des espaces extérieurs, coûts des réparations au second œuvre et de remplacement du mobilier) et des dommages structuraux.

Dans le cas torrentiel, seules certains postes de coûts changent. Développer des courbes d'endommagement consisterait donc en la modification de ces postes de coûts spécifiques au torrentiel : coûts dus au nettoyage et aux dommages structuraux (Figure 5). Les estimations des coûts spécifiques de nettoyage et remise en état des espaces extérieurs pourraient être réalisées par des interviews d'expert. Les estimations des coûts aux dommages structuraux pourraient être faites à partir d'approches mécanistiques basées sur des calculs de génie civil (cf. exemples développés dans la Section 8.3).

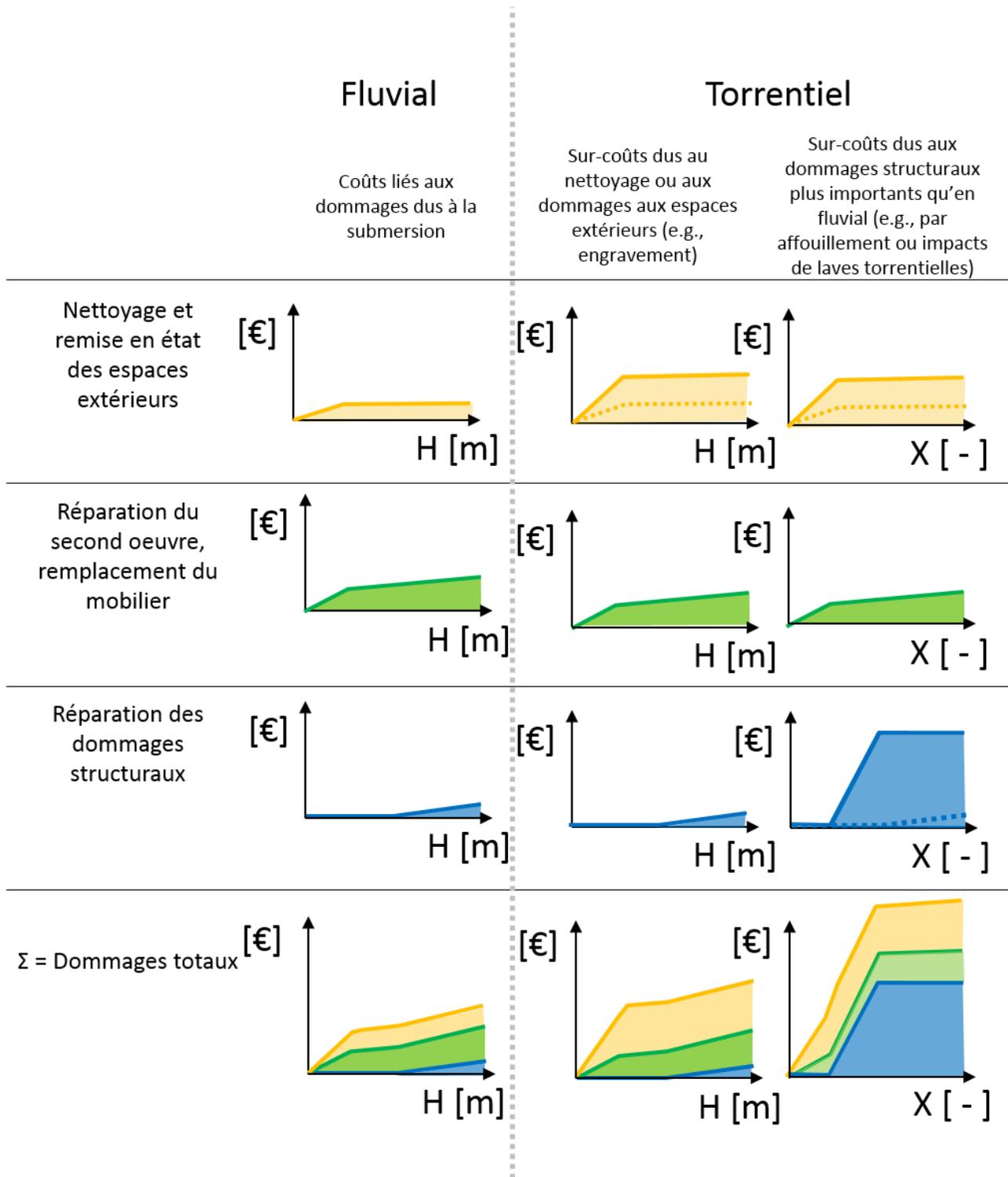


Figure 5 : Schéma conceptuel de calculs des coûts d'endommagement dans le cas fluvial et torrentiel : les dommages totaux sont la somme des dommages non structuraux (coûts de nettoyage et remise en état des espaces extérieurs, coûts des réparations au second œuvre et de remplacement du mobilier) et des dommages structuraux. Dans le cas torrentiel, ce sont les composantes « nettoyage + remise en état des espaces extérieurs » et « réparation du gros œuvre » qui augmentent par rapport au fluvial. Les courbes pointillées représentent la référence des pertes en contexte fluviale en première colonne.

En synthèse, l'AMC/ACB inondation propose des courbes de dommages pour les logements, les entreprises, les parcelles cultivées, et les établissements publics. En contexte torrentiel, les courbes de dommages pour les logements, les entreprises et les établissements devront être adaptées en prenant en compte :

- 1) des coûts sur les biens fonciers plus importants du fait de l'effet destructeur des crues sur le bâti ;
- 2) des coûts de nettoyage/déblayage plus importants que pour une inondation du fait de l'important transport de solide généré ;
- 3) des coûts indirects dus à des temps d'inactivité plus importants qu'en contexte de crues de plaine, i.e. du fait de reconstruction/réparation et de nettoyage/déblayage plus importants et donc plus longs qu'en contexte de crues de plaine.

6.3 Nouveaux enjeux et dommages indirects

Cette section vise à définir les enjeux de montagne spécifiques qui ne sont actuellement pas pris en compte dans l'AMC/ACB notamment les pertes d'accessibilité des villages de montagne liées aux défaillances des réseaux de transport, les conséquences sur les ouvrages de protection.

6.3.1 Vulnérabilité et dommages aux réseaux

Les phénomènes torrentiels entraînent des dommages directs (e.g. destructions, endommagements d'équipements exposés), mais aussi des dommages indirects liés, par exemple, aux conséquences économiques de l'endommagement d'infrastructures critiques tels que les réseaux de transport, d'énergie et de communication et les ouvrages d'art associés (Figure 6).

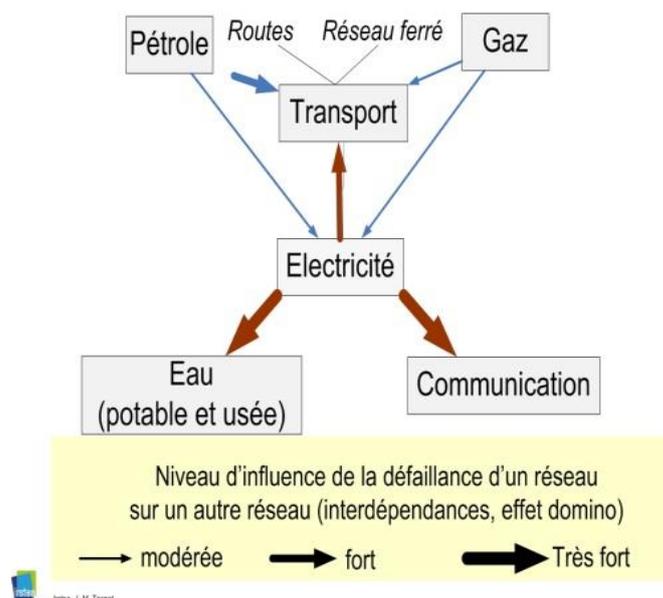


Figure 6 : Réseaux critiques et niveaux de dépendance (Tacnet et al. 2017)

Ces infrastructures critiques comprennent les équipements indispensables au maintien des fonctions vitales de la société en termes de santé, sûreté, sécurité et bien-être économique ou social des citoyens. Les réseaux de transport sont critiques. Leur coupure entraîne l'isolement plus ou moins long des territoires et populations desservis. Leur défaillance et la perte d'accessibilité induite impactent en effet largement l'activité humaine au niveau social et économique (e.g. arrêt de l'activité économique, difficultés d'accès aux soins, aux services de sécurité, et aux équipements culturels).

D'autres effets indirects ne sont pas traités ici, notamment ceux qui peuvent affecter l'environnement au travers des risques de pollution dues à une défaillance des systèmes d'assainissement (e.g., arrêt de fonctionnement d'une station d'épuration) par écoulement de produits toxiques (e.g. déchirure du contenant, déversement d'une citerne de fuel), rupture canalisation de gaz liquéfié (e.g. pollution atmosphérique), incendies ou explosions. Les effets sur la santé humaine notamment les problèmes psychologiques (e.g. effet psychologique dû à la perte de biens personnels, au chômage, à un relogement) sur la population ne sont également pas analysés ici.

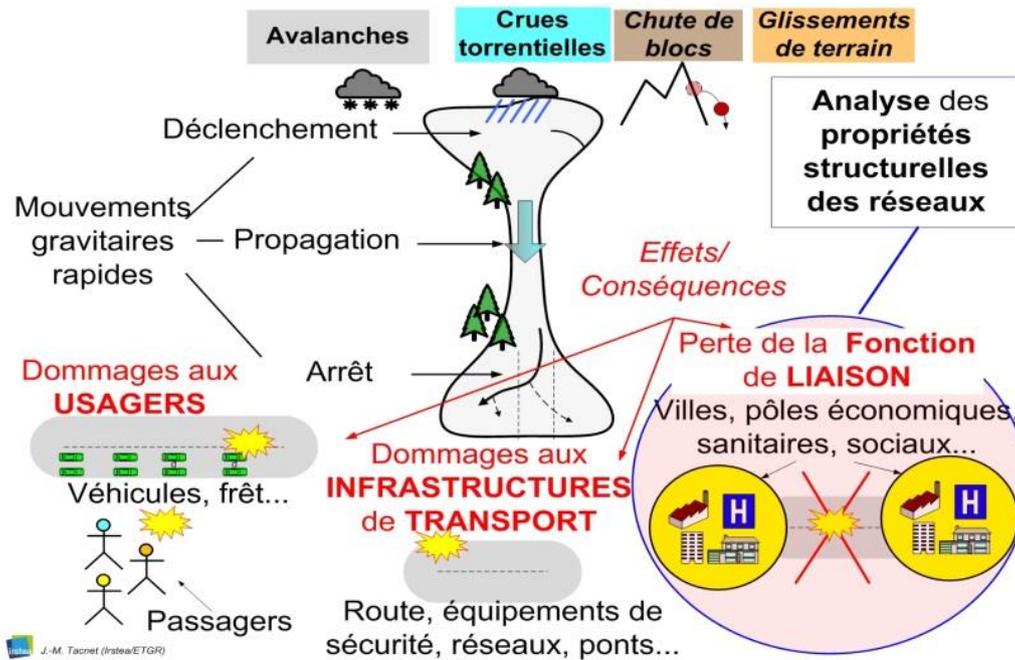


Figure 7 : Vulnérabilité indirecte des réseaux de transport (Tacnet et al. 2017)

Les analyses du risque sont généralement menées à l'échelle locale (bassin-versant torrentiel) et ne considèrent donc pas les effets distants. L'identification de l'aléa (phénomène spatialisé et caractérisé en intensité et fréquence) constitue alors une étape préalable incontournable mais non suffisante pour analyser le risque territorial. De manière assez classique, on envisage en effet les dommages directs et les risques liés à l'effet des phénomènes naturels sur les infrastructures ou les usagers. L'estimation de la vulnérabilité indirecte liée au potentiel de conséquences associées à l'effet distant de coupures, est plus difficile à estimer (Figure 7). Il faut en effet, dans ce cas, être capable de quantifier les effets en termes d'indicateurs territoriaux sur les plans économiques, sociaux et humains relatifs à la perte d'accessibilité dans les différents secteurs d'activité ou de services. Les conséquences peuvent ainsi être humaines (e.g. approvisionnement alimentaire, approvisionnement en énergie, approvisionnement en eau potable), économiques (e.g. perte d'activité, chômage technique), sociales (e.g. perte d'accès aux écoles), sécuritaires (e.g. inaccessibilité des services de secours). En fonction de la structure du réseau (e.g. nature des voies de communication, interconnexions, existence d'itinéraires alternatifs), les perturbations sur le réseau peuvent être plus ou moins importantes.

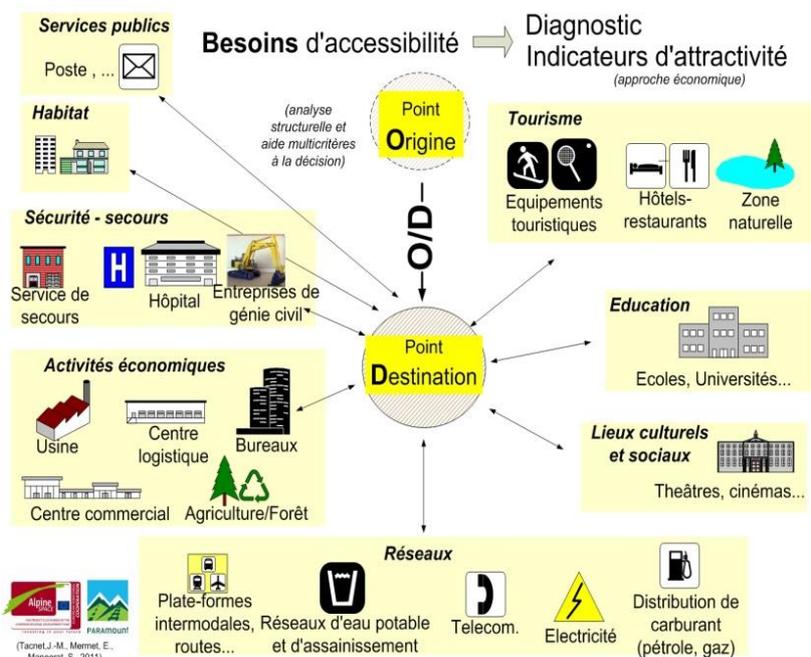


Figure 8 : Identification des facteurs d'attractivité sur la base de critères socio-économiques (Tacnet 2012, Tacnet et al. 2013).

Différentes méthodologies d'analyse de la vulnérabilité indirecte ont été proposées. Elles sont basées sur des approches économiques (Penning-Rowell et al. 2014) ou des analyses des propriétés structurelles des réseaux couplées avec des méthodes d'aide multicritères à la décision (Tacnet 2012, Tacnet et al. 2013, 2017).

Dans le cadre de la méthodologie proposée par Tacnet et al. (2017), l'importance et la criticité des réseaux et la perte d'accessibilité sont évaluées par rapport au niveau de conséquences attendues en fonction des zones et enjeux desservis (e.g. économie, emplois, santé, sécurité, éducation, environnement). Une route desservant une zone d'intense activité économique, des équipements de sécurité, de santé vitaux sera considérée comme importante et sa coupure associée à une forte valeur de criticité. Des méthodes telles que l'analyse des propriétés structurelles des réseaux permettent de mesurer ces niveaux d'importance et de criticité à partir d'indicateurs dits de centralité, d'éloignement calculés par application de la théorie des graphes. Elle utilise notamment des données relatives à l'existence de phénomènes tels que les inondations, avalanches, ou chute de blocs, pour définir les contraintes, des données socio-économiques liées à la population, aux activités et à la fréquentation des réseaux pour définir l'attractivité (Figure 8, Figure 9, Figure 10).

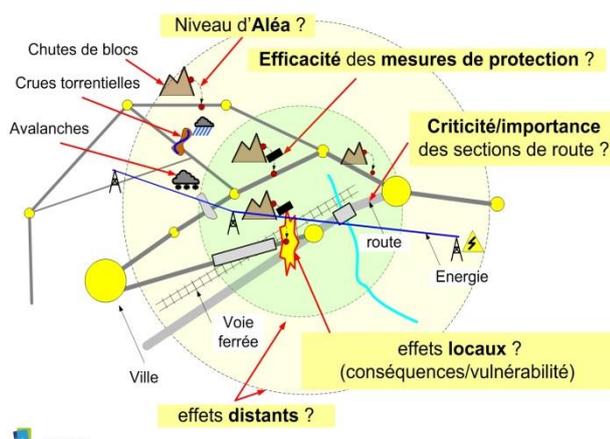


Figure 9 : L'analyse des propriétés structurelles des réseaux permet d'évaluer les conséquences associées aux phénomènes naturels (Tacnet et al. 2017)

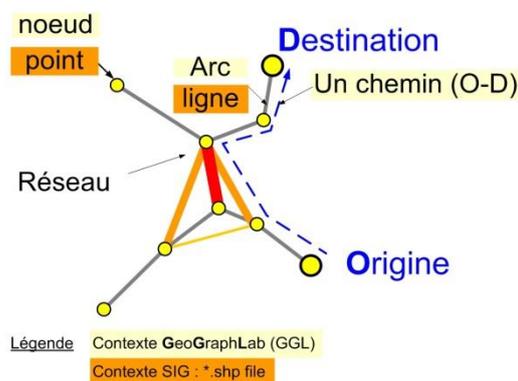


Figure 10 : Le réseau de transport est représenté par un ensemble de nœuds (les communes, les carrefours stratégiques) et d'arcs (les routes départementales, nationales etc.).(Tacnet et al. 2017)

6.3.2 Intérêt des méthodes et pistes de développement

Les méthodes présentées ci-dessus constituent une piste pour envisager de quantifier les effets et dommages indirects liés aux pertes d'accessibilité. Ces approches s'inscrivent aussi dans le cadre d'une analyse territoriale, stratégique de mise en œuvre des plans d'action et de prévention de type PAPI, StePRIM (i.e. Stratégie territoriale pour la prévention des risques en montagne) et autres approches intégrées de gestion des risques. Des prototypes d'outils opérationnels open source existent (e.g. plateforme GGLWeb⁵) pour une application aux problématiques de décision associées notamment en termes d'évaluation de vulnérabilité indirecte en permettant l'évaluation de : 1) la vulnérabilité associée aux risques en montagne (perte de la fonction de liaison liée aux coupures de routes et/ou voies ferrées) en tenant compte des effets distants et indirects, notamment de nature socio-économique ; 2) la criticité des tronçons des réseaux (de transport routier, en première approche) en lien avec les stratégies de protection; 3) la résilience des réseaux (évaluation quantitative de la perte d'efficacité en cas de perturbation, caractérisation des flux détournés).

Une réflexion sur la mise à disposition généralisée d'un outil de ce type pourrait être étudiée pour permettre aux donneurs d'ordre et bureaux d'études de réaliser ces analyses si elles sont demandées dans le cadre des AMC.

6.3.3 Autres Dommages indirects

La nature des dommages indirects causés par les phénomènes torrentiels ne diffère pas fondamentalement du contexte fluvial si ce n'est que les conséquences en termes d'enclavement et d'accessibilité sont plus critiques en zone de montagne que de plaine en raison du manque d'itinéraires alternatifs en cas de coupure.

