



Analyse comparative des méthodes dites “ multicritère ” dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 1 : Caractérisation des phénomènes torrentiels

Guillaume Piton, Félix Philippe, Didier Richard, Jean-Marc Tacnet

► To cite this version:

Guillaume Piton, Félix Philippe, Didier Richard, Jean-Marc Tacnet. Analyse comparative des méthodes dites “ multicritère ” dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 1: Caractérisation des phénomènes torrentiels. [Rapport de recherche] Commissariat général au développement durable (CGDD); IRSTEA. 2018, pp.46. hal-02132339

HAL Id: hal-02132339

<https://hal.science/hal-02132339>

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 1 : CARACTERISATION
DES PHENOMENES TORRENTIELS

7 MARS 2018

**GUILLAUME PITON, FELIX
PHILIPPE, DIDIER RICHARD,
JEAN – MARC TACNET**

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	3
2	Rappel des objectifs.....	4
2.1	Contexte de la demande	4
2.2	Objectifs.....	4
2.3	Contenu et méthodologie	5
2.4	Objet de la présente note	5
3	Phase 1 : Recommandations sur la caractérisation des phénomènes torrentiels.....	6
3.1	Action 1 : Définition des phénomènes torrentiels.....	6
3.1.1	Clarifier le terme de "crue torrentielle"	6
3.1.2	Origine de la torrencialité	6
3.1.3	Typologie des cours d'eau	8
3.1.4	Analyse des processus torrentiels	13
3.2	Action 2 : Identification des processus d'endommagement.....	23
3.2.1	Mécanismes d'endommagement aux bâtis.....	23
3.2.2	Localisation des endommagements.....	25
3.2.3	Effets et dommages sur les infrastructures.....	28
3.2.4	Les parcelles agricoles.....	29
3.3	Action 3 : Evaluation des intensités de phénomène et niveaux d'aléas	31
3.3.1	L'évaluation des niveaux d'intensité selon l'approche PPR torrents.....	31
3.3.2	Introduction d'un critère additionnel ou alternatif à la hauteur d'eau	34
3.4	Action 4 : Définition des typologies d'ouvrages de protection.....	35
3.4.1	Protections intégrées à l'enjeu (mitigation)	35
3.4.2	Ouvrages de protection	35
4	Conclusions et perspectives pour la phase 2 : évaluation quantitative et/ou qualitative des dommages..	40
5	Bibliographie	42

Auteurs et contributeurs

Rédaction de

- Guillaume PITON, IRSTEA, ETNA
- Félix PHILIPPE, IRSTEA, ETNA
- Didier RICHARD, IRSTEA, ETNA
- Jean-Marc TACNET, IRSTEA, ETNA

Avec la contribution de

- Simon CARLADOUS, ONF - Département Risques Naturels
- Laure VIDAUD, IRSTEA, ETNA
- Elsa CONSTANS, IRSTEA, ETNA
- Isabelle OUSSET, IRSTEA, ETNA

1 Avertissement au lecteur

Ce rapport constitue la première partie d'une mission qui a été confiée par le CGDD à l'IRSTEA Grenoble. Elle 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 constitue un état de l'art des connaissances sur la caractérisation des phénomènes torrentiels nécessaire à la réalisation d'une telle évaluation socio-économique dans le contexte des crues torrentielles. Les principales conclusions de ce rapport ont d'ores et déjà été intégrées dans la dernière version du guide AMC inondation publiée en mars 2018.

La seconde étape de la mission est synthétisée dans le rapport de phase II. Plus exploratoire, ce rapport de phase II donne des orientations sur les travaux à conduire dans les mois à venir afin d'élaborer des recommandations opérationnelles pour être en mesure de mettre en œuvre, dans le contexte des crues torrentielles, l'AMC inondation.

2 Rappel des objectifs

2.1 Contexte de la demande

Les programmes d'action et de prévention pour le risque inondation (PAPI) ont pour objectif de mettre en œuvre une politique globale définie à l'échelle du bassin de risques et sont subventionnés au titre du fonds Barnier. Le cahier des charges demande, depuis 2011, une évaluation socio-économique des projets les plus coûteux (au-delà de 2M€). Des méthodes d'analyse coûts bénéfices puis d'analyse multicritères ont été mises en place pour répondre à cette demande du cahier des charges PAPI¹.

Des actions de prévention des crues torrentielles peuvent être proposées dans un PAPI et ainsi être subventionnées par le fonds Barnier. Les méthodes d'analyse coûts bénéfices actuellement proposées présentent cependant des difficultés d'application aux phénomènes torrentiels, deux d'entre elles étant particulièrement majeures :

- les analyses coûts bénéfices reposent sur des modèles d'évaluation de l'endommagement basés sur une caractérisation de l'effet des phénomènes par des critères d'intensité telles que la hauteur d'eau et la durée de submersion. Ces caractéristiques sont peu pertinentes, ou du moins pas suffisantes, pour l'évaluation de l'endommagement par les crues torrentielles (voir explications dans le présent rapport);
- les analyses coûts bénéfices reposent également sur une évaluation de l'efficacité des ouvrages (en termes d'effets sur les phénomènes) qui reste partiellement quantifiable et compliquée, voire complexe² dans le cas de la protection contre les crues torrentielles.

A ces verrous liés à la mise en œuvre des ACB et AMC, il faut également noter la plus grande difficulté de caractérisation des aléas (phénomènes décrits en termes de fréquence et intensité) que dans le cas fluvial. Les données d'entrées des ACB et AMC sont donc plus incertaines.

2.2 Objectifs

La mission confiée à IRSTEA consiste à établir un état des connaissances sur les phénomènes torrentiels et 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.

Cette mission se décline en trois objectifs principaux :

- 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 endommagements et 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 :

¹ Cf.cahier des charges PAPI3

² Deux termes souvent confondus. En termes scientifiques, un système compliqué est composé de nombreux constituants plus simples. On peut décomposer son fonctionnement en s'intéressant à chaque constituant de façon indépendante. Au contraire, un système complexe montre des interactions et couplages entre les constituants ou processus qui ne pouvaient être compris que par une analyse du système complet et non grâce à des analyses indépendantes des constituants. C'est l'émergence de ces mécanismes de couplages et rétrocontrôles qui différencie le compliqué du complexe (Keiler, 2011) : en résumé une horloge est compliquée, la géomorphologie des rivières et ses liens avec la végétation sont complexes.

- 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 comparée (critique, synthétique) des approches de type PAPI dans le contexte torrentiel et lister les verrous (sous forme de tableaux comparatifs).

2.3 Contenu et méthodologie

La mission se décompose en deux phases avec un travail préalable d'analyse comparée (critique et synthétique) des approches de types PAPI dans le contexte torrentiel afin de lister les verrous (sous forme d'un tableau comparatif).

Phase 1 : Donner les recommandations sur la caractérisation des phénomènes torrentiels nécessaires pour la réalisation d'une analyse multicritères (dans l'esprit de celle préconisée dans CGDD 2014).

Cette phase se décline en 4 actions :

- Action 1 : Définir les phénomènes torrentiels :
 - Définir les spécificités des crues torrentielles par rapport aux crues de plaine ;
 - Caractériser les problématiques de transport solide (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 : Identifier les dynamiques de production des dommages réversibles et irréversibles dus aux crues torrentielles (destruction de biens, déclinaison en termes d'effets) : comment le phénomène provoque-t-il les dommages ?
- Action 3 : Proposer une méthodologie pour l'identification de zones d'intensité faible/moyenne/forte pour les relier aux dommages potentiels pouvant en résulter (échelles quantitatives et qualitatives, cinétique).
- Action 4 : Définir des typologies d'ouvrages de protection, identifier leurs rôles et modes d'effets et donner les recommandations pour quantifier leur impact.

Phase 2 : Proposer une méthodologie en vue d'évaluer quantitativement et/ou qualitativement les dommages.

La phase 2 a pour objectif:

- D'identifier les éléments méthodologiques pouvant être adaptés (s'ils existent) et les limites de la méthode AMC inondations actuelle ;
- De définir les enjeux spécifiques au contexte montagnard (telle que l'accessibilité de certains villages), qui ne sont actuellement pas pris en compte dans l'AMC inondations ;
- De donner des premiers éléments méthodologiques pour la production de fonctions de dommages spécifiques aux crues torrentielles.

2.4 Objet de la présente note

Cette note apporte des éléments de réponse à la phase 1 par une analyse des spécificités des crues torrentielles, de leur mode d'endommagement des enjeux, de la caractérisation des aléas et de l'effet des ouvrages de protection.

3 Phase 1 : Recommandations sur la caractérisation des phénomènes torrentiels

Préalablement à une quelconque étude d'aléas et de risques, il faut en premier lieu caractériser les types de phénomènes torrentiels qu'un site donné est susceptible de subir. On recommande la lecture du guide *"Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel"* de Givry and Peteuil (2011) édité par le MEDDTL qui présente les aspects principaux des risques torrentiels et sous-tend le développement d'une partie des analyses du présent rapport.

3.1 Action 1 : Définition des phénomènes torrentiels

3.1.1 Clarifier le terme de "crue torrentielle"

Les phénomènes torrentiels présentent des caractéristiques phénoménologiques différentes des crues des cours d'eau de plaine, parfois qualifiées exagérément de "crues d'eau claire".

Suivant l'interlocuteur (expert technique/hydraulique, profane...), le concept de "crue torrentielle" peut souvent avoir des significations diverses, portant à confusion lors d'échanges ou de communications. On peut ainsi rencontrer plusieurs définitions et qualifier de crue torrentielle :

- un écoulement rapide et peu profond, qu'il faudrait qualifier de supercritique ;
- une crue liquide subite, qu'il faudrait plutôt appeler crue éclair ou crue rapide des rivières ;
- une crue d'eau turbide, c'est-à-dire transportant des matières en suspension ;
- une crue qui transporte des objets flottants (arbres, véhicules,...) ;
- une crue ayant une activité morphologique notable, c'est-à-dire générant des dépôts et des érosions, ce qui est généralement le signe d'un transport sédimentaire important par des phénomènes de charriage ou de lave torrentielle.

La clarification de ces concepts est une étape préalable à tout échange technique ou de vulgarisation.

L'analyse réalisée dans le cadre de **cette étude porte spécifiquement sur la dernière définition (activité morphologique notable)**. Toutefois, en plus d'être capable de générer d'importants dépôts et érosions, les crues torrentielles **peuvent être, mais pas obligatoirement**, supercritiques / rapides / turbides / chargées en flottants.

On considérera dans la suite de cette note que le transport solide comprend à la fois la charge grossière (graviers, galets, blocs : transportés par charriage ou par lave torrentielle), la charge fine (argile, silt, sable : transportés en suspension) et les flottants (bois, voitures, caravanes ou déchets anthropiques transportés par flottaison).

3.1.2 Origine de la torrentialité

La première condition nécessaire au développement d'un caractère torrentiel est la présence d'eau et de reliefs. La pente permet aux torrents de transporter de tels volumes de sédiments : c'est donc le « moteur » principal de l'énergie des écoulements à l'origine de leur capacité à éroder et à déplacer des sédiments et donc générer du transport solide.

Le second facteur essentiel de torrentialité d'un cours d'eau est la disponibilité de matériaux à transporter. Si, malgré une pente forte, les berges et le lit du cours d'eau sont naturellement insensibles aux érosions, on n'observera alors pas les conséquences classiques des crues torrentielles. On peut citer, par exemple, les ruisseaux corses aux vasques de roche brute, résistant aux érosions ou encore les tronçons raides et artificialisés des ouvrages hydrauliques tels que les évacuateurs de barrages.

Il faut toutefois retenir que le potentiel de torrentialité d'un cours d'eau ne demande qu'à s'exprimer : l'activation d'un glissement de terrain fournissant des sédiments peut transformer un ruisseau idyllique en un torrent rugissant, tout comme le dommage partiel d'un ouvrage de protection contre les érosions peut engendrer des dégâts considérables par la suite (Figure 1).



Figure 1 : Exemple d'expression du caractère torrentiel d'un écoulement normalement confiné suite au disfonctionnement d'un ouvrage - Barrage d'Oroville en Californie, crise de février 2017 : (a) évacuateur de crue en béton armé, fonctionnement normal avec écoulement rapide (supercritique), blanchi par l'entraînement de l'air mais sans transport solide ; (b) rupture partielle du radier de l'ouvrage générant un écoulement sur le versant, des érosions massives et un risque de vidange incontrôlée du réservoir si l'érosion se propage jusqu'au lac ; (c) état final après 20 jours d'écoulements, érosion massive du versant n'atteignant pas le lac, végétation, matériaux mobiles et roche mère attaqués, impressionnante expression de la torrencialité d'un système normalement sous contrôle (photos © Paul Hames / California Department of Water Resources, Josh Edelson/AFP/Getty Images et *San Francisco Chronicle*)

Le caractère torrentiel ou fluvial n'est donc pas inné et définitif. La réactivation du caractère torrentiel d'un cours d'eau peut survenir soit à l'occasion d'un épisode de crue extrême dépassant la résistance à l'érosion naturelle (due au pavage du lit), ou artificielle (protection ruinée), soit à l'occasion d'une crue normale mais alimentée par une source sédimentaire usuellement non productrice.