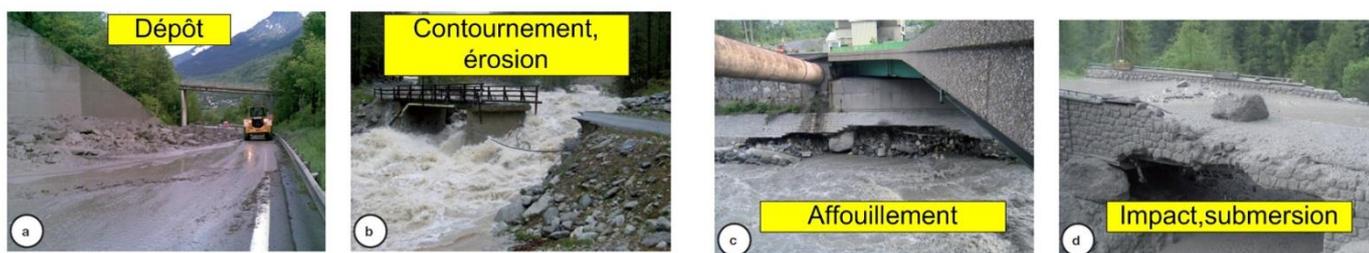
⁵ <http://artupweb.irstea.fr/>

6.3.4 Ouvrages d'art

Les ouvrages d'art implantés à proximité des cours d'eau torrentiels (e.g. soutènements) ou transversalement (e.g. ponts) sont exposés au phénomène des crues torrentielles. Ils sont soumis aux mêmes effets et contraintes que les habitations. Pour évaluer les dommages, la démarche de calcul reprend les mêmes principes de justification de la stabilité externe et interne de tout type de structure de génie civil comme les bâtiments ou les ponts: les actions associées aux effets identifiés dans le contexte des bâtiments restent valables. La rupture peut être due à un défaut de stabilité externe notamment par suppression d'appuis en fondation ou par rupture d'éléments constitutifs des ouvrages. En contexte torrentiel, des problématiques spécifiques vont apparaître notamment suite à des phénomènes d'affouillement (Figure 11) ou de transport solide et d'impacts (Figure 12). L'estimation des coûts des dommages nécessite une expertise spécifique (e.g Feraud and Picheneau 2015).



Figure 11 : Exemples de dommages aux ouvrages d'art par affouillement (Feraud and Picheneau 2015)



a) Oturation de la rampe d'accès au tunnel du Fréjus par un dépôt de lave torrentielle (photo Syndicat des Pays de Maurienne) ; b) pont du torrent de l'Ambin détruit (photo Florence de Grolée) ; c) affouillement de la culée du pont des Anglais (Arc, Valloire) (photo A. Citterio/SPM) ; d) débordement et destruction de pont du torrent de Bonne Nuit, à Valloire (DR).

Adapté d'après extrait *Torrents et Rivières de Montagne : Dynamique et aménagement*. Quae, 2015.

Figure 12 : Exemples de la diversité des dommages aux ouvrages d'art en contexte torrentiel en Savoie (Tacnet and Degoutte 2013b)

Les problématiques d'affouillement à proximité des ouvrages d'art se localisent sur les berges par érosion latérale et sur le fond du lit (Figure 13). Des mesures de conception spécifiques existent (Tacnet and Degoutte 2013b).

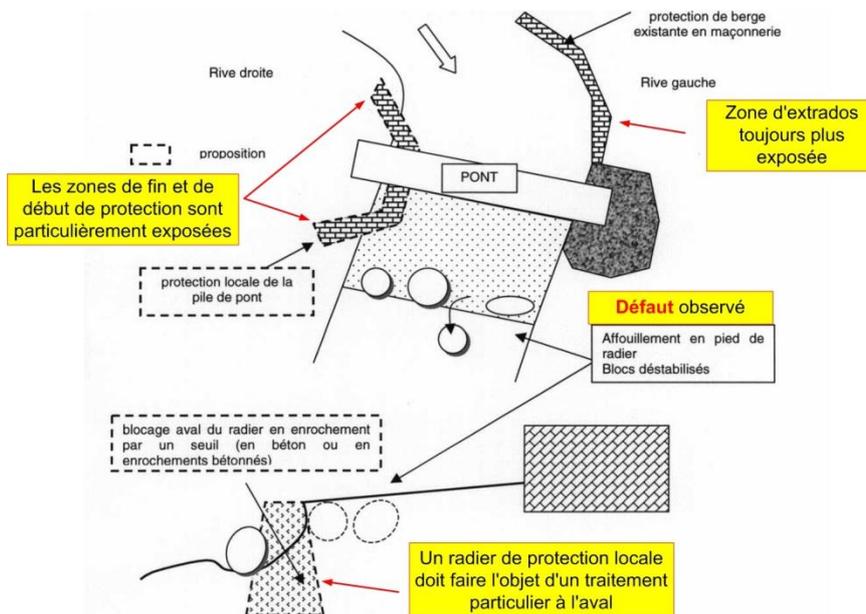


Figure 13 : Typologie et localisation des problématiques d'affouillement à proximité d'un pont en contexte torrentiel (Tacnet 2010)

6.3.5 Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection peuvent également être détruits lors des crues causant à terme une modification du niveau de protection et engendrant des coûts de réparation importants qui doivent être considérés dans les analyses de coûts globaux sous la catégorie de coût de maintenance exceptionnelle. La prise en compte dans les AMC des ouvrages menacés de ruine est décrite dans CGDD (2018 p. 42).

La problématique d'affouillement est prépondérante (Figure 14). La conception des ouvrages doit être adaptée afin de limiter les risques de dommages aux ouvrages (Tacnet and Degoutte 2013b). Pour les enrochements, la conception adéquate contient par exemple : un sabot de pied, une sélection détaillée de la taille, de l'angularité et de la qualité des blocs, un prolongement des protections qui limite le risque d'érosion à l'interface digue-protection, des conditions de pose avec une double couche d'enrochement et un appareillement.

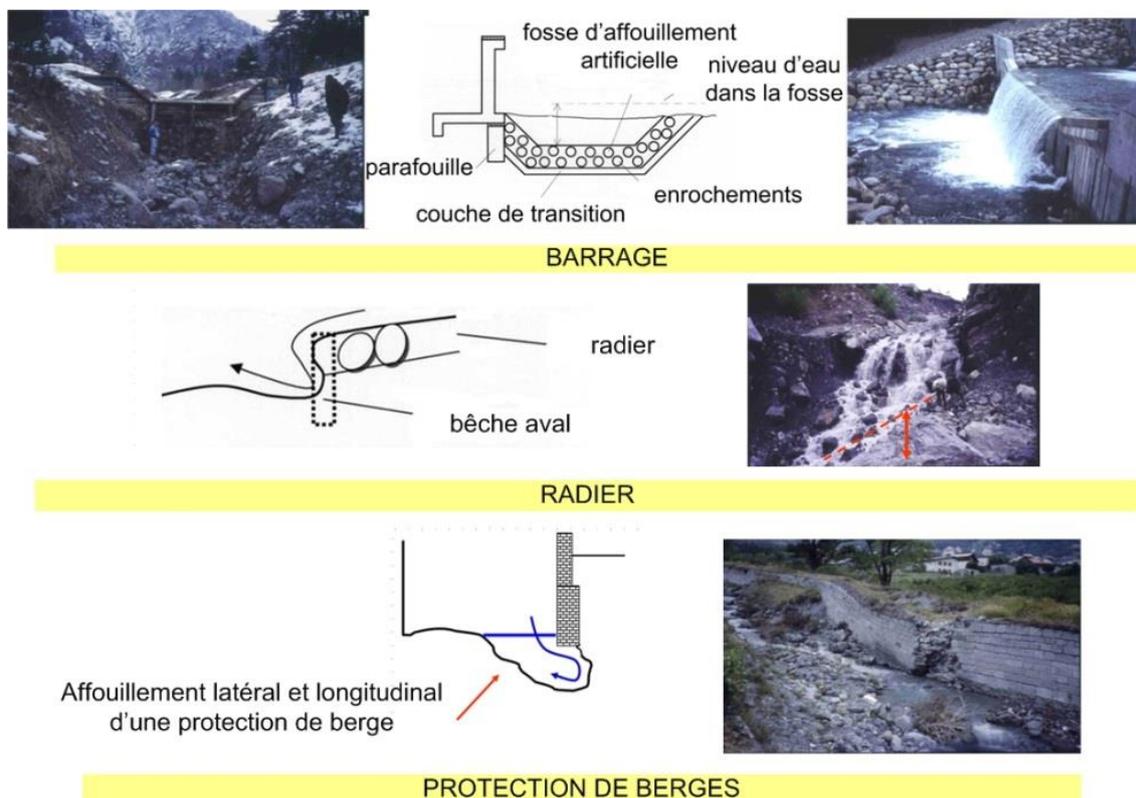


Figure 14 : Exemple de pathologies fonctionnelles (affouillement) affectant des ouvrages de protection (Tacnet 2010)

7 Evaluation des dommages

Cette section aborde trois différents points :

- Une analyse de la disponibilité et de la nature des données de dommages du bâti face aux crues torrentielles ;
- Un aperçu des quantifications des dommages utilisés à l'étranger dans le contexte opérationnel ;
- Un état de l'art des approches de quantification des risques dans la littérature scientifique.

7.1 Nature, provenance et disponibilité des données de dommages

Pour pouvoir comprendre les dommages dus aux crues torrentielles, des bases de données regroupant les dommages physiques et l'intensité de l'aléa local qui a généré ces dommages doivent être mises en place et être accessibles. Peu de bases de données nationales (voire aucune) recensent les dommages aux bâtiments résidentiels face aux crues torrentielles, e.g., l'observatoire national des risques naturels ne fournit pas ce genre de données (ONRN), les bases de données des assurances comme celle de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) existent mais sont confidentielles et donc non accessibles, les bases de données de l'ONF-RTM (i.e. RTM événements) donnent une description générale de l'événement mais ne recensent pas spécifiquement les dommages aux bâtiments résidentiels. Dans le cadre de travaux de recherche, de rares initiatives internationales ont émergé pour pallier ce manque de données. Jakob et al. (2011) utilise une base de données pour construire des relations de vulnérabilité aux phénomènes torrentiels. Cette base de données a été rendue disponible avec incitation à la compléter au niveau mondial (Government of Canada).

Devant ce manque de données documentant massivement les dommages observés après des crues torrentielles, les méthodes de collecte de données ou de rétro-analyse d'événements sont multiples (Kreibich et al. (2009) ; e.g. enquête de terrain, interview téléphonique, collecte de données basée sur un programme de compensation, collecte de données dans les municipalités). Il serait judicieux de proposer un formulaire pour normaliser la collecte de données dans le futur et/ou pour rétro-analyser des événements passés. Sur ces bases, la prédiction des dommages pourra se faire suivant une base statistique d'analyse des bases de données collectées et non, seulement, selon des méthodes basées sur des données à dire d'experts ou des modèles numériques souvent difficiles à valider.

7.2 Approches opérationnelles vues à l'étranger

La complexité du phénomène torrentiel amène souvent à opter pour des outils d'aide à la décision ou de zonage basés sur la définition de descripteurs discrets de l'aléa. L'analyse des outils quantitatifs ci-après consiste en :

- L'analyse des outils d'aide à la décision en Suisse, USA et Finlande ;
- L'analyse des outils de zonage en Autriche, Italie, Venezuela et Japon.

Ceci va permettre d'appréhender les quantités d'intensité de l'aléa retenues à l'étranger pour lesquelles certains niveaux de dommage à l'environnement construit sont attendus : les grandeurs retenues (e.g. h , $v \times h$) mais aussi les seuils associés (e.g. $h > 2 \text{ m}$ ou $v \times h > 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ définissent la délimitation de l'aléa fort d'inondation en Suisse).

7.2.1 Dans un contexte d'aide à la décision

7.2.1.1 Suisse

La Suisse, via son Office fédéral de l'aménagement du territoire (Loat and Petrascheck 1997), distingue trois types d'actions des crues à savoir l'inondation, l'érosion, et la lave torrentielle. Pour chacune de ces actions, des critères quantitatifs d'intensité sont donnés pour caractériser des classes d'aléa faible, moyen ou fort en cas d'inondation (Figure 15a), de lave torrentielle (Figure 15b), et d'érosion (Figure 15c). Ces critères sont basés sur des combinaisons de la vitesse de l'écoulement v , la profondeur de l'écoulement h , et la profondeur d'érosion p_a . Une description qualitative des dommages est donnée pour chaque type et intensité d'aléas (Figure 16).

Critères pour l'aléa inondation

Intensité forte :

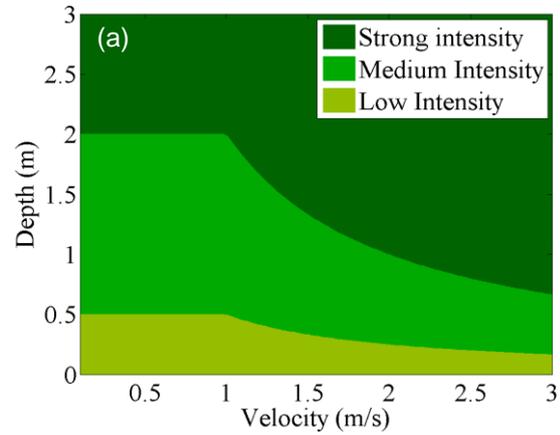
$$h > 2 \text{ m ou } v \times h > 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité moyenne :

$$0.5 \text{ m} < h < 2 \text{ m ou } 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} < v \times h < 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité faible :

$$h < 0.5 \text{ m ou } v \times h < 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$



Critères pour l'aléa lave torrentielle

Intensité forte :

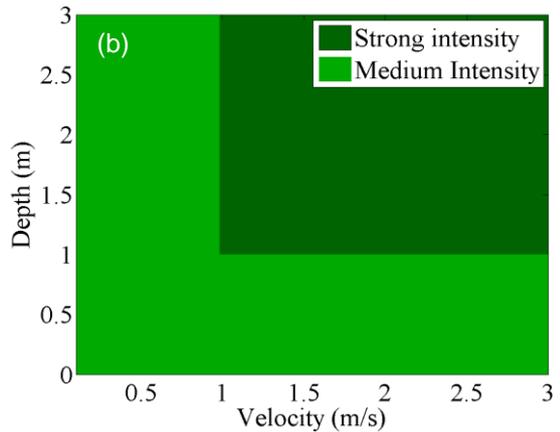
$$h > 1 \text{ m et } v > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité moyenne :

$$h < 1 \text{ m ou } v < 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité faible :

Aucune



Critères pour l'aléa érosion

Intensité forte :

$$p_a > 2 \text{ m ou } v \times h > 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité moyenne :

$$0.5 \text{ m} < p_a < 2 \text{ m et } v \times h < 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_a < 0.5 \text{ m et } 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} < v \times h < 2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Intensité faible :

$$p_a < 0.5 \text{ m et } v \times h > 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

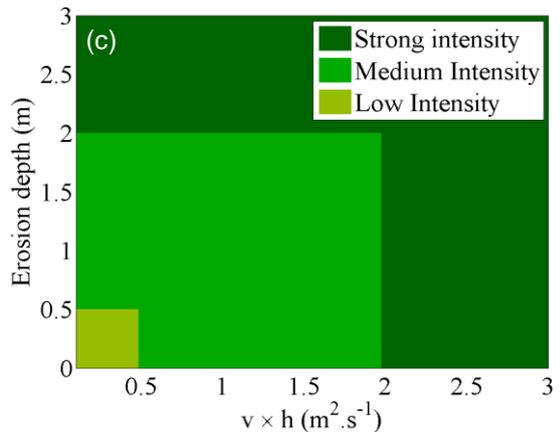


Figure 15 : Définition de l'intensité de l'aléa en Suisse pour les cas (a) d'inondation, (b) de lave torrentielle, et (c) d'érosion (Loat and Petrascheck 1997).

Effet dommageable lors d'inondation	Effet dommageable lors d'érosion des berges	Effet dommageable lors de débordements de laves torrentielles
intensité forte	intensité forte	intensité forte
Lors de grandes hauteurs d'eau , le rez-de-chaussée d'un bâtiment est entièrement inondé, les chemins de fuite dans les étages supérieurs ou sur le toit peuvent être coupés. Les bâtiments seront rarement détruits, mais le rez-de-chaussée et les caves fortement endommagés. Lors de vitesse d'écoulement élevées, des contraintes dynamiques se produisent et peuvent détruire un bâtiment. Il faut compter avec une grande quantité de matériaux charriés, des phénomènes d'érosion locaux et des dépôts de pierres et de blocs. Les objets faisant obstacle et les angles des bâtiments sont particulièrement menacés à cause de la concentration du courant à cet endroit. Les personnes et les animaux dans les bâtiments sont menacés.	Par le sapement des fondations, il y a menace d'un soudain effondrement du bâtiment; de ce fait les personnes et les animaux sont en danger dans les bâtiments. Lors du déplacement du lit d'un cours d'eau, les surfaces concernées feront partie du cours d'eau et ne seront plus utilisables sans mesures d'assainissement importantes.	L'effet de pression du front de la coulée, souvent encore renforcé par la force de poussée de blocs isolés, peut conduire à la destruction soudaine des bâtiments. Les personnes et les animaux sont en danger dans les bâtiments. L'effet dommageable est augmenté par les dépôts importants d'alluvions et d'éboulis.
intensité moyenne	intensité moyenne	intensité moyenne
L'eau pénètre dans les bâtiments, les fenêtres peuvent se briser. Il faut s'attendre à un fort charriage et localement à de l'érosion et de l'alluvionnement. Les personnes et les animaux à l'extérieur et dans les véhicules sont menacés. Dans les bâtiments, une retraite vers les étages supérieurs est la plupart du temps encore possible.	Dans ce cas, les bâtiments normalement fondés avec sous-sols excavés ne seront pas détruits par l'érosion. Si l'objet se situe pourtant dans une zone de déplacement du lit du cours d'eau, il faut vérifier en plus la pression du courant (si le critère suivant est rempli: $v \times h < 2m^2/s$). Ce critère n'est en général pas rempli dans un chenal avec un écoulement de plus de $20m^3/s$, et les zones concernées sont alors classées dans la zone rouge.	Malgré leur faible épaisseur, les débordements de laves torrentielles sont dangereux à cause des blocs transportés. Les bâtiments peuvent être endommagés. Les personnes et les animaux à l'extérieur sont en danger.
intensité faible	intensité faible	intensité faible
L'eau qui pénètre éventuellement dans les maisons peut être facilement maîtrisée avec des moyens relativement simples. Les étages en sous-sol sont cependant menacés. Il n'existe en général aucun danger pour les personnes et les animaux. Lors d'un événement situé à la limite supérieure de cette classe de danger, des véhicules peuvent être emportés.	L'entraînement de la couche d'humus et des affouillements peuvent se produire au voisinage d'obstacles. Les faibles intensités auront lieu seulement dans les petits cours d'eau. Dans la zone de déplacement possible du lit du cours d'eau, il faut vérifier en outre la pression du courant (c'est-à-dire si le critère suivant est rempli: $v \times h < 0,5m^2/s$).	N'existe pratiquement pas pour ce type de danger.