3.1.3 Typologie des cours d'eau

Les crues torrentielles concernent principalement les torrents mais d'une part les petites combes aux écoulements non-permanents, et d'autre part les rivières torrentielles peuvent aussi en présenter certaines caractéristiques.

3.1.3.1 Qu'est-ce qu'un torrent ?

Un torrent est un cours d'eau proche des sources primaires de production sédimentaire (Recking et al. 2013). Son fonctionnement peut être très influencé par les processus de versants (avalanches, glissements de terrains, chutes de blocs, etc.). Il est généralement caractérisé par :

- Une pluviométrie et une hydrologie (relation entre la pluie et le débit) fortement variables induisant un comportement hydraulique très transitoire (fortement variable dans le temps) : le débit d'un torrent est ainsi parfois nul pendant des périodes sèches avant de subir des crues très intenses et soudaines ; le niveau d'eau peut alors passer de quelques centimètres à plusieurs mètres en une durée courte, allant de l'ordre de quelques minutes à quelques heures (quelques secondes dans le cas des laves torrentielles) ;
- Une capacité à transporter des volumes solides très importants en comparaison avec la faiblesse du débit moyen, la taille du bassin versant, etc.

3.1.3.2 Torrent ou combe/ruisseau ?

On distingue la combe (sujette aux ruissellements) et le ruisseau vis-à-vis d'un torrent, en particulier sur le deuxième point (capacité de transport). Un ruisseau présente en effet peu d'activité morphologique, c'est-à-dire de transport solide (Surell 1841). Tous ont des périodes de basses eaux parfois complètement sèches et présentent, lors d'épisodes de pluies intenses, des écoulements d'eau importants. La torrentialité d'un site est par contre reliée à l'activation du transport notable de sédiments. Celui-ci est régulier dans les torrents et plus rare mais pas impossible dans les ruisseaux et combes sujettes aux ruissellements. **Il y a donc de fortes similarités, ou plutôt un réel continuum, entre crue torrentielle et crue de ruissellement. La transition se faisant à travers l'activation d'un transport solide notable.**

3.1.3.3 Rivières torrentielles

Les rivières torrentielles sont généralement les exutoires naturels des torrents (à l'exception des quelques cas de torrents côtiers ou alimentant un lac). Elles reçoivent les apports sédimentaires fournis avec plus ou moins de régularité par leurs cours d'eau tributaires (affluents). En fonction de la fréquence de ces apports et de la magnitude des crues qu'elles subissent, les rivières torrentielles ont plus ou moins tendance à développer des formes sédimentaires (bancs, tresses). Un faciès de rivière en tresses est caractéristique d'une forte alimentation sédimentaire, les tresses étant capables d'absorber et d'amortir des apports de sédiments aussi bien réguliers que soudains.

Une rivière torrentielle, par comparaison avec un torrent est donc caractérisée par :

- Un débit liquide plus régulier avec de rares périodes d'étiage total (rivière à sec).
- Un module³ spécifique⁴ plus important et des crues plus longues et légèrement moins soudaines ; liés notamment à des tailles de bassins versants plus grandes ;
- Une largeur plus importante qu'un torrent moyen, en particulier si un faciès de tressage est développé ;
- Un transport solide en moyenne plus important, une rivière torrentielle étant généralement en mesure de faire transiter les apports de l'ensemble de ses torrents affluents ;
- mais surtout un transport solide plus régulier, lié à l'effet de "tampon sédimentaire" que permettent les formes de tressage et autres zones de divagation, ajouté à l'hydrologie caractérisée par des débits plus élevés.

³ Module : débit moyen interannuel.

⁴ Débit spécifique : débit divisé par la superficie du bassin versant exprimé en m³/s/km², valeur illustrant la participation unitaire du bassin versant à l'écoulement.

3.1.3.4 Torrent ou rivière torrentielle ?

On considère généralement qu'un torrent a une pente supérieure ou égale à 6%. On notera par exemple que la valeur de pente de 5-6% est sensiblement la borne basse atteinte par les phénomènes de laves torrentielles (Recking et al. 2013 p. 23,208). La limite basse des phénomènes de charriage hyper-concentré est mal connue mais, selon des calculs de taux de transport (cf. encadré p. 17) et les rares données de la littérature (Hungry et al. 2014), elle doit être proche de celle retenue pour les laves torrentielles (cf. §3.1.4.2 pour la classification des types de phénomènes).

Surell (1841) indique que les plus grands torrents peuvent avoir des pentes descendant jusqu'à 2% dans les parties basses de leurs cônes de déjection. Dans cette zone terminale, ces grands torrents présentent probablement déjà des comportements plus proches des rivières torrentielles que des torrents de hauts bassins versants mais on gardera à l'idée que la transition a lieu entre 2 et 6% de pente.

3.1.3.5 Rivière torrentielle ou rivière ?

Il est fondamentalement subjectif de définir formellement la limite entre rivières torrentielles et rivières parce que, comme expliqué dans le §3.1.1, la notion de torrentialité est floue et renvoie à plusieurs aspects. Plusieurs approches possibles sont décrites et résumées, de manière non exhaustive, dans les paragraphes qui suivent.

A La catégorie historique de Surell

Historiquement, Surell (1841) retient une limite de l'ordre de 1,5% de pente pour la transition entre rivière et rivière torrentielle. Il faut toutefois souligner que les traits caractéristiques des "rivières" de Surell ressemblent beaucoup au standard actuel des "rivières torrentielles" :

« Le trait le plus saillant des rivières est de divaguer sur un lit plat, très-large, et dont elles n'occupent jamais qu'une très-petite portion. Ce n'est pas seulement la forme de la section fluide qui se modifie, et dans laquelle se déplace de temps en temps le thalweg ; c'est la masse toute entière des eaux, qui abandonne son lit, le laisse tout à coup à sec, et se transporte dans un lit nouveau, à une grande distance du premier. ».

En effet, Surell travaille alors sur le département des Hautes-Alpes dans leur état de fin de Petit Age Glaciaire et son référentiel y est adapté. Les exemples des "rivières" qu'il donne parlent d'eux-mêmes : « *La Durance, le Grand Buëch et le Petit Buëch, le Drac et l'Ubaye* ». On peut donc considérer que le seuil de transition retenu par Surell est plutôt une enveloppe haute qu'une valeur moyenne.

B Si torrentiel $\Rightarrow$ faciès géomorphologique particulier

Si on attache le caractère torrentiel d'un cours d'eau à un **faciès géomorphologique particulier, typiquement celui de lit en tresses ou divagant**, on peut citer le travail récent de Scorpio et al. (2018). Les résultats de ce travail devraient être confirmés à l'aide d'études complémentaires des exemples historiques de grandes crues torrentielles françaises (Aiguat de 1940 dans les Pyrénées, crue de 1957 en Maurienne et dans le Queyras, crue de 2013 sur le Gave de Pau).

Les travaux de Scorpio et al. (2018) ont porté sur l'étude de l'évolution historique (1803-1917) de la morphologie de 115 km du cours de l'Adige, une grande rivière de piémont des Alpes italiennes. L'Adige présente l'intérêt d'arborer l'ensemble des faciès depuis des tronçons de rivière en tresses à des zones de lit unique à méandres. Sur les 42 tronçons homogènes étudiés, la cartographie de 1803-1805, qui est une bonne représentation de l'état naturel du cours d'eau, montre une certaine corrélation entre pente et faciès : une transition entre les faciès les plus actifs (tressage) vers les faciès les moins actifs (méandres) apparaît vers 0,1%-0,2% (figure suivante).

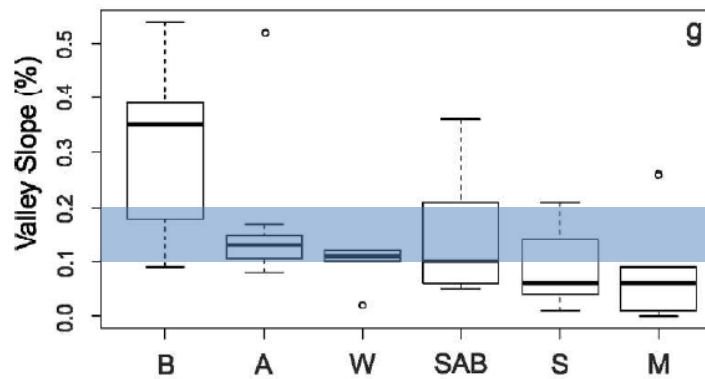


Figure 2 : Pentés moyennes des tronçons en fonction de leur faciès : (B : braided ou lit en tresse, A : anabranching ou lits multiples séparés d'îles végétalisées; W: wandering ou lit divagant; SAB: sinuous with alternate bars ou lit sinueux à barres alternées; S: sinuous ou lit sinueux; M: meandering ou lit à méandre). Transition (en bleu) autour de 0,1-0,2% de pente entre lit unique et lits multiples (B & A).

La transition observée sur l'Adige n'est toutefois pas vraie dans le cas des rivières à lit de sable. Quand ces dernières ont un faciès de lit en tresses, elles sont très actives et peuvent avoir des pentes très faibles. On ne trouve toutefois pas de grande rivière en tresses à lit de sable en métropole. La Loire est peut-être le type de cours d'eau qui s'en rapproche le plus.

C Si torrentiel $\Rightarrow$ dégâts géomorphologiques

Si on attache le caractère torrentiel d'un cours d'eau à sa **capacité à générer d'importants dégâts à travers son activité géomorphologique** (parti pris du présent rapport), alors il n'existe probablement pas de limite basse absolue dans la pente : certains grands fleuves proches de massifs montagneux montrent des changements morphologiques sur des échelles spatiales très étendues à des pentes très faibles. On pense par exemple aux dégâts relevés annuellement au Bangladesh par l'activité morphologique du Gange et du Brahmapoutre (qui sont dans ce secteur, des lits de sable).

Les phénomènes de coupures de méandres ou encore de bifurcation de chenal dans les zones côtières (avulsion) peuvent aussi générer des changements importants dans la morphologie d'un secteur et dans l'inondabilité de son voisinage. Mais ce changement de situation peut prendre un certain temps (Kleinhans et al. 2013).

Il faut alors sans doute croiser la rapidité de la menace géomorphologique avec son amplitude : les dégâts apparaissent-ils en quelques heures ou en plusieurs jours, mois, années ? La question de la magnitude des érosions de berges et de leur rapidité pour des événements extrêmes est un sujet qui reste assez flou et qu'il faudrait explorer à travers les études complémentaires précédemment citées.

D Si torrentiel $\Rightarrow$ rapidité des crues

Si on attache le caractère torrentiel d'un cours d'eau à la **temporalité des crues** (durée et soudaineté) qui est reliée dans une certaine mesure au dynamisme des changements morphologiques, on peut citer les travaux récents de Cipriani et al. (2012) sur les pics et surtout la durée des crues en métropole et le travail de Quefféléan (2015) qui analyse la question un peu plus précise du temps de montée des crues. Cette caractéristique est partiellement représentative de la question de la temporalité : le second paramètre étant le temps de décrue ou la durée de la crue qui relève alors aussi beaucoup du phénomène météorologique déclencheur (orage, phénomènes cycloniques, retour d'Est, etc.).

La première étude porte sur l'ensemble du territoire métropolitain (878 stations retenues) et comprend de très nombreux cours d'eau qui sortent de la catégorie torrentielle. La seconde est spécifiquement dédiée aux cours d'eau torrentiels des Alpes et des Pyrénées et se base sur l'extraction de plus de 14 000 hydrogrammes de crue (275 stations retenues).

Alors que la manifestation locale du risque torrentiel dans son aspect géomorphologique est principalement liée aux paramètres locaux : pente, granulométrie, végétation, débit liquide, apports solides et résistance (naturelle ou artificielle) des berges ; la forme des hydrogrammes est influencée par des paramètres d'extensions spatiales beaucoup plus larges : superficie, relief et occupation des sols du bassin versant, longueur et densité de drainage ainsi qu'extension spatiale et dynamique temporelle des pluies. Il en résulte qu'une analyse de la durée ou de la rapidité de montée des hydrogrammes de crues en fonction de la pente locale n'a aucun sens. Les analyses de ces caractéristiques s'appuient donc plutôt sur celle des paramètres de large échelle.

Les deux études concluent au fait que les deux variables les plus explicatives de la durée et de la rapidité des crues sont d'abord la superficie des bassins versants puis l'intensité des pluies. Les autres paramètres semblent avoir une incidence, mais l'échantillon est trop petit et le phénomène trop complexe pour la caractériser de manière rigoureuse. Cela pourrait se faire, par exemple, par le découpage en deux jeux de données : l'un pour calibrer et l'autre pour valider l'analyse. Il semble inutile dans le présent rapport d'aller plus en profondeur : on retiendra simplement qu'à travers la taille du bassin versant et les régimes de pluies, il est vraisemblablement possible de trouver une limite (qui reste à définir) entre crues rapides et crues lentes.

E Si torrentiel $\Rightarrow$ absence d'abattement du pic de crue

Lefort (1996) rappelle que la limite en dessous de laquelle les phénomènes **d'écèlement dynamique** deviennent notables se trouve autour d'une pente de 0,1% à 0,2%. Ces écèlement des débits hydrauliques de pointe des crues se manifestent lors de débordements en lit majeur (voir MEDD and CEMAGREF 2004, pour plus d'éléments sur l'écèlement dynamique). Au-dessus de cette pente, les écoulements d'eau qui débordent dans le lit majeur s'écoulent avec assez de vitesse pour que les débits de pointe de crue n'aient pas de franche tendance à la baisse, malgré l'inondation généralisée du lit majeur.