Figure 16 : Description qualitative des dommages pour chaque type et intensité d'aléa (Loat and Petrascheck 1997).

Sur ces bases, la quantification économique des dommages est ensuite faite grâce au logiciel EconoMe (SLF). L'utilisation de ce logiciel est obligatoire pour prouver la rentabilité économique de tout projet de protection. Un guide méthodologique regroupant les principes de calcul a été édité (Bründl et al. 2015). Pour un bien donné G , le dommage économique, exprimé en francs suisses (CHF), est calculé selon la formule suivante :

$$A_w(G)_{i,j} = P(rA)_j \times SE(G)_{i,j} \times W(G)_i \times (1 - \varepsilon_i),$$

où, $P(rA)_j$ est la probabilité d'occurrence spatiale du scénario j , $SE(G)_{i,j}$ est la vulnérabilité de l'élément de type i (e.g., un bâti résidentiel), $W(G)_i$ est la valeur de l'élément de type i , ε_i est un facteur de protection de l'élément de type i . Pour les inondations, la vulnérabilité du bâti résidentiel est définie comme étant égale à 0.02, 0.2, et 0.3 pour les intensités d'aléa faible, moyen, et fort, respectivement (Bründl et al. 2009). Pour les laves torrentielles, la vulnérabilité du bâti résidentiel est définie comme étant égale à 0.02, 0.4, et 0.6 pour les intensités d'aléa faible, moyen, et fort, respectivement. Pour calculer le dommage moyen de tous les éléments de type i (en CHF), la somme sur tous les éléments de type i est faite :

$$A_w(G)_j = \sum_i A_w(G)_{i,j}.$$

7.2.1.2 USA

Les États-Unis, via son organisation intitulée FEMA (Federal Emergency Management Agency), développent des approches pratiques de calcul de pertes dues aux inondations à travers le modèle Hazus (FEMA 2012). Dans le manuel technique, il est établi que sous une vitesse de 2 ft.s^{-1} (i.e. 0.61 m.s^{-1}), le potentiel de ruine est extrêmement bas et que les dommages sont dus à de la submersion seulement. Les courbes de dommages vitesse-hauteur relient les couples de vitesse-hauteur à un potentiel de ruine. Ces courbes ont été développées pour différents nombres d'étages et différents matériaux : bois (Figure 17), maçonnerie, béton, acier, et « manufactured buildings », qui sont des bâtiments communs en Amérique du Nord et qui pourraient être assimilés à du bâti préfabriqué en France. Ces courbes vitesse-hauteur s'utilisent selon cette règle : si le couple vitesse-hauteur indique la ruine, les pertes sont fixées à 100%, sinon les pertes sont fixées via une autre courbe fonction de la hauteur (Figure 18) qui donne les pertes dues uniquement au phénomène de submersion.

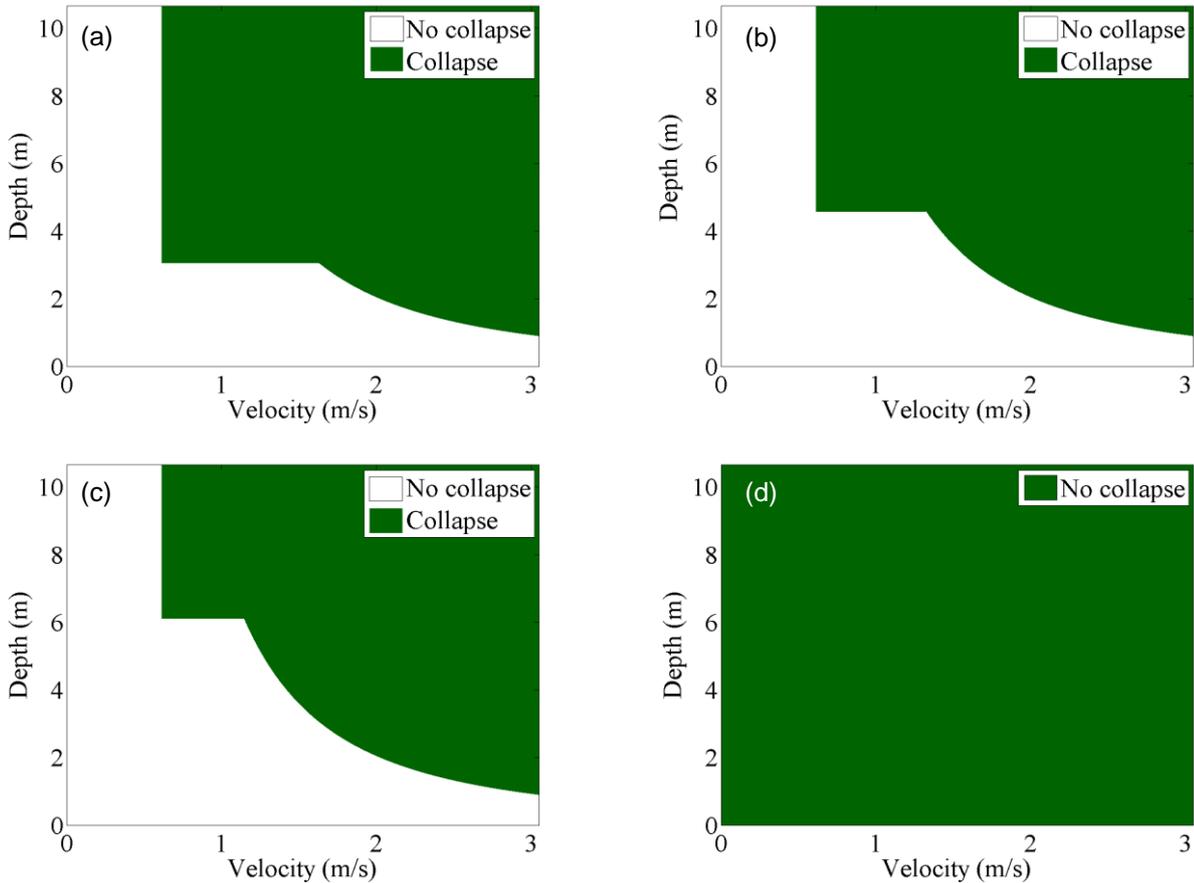


Figure 17 : Courbes de dommages vitesse-hauteur pour des bâtis en bois de (a) un étage, (b) deux étages, (c) trois étages, et (d) quatre étages et plus.

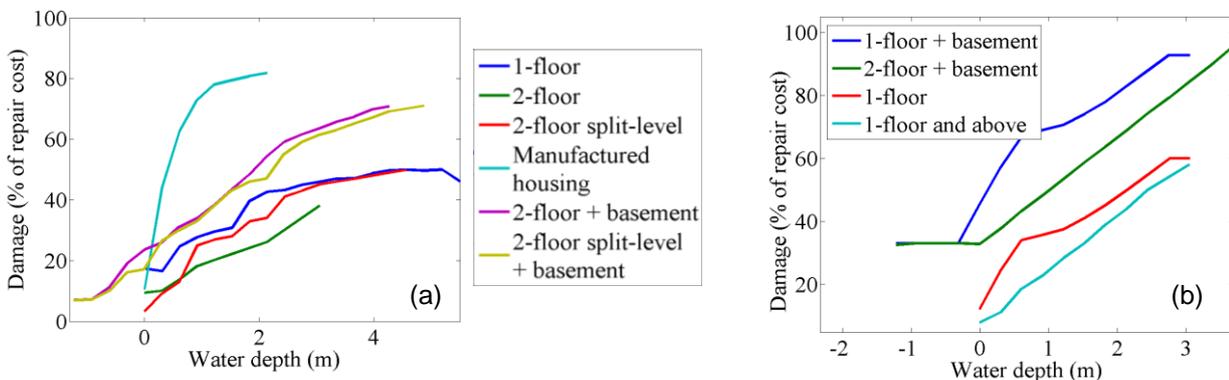


Figure 18 : Courbes de dommages fonction de la hauteur pour les dommages: (a) structuraux et non-structuraux; (b) contenu

7.2.1.3 Finlande

Un rapport technique finlandais de Karvonen et al. (2000) fournit des recommandations de valeurs de paramètres, basés sur la vitesse et la hauteur des écoulements, pour caractériser les dommages structuraux totaux et partiels lors d'une crue. Cette étude se base sur une bibliographie étendue des méthodes numériques (Black 1975) et empiriques (Sangrey et al. 1975, Clausen and Clark 1990) qui ont été développées sur du bâti similaire au bâti Finlandais. Les recommandations sont données pour des valeurs de vitesse et des valeurs du produit vitesse fois hauteur d'écoulement pour les bâtiments (a) non-ancrés à ossature en bois, (b) ancrés à ossature en bois, et (c) en maçonnerie, béton et briques (Figure 19).

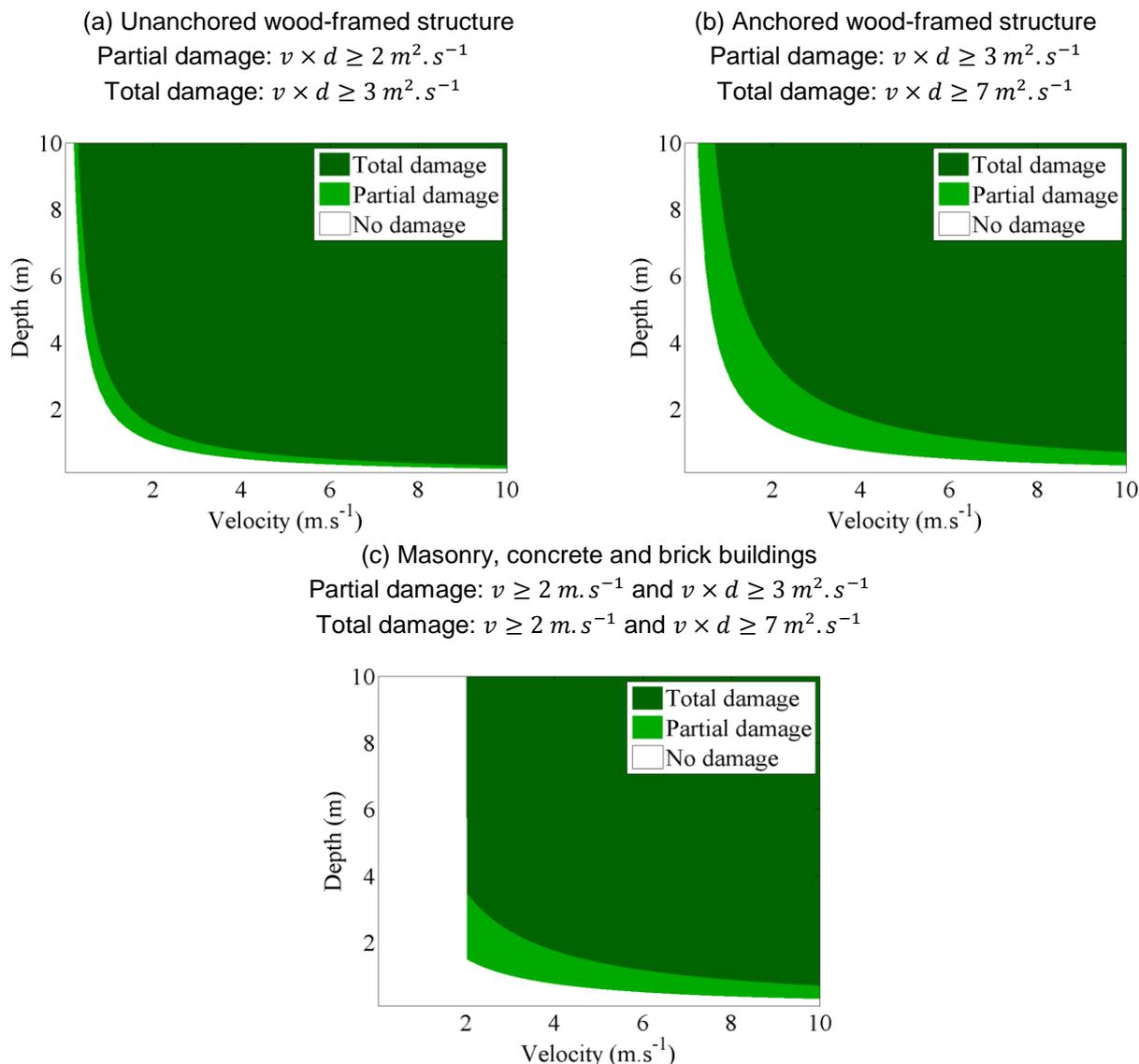


Figure 19 : Paramètres de dommage recommandés pour approcher les dommages structuraux des maisons en Finlande pour (a) du bâti non-ancré à ossature en bois, (b) du bâti ancré à ossature en bois, et (c) du bâti en maçonnerie, béton et briques (Karvonen et al. 2000).

7.2.2 Dans un contexte de zonage

Certaines approches proposent de baser les limites du zonage sur des critères de déplacements des personnes dans l'écoulement (Milanesi et al. 2014).

La réglementation en **Autriche** définit deux classes d'intensité d'aléas (i.e. fort ou moyen) pour chacun des types de phénomènes de crues : les inondation de plaine et les crues torrentielles (Faber 2006). Les intensités sont délimitées par les couples hauteur d'inondation/vitesse de l'écoulement (Figure 21a-b). Pour les crues torrentielles, la limite de hauteur entre intensité faible et intensité moyenne est donnée par l'équation :

$$1.5 - \frac{v^2}{2g}$$

En **Italie** dans la Province Autonome de Trente (ONF-RTM 2018), l'intensité d'un phénomène torrentielle est considérée :

- forte si $h > 1 \text{ m}$, ou $v > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ou $h_d > 1 \text{ m}$,
- moyenne si $0.5 < h \leq 1 \text{ m}$, ou $0.5 < v \leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ou $0.5 < h_d \leq 1 \text{ m}$,
- faible si $h \leq 0.5 \text{ m}$, ou $v \leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ou $h_d \leq 0.5 \text{ m}$.

La Figure 21c illustre la délimitation des intensités en fonction de la vitesse et de la hauteur de l'écoulement.

Au **Venezuela**, trois intensités sont définies (i.e. fort, moyen, faible) pour les inondations et les laves torrentielles (Jakob et al. 2005).

- Pour les inondations, l'intensité d'un phénomène est considérée (Figure 21d) :
 - forte si $h > 1.5 \text{ m}$, et $v \times h > 1.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - moyenne si $0.5 < h \leq 1.5 \text{ m}$, ou $0.5 < v \times h < 1.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - faible si $0.1 < h < 0.5 \text{ m}$, et $0.1 < v \times h < 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pour les laves torrentielles, l'intensité d'un phénomène est considérée (Figure 21e) :
 - forte si $h > 1 \text{ m}$, ou $v \times h > 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - moyenne si $0.2 < h \leq 1 \text{ m}$, et $0.2 < v \times h < 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - faible si $0.2 < h < 1 \text{ m}$, et $v \times h < 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pour chaque intensité, une description des conséquences attendues en termes de pertes humaines et physiques est succinctement donnée (Figure 20).

Hazard level	Map color	Description
High	Red	Persons are in danger both inside and outside their houses. Buildings are in danger of being destroyed.
Medium	Orange	Persons are in danger outside their houses. Buildings may suffer damage and possible destruction depending on construction characteristics.
Low	Yellow	Danger to persons is low or non-existent. Buildings may suffer little damage, but flooding or sedimentation may affect house interiors.

Figure 20 : Description des conséquences attendues en fonction de l'intensité de l'aléa au Venezuela (Jakob et al. 2005).

Au **Japon**, comme expliqué par Milanese et al. (2014), la limite de zonage fort et moyen est faite par un critère sur la vitesse et la hauteur de l'écoulement. L'aléa est caractérisé comme fort lorsque la force induite par la pression dynamique du fluide (i.e. $\rho v^2 [N \cdot m^{-2}]$) dépasse la résistance caractéristique des bâtiments en bois (i.e. $\frac{35300}{h(5.6-h)} [N \cdot m^{-2}]$).

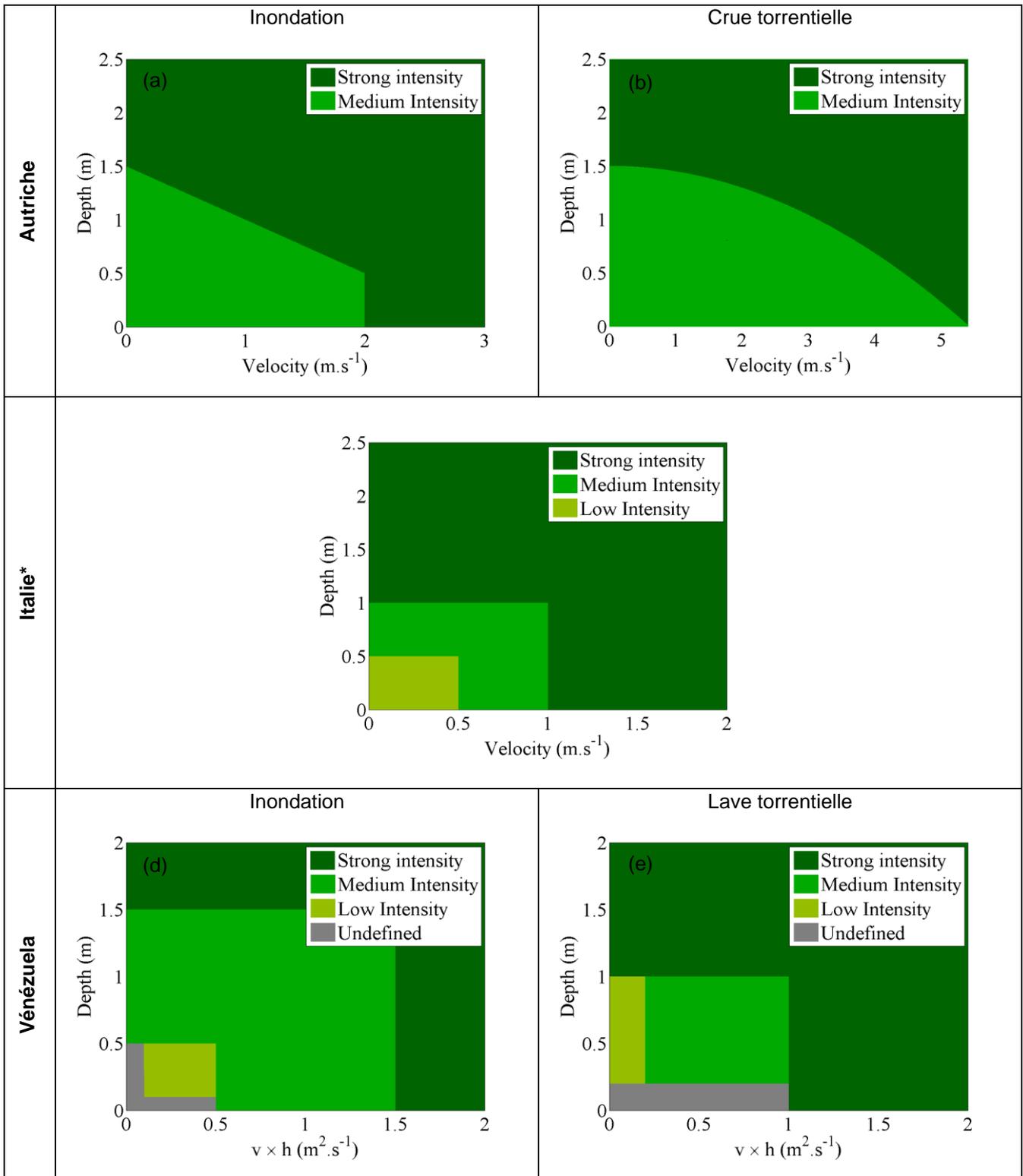


Figure 21 : Délimitation des zonages d'intensité des phénomènes inondation et crues torrentielles en Autriche, Italie (*Province autonome de Trente) et Venezuela.