L'écèlement dynamique est trop souvent surestimé dans le contexte torrentiel. Selon l'expérience des auteurs, il a pourtant été démontré comme négligeable en termes de réduction des zones inondables à travers des modélisations numériques de multiples rivières de piémonts, notamment : la Romanche, l'Arve, la Dordogne, l'Herbasse ou encore l'Isère en Combe de Savoie. Le ralentissement sans écèlement a par contre probablement une réalité plus large, même à des pentes un peu supérieures.

3.1.3.6 En synthèse

La Figure 3 tente de synthétiser les domaines des typologies selon des considérations de pente et d'activité géomorphologie. On retient ainsi que :

- Au-dessus d'une pente de 6% est situé le domaine des torrents, actifs géomorphologiquement et des ruisseaux, inactifs ;
- Les torrents les plus actifs peuvent avoir une pente diminuant jusqu'à 2% ;
- Le domaine des rivières torrentielles est situé entre celui des torrents soit entre des pentes de 2-5% et de 1%.
- Il semble qu'une certaine transition vers un caractère plus fluvial apparaisse entre des pentes de 1% et de 0.1%-0,2%. La superficie du bassin versant, le régime de pluie et la fourniture sédimentaire jouent vraisemblablement des rôles dans l'extension plus ou moins marquée du caractère torrentiel vers les pentes faibles.

Nous avons ainsi le sentiment que l'application d'une approche particulière adaptée au torrentiel devrait être quasi-automatique dans des pentes plus raides que 1%. Dans la zone de transition naturelle (pente = [0,1% ; 1%]), l'application d'une **approche ignorant les aléas géomorphologiques devrait être justifiée par l'absence de preuves de dégâts importants liés à l'activité géomorphologique dans les archives et sur le terrain**, confortant l'hypothèse d'une prédominance du risque hydraulique.

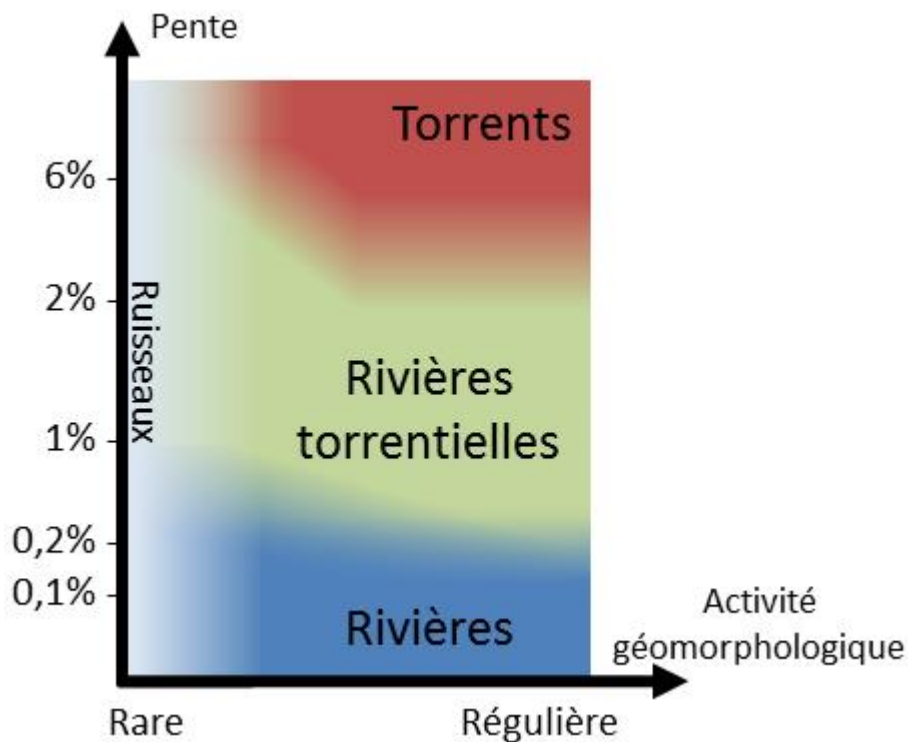


Figure 3 : Diagramme conceptuel des limites ruisseaux – torrents – rivières torrentielles – rivières défini selon des considérations de pentes et de fréquence d'activité géomorphologique

Fixer la limite entre les contextes fluviaux et torrentiels n'est pas possible de manière absolue sur la base de la bibliographie et des connaissances techniques et scientifiques actuelles. L'alternative est que la délimitation entre les deux catégories d'application d'un guide « inondations fluviales » ou d'un second guide « inondations torrentielles » fasse l'objet d'une **décision institutionnelle** fixant des seuils qui resteront forcément arbitraires. La question posée serait ainsi la suivante : **tout cours d'eau génère un risque géomorphologique sur le long terme, ainsi à partir de quel couple intensité – durée** (par exemple 10 m de recul de berge en 2 heures), **les changements morphologiques doivent-ils être considérés dans les études de risques et donc relever de la catégorie torrentielle ?** Si les seuils fixés par cette seconde option semblent plus clairs et précis, leur application sur le terrain sera entachée d'une grande incertitude liée à la difficulté d'estimer ces paramètres *à priori* pour différentes probabilités d'occurrence.

Cette note se concentre par la suite sur la phénoménologie des processus torrentiels observés dans les torrents, mais il faut garder à l'esprit qu'un continuum existe entre combes, torrents et rivières ou fleuves. Les rivières torrentielles ont une place importante dans ce continuum et présentent ainsi certains caractères torrentiels (capacité à éroder et déposer des volumes importants de sédiments) tout en ayant déjà des caractères plus fluviaux (durée des crues plus longue).

Point technique :
Serait-il pertinent de créer une catégorie « rivière de piémonts » ?

La proposition de la DDT65 (2015), inspirée par Bernard (1927), de maintenir un seuil de transition à 1% de pente entre rivières torrentielles et de créer une nouvelle catégorie de "rivières de piémont", puis de définir encore une nouvelle transition vers la catégorie des rivières ne nous semble pas justifiée. Ceci complique les catégories sans avantage avéré lié à un changement entre 1% et 0,1-0,2% de pente.

Le comblement du Lac des Gaves sur le Gave de Pau pendant la crue de 2013 dans les Pyrénées en est un bon exemple : le tronçon est considéré comme une rivière selon le critère pente $<1\%$ (DDT65 2015), ce qui n'a cependant pas empêché le cours d'eau de combler le lac, de changer de lit et de détruire par affouillement des ouvrages hydro-électriques en une seule crue : le Gave de Pau est donc encore bien une rivière torrentielle dans ce secteur.

Les auteurs historiques (Fabre 1797, Surell 1841, Bernard 1927) conviennent d'ailleurs que la limite entre rivière et rivière torrentielle était plus difficile à définir que celle entre torrent et rivière torrentielle.

3.1.4 Analyse des processus torrentiels

3.1.4.1 Définition de l'hydraulique torrentielle

La question de la différence entre les phénomènes d'inondation classiques et les inondations torrentielles est au cœur de la démarche de proposition d'un nouveau guide PPR pour les crues torrentielles (en cours d'élaboration).

Si les processus torrentiels menacent nos sociétés depuis la nuit des temps, une démarche scientifique de compréhension de leur **origine** n'a été initiée que tardivement durant la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle (Surell 1841, voir la synthèse de Piton et al. 2017). Le développement d'études systématiques de la **mécanique de propagation** de ces processus est encore plus tardif : l'étude mécaniste des laves torrentielles, qui permet le développement de modèles numériques, n'a été proprement lancée en Europe que suite aux épisodes de 1987 (Vischer 2003).

Les travaux de Meunier (1989) et (1991) ont lancé les bases de l'hydraulique torrentielle française. On retient en particulier son diagramme synthétique explicitant la transition entre hydraulique d'eau claire et mécanique du solide (Figure 4).

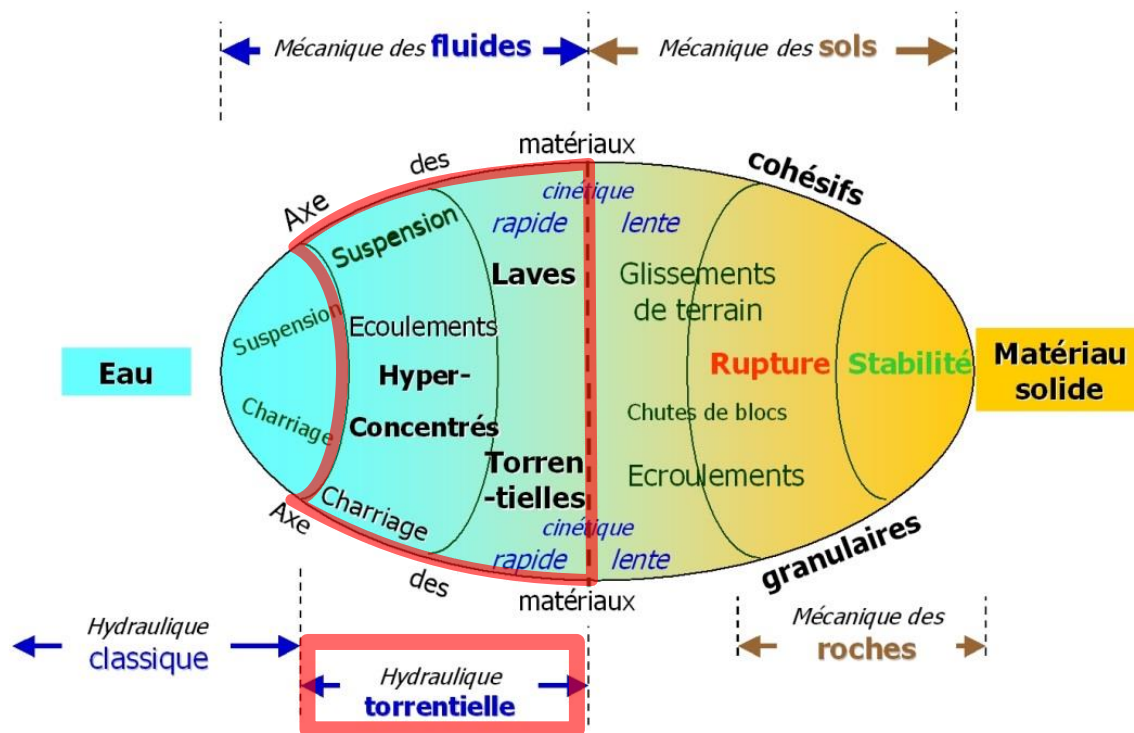


Figure 4: Différents types d'écoulements torrentiels (Meunier 1989)

L'hydraulique classique se limite aux écoulements d'eau faiblement chargés en matériaux en suspension (maintenus dans la lame d'eau par la turbulence) et charriés (matériaux grossiers entraînés par le courant, roulant et sautant sur le fond du lit). L'hydraulique torrentielle s'attache à décrire la mécanique des écoulements chargés ou massivement chargés en matériaux solides. L'autre discipline avec laquelle l'hydraulique torrentielle trouve des connexions est la géomécanique, en particulier le domaine de la dynamique des glissements de terrains. Ceux-ci présentent de fortes similarités avec les laves torrentielles tout en étant plus lents (Hungr et al. 2014).

3.1.4.2 Typologies principales et facteurs aggravants

Les phénomènes de charriage et de suspension sont observés jusque dans les fleuves les plus grands. C'est toutefois très principalement le premier phénomène qui induit les risques torrentiels. C'est en effet le transport de la charge grossière qui est prépondérant dans l'activité géomorphologique des cours d'eau à caractère torrentiel, à l'origine de la génération d'érosions et de dépôts (Malavoi et al. 2011).

A mesure que les pentes et que la magnitude des crues augmentent, la charge solide du cours d'eau augmente avec une transition progressive entre charriage et lave torrentielle. On utilise ici la classification retenue par D'Agostino (2013) présentée ci-dessous :

A Le charriage

Le charriage (bed-load en anglais : "charge de fond") est un écoulement bi-phasique (une lame d'eau s'écoule distinctement au-dessus des galets en mouvement avec des vitesses respectives différentes). Après crue, on observe un tri et une stratification des dépôts. Le charriage se caractérise par une forte variabilité instantanée du transport solide liée au tri granulométrique, aux dépavages et formations de bancs et de dépôts. On considère généralement que les concentrations solides maximums ne dépassent pas 10-15% (ratio débit solide sur débit liquide)⁵.

Dans les rivières, rivières torrentielles et sur les parties basses de la plupart des torrents, le charriage génère l'essentiel de l'activité morphologique (Figure 5).

⁵ Voir l'encadré " Détermination de la concentration solide d'un écoulement par l'estimation des taux de transport" p. 16 pour un point technique sur les moyens d'estimation de ces concentrations solides.