7.3 Approches scientifiques : état de l'art

Cette section décrit des travaux proposés dans le cadre de la recherche scientifique. La quantification des dommages dans ce contexte est faite via des courbes de vulnérabilité ou fragilité. Pour rappel, ces courbes traduisent la susceptibilité d'un élément étudié à être endommagé par une intensité d'aléa donné et elles sont quantifiées en fonction de l'aspect de l'élément que l'on souhaite étudier, e.g., ses aspects physique, social, économique, ou environnemental (UNISDR). La fragilité se réfère souvent à la quantification de dommages physiques pour une intensité d'aléa, tandis que la vulnérabilité se réfère souvent à la quantification des pertes (e.g., pertes économiques, pertes humaines) pour une intensité d'aléa. La fragilité et la vulnérabilité peuvent être définies sous hypothèse déterministe ou probabiliste. Les deux sous-sections suivantes introduisent les approches permettant de quantifier : 1) des ratios de pertes ; 2) une probabilité d'atteinte d'un niveau de dommage.

7.3.1 Approches exprimant un ratio de pertes

De nombreuses courbes de vulnérabilité déterministes, qui expriment un ratio de pertes en fonction de l'intensité d'aléa, sont disponibles (Figure 22). Elles sont dérivées empiriquement par le biais de données (e.g., collecte directe de données aux sinistrés, aux assurances, aux municipalités, ou via des rapports, via l'évaluation par photos). Le type d'aléa le plus représenté est la lave torrentielle. Totschnig and Fuchs (2013) proposent une approche qui conduit à l'obtention d'une même courbe pour les aléas de type « lave torrentielle » et « crue fluviale avec transport de sédiment ». Le ratio de pertes, exprimé par une valeur entre 0 et 1, est variablement défini : le ratio entre les pertes économiques et la valeur de reconstruction du bâti (Akbas et al. 2009, Quan Luna et al. 2011, Totschnig and Fuchs 2013), le ratio entre les pertes économiques et la valeur marché du bien (Totschnig et al. 2011, Papathoma-Kohle et al. 2012, Ciurean et al. 2017), le ratio entre les pertes économiques et la valeur de réhabilitation du bien (Fuchs et al. 2007). L'intensité d'aléa est majoritairement exprimée en hauteur de dépôt. Quelques auteurs ont cherché à exprimer ces ratios de pertes en fonction d'autres indicateurs d'intensité. Quan Luna et al. (2011) dérive des courbes en fonction de la pression d'impact, de la hauteur du fluide et non du dépôt, de la vitesse cinématique (Figure 23a, b, c). Totschnig and Fuchs (2013) et Totschnig et al. (2011) établissent des courbes où l'intensité est définie comme le ratio entre la hauteur de dépôt et la hauteur du bâti (Figure 23d).

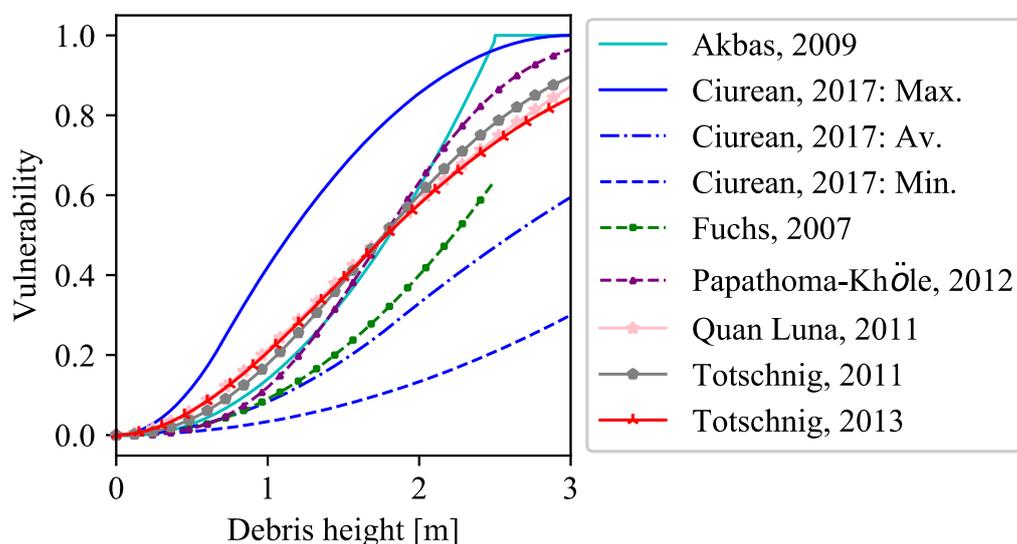


Figure 22: Courbes de vulnérabilité de la littérature où l'intensité de l'aléa est exprimée par la hauteur de dépôt.

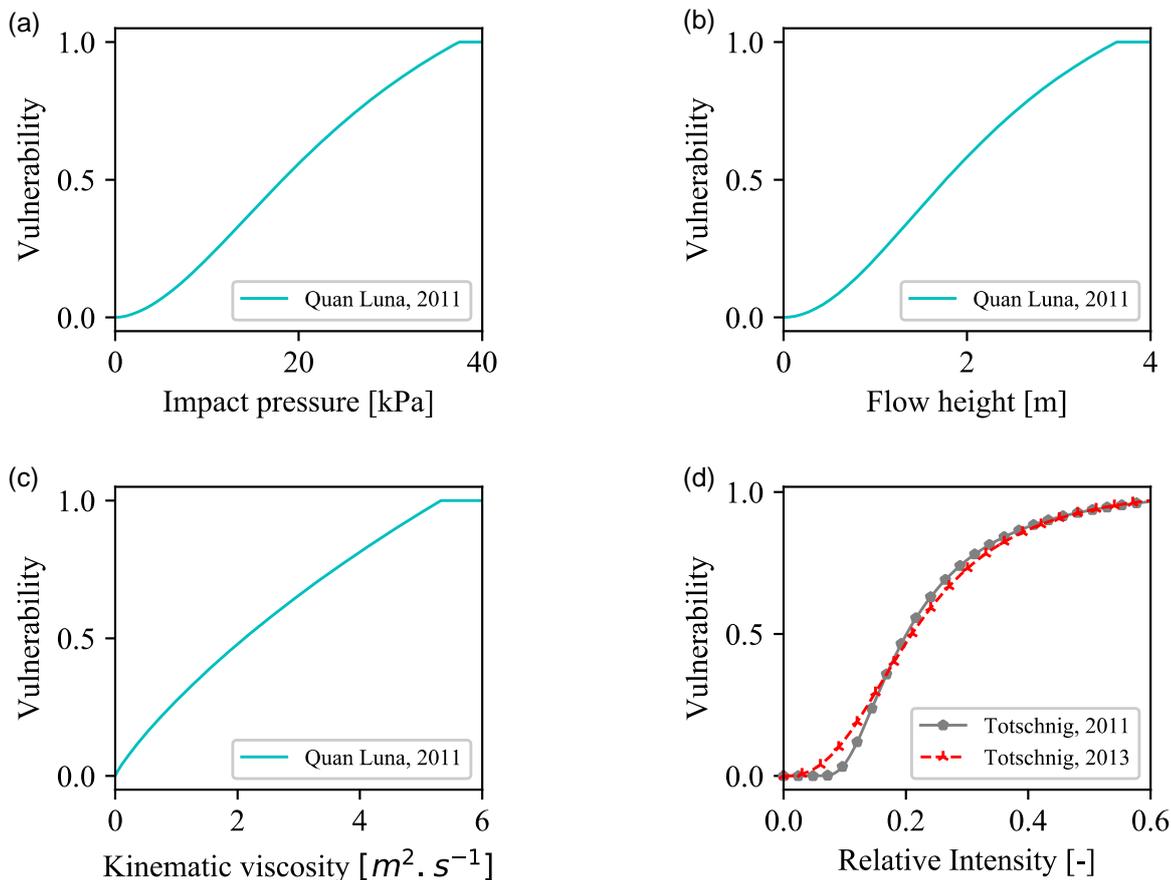


Figure 23 : Courbes de vulnérabilité de la littérature où l'intensité de l'aléa est exprimée par : a) pression d'impact, b) hauteur de l'écoulement, c) vitesse cinématique, d) hauteur relative du dépôt par rapport à la hauteur du bâti

7.3.2 Approches exprimant une probabilité d'atteinte d'un niveau de dommage

Par contraste avec le nombre de courbes déterministes de pertes précédemment présentées, seul un travail propose des valeurs de probabilité d'atteinte d'un niveau de dommage en fonction d'une intensité d'aléa (Jakob et al. 2011). L'intensité d'aléa est exprimée selon la variable $I_{DF} = h \times v^2$, fonction de deux valeurs d'intensité élémentaire, i.e. le produit de la hauteur de l'écoulement avec sa vitesse au carré. Cette intensité d'aléa est systématiquement utilisée sous la forme de classes liées à des intervalles d'intensités de $I_{DF} = h \times v^2$: 0-1, 1-10, 10-100, 100-1,000 , >1,000

Quatre classes de dommages ont été définies pour classer les dommages :

- (I) de l'eau chargée en sédiments est entrée dans le bâti au rez-de-chaussée ou sous-sol, de la rénovation sera nécessaire, les pertes assurantielles ne dépassent pas 25% ;
- (II) quelques éléments structuraux/portants sont endommagés et pourraient être réparés avec un effort majeur, les pertes assurantielles sont comprises entre 25 et 75% ;
- (III) les dommages sur les parties structurales/portantes cruciales du bâti (type poteaux, colonnes, murs porteurs) vont très probablement nécessiter une reconstruction complète du bâti, les pertes assurantielles sont supérieures à 75% ;
- (IV) la structure est totalement détruite et/ou totalement déplacée de son emplacement initial, les pertes assurantielles sont de 100%.

Ce travail est basé sur des retro-analyses des 75 cas⁶ de bâtis soumis à des laves torrentielles (debris flows en anglais) à travers le monde. Sur l'ensemble de ces cas, des valeurs de hauteurs, vitesses (min et max), taille des blocs, volume et débit au pic ont été évalués à dire d'expert ou sur la base de documents existants. Les probabilités d'être dans une classe de dommage à une intensité d'aléa donnée sont déduites par calcul du ratio du nombre de bâtis dans cette classe de dommage sur le total du nombre de bâtis touché par une intensité d'aléa donnée (Figure 24).

⁶ La base de donnée est téléchargeable ici <http://chis.nrcan.gc.ca/QRA-EQR/index-en.php#debris>

Damage class	Number of cases					Insured loss (%)
Complete destruction (IV)	0	1	4	12	6	100
Major structural damage (III)	0	4	6	5	0	>75
Some structural damage (II)	3	9	6	1	0	25–75
Some sedimentation (I)	7	4	0	0	0	<25
I_{DF}	0–1	1–10 ¹	10 ¹ –10 ²	10 ² –10 ³	>10 ³	

Figure 24 : Table de synthèse du nombre de cas ayant subi des dommages de classes I à IV et des impacts selon les différentes classes d'intensité de lave torrentielle (I_{DF}), tiré de (Jakob et al. 2011)

La Figure 25 montre sous forme graphique les courbes équivalentes déduites des données de la Figure 24 où une interpolation linéaire a été retenue pour relier les points.

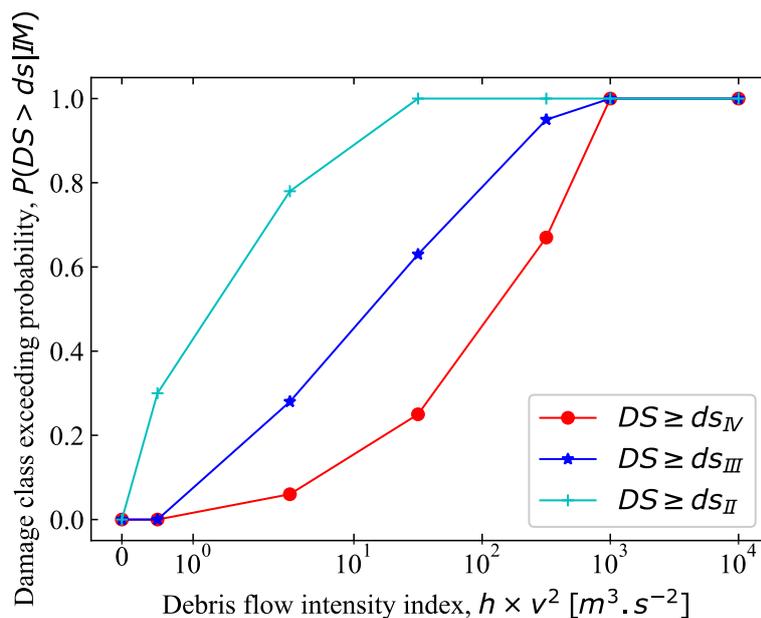


Figure 25 : Probabilité de surpasser un état de dommage sachant une intensité d'aléa exprimée en hauteur et vitesse (Jakob et al. 2011).

Les structures analysées sont très diverses et ont été regroupées pour l'analyse. La base de données de l'auteur est composée des catégories suivantes : structure de type cabane, structure à ossature de bois, structure en béton, infrastructures (i.e. ponts, routes, pipeline), structure en maçonnerie, et une catégorie regroupant les structures dont le matériau n'est pas connu.

Des échanges techniques ont eu lieu en 2018 avec M. Jakob à l'occasion de la préparation de ce rapport. Il indiquait qu'un certain nombre de nouvelles données issues d'événements ayant eu lieu après sa publication pourraient venir enrichir cette base de données. Le domaine d'utilisation, initialement limité aux laves torrentielles, pourrait être étendu aux crues de charriage après contrôle de la formulation retenue pour l'intensité de l'aléa. Il faudra au préalable voir comment intégrer et prendre en compte au mieux les problèmes d'affouillements en complément des problèmes d'impact déjà pris en compte.

8 Quelques pistes de développement

8.1 Améliorer les retours d'expérience sur les événements

Les retours d'expérience sont essentiels pour déterminer et enrichir la connaissance relative à l'effet des phénomènes sur les structures. Ces informations proviennent de sources variables (e.g., communes, services techniques, assurance) et s'avèrent plus ou moins complètes et accessibles. Sur ce point, on pourrait regretter que les bases de données de dommages économiques telles que celles collectées par la CCR ne soient pas largement diffusées ou a minima diffusées aux instances, organismes de décision et de recherche publique en charge de la quantification des dommages. Dans le cadre du dispositif CATNAT, et par le fait qu'elle reçoive une garantie illimitée de l'Etat en cas de catastrophes déclarées, la CCR réassure une grande majorité des compagnies d'assurances privées. Ceci lui permet de collecter d'importantes données de dommages économiques liés aux catastrophes naturelles. Ces données collectées ne sont malheureusement pas accessibles, ainsi que les paramètres des courbes de dommage que la CCR est amené à développer grâce à ces données (e.g., Moncoulon et al. 2014, p.2474). Tout en ayant conscience des enjeux de confidentialité et du contexte économique associé à l'activité d'assurance, la question de l'accessibilité est donc posée pour permettre d'envisager des progrès significatifs.

Une autre piste de progrès concerne l'harmonisation des procédures et modes de collecte des retours d'expérience : l'expertise requise est en effet multifactorielle et mobilise par exemple des compétences en hydraulique et génie civil. Sur la base de ce que propose la FEMA ou Papathoma-Kohle et al. (2012), des fiches de collecte de dommages peuvent être développées et pourraient être utilisées pour analyser immédiatement après les événements ou pour rétro-analyser des événements passés. Sur la base de ces formulaires et par le biais de l'expérience d'adaptation et d'utilisation de fiches de dommage dans le contexte du sismique (cf. Favier et al. (2017) dont les données ont été collectées grâce à une adaptation du formulaire développé aux USA par Mitrani-Reiser et al. (2012)), une fiche préliminaire est proposée en **Annexe D**. Cette fiche est une proposition et nécessitera encore du travail de développement et de validation entre spécialistes avant publication et utilisation définitives.

→ **En synthèse, le manque de données ou d'accessibilité aux données qui existent limitent à la fois la possibilité de valider les méthodes de caractérisation des aléas et le développement des méthodes d'estimations des dommages. Standardiser le recueil des données sur la question et diffuser librement les données recueillies semblent deux pistes de progrès.**

8.2 Se référer aux travaux développés à l'étranger ou dans la littérature scientifique

8.2.1 Construire les courbes selon les classes d'aléas PPR

Compte tenu des grandes incertitudes liées à la qualification des aléas d'une part et à la construction des courbes de vulnérabilité d'autre part, il pourrait être bénéfique dans une vision court terme d'utiliser des gammes d'aléas (fort, moyen, faible) comme paramètres d'entrée des courbes de dommages.

Les classes d'intensité des zonages PPR torrentiels étant construites sur la base de la vulnérabilité du bâti, on peut s'attendre à ce que les classes d'intensités expliquent bien les endommagements potentiels aux bâtis, mais moins bien sur l'ensemble des autres enjeux (e.g. réseau, ouvrages d'art et de protection).

L'approche Suisse présentée en Section 7.2.1.1 est proche de ce concept et un travail de croisement entre données de sinistres et classes d'aléas sur des sites français touchés par des crues torrentielles connues pourrait permettre d'identifier les valeurs moyennes d'endommagement dans les zones d'aléas forts, moyens et faibles, ainsi que l'incertitude liée.

Il reste à éclaircir dans quelle mesure les approches déjà développées pour le fluvial peuvent aider à caractériser ces gammes de dommages et quelles données supplémentaires sont nécessaires.

- **A court à moyen terme il semble possible de réaliser les estimations économiques des dommages liés aux crues torrentielles par une approche simple basée sur gammes d'intensité fort, moyen, faible reliées à des dommages forts, moyens, faibles.**

8.2.2 Construire les courbes directement sur les intensités d'aléas

L'approche de Jakob et al. (2011) présentée Sections 7.2.2 et 7.3.2 exprime des probabilités d'appartenir à une classe de dommages (0-25, 25-75, 75-100, 100 [%]). A partir de la distribution en classe de dommage, une courbe de vulnérabilité peut être obtenue : si un pourcentage de pertes ($l = \{12.5, 50, 87.5, 100\}$) est associé à chacun des quatre états ($n = 4$) de dommages, il est possible de calculer la perte moyenne en utilisant les courbes présentées en Figure 25 suivant le calcul de l'espérance conditionnée des pertes :

$$E[L|IM] = \sum_{i=1}^n l_i p(ds_i|IM).$$

Cette quantification permet d'obtenir la courbe moyenne présentée en Figure 26.