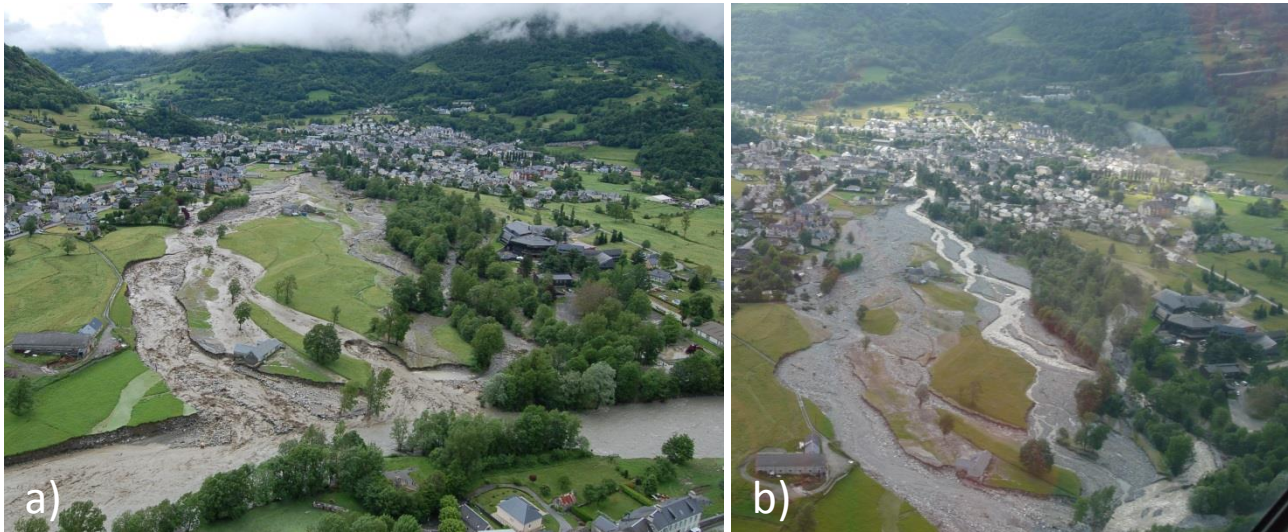


Figure 5 : Erosion par charriage sur le cône de déjection du Bastan à Luz-Saint-Sauveur (65) pendant (a) et après (b) la crue de 18 juin 2013 (© Sécurité Civile et ONF-RTM65). Les pluies très fortes tombées durablement sur de grandes épaisseurs de neige lors d'un épisode de redoux ont généré une crue exceptionnelle par ses débits liquides mais surtout par sa durée. Dans la zone aval du Bastan, les matériaux transportés ont obstrué et rempli le lit original (situé dans le corridor boisé) et débordé dans les champs du cône de déjection érodant et transportant d'importants volumes de sédiments

B Le charriage hyper-concentré

Le charriage hyper-concentré (debris flood en anglais : "crue de débris") est la forme paroxysmique du phénomène de charriage. Il continue de présenter un caractère bi-phasique mais ne développe plus de tri granulométrique. Les volumes transportés peuvent être très importants, dépassant parfois les dizaines de milliers de mètres cubes. Il est capable de mobiliser de gros blocs de taille métrique mais ceux-ci ne sont généralement pas transportés en groupes, on les retrouve plutôt dispersés aléatoirement sur des dépôts de matériaux moins grossiers. On considère généralement que les concentrations solides maximum sont comprises entre 10 et 30% (ratio débit solide sur débit liquide).

Les observations récentes de transport solide menées par l'équipe ETNA dans plusieurs torrents montrent que lors d'épisodes de charriage hyper-concentré, le transport n'est pas continu mais peut avoir lieu en « vagues sédimentaires ». Ces bouffées engendrent une forte variation du niveau de l'écoulement et commencent à évoquer la transition vers les bouffées de laves torrentielles. La différence essentielle avec une lave torrentielle est l'absence de développement d'un front raide, constitué de gros blocs se déplaçant en groupes. Ce front est particulièrement destructeur. Il en résulte que, malgré sa capacité à transporter des volumes solides extraordinaires, une crue de charriage hyper-concentré cause généralement moins d'impacts destructeurs sur les ouvrages. Les affouillements sont, par contre, tout aussi destructeurs.

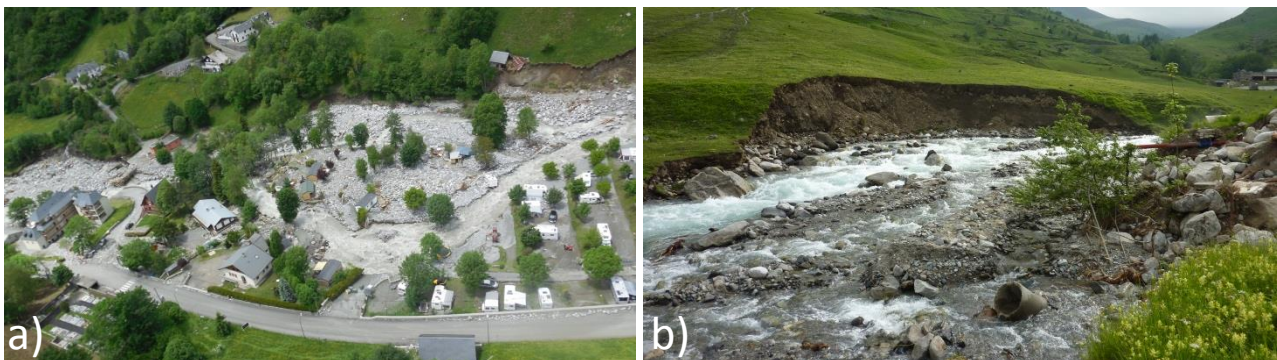


Figure 6 : Erosion par charriage hyper-concentré dans le lit amont du Bastan à Barèges (65) pendant (a) et après (b) la crue de 18 juin 2013 (© Sécurité Civile et Guillaume PITON). Le même épisode que celui de la Figure 5 a généré plus haut dans le bassin versant, là où les pentes sont plus fortes, des dépôts au droit du camping de Barèges, faisant déborder l'écoulement principal vers le centre du camping. Encore plus haut sur le cours d'eau, les berges ont été attaquées profondément, le pavage du torrent pourtant stable et constitué de blocs métriques a été détruit et remanié, la largeur du lit a augmenté.

C Les laves torrentielles

Les laves torrentielles (debris flows en anglais : "écoulement de débris") sont des écoulements monophasiques ayant lieu par bouffées, c'est-à-dire de façon pulsée. Les dépôts sont généralement non stratifiés et sans tri granulométrique dans la masse. On observe par contre des accumulations naturelles d'éléments grossiers au front et sur les bourrelets latéraux. La matrice située entre les éléments grossiers est souvent fine et parfois très cohésive, conférant aux dépôts un caractère cimenté contrairement aux dépôts de charriage plus granulaires et moins compacts.

Les laves torrentielles ont des comportements de fluides à seuil (ils s'arrêtent quand la pente passe sous un certain seuil) et génèrent des dépôts épais. La conjonction de leur forte énergie et densité (supérieure à 2) leur permet de mobiliser des blocs énormes (Figure 7), dépassant régulièrement la centaine de tonnes. On suppose que ces blocs sont en grande partie responsables de la capacité des laves torrentielles à éroder massivement les lits des torrents (gagnant en volume au passage) et à détruire ponts et bâtiments par impacts directs.



Figure 7 : (a) Blocs rocheux transportés par des laves torrentielles (diamètre 2 à 3 mètres) pendant la crue torrentielle du Saint Antoine de juillet 2014, déposant des dizaines de milliers de mètres cubes de matériaux dans la zone industrielle de Modane (73). (b) Bloc estimé à 700 tonnes transporté sur quelques centaines de mètres par le Boscodon en 1998 (© Guillaume PITON et ONF-RTM05)

Les laves torrentielles peuvent prendre plusieurs aspects allant de celui d'une coulée de boue (mudflow en anglais) à celui d'une masse de blocs en mouvement (granular debris flows). On considère généralement que les concentrations solides maximales sont de l'ordre de 30-70% (ratio débit solide sur débit liquide).

Par ailleurs, « *Il est généralement admis pour les laves torrentielles d'origine hydrologique qu'elles commencent à se déposer lorsqu'elles rencontrent une zone de pente comprise entre 10% (0,1 m/m) et 13% (0,13 m/m) selon la nature du matériau. Il s'agit là de pentes de début de dépôt, pas d'un arrêt stricto sensu. En pratique, lorsqu'une pente inférieure à 8 - 10% est rencontrée sur la zone de parcours potentiel de la lave torrentielle, on peut considérer que la distance résiduelle qu'elle parcourra est limitée (de l'ordre de quelques centaines de mètres)* » (Laigle and Carlados 2015).

Point technique:

Détermination de la concentration solide d'un écoulement par l'estimation des taux de transport

L'estimation du débit solide d'un cours d'eau fait l'objet d'un traitement différent si le processus de transport relève du charriage (normal ou hyper-concentré) ou de la lave torrentielle.

Dans le cas du **charriage**, les concentrations solides sont directement déduites du rapport entre le débit liquide estimé par l'étude hydrologique et le débit solide calculé à partir de formules de transport par charriage. En résumé, sur la base de la connaissance des paramètres (débit liquide, pente, largeur de cours d'eau et granulométrie), le calcul se fait en général en deux étapes : calcul de la contrainte de cisaillement appliquée par l'écoulement sur le lit puis calcul du taux de transport pour ce taux de cisaillement. L'approche est présentée dans Malavoi et al. (2011) pour le cas général des rivières, dans Recking et al. (2013 p. 133) pour les rivières de montagnes et dans Piton (2016 p. 83) et Piton and Recking (2017) pour les derniers développements concernant les torrents pavés et les problématiques de dépavage.

Par exemple, l'application de l'approche proposée par Piton (2016 p. 83), avec les paramètres suivants : débit de pointe = $35 \text{ m}^3/\text{s}$ et hydrogrammes de 10 h, pentes = 12% & 4% (amont et aval du cône de déjection) ; $D_{84} = 50 \text{ mm}$, largeur de lit = 4 m donne des concentrations au pic de l'ordre de 15% et 2,3%, des capacités de transport de $35\,000 \text{ m}^3$ et $5\,000 \text{ m}^3$ en 10 h et les courbes d'apport suivantes.

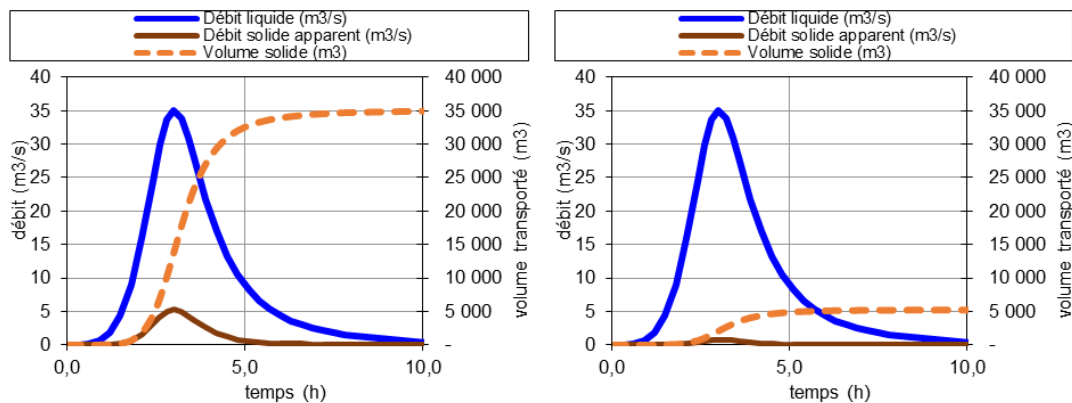


Figure 8 : Exemple d'hydrogrammes et de sédimentogrammes tiré des calculs de taux de transports pour des pentes de 12% (amont du cône de déjection – à gauche) et de 4% (aval du cône de déjection – à droite), formule de Piton (2016 p. 83)

Analyse : Compte tenu de la concentration et du volume transporté, cet événement peut être considéré comme du charriage hyper-concentré en amont du cône de déjection (pente 12%), le transport de gros blocs épars est donc possible. Au contraire, seul un charriage normal peut avoir lieu dans la zone basse. Si le cours d'eau n'a pas la largeur pour encaisser sans débordement les $30\,000 \text{ m}^3$ de dépôts potentiels (différence entre les volumes transportés et ceux pouvant transiter en partie basse), une plage de dépôt peut être justifiée.

Il est utile de rappeler que Recking et al. (2012) ont montré que, dans le meilleur des cas, les formules de transport solide ne peuvent, permettre d'atteindre que les précisions suivantes en fonction de la durée de l'observation (notamment en conséquence des fluctuations naturelles de transport réel qui oscille autour de la valeur moyenne estimée par une formule correctement utilisée).

Table 1 : Intervalle d'incertitude "normal" d'une formule de transport selon Recking et al. (2012)

Durée de la mesure du transport solide	Ratio entre transport réel et transport estimé
Mesure instantanée (prélèvement)	[0,1 ; 10]
Événement (dépôt cumulés)	[0,2 ; 5]
Année (dépôt cumulés)	[0,5 ; 2]
20 ans (dépôt cumulés)	[0,5 ; 2]

L'utilisation des formules sans croisement avec des données historiques, indices de terrains et tests de sensibilité et d'incertitude est donc très incertain.

Dans le cas des **laves torrentielles**, on peut résumer les conditions nécessaires au déclenchement d'une lave torrentielle par une double condition de pente forte (>16-17%) et de disponibilité massive de matériaux mobilisables. Il est alors possible qu'une lave se forme telle que « *le rapport entre volume de matériau solide et volume d'eau varie dans une gamme allant de 2 à 5 avec une valeur le plus souvent aux alentours de 4* » (Laigle and Carlados 2015). Dans ce cas, on procède généralement de façon inverse par rapport au charriage en faisant des hypothèses sur la concentration et en calculant le volume équivalent. Les hypothèses sont étayées à l'aide de différents indices de terrains, données historiques et formules de volume global tirées de la littérature (Recking et al. 2013 p. 200).

Une fois la lave formée, la question est ensuite de définir jusqu'où la lave torrentielle se propage. Laigle and Carlados (2015) propose un double diagramme (initiation & propagation) pour réaliser un diagnostic préliminaire (figure ci-dessous). Celui-ci avait été développé pour le risque de formation de laves torrentielles lors des ruptures de retenues collinaires mais s'applique aux torrents. Si le risque est considéré comme plausible, des analyses plus détaillées doivent être mises en œuvre.

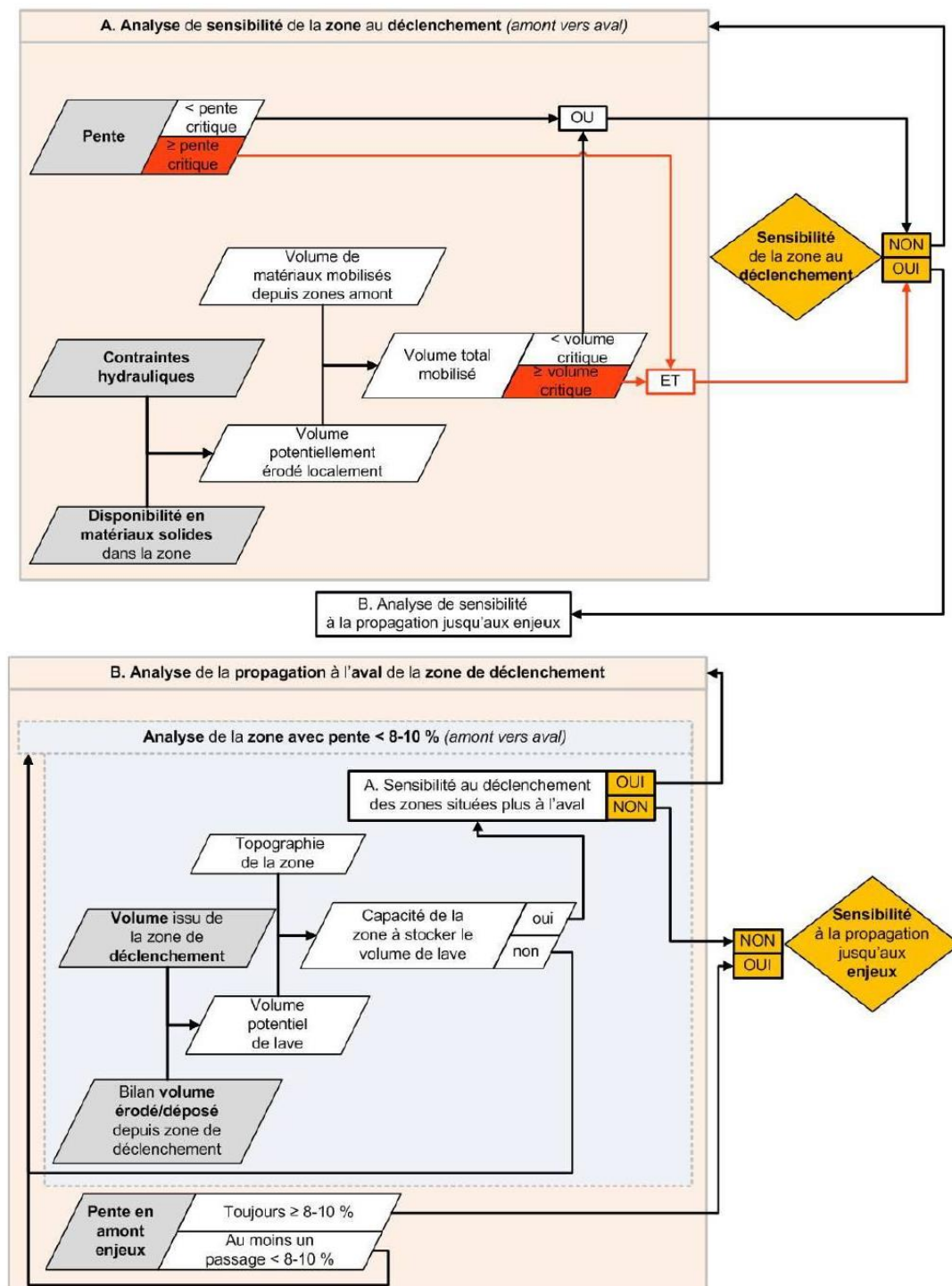


Figure 9 : Diagrammes déclenchement et propagation des laves torrentielles de Laigle and Carlados (2015)

D Les flottants

Les trois typologies mentionnées précédemment sont principalement liées à la question de la charge sédimentaire de l'écoulement. Dans les trois cas, la présence additionnelle de flottants, majoritairement sous la forme de bois (morts ou vivants arrachés aux berges et versants), aggrave les aléas par formation de bouchons nommés embâcles dans les sections étroites telles que les ponts et traversées urbaines (Figure 10).



Figure 10 : Dépôt massif de flottants dans le village Italien de Caprile en 1966 et sur un pont de la province italienne de la Spezia, images tirées de Comiti et al. (2016)

E Autres phénomènes aggravants plus intenses et plus rares

Des phénomènes plus rares et plus violents ayant un caractère proche des crues torrentielles peuvent s'observer du fait de l'occurrence, dans le haut des bassins versants, d'événements géomorphologiques aggravants.

Les ruptures de lacs glaciaires et de lacs de barrages

Les ruptures de poches d'eau ou de lacs glaciaires, ou les ondes de submersion liées à la rupture d'un barrage artificiel ou issu d'un glissement de terrain (glacial lake outburst flood – GLOF, ou dam break ou landslide dam failure en anglais), peuvent être catastrophiques. La catastrophe de Saint-Gervais (1882, 175 morts, Givry and Peteuil 2011, p. 22) fut liée à la vidange subite d'une poche d'eau du glacier de Tête Rousse (74). Celle-ci a généré la propagation d'une lave torrentielle puis d'une crue avec charriage hyper-concentré jusque dans la vallée de l'Arve (Figure 11).

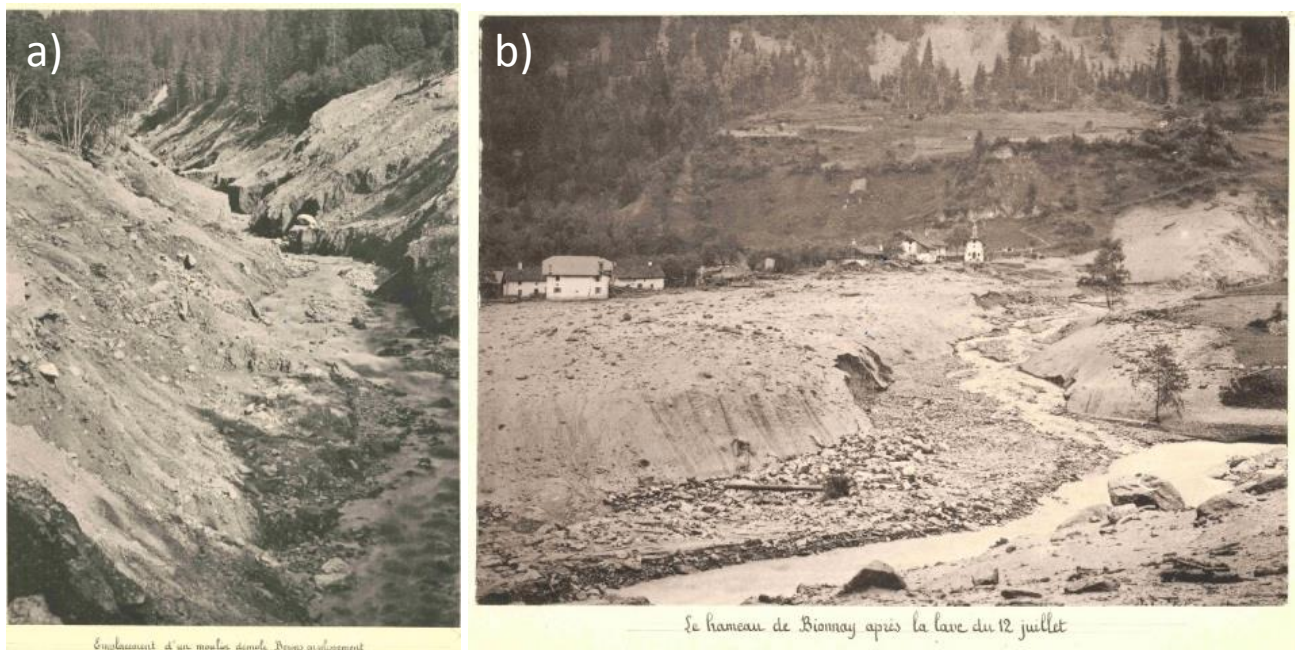


Figure 11 : (a) Lit du torrent de Bionasset après le passage du GLOF de Tête Rousse à l'emplacement d'un ancien moulin, lit ravagé et végétation emportée sur un grand gabarit ; (b) Hameau de Bionnay sur le Bon Nant plus loin

en aval, la lave torrentielle a ici déposé des flottants en nombre dans le hameau, détruit des maisons, couvert le lit majeur de dépôts et généré des érosions de berges (Kuss, 1900)

Les ruptures de lacs (glaciaires ou de barrage) génèrent en effet des phénomènes torrentiels de plus grande magnitude que les précipitations (Schuster 2000). Ceci est lié à l'importance du volume d'eau immédiatement libéré et concentré sur une petite surface. Ils restent heureusement relativement rares sous nos latitudes bien que des exemples multiples existent (Saint-Gervais mais aussi Verdun-sur-Ariège (09) : 81 morts en 1875 suite à un dépôt de 100 000 m³ de matériaux éboulés de le lit du torrent qui ont bouché ce dernier puis ont rompu, rupture du lac du Saint-Laurent sur la Romanche (38) en 1219 ravageant la partie basse de la vallée de l'Oisans tuant la moitié de la population de Grenoble, cf. Givry and Peteuil 2011, Chap. 1). Le changement climatique et le nombre croissant de barrages réservoirs pourraient en augmenter le nombre potentiel.

Avalanches de débris ou avalanches rocheuses

Ces phénomènes s'initient dans les versants (débris avalanche ou rock avalanche en anglais). Les écoulements sont alors encore plus massifs que les laves torrentielles, plus granulaires et non confinés à un chenal contrairement à une crue. Ils restent heureusement rares.

3.1.4.3 Détermination de la typologie de crue d'un torrent donné et des probabilités d'occurrences

Dans le cadre de l'analyse d'aléas d'un bassin versant donné, il convient en premier lieu de déterminer quels types de processus torrentiels peuvent être rencontrés lors des crues. Dans un second temps, on tente d'estimer les fréquences d'occurrence. L'activité torrentielle d'un bassin versant étant généralement fluctuante et irrégulière dans le temps et dans l'espace, c'est en croisant analyses historiques, géomorphologiques, hydrologiques et hydrauliques qu'il convient d'approcher le problème. C'est d'ailleurs la méthode intégratrice recommandée par le MEDDE (2012 p. 35) dans la *Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation*.

A Historique

Les plus anciens praticiens qui se sont sérieusement intéressés au risque torrentiel ont immédiatement compris que les archives sont une source très précieuse d'information dans la détermination des caractéristiques des crues extrêmes des torrents (Mougin 1914). Cette étape reste absolument essentielle dans les études actuelles malgré l'émergence de modèles numériques et de méthodes statistiques de plus en plus sophistiquées.

D'Agostino (2013) propose une revue des points essentiels et parfois subtils à aborder. Il rappelle que l'analyse historique doit, à travers l'ensemble des documents et témoignages les plus divers, chercher à répondre aux questions suivantes :

- Quels types d'événements ont eu lieux et quand ?
- Comment ces derniers se sont produits et déroulés et avec quelle magnitude / intensité ?
- Par quelles conséquences ont été affectés les populations, les terrains et les biens ?

À travers une lecture détaillée de l'ensemble des documents historiques disponibles (cartes, photos, articles, compte rendus et rapports), on s'intéresse donc à la fréquence d'événements remarquables en tentant de discriminer épisodes de laves torrentielles et épisodes de charriage, et en tentant d'estimer la proportion plus ou moins importante de flottants et de gros blocs. Il est aussi intéressant d'étudier le temps caractéristique de recharge sédimentaire, l'origine des matériaux et l'existence potentielle de multiples branches actives, mais aussi la possibilité d'enchaînement d'événements tels que plusieurs grosses laves torrentielles dans un faible laps de temps.