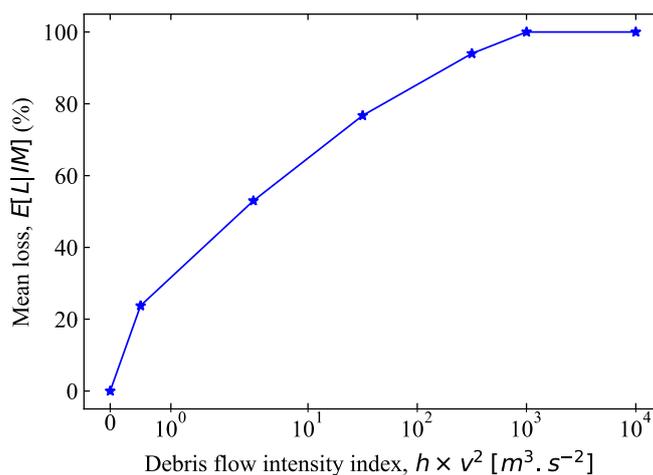


Figure 26 : Perte moyenne en fonction d'une intensité d'aléa exprimée en hauteur et vitesse (en utilisant les courbes de fragilité de Jakob et al. 2011).

Cette approche intégratrice est alternative à la réutilisation des approches déjà développées pour le fluvial.

- **Sur la base de retour d'expérience et par une procédure de comptage des bâtis ayant subi des dommages sur un échantillon assez large, il semble possible à moyen terme de proposer des courbes continues d'endommagement pour les laves torrentielles.**

8.3 Développer des approches numériques mécanistiques pour mieux caractériser les dommages structuraux

Comme présenté conceptuellement dans la Figure 5 p. 35, une alternative pour construire des courbes de dommages adaptées au torrentiel serait d'amender les courbes développées pour le fluvial en modifiant les probabilités de dommages structuraux et en augmentant les coûts de nettoyage et de remise en état des extérieurs. L'estimation des dommages structuraux est difficile à faire avec des données à dire d'expert mais peut s'appuyer sur des approches mécanistiques basées sur des calculs de génie civil. Les sections suivantes explorent la capacité de telles approches à estimer une probabilité de ruine structurale en fonction d'aléas de différentes natures.

Pour les intensités d'aléas exprimées en hauteur d'écoulement ou de dépôt, la convergence avec les données issues du cas fluvial pourrait se faire en considérant que la hauteur de dépôt est une hauteur d'écoulement. Pour le cas des affouillements, la convergence est plus compliquée et le travail réalisé pour le cas fluvial sur les dommages au second œuvre est peut-être à répéter sur le cas des affouillements.

Les résultats présentés dans cette partie sont barrés d'un filigrane « EXEMPLE ». Ces courbes visent à démontrer que l'approche fonctionne mais reposent sur un travail trop préliminaire pour être utilisées dans un cas général. Les courbes obtenues sont dépendantes des hypothèses faites sur les distributions statistiques d'entrée qu'il faudra affiner et valider si on souhaite mener l'approche plus loin. Les statistiques d'entrée doivent être représentatives du système étudié. Les calculs doivent être faits sur une structure moyenne qui représenterait un ensemble de structure de la même population ou sur une quantité assez importante de bâti de cette catégorie dont l'échantillon serait représentatif de la distribution réelle.

8.3.1 Action de flottaison du fluide

Comme précédemment présentée, la flottaison de bâti est un dommage observé pour du bâti léger de type préfabriqué ou mobile home. Ce type de bâti est plus largement utilisé en Amérique du Nord (Figure 27b-c) qu'en France, où il est surtout présent dans les campings (Figure 27a).



Figure 27 : Effets de la flottaison sur (a) les mobile homes d'un camping lors des événements de La Brague en Juin 2013 en France (Photos credits : RTM/Irstea), et (b-c) les mobile homes au Canada lors de l'événement à Cougar Creek, Alberta en 2013 (Photos credits : BGC ENGINEERING INC.).

En utilisant les équations simples de calcul de la poussée d'Archimède et en faisant des hypothèses, simplistes, sur la distribution de la géométrie et du poids des mobile-homes présents sur un site, on peut calculer la probabilité qu'un mobile home soit emporté par flottaison. Les distributions d'entrées uniformes sont : sur l'aire ($U(10,40)[m^2]$), et la masse du mobile home ($U(1500,8000)[kg]$). Dans ce calcul, le bâti est surélevé systématiquement de 55cm et il est supposé que le bâti n'est pas ancré par chaînage ou autres méthodes. La probabilité de défaillance est calculée pour différentes densités de fluide selon Huebl et al. (2017) : eau de densité $1,000 kg.m^{-3}$, crues avec charriage de densité $1,500 kg.m^{-3}$, laves torrentielles avec pierres de densité $1,850 kg.m^{-3}$ ou plutôt boueuse de densité $2,150 kg.m^{-3}$ (Figure 28).

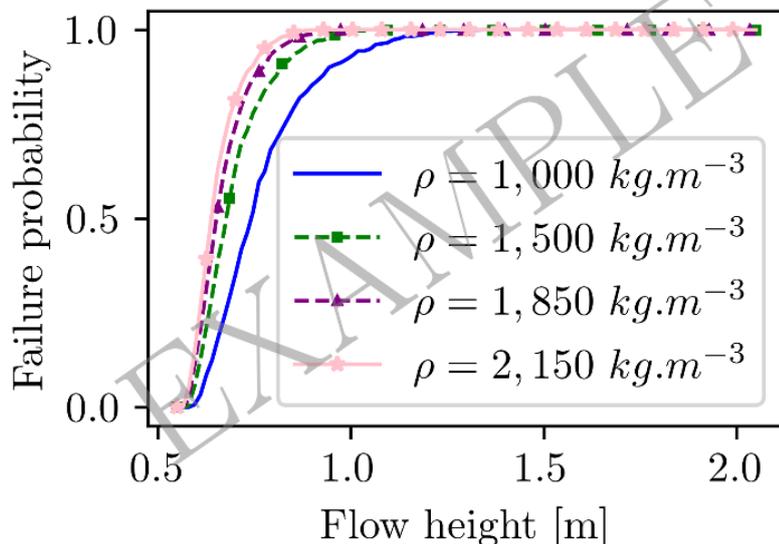


Figure 28 : Courbes de probabilité de flottaison d'un parc de bâtis légers uniformément répartis selon certaines dimensions ($a \sim U(10, 40)[m^2]$) et masses ($m \sim (1500, 8000)[kg]$), pour différentes densités de fluide ; le bâti est surélevé systématiquement de 55cm et il est supposé que le bâti n'est pas ancré par chaînage ou autres méthodes.

8.3.2 Action d'affouillement du fluide

Des dommages structurels très importants, allant parfois jusqu'à la ruine des bâtiments sont régulièrement observés en conséquences des affouillements des bâtis, en particulier à proximité des lits élargis par des érosions (Figure 29).



Figure 29 : Exemples d'action d'érosion/d'affouillement après (a) les événements de Juin 2013 dans les Pyrénées, France (Photos credits : RTM / Irstea) ; et (b) l'événement à Cougar Creek, Alberta en 2013 (Photos credits : BGC ENGINEERING INC.).

8.3.2.1 Calcul de l'intensité d'affouillement : de la profondeur à la largeur d'affouillement

Certains modèles hydrauliques peuvent calculer des érosions et donc théoriquement prédire des profondeurs d'affouillement p_a , tandis que les modèles d'étude de stabilité des structures ont besoin de connaître la longueur d'affouillement sous les fondations de la structure, i.e. la longueur de fondation qui n'est plus supportée, notée l_a (Figure 30). Pour pouvoir utiliser la sortie du modèle d'aléa, i.e. la quantification de p_a , en entrée du modèle de vulnérabilité, i.e. la quantification de l_a , une hypothèse est posée. Cette hypothèse est que la profondeur d'affouillement peut être considéré égale à la longueur d'affouillement, soit $p_a = l_a$.

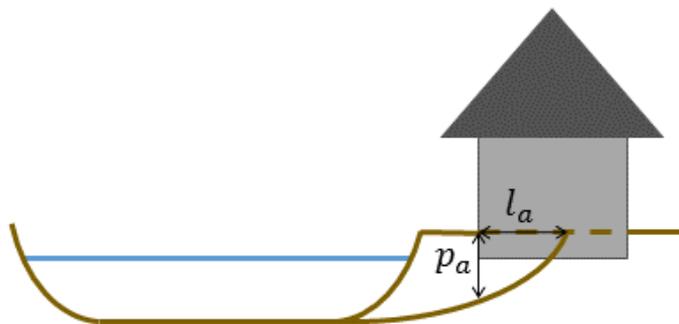


Figure 30 : Illustration de la longueur d'affouillement (l_a) et profondeur d'affouillement (p_a) touchant une maison en bordure de torrent.

La probabilité de ruine est ensuite étudiée selon plusieurs critères :

- Ruine par perte de stabilité externe, c'est-à-dire par atteinte de la capacité portante du sol ou par renversement du bâti ;
- Ruine par perte de stabilité interne, c'est-à-dire par rupture de la fondation du bâti.

8.3.2.2 Stabilité externe

En utilisant les équations simples de calculs, originellement développées pour la conception et le calcul des barrages de correction torrentielle (Deymier et al. 1995) où les phénomènes d'affouillement sont courants, et en faisant des hypothèses, simplistes (faute de données), sur la distribution de la géométrie et du poids des bâtis présents sur un site, on peut calculer la probabilité (Figure 31) pour que les fondations d'un type de bâti soient détruites :

- Par atteinte de la capacité portante du sol (non étudiée ici) ou,
- Par renversement du bâti.

Les distributions d'entrées uniformes portent : sur la longueur ($U(4,20)[m]$), le nombre d'étages ($U(1,2)[-]$ avec sortie seulement en entier), et le poids propre du bâti ($superload \sim U(2.5,4.0)[kN.m^2]$ et $liveload \sim U(2.5,3.5)[kN.m^2]$). Les calculs sont illustrés et détaillés en **Annexe 10E**.

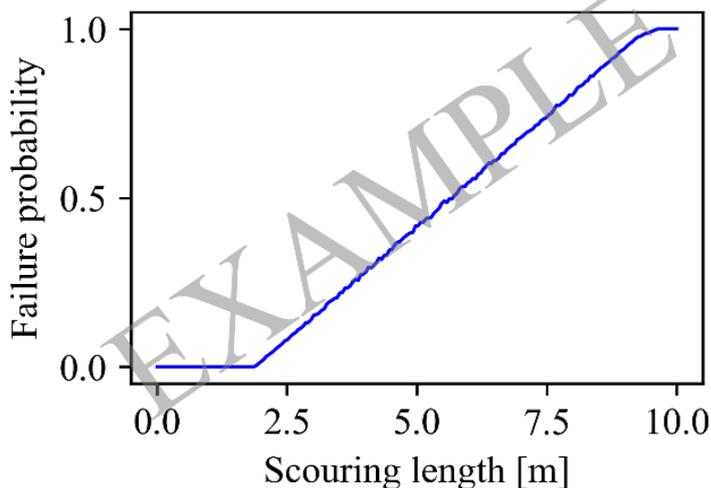


Figure 31 : Courbes de probabilité de perte de stabilité externe d'un bâti dont les fondations sont de type radier et dont les caractéristiques sont tirées selon : sa longueur ($U(4, 20)[m]$), le nombre d'étages ($U(1, 2)[-]$ avec sortie seulement en entier), et le poids propre du bâti ($superload \sim U(2.5, 4.0)[kN.m^2]$ et $liveload \sim U(2.5, 3.5)[kN.m^2]$).

8.3.2.3 Stabilité interne

Dans cette section, la stabilité interne d'une fondation de type radier est étudiée. Comme la section précédente, les équations développées pour la conception et le calcul des barrages de correction torrentielle (Deymier et al. 1995) ont été utilisées. Des hypothèses, simplistes (faute de données), sur la distribution de la géométrie et du poids des bâtis présents sur site, ont été posées.

La probabilité pour que les fondations type radier en béton armé soient détruites par atteinte du moment en flexion ultime est quantifiée et présentée en Figure 32. Les distributions d'entrées uniformes portent : sur la longueur ($U(4,20)[m]$), le nombre d'étages ($U(1,2)[-]$ avec sortie seulement en entier), le poids propre du bâti ($superload \sim U(2.5,4.0)[kN.m^2]$) et $liveload \sim U(2.5,3.5)[kN.m^2]$, et l'épaisseur du radier ($h \sim U(15,45)[cm]$). Les calculs sont illustrés et détaillés en **Annexe 10E**.

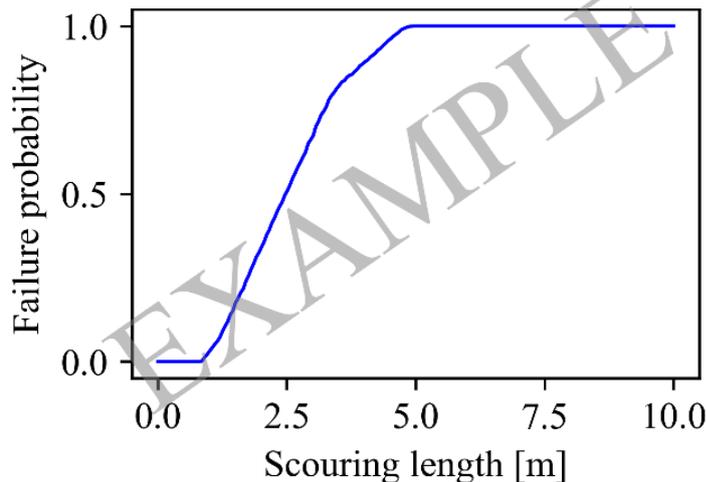


Figure 32 : Courbes de probabilité de perte de stabilité interne d'un bâti dont les fondations sont de type radier en béton armé et dont les caractéristiques sont tirées selon : sa longueur ($U(4,20)[m]$), le nombre d'étages ($U(1,2)[-]$ avec sortie seulement en entier), le poids propre du bâti ($superload \sim U(2.5,4.0)[kN.m^2]$) et $liveload \sim U(2.5,3.5)[kN.m^2]$, et l'épaisseur du radier ($h \sim U(15,45)[cm]$).

8.3.3 Action hydrostatique, hydrodynamique et impact ponctuel

Des résultats de modèles similaires pour des structures simples en béton armé impactées ont fait l'objet de publications dans plusieurs journaux scientifiques internationaux à comité de lecture. Les sollicitations étudiées sont celles d'impacts ponctuels dus à des chutes de blocs rocheux (Mavrouli and Corominas 2010, Bertrand et al. 2015) ou celles de pressions surfaciques dues à des avalanches de neige (Bertrand et al. 2010, Favier et al. 2014, 2018). Des travaux équivalents pourraient être réalisés pour les laves torrentielles.

- ➔ La spécificité des dommages liés au torrentiel est liée à l'occurrence de dommages structuraux aux bâtis. Les procédures de développement des courbes d'endommagements déjà existantes et basées sur du dire d'expert pourraient être complétées par des approches numériques mécanistiques décrivant les dommages structuraux. Trois exemples d'application ont été fournis dans ce paragraphe.

9 Conclusions et recommandations

En conclusion, ce rapport a fourni une étude détaillée des étapes de l'AMC fluviale et des possibilités d'adaptation vers le torrentiel notamment via un tableau et un code couleur synthétiques de son potentiel d'adaptabilité. Les méthodes de quantification de l'intensité de l'aléa torrentiel ont été étudiées en détail conduisant à l'établissement d'un tableau de propositions de méthodes de caractérisation de l'aléa torrentiel et paramètres de sortie dans l'état des connaissances actuelles. Les relations entre les enjeux, les caractéristiques spécifiques des crues torrentielles, et les intensités d'aléa aux potentiels dégâts ont été fournies. Un état de l'art des approches de quantifications des conséquences (i.e., dommages, pertes, intensité d'impacts fort/moyen/faible) de l'aléa torrentiel dans la littérature opérationnelle et scientifique internationale a été développé. Quelques exemples de développement et/ou leurs potentiels ont enfin été décrits suivant des méthodes empiriques (i.e. basées sur des données), à dire d'experts, ou numériques (i.e. basées sur des modèles numériques).

La liste ci-dessous propose une série de recommandations ou pistes possibles découlant émanant des développements menés dans ce rapport. Selon ses auteurs, plusieurs points devront être approfondis pour une adaptation adéquate des AMC fluviales vers le torrentiel. Il a notamment été identifié :

- La nécessité de progresser dans la caractérisation précise des aléas dans le cadre spécifique de phénomènes torrentiels. Il est ainsi nécessaire d'être concis dans la différenciation des diverses manifestations du phénomène torrentiel (e.g., charriage, lave torrentielle), la quantification des scénarios et probabilités d'occurrence (e.g. via le caractère multivarié de son intensité), les critères de magnitude et d'intensité retenus qui diffèrent des inondations de plaine, et les méthodes de quantification de l'aléa ;
- La nécessité d'un travail de collecte d'informations pour fournir une liste exhaustive des types d'enjeux spécifiques au torrentiel et améliorer la connaissance des dommages et pertes spécifiques à ces différents types d'enjeux, pour des critères d'intensité particuliers. Les données sur les conséquences des crues torrentielles doivent être collectées et rendues largement disponibles. Les connaissances des approches internationales et de la recherche scientifique doivent être diffusées dans le milieu opérationnel. La valorisation des méthodes actuelles de quantification de la vulnérabilité, et des méthodes de quantification des pertes/dommages via développement numérique, pourraient alimenter les premières quantifications des dommages dus aux crues torrentielles ;
- Définir les effets et fonctions des ouvrages de protection contre les crues torrentielles et analyser leur possible prise en compte dans les ACB et AMC constitue encore un besoin. Les ouvrages de protection dite rapprochée contre les crues torrentielles (e.g., entonement, digues, protections de berges et plages de dépôt) ont été identifiés comme compatibles avec les analyses AMC. La complexité des processus sources nous amène par contre à recommander de ne pas tenter d'inclure dans les ACB et AMC les ouvrages relevant de la correction torrentielle à la source et des forêts de protection.