Une étude historique menée rigoureusement passe par la consultation des archives départementales en complément des archives communales, du service RTM local, de sites internet tels que <http://pluiesextremes.meteo.fr/> et des ouvrages historiques. Les données ainsi recueillies sont souvent très précieuses pour guider le chargé d'étude dans la recherche des indices géomorphologiques sur site, ainsi que dans le choix des hypothèses de travail retenues dans les études hydrologiques et hydro-sédimentaires qui suivent.

Après avoir établi une liste exhaustive des éléments relevés sur les crues et dommages, mais aussi sur l'historique de l'aménagement et des actions entreprises vis-à-vis de l'aménagement du bassin versant, il est bon de résumer les conclusions principales qui étayeront la suite des analyses tel qu'illustré dans l'encadré suivant.

Exemple des conclusions principales de l'analyse historique du risque torrentiel sur le bassin versant de la Roize à Voreppe (38), source : Lamand et al. (2015)

« Cette analyse historique, partie clé de toute étude hydraulique a permis de mettre en évidence :

- Un long passif de travaux de correction avec :
 - Les classiques endiguements sur le cône de déjection dès le 18^{ème} siècle ;
 - La mise en œuvre des premiers barrages de correction torrentielles en 1851, conçu par Scipion GRAS et visant à réguler le transport solide ;
 - La réalisation de séries de seuils et barrages de stabilisation des zones de production dans le haut bassin au cours du 20^{ème} siècle.
 - La réalisation d'une plage de dépôt en 1985 de conception classique suite à la crue très importante de 1971.
- L'existence de données sur la production sédimentaire depuis les curages ayant débuté en 1990 avec un volume annuel moyen compris entre 950 m³/an et 2 050 m³/an, avec une variabilité interannuelle forte : entre 350 et 5 000 m³/an.
- L'importance clé de la présence de flottants dans l'aggravation du risque torrentiel, les problèmes d'inondation ayant eu lieu en 1971 étant reliés à la formation d'un embâcle sur le pont de la RD75. Sur ce point, la Roize semble tout autant sensible que par le passé.
- La capacité du lit du torrent à beaucoup s'élargir, surtout dans la partie aval, lors des crues extrêmes type 1971. Le volume transporté lors de celle-ci semble être estimé à plusieurs dizaines de milliers de m³. La valeur de 100 000m³ avancée par Jail and Martin (1971) dans la revue de Géographie Alpine semble par contre douteuse par excès. »

Voir Lamand et al. (2015) pour l'ensemble des détails de l'étude historique et de l'usage qui en est ensuite fait ainsi que Piton et al. (2016) pour un exemple plus synthétique de l'intérêt d'une approche historique dans l'interprétation des résultats de calculs de transport solide.

B Géomorphologie

L'étude historique doit être croisée avec une étude de la géomorphologie du bassin versant. Cette dernière est réalisée par une approche géographique à travers de photos aériennes et de bases de données SIG (Système d'information géographique) (Recking et al. 2013 p. 15). Cette analyse doit permettre l'identification des zones de production sédimentaire (glissements, lits, ravines, dérochoirs, moraines), leurs caractéristiques localisées ou diffuses, les possibles stocks en place, etc.

Dans un second temps, un effort suffisant de visite de terrain doit être réalisé afin de relever sur place les traces d'activités torrentielles présentes et passées (Kaitna and Hübl 2013). Cette lecture experte des "témoins silencieux" est cruciale et permet généralement de valider ou d'invalides des hypothèses faites via les phases précédentes. On s'y attache à identifier des traces et restes des événements passés : fronts de laves végétalisés / déposés dans lit, chenaux et bourrelets passés, terrasses, traces sur les arbres, évidences de respirations du lit, etc.

C Hydrologie et hydraulique

Une fois la typologie des processus atteignant les zones à enjeux établie, des méthodes d'hydrologie, d'hydraulique torrentielle et de rhéologie des laves torrentielles sont mises en œuvre (Recking et al. 2013 pp. 90, 133, 200). On s'intéresse alors classiquement à :

- La statistique des pluies extrêmes, marquée en montagne par les effets du relief (à défaut de disposer de longues séries temporelles sur les débits). La durée des épisodes est alors tout autant importante que leur intensité dans le contexte spécifique du transport solide : contrairement à l'hydraulique de plaine où l'effort se concentre sur le débit liquide au pic de crue, beaucoup moins à sa durée, une crue torrentielle transporte des sédiments d'autant plus qu'elle est longue (en particulier pour les crues à charriage) ;
- L'hydraulique des écoulements est approchée par des équations spécifiques prenant en compte la granulométrie grossière des lits torrentiels ;

- Le transport solide par charriage est généralement estimé par des équations de loi de transport spécialement développées pour la montagne ;
- Les volumes de laves torrentielles sont généralement estimés par le croisement de méthodes empiriques basées sur la morphométrie du bassin versant, avec des approches simplifiées croisant pluie et concentration solide et des approches à dire d'expert.

L'ensemble de cette approche multidisciplinaire est mis en œuvre par exemple dans les EBR (études de bassins de risque) réalisés par les services RTM (Restauration des Terrains de Montagne) de l'Office National des Forêts sur les bassins versants domaniaux torrentiels.

L'hydraulique et la géomorphologie torrentielle restent toutefois des disciplines subtiles, demandant, pour être menées de façon rigoureuse, une expérience dont malheureusement seul un nombre insuffisant de praticiens avertis dispose. Il faut en effet noter que ces sciences sont encore relativement jeunes comparées à l'hydraulique fluviale, développée sur les grands fleuves depuis Castelli (1628). Les scientifiques travaillent donc encore activement à poser les bases théoriques de certains problèmes, mais de nombreux verrous scientifiques et techniques subsistent.

3.1.4.4 Verrous perdurant dans le domaine de la classification des processus torrentiels

En pratique, les points suivants restent des verrous scientifiques :

- Dissocier à coup sûr les types de phénomènes observés : dans la mesure où l'activité torrentielle a fortement baissé entre la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1860) et maintenant, il est par exemple difficile de définir si d'anciennes traces probables de laves torrentielles constituent une preuve de la capacité actuelle et future du bassin versant à en produire à nouveau ;
 - L'activation d'un fort épisode morphogène est régulièrement liée à la rupture du pavage du lit. Il n'existe pas encore d'approche rigoureuse permettant d'estimer la probabilité de cette rupture. La caractérisation de la probabilité de changement important du lit d'un cours d'eau est donc imparfaite ;
 - Déterminer la probabilité (période de retour) d'une lave torrentielle de magnitude donnée : il n'y a pas de lien direct entre la connaissance de la fréquence de pluie et le déclenchement d'une lave torrentielle qui sera, par exemple, liée à la disponibilité du stock de matériaux mobilisables ;
 - Déterminer l'extension spatiale de la propagation d'un événement de volume donné : les cheminements empruntés et les distances de propagation doivent être estimés pour caractériser l'intensité du phénomène en chaque point du territoire. Cette étape est compliquée et donne des résultats incertains ;
 - De nombreux modèles numériques de propagation de laves torrentielles ou de crues à charriage ont été développés. Utiliser ces derniers n'est toutefois pas la solution ultime. Comme dans le cas des avalanches (Ancey 2013), il faut savoir d'une part que les données permettant de valider ces outils sont en général lacunaires (l'outil est alors douteux en lui-même) et que, d'autre part, les ingénieurs ne disposent qu'extrêmement rarement des données pour caler le modèle sur le site étudié (l'utilisation de l'outil est douteuse aussi). Dans tous les cas, une analyse d'incertitude et de sensibilité est conseillée pour analyser et utiliser objectivement les résultats d'un modèle
- Au final, les modèles numériques peuvent aider à préciser un diagnostic de risque torrentiel s'ils sont utilisés dans leur domaine d'application, par un praticien averti et disposant des données suffisantes en nombre et qualité.

En synthèse, il faut retenir que les inondations par les crues des rivières de plaine sont un problème mieux défini car étudié depuis des siècles sur les grands fleuves (longues séries statistiques) et n'impliquant presque exclusivement qu'un excès d'eau, dont le comportement, décrit par les équations de Navier-Stokes, est bien connu. Les ingénieurs disposent donc d'analyses statistiques de qualité pour alimenter des modèles numériques de grande taille mais à la validité mieux comprise et aux équations relativement simples.

Les crues torrentielles sont, au contraire, mal connues, tant en termes de fréquence d'occurrence qu'en termes physiques et mécaniques (vitesses, hauteurs et densité des écoulements). Elles sont, de plus, changeantes selon l'état et la dynamique du système torrentiel, ce qui influence sa capacité à éroder ou déposer des matériaux, et du même coup la typologie et la magnitude de sa torrentialité.

3.2 Action 2 : Identification des processus d'endommagement

3.2.1 Mécanismes d'endommagement aux bâtis

On retient dans la suite de cette analyse la définition proposée par Leone (1996) : "Le processus d'endommagement, ou sollicitation, décrit l'action du phénomène sur l'élément structurel (ou bien) ou corporel (personne) qui le subit."

Salagnac et al. (2014) identifient 4 niveaux d'endommagement des bâtis dans leur analyse qui porte principalement sur les crues classiques des rivières :

- Niveau 1 : pas de ruine des ouvertures et pas de ruine des murs. Les dégâts sont limités au contact de l'eau avec les ouvrages de second œuvre, sachant qu'il est quasi impossible d'empêcher durablement l'eau de pénétrer dans un bâtiment ordinaire ;
- Niveau 2 : ruine des ouvertures (portes, fenêtres). L'eau pénètre à l'intérieur du bâtiment, ce qui a pour effet de rétablir l'équilibre des pressions de part et d'autre des murs qui peuvent de ce fait conserver leur intégrité. Aux réparations de niveau 1, s'ajoute alors au minimum la réparation des ouvrants ;
- Niveau 3 : ruine d'un mur non porteur. L'eau pénètre à l'intérieur du bâtiment avec le même effet d'équilibrage des pressions que pour le niveau 2. S'ajoutent aux précédentes la réparation des murs non porteurs ;
- Niveau 4 : ruine d'un mur porteur. La stabilité du bâtiment est compromise. Les réparations sont lourdes.

A la différence des crues de plaine dont la dynamique d'endommagement principale est la submersion (ennoiment des enjeux avec de potentielles suppressions hydrostatiques), les crues torrentielles génèrent des effets variés sur les enjeux (Figure 12).

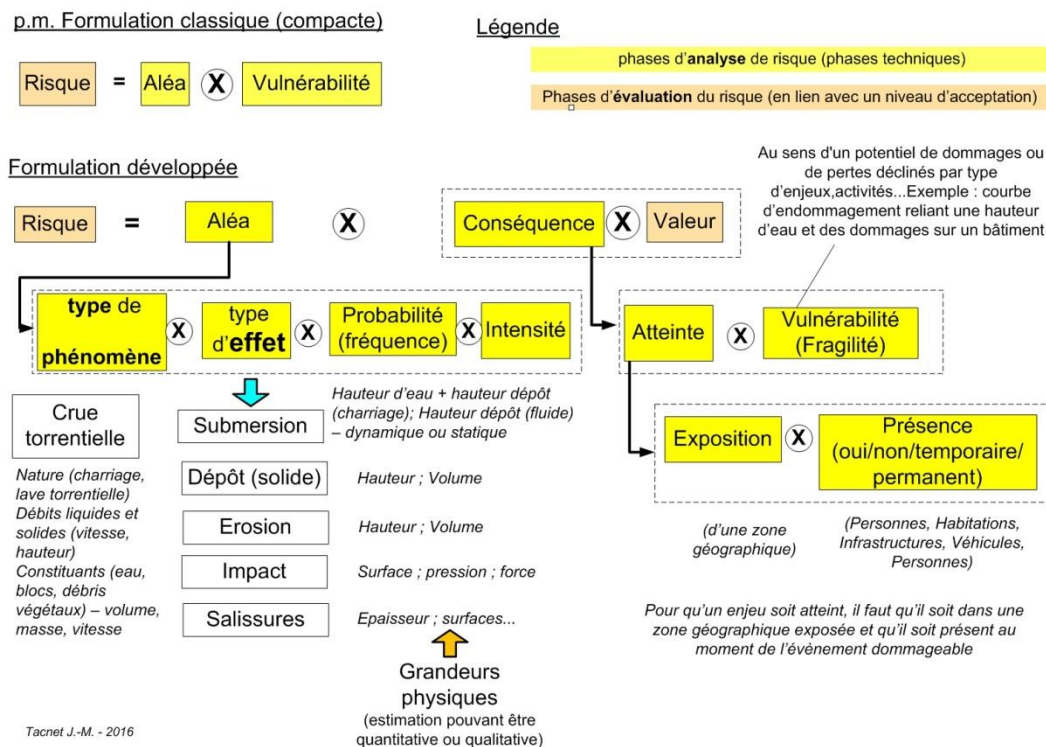


Figure 12 : Formulation complète du risque, le type d'effet étant une de ses composantes

Pour décrire les formes d'endommagement dues aux crues torrentielles, on reprend ici la terminologie et les illustrations proposées par Givry and Peteuil (2011) pour les bâtis et une extension est proposée sur la base de notre expérience.

3.2.1.1 Envahissement de la construction par l'eau et les sédiments

"La destruction des ouvertures entraîne l'envahissement de la construction. On peut se faire une idée des conséquences en se référant par exemple aux documents du service RTM 05 sur la crue du Peytavin du 24 juillet 1995, qui a endommagé le centre de vacances de la ville de Levallois-Perret.

Sur les légendes des photos, on trouve ceci : "L'eau chargée de boue et d'arbres s'est engouffrée par le premier étage situé à niveau à l'amont pour ressortir au rez de chaussée façade opposée. La salle à manger a été désertée précipitamment (crue vers 20 heures) ..."



Figure 13 : (a et b) Envahissement de constructions : Saint-Chaffrey, crue du Peytavin, 1995. Les escaliers empruntés par la boue et les dégâts au niveau inférieur (© ONF-RTM 05) et (c) crue de charriage hyper-concentré du torrent du Grand Rocher, Chantelouve, 2014 : traces laissées après dégagement des graviers qui atteignaient presque les poutres du plafond du rez de chaussée de la maison de Chantelouve (même maison que celle vue d'extérieur sur la Figure 17b). (© Guillaume PITON)

Le dégagement est plus lourd que dans le cadre d'une crue d'eau claire mais les dégâts intérieurs sont assez semblables à une crue d'eau claire envahissant le bâti avec des vitesses importantes.

3.2.1.2 Engrèvement / dépôt

"Nous avons vu que les crues torrentielles se traduisaient toujours par un transport et des dépôts sédimentaires importants, mais paradoxalement ces phénomènes, hors du lit mineur et de ses abords immédiats, ne sont pas très destructeurs pour les structures.

Les hauteurs atteintes sont parfois très spectaculaires, mais les bâtiments ne sont pas détruits : de nombreuses photos en témoignent et on trouve même parfois des éléments vitrés, tels que vérandas ou glaces de voiture, intacts bien que submergés."



Figure 14 : Photos d'épisodes d'engrèvement marqué : (a) Brigue-Glis, Suisse, 1993 (© Jean-Pierre Jordan OFEG) et (b) Baltschieder, Valais, 2000 (© Andreas Götz PLANAT-OFEG)

3.2.1.3 Affouillement

L'affouillement, c'est à dire l'érosion verticale d'un ouvrage, aussi appelé sous-cavage, est la **menace principale** pour les bâtis mais aussi pour les ponts ou les ouvrages de protection : la disparition des matériaux sur lesquels un ouvrage est fondé résulte rapidement en la ruine partielle ou totale de ce dernier par suppression des appuis en fondation. Ces affouillements apparaissent classiquement pendant les "divagations incontrôlées des écoulements en dehors du lit ordinaire. Il est très difficile d'en apprécier la localisation et l'ampleur, et donc de bien le quantifier. Pour ce risque, il faut toutefois considérer plusieurs mécanismes possibles :

- *recul des berges du torrent, voire déplacement de son lit, la manifestation la plus classiquement observée étant l'érosion des berges situées à l'extrados des méandres ou des bras actifs, souvent accompagnée d'une attaque de la berge opposée quelques dizaines de mètres plus en aval ;*
- *divagation du torrent hors de son chenal d'écoulement ordinaire. Ce type d'érosion peut être assez spectaculaire (cf. Figure 5), même loin du lit initial, car il est capable d'affouillements de plusieurs mètres. Cette situation est particulièrement dommageable dans le cas d'un bâtiment implanté sur un terrain en remblai ;*
- *incision verticale qui conduit à la destruction des berges et des fondations des ouvrages. Là aussi, ce mécanisme d'incision peut atteindre plusieurs mètres ;*
- *survitesses intervenant par exemple à l'angle de bâtiments, du fait de la concentration des écoulements.*

Des phénomènes comparables sont classiquement observés au droit de piles de ponts."



Figure 15 : Affouillements : (a) baraque RTM de Barège sur le Bastan en Juin 2013 (© ONF-RTM65) et (b) maison de particulier plus en amont (© Guillaume PITON)

Il convient également de noter que des phases d'érosion et dépôt peuvent parfois se succéder au cours d'une même crue en un point donné. L'état final observé n'est donc pas forcément représentatif pour identifier et justifier le mécanisme et la cause de ruine d'un bâtiment ou d'une structure.

3.2.2 Localisation des endommagements

3.2.2.1 Vulnérabilité des angles

"En général, les affouillements se concentrent très souvent dans les angles par un mécanisme d'accélération tourbillonnaire. Il n'est pas étonnant que pour les bâtiments anciens les destructions commencent presque toujours par un angle. L'angle est le point le plus vulnérable d'une construction en maçonnerie peu ou pas chaînée."



Figure 16 : Vulnérabilité des angles des bâtiments en maçonnerie ((a) © photo d'époque DR, (b) ONF-RTM 38 et (c) Yannick Guigal, IRMa)

3.2.2.2 Dommages sur les murs

"La destruction des murs par impact est dans l'ensemble assez rare. En regardant certaines photos qui font apparaître de grandes hauteurs touchées et des dépôts très importants, on est souvent surpris de la résistance des parois pleines des bâtiments face à une crue torrentielle.

On peut se remémorer les débordements du Saint-Antoine à Modane en 1987, où des camions ont été emportés par la crue et sont allés percuter des bâtiments industriels. Ces bâtiments industriels, avec des charpentes métalliques et des remplissages en parpaings, sont pourtant restés intacts."



Figure 17 : Illustration de la résistance des murs structurants : (a) Modane (73), lave torrentielle du Saint Antoine de 2014, vue amont du dépôt de bus. Les tôles de couvertures ont été arrachées alors que la structure en béton semble relativement intacte, la lave torrentielle a pourtant laissé des marques jusqu'au deuxième étage (© Guillaume PITON) et (b) crue de charriage hyper-concentré du torrent du Grand Rocher, Chantelouve (38) 2014, le bâtiment engravé jusqu'au niveau du premier étage ne porte pourtant pas de trace de dommages mises à part les traces d'humidification (© Marie Spitoni)

"Dans les archives des services RTM, on trouve souvent des illustrations de même type, avec des murs intacts malgré des hauteurs de sollicitation d'environ un niveau. De même, on trouve aussi parfois des images très impressionnantes d'impact par des flottants avec des bâtiments intacts."



Figure 18 : Accumulation de flottants venus impacter un bâtiment avec pourtant un minimum de dégâts : Valais suisse, 2000 (© Robert Marie, ONF-RTM38)

On notera que si les parties structurantes des bâtiments industriels peuvent être peu touchées, les surpressions sur des parois non structurantes entraînent de gros dommages. Par exemple les tôles du dépôt de bus de Modane n'ont aucunement résisté au passage de la lave torrentielle (**Figure 19**).



Figure 19 : Modane, lave torrentielle du Saint Antoine de 2014, vue de l'aval du dépôt de bus. Les bus, soulevés par la lave torrentielle (épaisseur 1.5 – 2 m) ont été déplacés et sont passés à travers la paroi en tôle du dépôt. La structure métallique porteuse a toutefois tenu ((a) © Guillaume PITON et (b) Simon CARLADOUS, ONF-RTM DN)

"Les images de murs détruits, sans affouillement des fondations, sont rares et ils correspondent toujours à de très gros impacts de bloc ou de flottants."



Figure 20 : Destruction de murs par impact de blocs : Val d'Aoste 2000 (© Région Autonome Vallée d'Aoste)

On retrouve ici à travers les dommages la distinction entre charriage hyper-concentré et lave torrentielle. Les spécialistes relèvent que le premier phénomène transporte d'importants volumes de matériaux mais ne génère pas de pression d'impact beaucoup plus forte qu'une crue d'eau claire (Kaitna and Hübl 2013). La problématique des affouillements reste par contre très prégnante lors des crues à charriage hyper-concentré

(Figure 15). C'est le front des laves torrentielles, constitué de gros blocs poussés par la masse du corps de la lave torrentielle, qui leur donne leur pouvoir destructeur plus important.

3.2.2.3 Destruction des ouvertures

"Si les murs pleins résistent assez souvent correctement, les ouvertures par contre sont beaucoup plus vulnérables et plus facilement endommagées."

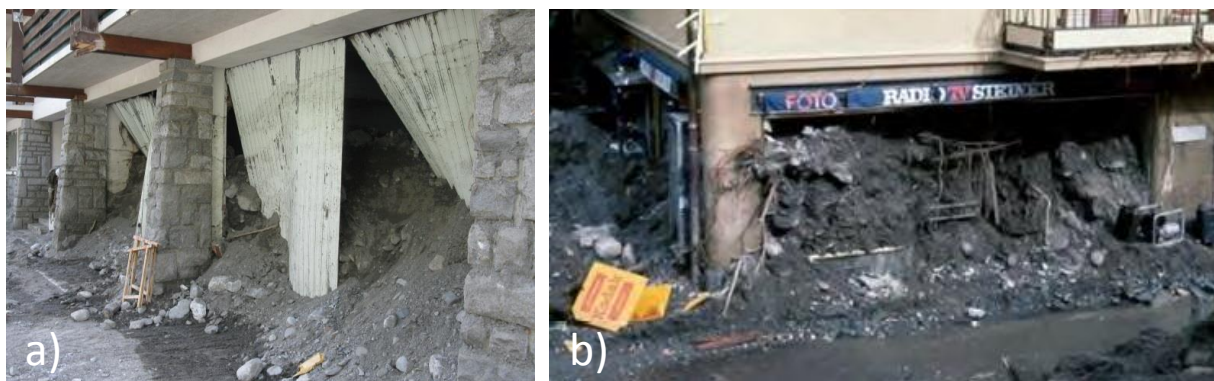


Figure 21 : Destruction des ouvertures, (a) garages de Barège après la crue du Bastan de 2013 (© Guillaume PITON) et (b) Brigue-Glis, Suisse, 1993 (© Roberto Loat OFEG)

Il faut toutefois noter que les documents de référence sur l'endommagement des bâtis soumis aux inondations font la distinction entre bâtis avec et sans étage ou avec et sans sous-sol (CEPRI 2013) : la justification est liée au caractère porteur des murs des bâtiments à plusieurs niveaux qui sont donc plus résistants et souvent constitués de matériaux différents. Les bâtiments à un niveau peuvent donc être plus vulnérables aux surpressions hydrauliques et géomécaniques que les autres.

3.2.3 Effets et dommages sur les infrastructures

3.2.3.1 Réseaux

Les réseaux qu'ils soient routiers, ferroviaires, de transport d'énergie, d'eau usée ou potable, sont principalement sensibles (Figure 22) :

- Aux affouillements principalement : destruction régulière des structures nécessitant des réparations qui peuvent être longues : dommages directs et indirects (interruption longue du fait de la destruction du réseau) ;
- Aux engravements et aux impacts dans une moindre mesure, puisqu'ils n'engendrent généralement pas de désordres structurels majeurs mais nécessitent une intervention pour déblayer et rétablir le fonctionnement (plus rapide) ;
- A l'invasion par les eaux de la même manière que dans le cas des crues fluviales : rétablissement très rapide du fonctionnement ;



Figure 22 : Les crues torrentielles peuvent causer des dégâts sur des infrastructures critiques (réseaux de transport, énergie...) (Tachet et al. 2016)

3.2.3.2 Ouvrages d'art

Les ponts et autres ouvrages d'art transversaux aux cours d'eau torrentiels sont très régulièrement endommagés lors des crues. La problématique de l'affouillement est ici encore une menace prépondérante, au même titre que :

- Les impacts des laves torrentielles qui déplacent, endommagent et entraînent parfois la disparition de tabliers de pont ;
- Les accumulations de flottants formant des embâcles qui 1) aggravent les problématiques d'inondations à l'amont en formant un obstacle à l'écoulement des eaux au niveau de la structure. Ceci entraîne une rehausse des niveaux d'eau et une tendance accrue au dépôt de sédiments, entraînant par effets en cascade toujours plus de débordements (Givry and Peteuil 2011) ; 2) entraînent, par restriction de la section hydraulique au droit de l'ouvrage des surtensions locales (effet Venturi) et une aggravation des affouillements de la structure (Lagasse et al. 2010).

3.2.3.3 Ouvrages de protection

Les structures transversales telles que les barrages de correction torrentielle et les plages de dépôts peuvent être soumises aux mêmes sollicitations que les ouvrages d'art (Deymier et al. 1995). La problématique de l'impact des laves torrentielles et les aggravations des processus de dépôt liés à l'obstruction par les embâcles sont en effet très similaires (Piton and Recking 2016a, 2016b, Hubl et al. 2017).

Les structures longitudinales telles que les protections de berges et les digues sont régulièrement sollicitées par l'aspect affouillant des crues torrentielles qui est la cause principale de leur ruine (Recking et al. 2013 p. 267). La problématique d'engravement menace aussi les endiguements par augmentation du risque de surverse et de rupture par érosion de surface.