10 Bibliographie

- Akbas, S. O., J. Blahut, and S. Sterlacchini. 2009. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. *Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, Strasbourg 67.
- Astrade, L., E. Ployon, and S. Veyrat-Charvillon. 2011. Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels, retours d'expériences. Pages 107–118 in S. Jaillet, E. Ployon, and T. Villemin, editors. *Images et modèles 3D en milieux naturels*. Coll Edytem.
- Bertrand, D., F. Kassem, F. Delhomme, and A. Limam. 2015. Reliability analysis of an RC member impacted by a rockfall using a nonlinear SDOF model. *Engineering Structures* 89:93–102.
- Bertrand, D., M. Naaim, and M. Brun. 2010. Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Science* 10:1531–1545.
- Black, R. D. 1975. Flood proofing rural residences. A Project Agnes Report, Pennsylvania. New York State Coll of Agriculture and Life Sciences, Ithaca. Prepared for Economic Development Administration, Washington, DC Office of Technical Assistance.
- Boncompain, I., and Y. Quefféléan. 2013. *Coûts Des Protections Contre Les Crues Torrentielles - Guide À L'attention Des Maîtres D'ouvrage, Des Maîtres D'œuvre Et Des Experts Chargés De L'évaluation Des Projets*. ONF-RTM DN.
- Brachet, M. 2018. Plages de dépôt - Retour d'expérience et analyse des modes de défaillance - Mise à jour de l'inventaire du parc des plages de dépôt et retours d'expérience approfondis. Univ. Savoie Mont Blanc.
- Brochot, S., P. Duclos, and M. Bouzit. 2003. L'évaluation économique des risques torrentiels: intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention. *Ingénieries Spécial*:53–68.
- Bründl, M., L. Ettl, A. Burkard, N. Oggier, F. Dolf, and P. Gutwein. 2015. *EconoMe – Efficacité et caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA.
- Bründl, M., H. E. Romang, N. Bischof, and C. M. Rheinberger. 2009. The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:801–813.
- Carladous, S. 2013. *Analyse critique des méthodes d'évaluation de l'efficacité économique des mesures de protection contre les risques naturels en montagne*. Univ. Paul Valéry Montpellier III.
- Carladous, S. 2017. *Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information dans le processus d'expertise : application à l'amélioration de l'efficacité des stratégies et mesures de protection contre les risques naturels en montagne*. AgroParisTech.
- Carladous, S., G. Piton, A. Recking, F. Liebault, D. Richard, J. M. Tacnet, D. Kuss, F. Philippe, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2016. Towards a better understanding of the today French torrents management policy through a historical perspective. Page 12011 *E3S Web Conf*.
- Carladous, S., J.-M. Tacnet, M. Batton-Hubert, J. Dezert, and O. Marco. 2019. Managing protection in torrential mountain watersheds: A new conceptual integrated decision-aiding framework. *Land Use Policy* 80:464–479.
- CGDD. 2018. *Analyse multicritères des projets de prévention des inondations*. Commissariat général au développement durable.
- Ciurean, R. L., H. Hussin, C. J. van Westen, M. Jaboyedoff, P. Nicolet, L. Chen, S. Frigerio, and T. Glade. 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards* 85:929–957.
- Clausen, L., and P. B. Clark. 1990. The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures. Pages 369–380 in W. R. White., editor. *International Conference on River Flood Hydraulics*. John Wiley & Sons Ltd. Hydraulics Research Limited.
- Cœur, D., M. Lang, R. Naulet, R. Burnet, and D. Strazzeri. 1998. Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes. *Ingénieries-EAT, n spécial Risques naturels*:15–26.
- Couvert, B., and B. Lefebvre. 1994. Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel. *La Houille Blanche* 3:81–90.
- D'Agostino, V. 2013. *Advances in Global Change Research*. Pages 131–146 in M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel, and F. Rudolf-Miklau, editors. *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Deymier, C., J. M. Tacnet, and N. Mathys. 1995. Conception et calcul de barrages de correction torrentielle [Design and computation of check dams]. Page 287 p. (C. Editions, Ed.). Cemagref Grenoble Pegr.
- Duchene, S. 2015. *Eléments d'adaptation des analyses coûts-bénéfices au domaine torrentiel - Contribution du retour d'expérience de la crue de juin 2013 Gave-de-Pau amont (Hautes-Pyrénées) puis application au secteur Barèges – Sers*. Univ. Reims Champagne-Ardenne.
- Faber, R. 2006. *Flood risk analysis: Residual risks and uncertainties in an Austrian context*. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.
- Favier, P., D. Bertrand, N. Eckert, and M. Naaim. 2014. A reliability assessment of physical vulnerability of reinforced concrete walls loaded by snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14:689–704.

- Favier, P., D. Bertrand, N. Eckert, I. Ousset, and M. Naaim. 2018. Assessing fragility of a reinforced concrete element to snow avalanches using a non-linear dynamic mass-spring model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18:2507–2524.
- Favier, P., F. Rivera, A. Poulos, J. A. Vázquez, J. C. de la Llera, and J. Mitrani-Reiser. 2017. Impact on Chilean Hospitals Following the 2015 Illapel Earthquake. 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017 - Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- FEMA. 2012. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Flood Model, Hazus-MH 2.1, Technical Manual. . Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA.
- FEMA. (n.d.). WORKSHEET - BUILDING. https://www.fema.gov/media-library-data/1533072580399-7e24867c55069c657d03d352427b9e85/FEMA_Form_086_0_07_08012017_worksheet_building.pdf (Accessed: 2018-11-29). . Department of Homeland Security. Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA.
- Feraud, R., and P. Picheneau. 2015. REX des inondations dans le Var (2010), Dégâts constatés sur ouvrages d'art et travaux de réparation induits, Cas des sinistres les plus importants. Journées techniques DTMed. . Cerema.
- Ferro, V., and P. Porto. 2011. Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion. *Earth Surface Processes and Landforms* 36:1007–1022.
- Fuchs, S., K. Heiss, and J. Hubl. 2007. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7:495–506.
- Givry, M., and C. Peteuil. 2011. Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel. . Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- Government of Canada. (n.d.). Quantitative Risk Assessments. <http://chis.nrcan.gc.ca/QRA-EQR/index-en.php#debris> (Accessed: 2018-11-06).
- Gras, S. 1857. Etudes sur les torrents des Alpes. Page 108 (Victor Dalmont, Ed.). . F.Savy, Paris.
- Huebl, J., G. Nagl, J. Suda, and F. Rudolf-Miklau. 2017. Standardized Stress Model for Design of Torrential Barriers under Impact by Debris Flow (According to Austrian Standard Regulation 24801). *International Journal of Erosion Control Engineering* 10:47–55.
- Hungr, O. 2005. Classification and terminology. Pages 9–23 in M. Jakob and O. Hungr, editors. Debris-flow hazards and related phenomena. . Springer.
- Hungr, O., G. C. Morgan, and R. Kellerhals. 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21:663–677.
- Jakob, M., O. Hungr, and D. M. Jakob. 2005. Debris-flow hazards and related phenomena. . Springer.
- Jakob, M., D. Stein, and M. Ulmi. 2011. Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards* 60:241–261.
- Kaitna, R., and J. Hübl. 2013. Advances in Global Change Research. Pages 111–130 in M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel, and F. Rudolf-Miklau, editors. Dating Torrential Processes on Fans and Cones. . Springer Netherlands.
- Karvonen, R., A. Hepojoki, H. Huhta, and A. Louhio. 2000. The use of physical models in dam-break analysis. . RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.
- Kelman, I., and R. Spence. 2004. An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology* 73:297–309.
- Kimura, I., and K. Kitazono. 2018. Studies on Driftwood Motions around Obstacles by Laboratory and Numerical Experiments. *E3S Web of Conferences* 40:02032.
- Kostadinov, S. 1993. Possibility of Assessment of the Slope of Siltation Based on the Some Hydraulic Characteristics of the Torrential Flows. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 45:28–33.
- Kostadinov, S., and N. Dragovic. 2013. Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams. Pages 63–88 in C. Conesa-Garcia and M. A. Lenzi, editors. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY.
- Koulinski, V., and P. Richard. 2008. Apports des modèles réduits pour la gestion des sédiments et des flottants en torrents et rivières torrentielles [Small scale models contribution to sedimentation processes and floating debris transit of torrential rivers]. *Houille Blanche* 4:90–97.
- Kreibich, H., K. Piroth, I. Seifert, H. Maiwald, U. Kunert, J. Schwarz, B. Merz, and A. H. Thieken. 2009. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:1679–1692.
- Lang, M., D. Cœur, C. Lallement, and R. Naulet. 1998. Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation: application au bassin du Guiers. *Ingénieries-EAT*:p–3.
- Liu, J., K. Nakatani, and T. Mizuyama. 2013. Effect assessment of debris flow mitigation works based on numerical simulation by using Kanako 2D. *Landslides* 10:161–173.
- Liu, J., Y. You, X. Chen, and X. Chen. 2015. Mitigation planning based on the prediction of river blocking by a typical large-scale debris flow in the Wenchuan earthquake area. *Landslides* 13:1231–1242.
- Loat, R., and A. Petrascheck. 1997. Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. . Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE) - Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT) - Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP).

- MA. 1969. Instruction F2/3 N°346 : Modification de l'instruction relative à la Restauration et à la Conservation des Terrains en Montagne et à la régularisation du régime des eaux. . Ministère de l'Agriculture, Direction des forêts. Paris.
- Mavrouli, O., and J. Corominas. 2010. Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls. *Landslides* 7:169–180.
- Mazzorana, B., F. Comiti, C. Volcan, and C. Scherer. 2011. Determining flood hazard patterns through a combined stochastic–deterministic approach. *Natural Hazards* 59:301–316.
- Mazzorana, B., and S. Fuchs. 2010. Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. *Environmental Modelling & Software* 25:1208–1224.
- Mazzorana, B., L. Levaggi, M. Keiler, and S. Fuchs. 2012. Towards dynamics in flood risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12:3571–3587.
- MEDTL. 2012. La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Vers la relocalisation des activités et des biens. . Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- MEEM. 2017. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Programme d'actions 2017-2019. . Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- Mertin, M. 2018. What is the effect of check dams? Simulating the impact of check dams on landscape evolution at centennial time scale. . Univ. Bern.
- Milanesi, L., M. Pilotti, R. Ranzi, and G. Valerio. 2014. Methodologies for hydraulic hazard mapping in alluvial fan areas. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 364:267–272.
- Mitrani-Reiser, J., M. Mahoney, W. T. Holmes, J. C. De La Llera, R. Bissell, and T. Kirsch. 2012. A functional loss assessment of a hospital system in the Bio-Bio province. *Earthquake Spectra* 28:S473–S502.
- Moncoulon, D., D. Labat, J. Ardon, E. Leblois, T. Onfroy, C. Poulard, S. Aji, A. Rémy, and A. Quantin. 2014. Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff. *Natural Hazards and Earth System Science* 14:2469–2485.
- MTES. (n.d.). Guide méthodologique - Plan de prévention des risques naturels - Guide "Cours d'eaux torrentiels. . Ministère de la Transition écologique et solidaire (en préparation).
- Nakatani, K., Y. Satofuka, T. Mizuyama, and others. 2009. One-dimensional numerical simulation for sabo damplanning using Kanako (Ver. 1.40): A case study at Cipanas, Guntur Volcanoes, West Java, Indonesia. *International Journal of Erosion Control Engineering* 2:22–32.
- Nakatani, K., T. Wada, Y. Satofuka, and T. Mizuyama. 2008. Development of "Kanako 2D (Ver. 2.00)," a user-friendly one-and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. *International Journal of Erosion Control Engineering* 1:62–72.
- Nishimoto, H. 2014. Relationship between european countries and japan in the field of erosion control at the beginning of the 20th century. Pages 4–2 Proc. of the 2014 International Debris-Flow Workshop. . National Cheng Kung University, Tawian.
- ONF-RTM. 2018. Personal communication.
- ONRN. (n.d.). Bienvenue sur le site de l'Observatoire National des Risques Naturels. <http://www.onrn.fr/> (Accessed: 2018-11-27). . Observatoire National des Risques Naturels.
- Papathoma-Kohle, M., M. Keiler, R. Totschnig, and T. Glade. 2012. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 64:2083–2105.
- Penning-Rowsell, E., S. Priest, D. Parker, J. Morris, S. Tunstall, C. Viavattene, J. Chatterton, and D. Owen. 2014. Flood and coastal erosion risk management: a manual for economic appraisal. . Routledge.
- Peteuil, C. 2010. Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises. . ONF-service RTM de l'Isère, Grenoble.
- Peteuil, C., F. Liébault, and O. Marco. 2012. ECsTREM, a practical approach for predicting the sediment yield in torrents of the French Alps [ECsTREM, une approche pratique pour predire la production sédimentaire des torrents des Alpes Françaises]. Pages 293–304 INTERPRAEVENT Conference Proceedings.
- Philippe, F., J. M. Tacnet, and S. Carladou. 2015. ACTION PROPPR - Etat des lieux et analyse critique de la prise en compte des ouvrages de protection torrentielle dans les PPR et contribution à la rédaction d'un guide PPR Torrents. . MEDDE (DGPR / SRNH) - IRSTEA.
- Piton, G., S. Carladou, O. Marco, D. Richard, F. Liebault, A. Recking, Y. Quefféléan, and J. M. Tacnet. 2019a. Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives. *La Houille Blanche*:57–67.
- Piton, G., S. Carladou, A. Recking, J. Tacnet, F. Liebault, D. Kuss, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2019b. Fonctions Des Barrages De Correction Torrentielle. *Cybergeo : European Journal of Geography* 896.
- Piton, G., F. Fontaine, H. Bellot, F. Liébault, C. Bel, A. Recking, and T. Hugerot. 2018a. Direct field observations of massive bedload and debris flow depositions in open check dams. Pages 1–8 *in* A. Paquier and N. Rivière, editors. E3S Web of Conferences. . EDP Sciences.
- Piton, G., and A. Recking. 2016a. Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–23.
- Piton, G., and A. Recking. 2016b. Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. *Journal of Hydraulic Engineering* 142:1–17.
- Piton, G., and A. Recking. 2017. The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation of mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 42:1505–1519.

- Piton, G., A. Recking, and J. Tacnet. 2018b. An attempt to classify malfunctions of steep channel flows justifying building of open check dams or other torrent control works. Pages 377–378 Proc. of the 5th IAHR Europe Congress.
- Porto, P., and J. Gessler. 1999. Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams: Field study. *Journal of Hydraulic Engineering* 125:1231–1242.
- Quan Luna, B., J. Blahut, C. J. van Westen, S. Sterlacchini, T. W. J. van Asch, and S. O. Akbas. 2011. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural hazards and earth system sciences* 11:2047–2060.
- Quefféléan, Y., S. Carladous, G. Piton, D. Kuss, M. Fouquet, and R. Tourment. 2019. Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel. Proc. of the Conf. Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations 2019.
- Recking, A. 2013. An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118:1–18.
- Recking, A., G. Piton, D. Vázquez-Tarrío, and G. Parker. 2016. Quantifying the morphological print of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms* 41:809–822.
- Recking, A., D. Richard, and G. Degoutte. 2013. Torrents et rivières de montagne: Dynamique et aménagement. Editions Quae, Antony.
- Remaître, A., T. W. J. Van Asch, J.-P. Malet, and O. Maquaire. 2008. Influence of check dams on debris-flow run-out intensity. *Natural Hazards and Earth System Science* 8:1403–1416.
- Ruiz-Villanueva, V., E. Bladé, M. Sánchez-Juny, B. Martí-Cardona, A. Díez-Herrero, and J. M. Bodoque. 2014. Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics* 16:1077.
- Salagnac, J. L., D. Marchand, C. Florence, P. Delpech, and J.-M. Axès. 2014. Impacts des inondations sur le cadre bâti et ses usagers, rapport final. CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment.
- Sangrey, D. A., P. J. Murphy, and J. L. Nieber. 1975. Evaluating the impact of structurally interrupted flood plain flows. Unknown.
- SLF. (n.d.). EconoMe – outils d'évaluation des risques en ligne - Projets - SLF. <https://www.slf.ch/fr/projets/econome.html> (Accessed: 2018-11-27). WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF.
- Tacnet, J. M., and G. Degoutte. 2013a. Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. Pages 267–331 in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, editors. QUAE, Antony.
- Tacnet, J.-M. 2009. Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information. Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, France.
- Tacnet, J.-M. 2010. Stratégies et ouvrages de correction torrentielle : de la conception à ...l'analyse des pathologies (présentation powerpoint, 116 diapos), Stage FOP/RTM « Connaissances de base en correction torrentielle », Cemagref, Grenoble, Mars 2010. Cemagref, Grenoble, Grenoble, France.
- Tacnet, J.-M. 2012. Decision Support Guidelines - Methods, procedures and tools developed in PARAMount (WP7). European Regional Development Fund - Alpine Space Program - Intereg IV - PARAMount projet: imPROved Accessibility: Reliability and safety of Alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate. <http://www.paramount-project.eu/>.
- Tacnet, J.-M., and G. Degoutte. 2013b. Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. Pages 267–331 in A. Recking, D. Richard, and G. Degoutte, editors. Quae, Versailles, France.
- Tacnet, J.-M., J. Dezert, C. Curt, M. Batton-Hubert, and E. Chojnacki. 2014. How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making. *Environment Systems and Decisions* 34:288–311.
- Tacnet, J.-M., E. Forestier, E. Mermet, C. Curt, and F. Berger. 2017. Résilience territoriale : du concept à l'analyse d'infrastructures critiques en montagne. Colloque Société Hydrotechnique de France (SHF), Risques-Décision-Territoires, 10-11 octobre 2017, Paris, France.
- Tacnet, J.-M., E. Mermet, K. Zadorina, M. Deschatres, P. Humbert, J.-C. Dissart, and S. Labbe. 2013. Road network management in the context of natural hazards: a decision-aiding process based on multi-criteria decision making methods and network structural properties analysis. Pages 95–106 Proceedings of the International Snow Science Workshop (ISSW 2013), 7-11 october 2013, Grenoble, France. Grenoble, France.
- Takahashi, T. 2007. Debris flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. Page 448 p. Taylor and Francis, London, UK.
- Theule, J. I., F. Liébault, A. Loye, D. Laigle, and M. Jaboyedoff. 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Science* 12:731–749.
- Theule, J., F. Liébault, D. Laigle, A. Loye, and M. Jaboyedoff. 2015. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology* 243:92–105.
- Totschnig, R., and S. Fuchs. 2013. Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology* 155:31–44.
- Totschnig, R., W. Sedlacek, and S. Fuchs. 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards* 58:681–703.
- UNISDR. (n.d.). Terminology - UNISDR. <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology#letter-v> (Accessed: 2018-11-27). United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Annexes

A Index des figures

FIGURE 1 : CARTE DES ALEAS SUR UN SITE D'ETUDE VIRTUEL : (A) DANS UN ETAT INITIAL SANS AMENAGEMENT ET (B) AVEC PRISE EN COMPTE DES AMENAGEMENTS DE PROTECTION CONTRE LES CRUES TORRENTIELLES ET DELOCALISATIONS	16
FIGURE 2 : CONTEXTES GEOMORPHOLOGIQUES TORRENTIELS : CONFINEMENT, CONCAVITE ET CONVEXITE ; ILLUSTRATION DU BASTAN ET DU GAVE DE PAU DANS LES HAUTES PYRENEES (SOURCE PHOTO AERIENNE ET PROFILS EN TRAVERS : GEOPORTAIL.FR)	21
FIGURE 3 : LES PHENOMENES TYPIQUES DES MONTAGNES, LEURS EFFETS SUR LES BATIS ET UNE PROPOSITION DE PARAMETRES DESCRIPTEURS (P.17, CARLADOUS (2017)).....	31
FIGURE 4 : SCHEMA CONCEPTUEL DE CALCULS DES COUTS D'ENDOMMAGEMENT DANS LE CAS FLUVIAL : LES DOMMAGES TOTAUX SONT LA SOMME DES DOMMAGES NON STRUCTURAUX (COUTS DE NETTOYAGE ET REMISE EN ETAT DES ESPACES EXTERIEURS, COUTS DES REPARATIONS AU SECOND ŒUVRE ET DE REMPLACEMENT DU MOBILIER) ET DES DOMMAGES STRUCTURAUX.	34
FIGURE 5 : SCHEMA CONCEPTUEL DE CALCULS DES COUTS D'ENDOMMAGEMENT DANS LE CAS FLUVIAL ET TORRENTIEL : LES DOMMAGES TOTAUX SONT LA SOMME DES DOMMAGES NON STRUCTURAUX (COUTS DE NETTOYAGE ET REMISE EN ETAT DES ESPACES EXTERIEURS, COUTS DES REPARATIONS AU SECOND ŒUVRE ET DE REMPLACEMENT DU MOBILIER) ET DES DOMMAGES STRUCTURAUX. DANS LE CAS TORRENTIEL, CE SONT LES COMPOSANTES « NETTOYAGE + REMISE EN ETAT DES ESPACES EXTERIEURS » ET « REPARATION DU GROS ŒUVRE » QUI AUGMENTENT PAR RAPPORT AU FLUVIAL. LES COURBES POINTILLEES REPRESENTENT LA REFERENCE DES PERTES EN CONTEXTE FLUVIALE EN PREMIERE COLONNE.	35
FIGURE 6 : RESEAUX CRITIQUES ET NIVEAUX DE DEPENDANCE (TACNET ET AL. 2017).....	36
FIGURE 7 : VULNERABILITE INDIRECTE DES RESEAUX DE TRANSPORT (TACNET ET AL. 2017).....	37
FIGURE 8 : IDENTIFICATION DES FACTEURS D'ATTRACTIVITE SUR LA BASE DE CRITERES SOCIO-ECONOMIQUES (TACNET 2012, TACNET ET AL. 2013).....	37
FIGURE 9 : L'ANALYSE DES PROPRIETES STRUCTURELLES DES RESEAUX PERMET D'EVALUER LES CONSEQUENCES ASSOCIEES AUX PHENOMENES NATURELS (TACNET ET AL. 2017)	38
FIGURE 10 : LE RESEAU DE TRANSPORT EST REPRESENTE PAR UN ENSEMBLE DE NŒUDS (LES COMMUNES, LES CARREFOURS STRATEGIQUES) ET D'ARCS (LES ROUTES DEPARTEMENTALES, NATIONALES ETC.).(TACNET ET AL. 2017)	38
FIGURE 11 : EXEMPLES DE DOMMAGES AUX OUVRAGES D'ART PAR AFFOUILLEMENT (FERAUD AND PICHENEAU 2015)	39
FIGURE 12 : EXEMPLES DE LA DIVERSITE DES DOMMAGES AUX OUVRAGES D'ART EN CONTEXTE TORRENTIEL EN SAVOIE (TACNET AND DEGOUTTE 2013b)	39
FIGURE 13 : TYPOLOGIE ET LOCALISATION DES PROBLEMATIQUES D'AFFOUILLEMENT A PROXIMITE D'UN PONT EN CONTEXTE TORRENTIEL (TACNET 2010).....	40
FIGURE 14 : EXEMPLE DE PATHOLOGIES FONCTIONNELLES (AFFOUILLEMENT) AFFECTANT DES OUVRAGES DE PROTECTION (TACNET 2010)	40
FIGURE 15 : DEFINITION DE L'INTENSITE DE L'ALEA EN SUISSE POUR LES CAS (A) D'INONDATION, (B) DE LAVE TORRENTIELLE, ET (C) D'EROSION (LOAT AND PETRASCHECK 1997).	42
FIGURE 16 : DESCRIPTION QUALITATIVE DES DOMMAGES POUR CHAQUE TYPE ET INTENSITE D'ALEA (LOAT AND PETRASCHECK 1997).	43
FIGURE 17 : COURBES DE DOMMAGES VITESSE-HAUTEUR POUR DES BATIS EN BOIS DE (A) UN ETAGE, (B) DEUX ETAGES, (C) TROIS ETAGES, ET (D) QUATRE ETAGES ET PLUS.	44
FIGURE 18 : COURBES DE DOMMAGES FONCTION DE LA HAUTEUR POUR LES DOMMAGES: (A) STRUCTURAUX ET NON-STRUCTURAUX; (B) CONTENU	44
FIGURE 19 : PARAMETRES DE DOMMAGE RECOMMANDES POUR APPROCHER LES DOMMAGES STRUCTURAUX DES MAISONS EN FINLANDE POUR (A) DU BATI NON-ANCRE A OSSATURE EN BOIS, (B) DU BATI ANCRE A OSSATURE EN BOIS, ET (C) DU BATI EN MAÇONNERIE, BETON ET BRIQUES (KARVONEN ET AL. 2000).....	45
FIGURE 20 : DESCRIPTION DES CONSEQUENCES ATTENDUES EN FONCTION DE L'INTENSITE DE L'ALEA AU VENEZUELA (JAKOB ET AL. 2005).....	46
FIGURE 21 : DELIMITATION DES ZONAGES D'INTENSITE DES PHENOMENES INONDATION ET CRUES TORRENTIELLES EN AUTRICHE, ITALIE (*PROVINCE AUTONOME DE TRENTE) ET VENEZUELA.....	47
FIGURE 22: COURBES DE VULNERABILITE DE LA LITTERATURE OU L'INTENSITE DE L'ALEA EST EXPRIMEE PAR LA HAUTEUR DE DEPOT.....	48
FIGURE 23 : COURBES DE VULNERABILITE DE LA LITTERATURE OU L'INTENSITE DE L'ALEA EST EXPRIMEE PAR : A) PRESSION D'IMPACT, B) HAUTEUR DE L'ÉCOULEMENT, C) VITESSE CINEMATIQUE, D) HAUTEUR RELATIVE DU DEPOT PAR RAPPORT A LA HAUTEUR DU BATI.....	49
FIGURE 24 : TABLE DE SYNTHÈSE DU NOMBRE DE CAS AYANT SUBI DES DOMMAGES DE CLASSES I A IV ET DES IMPACTS SELON LES DIFFERENTES CLASSES D'INTENSITE DE LAVE TORRENTIELLE (I_{DF}), TIRE DE (JAKOB ET AL. 2011).....	50

FIGURE 25 : PROBABILITE DE SURPASSER UN ETAT DE DOMMAGE SACHANT UNE INTENSITE D'ALEA EXPRIMEE EN HAUTEUR ET VITESSE (JAKOB ET AL. 2011).....	50
FIGURE 26 : PERTE MOYENNE EN FONCTION D'UNE INTENSITE D'ALEA EXPRIMEE EN HAUTEUR ET VITESSE (EN UTILISANT LES COURBES DE FRAGILITE DE JAKOB ET AL. 2011).....	52
FIGURE 27 : EFFETS DE LA FLOTTAISON SUR (A) LES MOBILE HOMES D'UN CAMPING LORS DES EVENEMENTS DE LA BRAGUE EN JUIN 2013 EN FRANCE (PHOTOS CREDITS : RTM/IRSTEA), ET (B-C) LES MOBILE HOMES AU CANADA LORS DE L'EVENEMENT A COUGAR CREEK, ALBERTA EN 2013 (PHOTOS CREDITS : BGC ENGINEERING INC.).	53
FIGURE 28 : COURBES DE PROBABILITE DE FLOTTAISON D'UN PARC DE BATIS LEGERS UNIFORMEMENT REPARTIS SELON CERTAINES DIMENSIONS ($a \sim U(10,40)[m]$) ET MASSES ($m \sim (1500,8000)[kg]$), POUR DIFFERENTES DENSITES DE FLUIDE ; LE BATI EST SURELEVE SYSTEMATIQUEMENT DE 55CM ET IL EST SUPPOSE QUE LE BATI N'EST PAS ANCRE PAR CHAINAGE OU AUTRES METHODES.	54
FIGURE 29 : EXEMPLES D'ACTION D'EROSION/D'AFFOUILLEMENT APRES (A) LES EVENEMENTS DE JUIN 2013 DANS LES PYRENEES, FRANCE (PHOTOS CREDITS : RTM / IRSTEA) ; ET (B) L'EVENEMENT A COUGAR CREEK, ALBERTA EN 2013 (PHOTOS CREDITS : BGC ENGINEERING INC.).	54
FIGURE 30 : ILLUSTRATION DE LA LONGUEUR D'AFFOUILLEMENT (la) ET PROFONDEUR D'AFFOUILLEMENT (pa) TOUCHANT UNE MAISON EN BORDURE DE TORRENT.	55
FIGURE 31 : COURBES DE PROBABILITE DE PERTE DE STABILITE EXTERNE D'UN BATI DONT LES FONDATIONS SONT DE TYPE RADIER ET DONT LES CARACTERISTIQUES SONT TIREES SELON : SA LONGUEUR ($U(4,20)[m]$), LE NOMBRE D'ETAGES ($U(1,2)[-]$ AVEC SORTIE SEULEMENT EN ENTIER), ET LE POIDS PROPRE DU BATI ($superload \sim U(2.5,4.0)[kN.m^2]$ ET $liveload \sim U(2.5,3.5)[kN.m^2]$).	55
FIGURE 32 : COURBES DE PROBABILITE DE PERTE DE STABILITE INTERNE D'UN BATI DONT LES FONDATIONS SONT DE TYPE RADIER EN BETON ARME ET DONT LES CARACTERISTIQUES SONT TIREES SELON : SA LONGUEUR ($U(4,20)[m]$), LE NOMBRE D'ETAGES ($U(1,2)[-]$ AVEC SORTIE SEULEMENT EN ENTIER), LE POIDS PROPRE DU BATI ($superload \sim U(2.5,4.0)[kN.m^2]$ ET $liveload \sim U(2.5,3.5)[kN.m^2]$), ET L'EPAISSEUR DU RADIER ($h \sim U(15,45)[cm]$).	56
FIGURE 33 : LA QUALITE DE L'ANALYSE DE RISQUE DEPEND DE CELLE DES ETAPES INTERMEDIAIRES (ALEA, ENDOMMAGEMENT, EVALUATION DES DOMMAGES)	65

B *Index des tableaux*

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS ET IDENTIFICATION DES SECTIONS CORRESPONDANTES POUR PROPOSER DES PISTES DE METHODOLOGIES D'EVALUATION QUANTITATIVE ET/OU QUALITATIVE DES DOMMAGES LIES AUX CRUES TORRENTIELLES – PHASE 2.....	9
TABLEAU 2 : OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES CRUES TORRENTIELLES : EFFETS, FONCTION, CAPACITE ET CAPACITE A CARACTERISER LE LIEN DIRECT AVEC UNE MODIFICATION DE L'ALEA EN L'ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES	14
TABLEAU 3 : METHODES DE CARACTERISATION DE L'ALEA INONDATION FLUVIAL ET PARAMETRES DE SORTIES (CF. ANNEXE 5 DU GUIDE AMC INONDATION, CGDD 2018)	19
TABLEAU 4: PROPOSITION DE METHODES DE CARACTERISATION DE L'ALEA TORRENTIEL ET PARAMETRES DE SORTIE DANS L'ETAT DES CONNAISSANCES ACTUELLES.....	22
TABLEAU 5: INDICATEURS SYNTHETIQUES DE L'AMC INONDATION	27
TABLEAU 6 : CODE COULEUR UTILISE DANS LE CHAPITRE	29
TABLEAU 7 : SYNTHÈSE DES POSSIBILITES, VEROUS ET MODALITES D'ADAPTATION DU FLUVIAL AU TORRENTIEL.....	29
TABLEAU 8 : EVALUATION D'UN INDICATEUR DE RISQUE DE CHANGEMENT DE LIT OU DE DESTRUCTION DE BERGES (DUCHENE 2015)	32
TABLEAU 9 : SYNTHÈSE DES EFFETS, ACTIONS ET INTENSITES DES CRUES TORRENTIELLES	32
TABLEAU 10 : SYNTHÈSE DES DOMMAGES STRUCTURAUX ET NON-STRUCTURAUX AU BATI.....	33

C Verrous et points critiques

Cette annexe relève quelques verrous ou points critiques méthodologiques décelées par les auteurs lors de l'analyse de l'AMC fluviale. Elle n'engage que l'avis des auteurs qui n'ont pas participé aux développements préalables des guides et méthodes en place ; et ne disposent donc pas de leur historique de développement qui a amené aux choix sur la terminologie et sur les méthodes utilisées

I Terminologie sur les scénarios

Le terme de « scénario de référence » est repris du guide CGDD (2018). Ce terme peut être ambigu et prête à confusion avec les termes « situation de référence », « situation initiale », « scénarios d'aléas » (pour ce dernier, on parle d'ailleurs parfois d'« événements d'inondation »), et la terminologie utilisée dans les PPR où le « scénario de référence » se rapporte aux aléas. Nous recommandons de réserver le terme de « scénario » uniquement aux aléas. L'utilisation du terme « scénario d'aménagement » apporte aussi de la confusion. On pourrait imaginer parler de « solution d'aménagement », de « variante d'aménagement » ou encore d'« option d'aménagement ».

Pour résumer, nous recommandons d'utiliser :

- le terme « scénario » pour l'aléa ;
- le terme « aménagement », « variante », « solution » ou « option » pour les aménagements que l'on veut comparer / évaluer ;
- le terme « situation » pour désigner les contextes (situation sans tenir compte du projet, situation en tenant compte du projet).

II Analyse de l'ACB sur une quantité réduite de scénarios

Les indicateurs de l'AMC et de l'ACB pré- et post-projet ne sont quantifiés que sur une quantité réduite de scénarios d'aléa. Ce choix résulte certainement de contraintes pratiques fortes et de la recherche de la faisabilité opérationnelle optimale pour un coût d'étude acceptable. Cependant, cette pratique est peu recommandable et est largement critiquée dans le domaine de la recherche portant sur la gestion des risques naturels. D'autres approches sont généralement privilégiées (Mazzorana and Fuchs 2010, Mazzorana et al. 2011, 2012). Les pratiques recommandées consistent en l'intégration d'un nombre suffisant de scénarios d'aléas afin de prendre en compte une réponse moyenne⁷ du système étudié. En menant cette intégration, on se prémunit des effets qui pourraient ne pas avoir été pris en compte lors de l'analyse des effets sur une quantité réduite de scénarios.

III La pertinence des modèles et leur capacité à décrire un phénomène

Le sujet étant central, il a été couvert déjà assez largement dans le chapitre sur l'estimation de l'intensité de l'aléa. Ce paragraphe vise donc simplement à souligner à nouveau que la plupart des modèles numériques aussi bien sur l'aléa que sur la vulnérabilité souffrent encore de l'absence ou d'un nombre trop limité de cas de validation. Il est impératif que les chargés d'études justifient leurs choix de modèles utilisés et s'appuient sur des références de validations où les paramètres de calages sont connus et les performances et limites retranscrites. Un travail scientifique et technique est à réaliser à court terme pour 1) éprouver la capacité de modèles prometteurs sur des sites et événements connus avec rigueur et précision ; et 2) diffuser ces données de calage afin de permettre le développement et la validation de nouvelles approches et modèles.

IV Confusion terminologique entre les termes de « vulnérabilité » et « exposition »

Le guide énonce : « les indicateurs d'enjeux caractérisent uniquement la présence d'un enjeu en zone inondable : l'enjeu est considéré en zone inondable dès qu'il est exposé à une hauteur d'eau $h > 0$ m. Par conséquent, la vulnérabilité d'un enjeu sera appréciée uniquement au regard de sa localisation (ou non) dans la zone inondable, ne reflétant ainsi que de façon très imparfaite sa vulnérabilité réelle. ». En réalité, ces indicateurs ne reflètent que l'exposition des enjeux et pas leur vulnérabilité. L'exposition d'un enjeu correspond à ses caractéristiques spatio-temporelles : 1) spatialement, du fait d'être située physiquement dans une zone géographique où l'intensité du phénomène peut ne pas être nulle ; 2) temporellement, du fait d'être exposé

⁷ Étudier la réponse moyenne d'un système est une quantification issue d'un choix parmi tant d'autres (e.g. value-at-risk, volatilité). La remise en cause du calcul d'une valeur moyennée nous semble être un débat d'experts en quantification du risque décisionnel hors sujet dans le cadre de ce document AMC.

sur une durée donnée limitée (e.g., l'exposition temporelle partielle d'une personne en fonction de sa situation spatiale en voiture, ou sur son lieu de travail, ou dans sa résidence personnelle). La vulnérabilité d'un enjeu constitue quant à elle une caractéristique intrinsèque de l'enjeu : elle traduit le potentiel de dommages de l'enjeu lorsqu'il est soumis à un phénomène d'une intensité donnée et non pas le fait qu'il soit atteint par une inondation parce qu'il est exposé de manière permanente ou parce qu'il est présent temporairement dans une zone exposée.

V L'information disponible dans le processus d'expertise et de décision

L'expertise des risques naturels et les différentes phases de gestion associées dépendent de la qualité ou de l'imperfection de l'information utilisée. Différentes formes d'imperfection existent, comme par exemple, selon (Tacnet 2009) :

- l'inconsistance (e.g. deux experts malgré leur qualification ont des avis contraires) ;
- l'imprécision (e.g. l'expert ne peut donner qu'un intervalle de valeur, « l'affouillement sera entre 0.5 et 1m ») ;
- l'incomplétude (e.g. l'expert omet de prendre en compte des données) ;
- l'incertitude (aléatoire ou épistémique).

Les probabilités et les statistiques sont couramment utilisées. D'autres cadres quantitatifs tels que la théorie des ensembles flous, des possibilités, et des fonctions de croyance émergent et il existe quelques applications opérationnelles dans le domaine de l'analyse de l'efficacité des ouvrages de protection (Carladous 2017).

Dans notre domaine, cette imperfection va se manifester au cours des trois étapes d'identification de l'aléa (courbe intensité-fréquence), de l'estimation des dommages des enjeux situés dans des zones exposées (courbe intensité endommagement) et enfin de l'estimation de la valeur des dommages. L'analyse de risque et l'analyse des coûts/bénéfices des mesures sont ainsi soumises à de nombreuses sources d'imperfection qu'il faut connaître et expliciter le mieux possible pour prendre une décision « éclairée ». La Figure 33 montre quelques exemples des incertitudes qui sont présentes dans les sous-étapes « aléa », « fragilité » et « dommages » du calcul de risque.

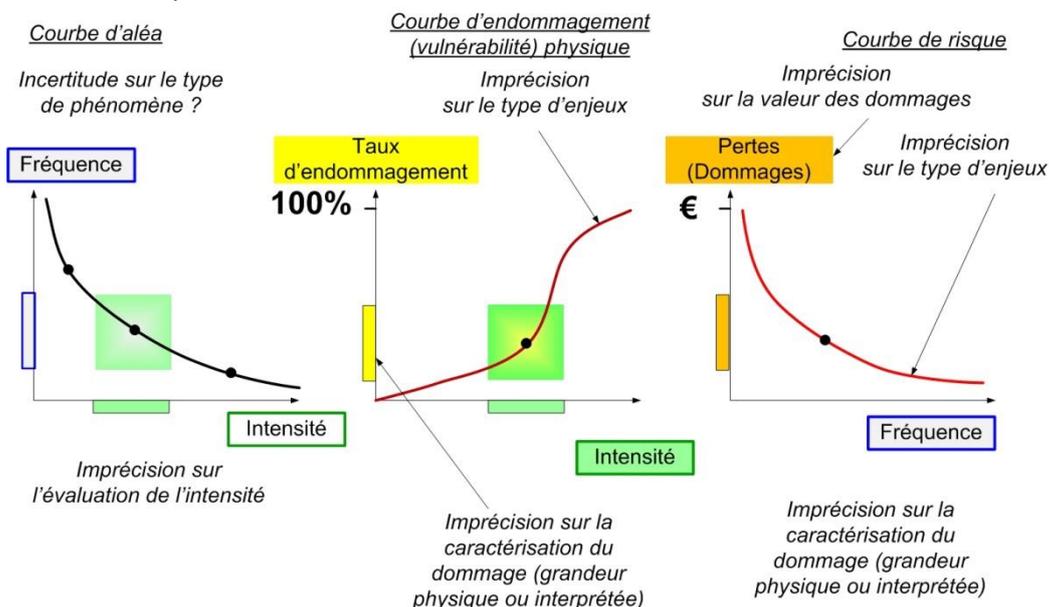


Figure 33 : La qualité de l'analyse de risque dépend de celle des étapes intermédiaires (aléa, endommagement, évaluation des dommages)

Au niveau pratique on peut citer les exemples suivants non exhaustifs : l'identification du phénomène peut être entachée d'erreurs en assimilant une inondation à du ruissellement voire en confondant inondation de plaine et torrentielle ; l'intensité, le tracé d'un phénomène peut également être soumis à interprétation ; l'analyse géomorphologique peut permettre de reconstituer des tracés mais cela peut être ambigu dans des environnements très anthropisés ; la qualification de la fréquence d'une crue torrentielle centennale est-elle déterminée par rapport au débit de pointe liquide ou solide, à sa durée, ou aux deux ?, au niveau des enjeux, la description des enjeux et les retours d'expérience peuvent être plus ou moins bien documentés.

D Proposition préliminaire d'une fiche dommage pour l'analyse des dommages dus aux crues torrentielles

Evaluation form for non-protective structure damage quantification after a torrential event

I. Localization

Municipality and address		Torrent name	
GPS point		Date of the event	

Obs:

II. Hazard description

General description of the torrential event	<input type="checkbox"/> Bed-load laden flow (biphasic flow) <input type="checkbox"/> Hyper-concentrated laden flow/debris flood (biphasic flow) <input type="checkbox"/> Debris flow (monophasic flow); if so, the flow is <input type="checkbox"/> muddy - <input type="checkbox"/> granular			
	Description of the action(s) of the torrential flow on the element	<input type="checkbox"/> hydrostatic	Flow height [m]:	Duration [h]: .....	Density [kg.m^{-3}]: .....
		Quantification method:	Quantification method:	Quantification method:
<input type="checkbox"/> hydro-dynamic		Velocity [m.s ⁻¹]:		Density [kg.m ⁻³]:
		Quantification method:		Quantification method:
<input type="checkbox"/> erosion		Scouring depth [m]:		Scouring width [m]:
	Quantification method:		Quantification method:	
<input type="checkbox"/> buoyancy	Volume of the submerged part of the object [m ³]:		Weight of the displaced object [kg]:	
	Quantification method:		Quantification method:	
<input type="checkbox"/> debris	Debris height [m]:	Volume [m ³]:	Density [kg.m ⁻³]:	
	Quantification method:	Quantification method:	Quantification method:	

Obs:

III. Structure general description

Inspection	<input type="checkbox"/> outside the building - <input type="checkbox"/> inside the building Obs:
Use	<input type="checkbox"/> residential dwellings - <input type="checkbox"/> business - <input type="checkbox"/> agriculture - <input type="checkbox"/> public facilities - <input type="checkbox"/> other:..... Obs:
Number of stories	Downstream overground story level:
	Downstream underground story level:
Estimated surface [m ²]	
Construction year	
Torrent protective measures	<input type="checkbox"/> yes - <input type="checkbox"/> no Obs:
Material	<input type="checkbox"/> masonry - <input type="checkbox"/> concrete - <input type="checkbox"/> wood - <input type="checkbox"/> adobe - <input type="checkbox"/> stone - <input type="checkbox"/> other:..... Obs:
Roof material	
Structural system	

Obs:

IV. Damage overview

Percentage of global damage on the structure	0% - none <input type="checkbox"/>	0-30% - slight <input type="checkbox"/>	30-60% - moderate <input type="checkbox"/>	60-100% - Extensive <input type="checkbox"/>	100% - complete <input type="checkbox"/>
Habitability decided by the authorities	<input type="checkbox"/> habitable - <input type="checkbox"/> restrained use - <input type="checkbox"/> not habitable - <input type="checkbox"/> risk of collapse - <input type="checkbox"/> other:..... Obs:				
Occupants effects	Number of occupants inside during the event: <input type="checkbox"/> no - <input type="checkbox"/> yes, number: Number of occupants that are: <input type="checkbox"/> injured - <input type="checkbox"/> dead				

Obs:

V. **Structural damage description** (Fill in the number of elements in each damage category)

	0% - none	0-10% - low	10-30% - medium	30-60% - strong	60-100% - severe
Column					
Walls					
Beams					
Slab					
Foundation					

Obs:

VI. **Non-structural damage description** (Fill in the number of elements in each damage category)

	0% - none	0-10% - low	10-30% - medium	30-60% - strong	60-100% - severe
Doors					
Windows					
Partition wall					
Floor cover					
Water red					
Electric red					
Gas red					
Sewage					
Stairs					
Roof					
False ceiling					

Obs:

VII. **Contents damage description**

% physical loss basement% <input type="checkbox"/> due to water submersion - <input type="checkbox"/> due to sediment and water submersion
% physical loss first floor% <input type="checkbox"/> due to water submersion - <input type="checkbox"/> due to sediment and water submersion
% physical loss above first floor% <input type="checkbox"/> due to water submersion - <input type="checkbox"/> due to sediment and water submersion

Obs:

VIII. **General comments** (Detail your visit and the relevant information that was previously missing)

IX. **Investigator information** (Detail who you are, who supervises the survey, the date and the type of the survey)

First name and name	.....	Years of experience (natural hazard management topic)	.....
Professional specialty	.....	Company/Institute	.....
Survey supervisor	.....	Specialty of the survey supervisor	.....
Date of the survey	.....	Hour of the survey	.....
Survey type	<input type="checkbox"/> on the field - <input type="checkbox"/> retro-analysis		

Please add in annex relevant documents (or their references): technical reports, BD-RTM documents, photos, videos, etc.

Residential buidlings scouring stability calculations

Philomène Favier and Nour Chahrour

November 2018

1 Preliminary calculations

The load of the considered residential building (Fig. 1) is the main vertical load applied on the foundation:

$$p = nb_{floor} \times (b \times L) \times (\alpha_1(SWL \times H + SDL) + \alpha_2(LL)), \quad (1)$$

where nb_{floor} [-] is the number of floor of the residential building, b [m], L [m], and H [m] are the width, the length and thickness of the foundation, respectively, α_1 and α_2 are coefficients, that are determined by the Eurocode and are equal to 1.35 and 1.5, respectively, SWL [$kN.m^{-3}$], SDL [$kN.m^{-2}$], and LL [$kN.m^{-2}$] are the self-weight load of a reinforced concrete house with RC slab foundation (i.e., load of the foundation), the super dead load (i.e., load of the structure itself, and immovable elements such as walls or partition walls) and the live load (i.e., temporary short duration load related to human living actions). For all the calculation then after presented, the vertical resulting force is calculated as the load, which is applied on a 1 m width of the foundation, i.e. $R_v = p|_{b=1}$ [kN]. For what follows, scouring is assumed to be only longitudinal and is quantified via a scouring length, l [m].

2 Raft footing

2.1 External stability

2.1.1 Eccentricity calculation

Let B [m], be the length of foundation which is not scoured, i.e. $B = L - l$. Let X [m] be the distance between the end of scouring under the foundation and the application of R_v , i.e., $X = \frac{L}{2} - l$. The eccentricity is calculated as $e = X - (\frac{B}{2})$.

2.1.2 Calculation of q_{ref} and the length of soil compression l_p

The calculation of q_{ref} and the length of soil compression l_p take different values function of a condition on e and $B/6$. Calculation are summarized in Table 1.

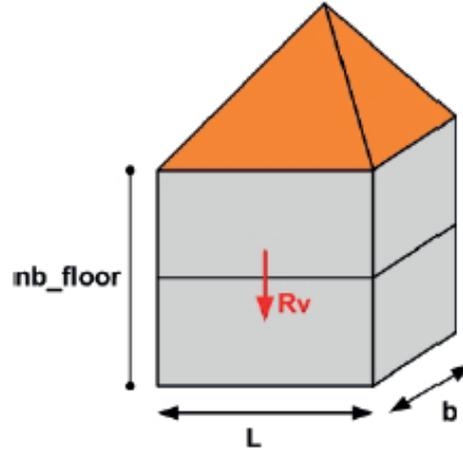


Figure 1: Residential building example.

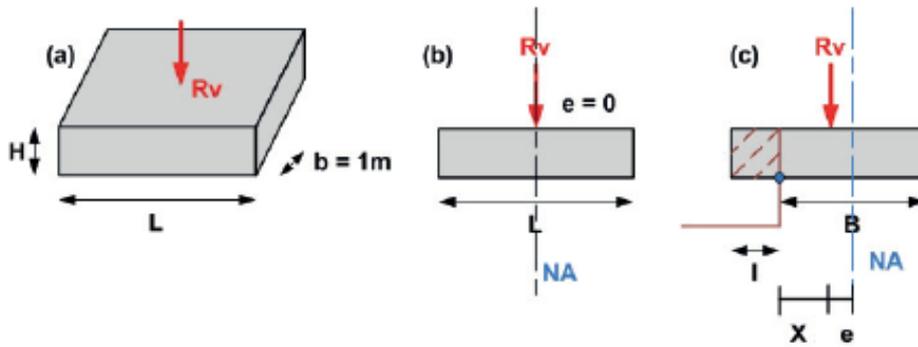


Figure 2: Raft foundation: (a) dimensions, (b) before scouring, (c) after scouring

$|e| < B/6$	$-e \geq B/6$	$e \geq B/6$
$q_{max} = \frac{R_v}{B} \left(1 + 6 \frac{|e|}{B}\right)$	$q_{max} = \frac{2R_v}{3X}$	$q_{max} = \frac{2R_v}{3(B-X)}$
$q_{min} = \frac{R_v}{B} \left(1 - 6 \frac{|e|}{B}\right)$		
$q_{ref} = \frac{3q_{max} + q_{min}}{4}$	$q_{ref} = \frac{3}{4}q_{max}$	$q_{ref} = \frac{3}{4}q_{max}$
$l_p = B$	$l_p = 3X$	$l_p = 3(B - X)$

Table 1: Table of rules for the calculation of q_{ref} and the length of soil compression l_p .

2.1.3 Soil admissible stress

The soil admissible stress is calculated as:

$$\sigma_{adm} = \frac{1}{\gamma_q} (q'_u - q'_0) i_{\delta\beta} + q'_0, \quad (2)$$

where $i_{\delta\beta}$ is a reduction factor usually taken equal to 1, γ_q is a safety factor equals to 2 for ELU and 3 for ELS, $q'_u = K_p P_{Le}^* + q'_0$, where $K_p = 1$, $P_{Le}^* [MPa]$

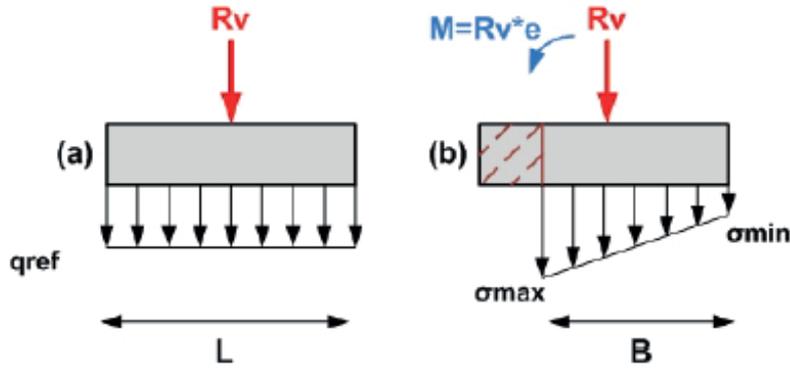


Figure 3: Stress distribution in a raft foundation (a) before scouring, (b) after scouring.

is the soil limit pressure (e.g., $P_{Le}^* = 1 \text{ MPa}$ for sand soil), and $q_0' = 0$.

2.1.4 Checking overturning and soil bearing capacity overpassing

If the ratio of the soil compression length l_p over the length of the foundation which is not scoured B is lower than 10%, then the structure overturned. The previous condition is equivalent to checking $|e| < 0.467B$.

Else, if $q_{ref} \geq \sigma_{adm}$, then the soil bearing capacity is overpassed and the system fails.

2.2 Internal stability

Internal stability calculation consists in comparing the ultimate bending moment that the section of the foundations can fulfill to the real bending applied moment. The bending applied moment induced by the uniform linear pressure p [$kN.m^{-1}$] over the part of foundation without support on the scouring length l [m] is quantified as:

$$M_a = \frac{-pl^2}{2}. \quad (3)$$

The ultimate moment that the section can fulfill is quantified as:

$$M_{ult} = 0.8f_{bu}\alpha db_0 \times z, \quad (4)$$

where f_{bu} [kPa] is the ultimate compressive strength of the concrete (cf. Fig. 4c), α [-] is the value obtained by assuming equilibrium of the forces in the section (cf. Fig. 4c), d [m] is the useful height (cf. Fig. 4a), b_0 [m] is the width of the considered section (cf. Fig. 4a), and z [m] is the lever arm. The ultimate compressive strength of the concrete is quantified as:

$$f_{bu} = \frac{0.85f_{c28}}{\theta\gamma_b}, \quad (5)$$

where f_{c28} [kPa] is the concrete strength at 28 days, the coefficient $\theta = 1$ [-], and the ELU safety coefficient $\gamma_b = 1.5$ [-].

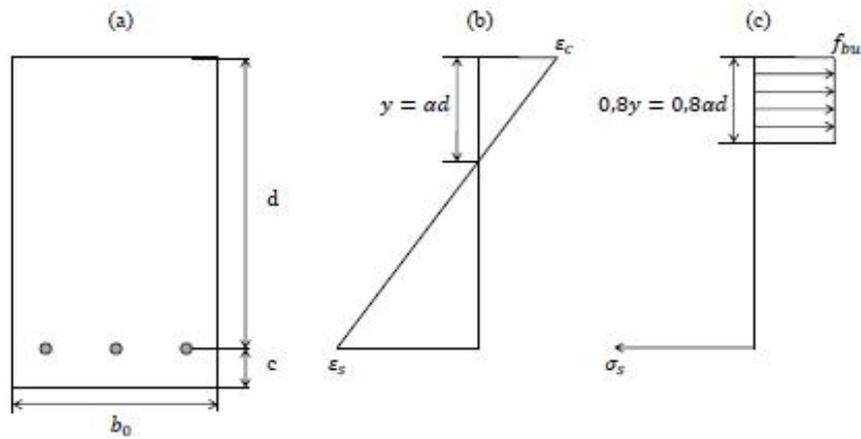


Figure 4: Reinforced concrete (a) beam profile, (b) stress distribution, (b) strain distribution.

3 Other foundations

Similar calculations can be conducted for strip footing and isolated footing foundations (Figs 5 and 6)

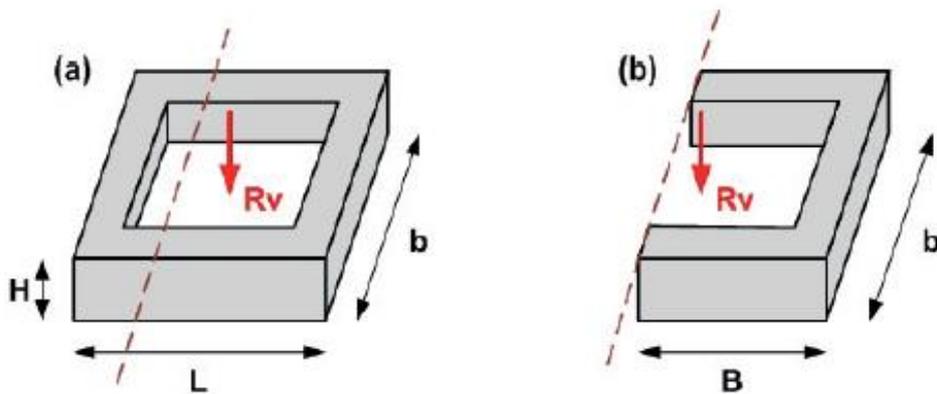


Figure 5: Strip footing (a) before scouring, (b) after scouring.

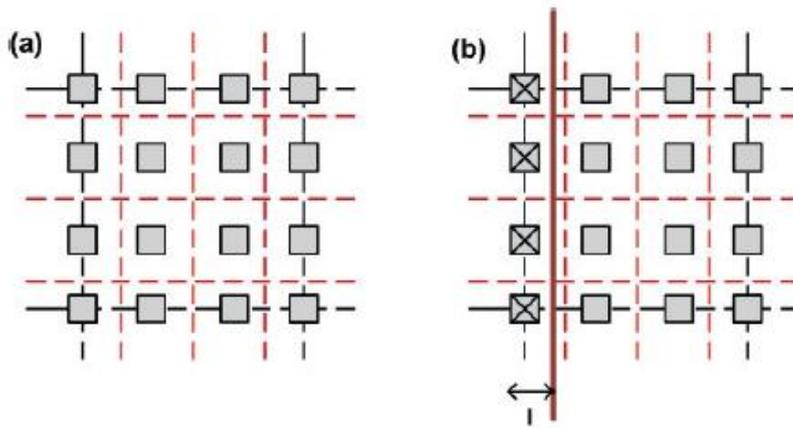


Figure 6: Isolated footings (a) before scouring, (b) after scouring.

Citation : Favier, P., Piton. G., Ousset, I. & Tacnet, J.-M. (2019). Analyse comparative des méthodes dites « multicritère » dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 2 : méthodologie d'évaluation des dommages. Rapport IRSTEA. Commissariat général au développement durable (CGDD), 72 p. ([hal-02132546](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132546))

Irstea – centre de Grenoble
Unité ETGR
Domaine universitaire 2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 Saint-Martin-d'Hères cedex
tél. +33 (0)476762727
fax +33 (0)476513803
www.irstea.fr