3.2.4 Les parcelles agricoles

Les parcelles agricoles peuvent être endommagées :

- par le simple passage de l'écoulement d'eau claire, avec le même type d'endommagement que par submersion lors des crues fluviales ;
- par l'engravement : au-dessus d'une certaine épaisseur de dépôt, les agriculteurs ne sont plus en mesure de remettre en état la parcelle et l'évacuation doit être réalisée par des engins spécialisés (Fauré 2015) ;
- par l'affouillement, qui est là aussi l'effet des processus torrentiels qui génèrent les dommages les plus graves (par exemple Figure 5) : la terre végétale est en général présente sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres. Elle est la première couche à être emportée une fois que la capacité protectrice du couvert végétal est dépassée, et son remplacement est très coûteux (Fauré 2015) ;

3.3 Action 3 : Evaluation des intensités de phénomène et niveaux d'aléas

La définition des intensités de phénomènes torrentiels est un sujet complexe lié à la nature multiple et concomitante des processus et des dynamiques d'endommagement. Nous avons tenté d'expliquer dans la présente note que le caractère torrentiel des écoulements n'est pas limité à quelques bassins versants de montagne. On en retrouve des traces dans beaucoup de situations : ruissellements extrêmes en zone rurale, crues éclair en zone méditerranéenne, rupture d'ouvrages hydrauliques. Malgré l'impressionnante violence des crues des torrents alpins, il nous semble peu pertinent de limiter notre analyse, et la portée de nouvelles recommandations visant des AMC torrentielles aux seuls torrents. Par ailleurs, il serait dommageable que les études d'aléas servant à la réalisation des PPR n'aient pas une approche cohérente avec les études qui alimentent les ACB et AMC demandées dans les PAPI. L'identification des intensités de phénomène et niveaux d'aléas considérée dans les AMC torrentielles doit donc, de notre point de vue, à la fois :

- Suivre les méthodes d'estimation des critères d'intensité qui permettent de construire les zonages PPR en étant complétée par l'étude d'autres scénarii en termes de fréquence de phénomène et d'aménagements ;
- Prendre en compte le continuum entre torrents, rivières torrentielles et rivières de plaine et en conséquence proposer des techniques adaptées à l'ensemble des problématiques torrentielles et pas seulement, pour rester simpliste, aux torrents à laves torrentielles.

3.3.1 L'évaluation des niveaux d'intensité selon l'approche PPR torrents

Un guide d'élaboration des PPR (Plan de Prévention des Risques) crues torrentielles est en cours d'élaboration depuis 2008 (travail relancé et pilotage actuel par le RTM). Des extraits de sa version de travail ont notamment servi dans la rédaction du guide « Construire en montagne » de Givry and Peteuil (2011). On reprend ici des éléments et ajoutons quelques remarques afin d'assurer une cohérence entre les documents qui traitent du sujet.

Vis-à-vis de la détermination des aléas en termes d'intensité, on note que *"Dans le cas des inondations de plaine, l'intensité du phénomène est classiquement traduite par les caractéristiques physiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, durée), et, souvent, par le seul débit liquide de pointe.*

Pour les crues torrentielles, dans les zones à fortes pentes, les vitesses d'écoulement dépassent souvent des valeurs de quelques mètres par seconde, même pour des débits et des hauteurs faibles⁶. Par ailleurs, la détermination d'une hauteur d'écoulement souffre encore de très nombreuses indéterminations, et encore plus lorsque l'écoulement a lieu en dehors du lit ordinaire du torrent.

Pour définir et appliquer des prescriptions d'urbanisme, l'expérience montre aussi qu'il est souvent plus pertinent de considérer des critères comme la hauteur de l'engravement qui peut affecter les terrains exposés ou la profondeur des affouillements susceptibles de se produire localement. La taille des plus gros blocs transportés est à ce titre un élément d'appréciation intéressant car il renseigne sur l'effort d'impact potentiel de l'écoulement."

Les classes d'évaluation du niveau d'intensité associée aux caractéristiques des phénomènes torrentiels sont synthétisées dans la Table 2. Les gammes d'endommagement typique en fonction des gammes d'aléas sont synthétisées dans la **Table 3**.

Selon notre expérience et la connaissance que nous avons de la validité des modèles numériques et des doutes qui persistent quant à la qualité de leur utilisation, nous pensons que, dans une assez grande majorité des cas portant sur des torrents, la cartographie de ces niveaux d'intensité géomorphologiques est à réaliser par des approches croisant géomorphologie, analyse historique et calculs hydrologiques et hydrauliques **simplifiés**. Le recours à la modélisation numérique et/ou physique ne devrait être limité qu'à des cas à forts enjeux ou trop complexes pour être traités par les méthodes classiques.

⁶ L'ensemble des zones concernées par des débordements torrentiels serait donc classées en rouge, i.e., en aléa fort au sens des seuils retenus en inondation de plaine, ce qui semble déraisonnable s'il s'agit seulement d'une lame d'eau de 10 cm de haut sans activité morphogène générant un risque.

Table 2 : Relations entre critère d'intensité et classes d'aléas (Guide PPR Torrent, version de travail)

Caractéristiques des phénomènes torrentiels	<u>Niveaux d'intensité retenus</u>		
	Fort	Moyen	Faible
Paramètres hydrauliques	La brutalité des phénomènes et des débordements ne laisse pas la possibilité d'anticiper et de se déplacer hors de la zone exposée ou jusqu'à une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement dépasse 1 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur supérieure à 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés excède 50 cm.	Les phénomènes sont suffisamment progressifs pour laisser la possibilité d'anticiper et, au moins, de rejoindre une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 1 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 50 cm.	Les phénomènes sont progressifs et laissent la possibilité d'anticiper pour quitter la zone menacée ou rejoindre une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 0,5 m. Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 0,5 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 10 cm.
Flottants	Les risques d'impact par des flottants de grande taille (arbres) sont importants.	Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont faibles.	Les flottants sont de petite taille et ne peuvent pas endommager une façade de maison.
Laves torrentielles	La parcelle peut être atteinte par des laves torrentielles , soit en zones de transit soit en zones de dépôts épais et pouvant contenir des blocs de plus de 50 cm.	La parcelle est située en dehors des zones de transit des laves torrentielles, mais peut être atteinte par des dépôts fluides de moins de 1 m d'épaisseur et sans éléments transportés de plus de 50 cm	La parcelle ne peut pas être atteinte par des laves torrentielles

Table 3 : Effets prévisibles sur les enjeux en fonction de la classe d'intensité (adapté du Guide PPR Torrent, version de travail)

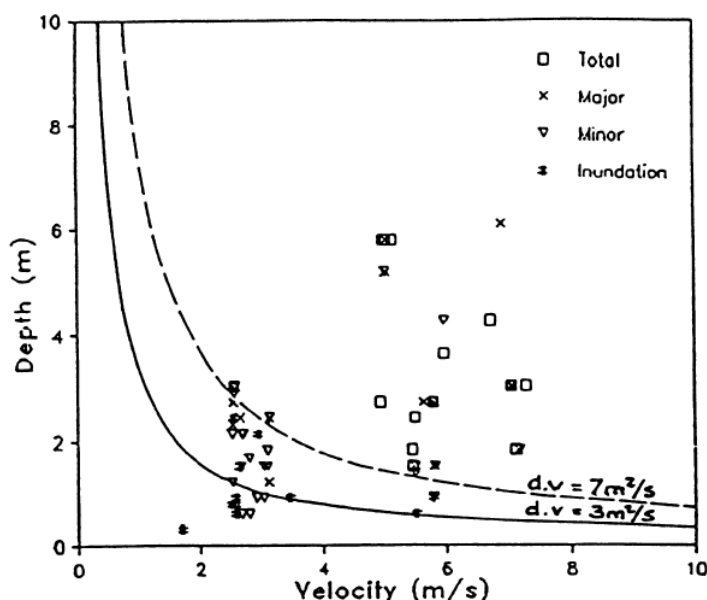
Type d'enjeux	Effets prévisibles sur les enjeux		
	Intensité forte	Intensité moyenne	Intensité faible
Espaces naturels et agricoles	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion de grande ampleur sont prévisibles à cause des divagations du lit du torrent. Ils conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion sont prévisibles mais leur ampleur reste limitée	Les écoulements prévisibles sont de faible hauteur. Les dépôts peuvent être boueux mais sans matériaux de plus de 10 cm. Les affouillements prévisibles sont faibles.
Bâtiments	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent détruire les bâtiments exposés. La ruine des constructions peut notamment intervenir par impacts sur les façades ou par sapement des fondations (notamment sur les angles des bâtiments, plus particulièrement menacés d'affouillement par la concentration des écoulements et les survitesses).	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent endommager gravement des façades non renforcées mais sont insuffisantes pour endommager des façades renforcées. Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions fondées à au moins 1 m de profondeur.	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont modérées et ne peuvent pas endommager des façades usuelles même non renforcées. Les affouillements prévisibles sont faibles et ne peuvent pas menacer les fondations des bâtiments
Infrastructures et ouvrages	Les ponts peuvent être engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements (pylônes, captages,...) faisant obstacle aux divagations du torrent peuvent être détruits ou ensevelis par des dépôts. Les voies de circulation sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.	Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylônes, captages,...) restent modérés ou ponctuels et leur remise en service peut être rapide.	Les routes peuvent être submergées mais sans endommagement et avec possibilité de remise en service rapide.

3.3.2 Introduction d'un critère additionnel ou alternatif à la hauteur d'eau

L'approche proposée pour la version provisoire du guide PPR torrentiel est basée sur la connaissance des torrents de montagne où d'une part les facteurs géomorphologiques sont prépondérants sur les paramètres hydrauliques (hauteur et vitesse), et, d'autre part, où les outils actuels de modélisation sortent de leur zone de validité (dans l'état actuel des connaissances en la matière). On peut imaginer que dans le cadre des rivières torrentielles, des problématiques de ruissellement avec activité géomorphologique limitée ou dans des contextes plus méditerranéens qu'alpins, les phénomènes se situent entre les inondations de plaine et les crues torrentielles. Dans ce cas, la question du choix de l'approche à appliquer à ces cas mixtes entre ruissellement, crue torrentielle et crue fluviale est posée.

Moncoulon et al. (2014) note, à travers des analyses croisées de modélisation numérique et de bases de données de dommages réels⁷, que jusqu'à 50% des dommages réels sont localisés hors des zones inondables identifiées par les modèles numériques de crues de plaine. C'est par l'ajout d'un modèle relatif au phénomène de l'aléa ruissellement que ces dommages peuvent être compris et représentés. La CCR (Caisse Centrale de Réassurance) nous indiquait par ailleurs dans des échanges récents, que les courbes d'endommagement des enjeux dans ce modèle de ruissellement ne dépendent pas de la seule hauteur d'eau, telle que retenue dans le modèle d'inondation, mais plutôt du produit entre hauteur et vitesse de l'eau, c'est-à-dire du **débit linéique** (débit exprimé en $\text{m}^3/\text{s.m}$, soit le débit local passant dans une bande de 1 m de large). La pertinence de l'utilisation de ce débit unitaire est vraisemblablement liée à sa corrélation avec la capacité locale de la crue à endommager le terrain, l'éroder ou y transporter blocs et flottants.

Cette approche d'estimation de l'intensité de l'aléa par le débit linéique a aussi été proposée il y a déjà quelques temps par divers auteurs dans des analyses post-crues liées à des ruptures de barrages et digues. Karvonen et al. (2000) synthétisent ainsi certaines approches et citent en particulier le travail de Clausen and Clark (1990) qui, croisé avec d'autres, est retenu pour les recommandations Finnoises dans les analyses de risque de rupture de barrage. Cette approche est reprise aussi dans des travaux récents suisses, italiens et autrichiens.



Ces derniers arrivent à la conclusion d'une augmentation dans le niveau d'endommagement au-dessus d'une valeur de $q=h.V=3 \text{ m}^2/\text{s}$, et d'observations de ruptures totales au-dessus de $q=h.V=7 \text{ m}^2/\text{s}$ pour les bâtiments en briques (Figure 23). Karvonen et al. (2000) concluent à des seuils limites de $2 \text{ m}^2/\text{s}$ et $3 \text{ m}^2/\text{s}$ associés à la destruction des bâtiments en bois non ancrés par un croisement avec d'autres données de la littérature. Une adaptation est parfois retenue en-dessous d'un certain seuil de vitesse et au-dessus d'une certaine hauteur.

Figure 23 : Courbes de dommage de Clausen and Clark (1990) pour des bâtiments en maçonnerie et briques, suite à la reconstitution de la rupture du barrage de Dale (UK, 1864)

Il est intéressant de noter que l'approche par débit linéique est aussi recommandée pour le cas des ruissellements dans la *Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation* (MEDDE 2012 p. 36).

Une telle approche complémentaire devrait probablement être intégrée en complément des approches géomorphologiques. On pourrait ainsi espérer décrire une gamme aussi étendue que possible des

⁷ Données assureurs fournis à la CCR, Caisse Centrale de Réassurance

phénomènes dits "torrentiels", qu'il s'agisse de phénomènes de crue éclair (cf. §3.1.1) ou que le site présente un comportement tendant vers celui des torrents alpins.

3.4 Action 4 : Définition des typologies d'ouvrages de protection

On peut considérer deux grands types d'ouvrages de protection des enjeux dont l'objectif reste de réduire les dommages potentiels :

- Les mesures de mitigation concernant les enjeux eux-mêmes ont pour objectif de réduire l'endommagement de cet enjeu, sans agir sur l'intensité du phénomène. Dans ce cas, à intensité égale, l'endommagement sera réduit ;
- Les ouvrages de protection au sens strict ont pour objectif d'agir sur le phénomène, en modifiant soit son niveau d'intensité, soit sa probabilité d'occurrence associée sans agir sur le potentiel d'endommagement de l'enjeu lui-même.

3.4.1 Protections intégrées à l'enjeu (mitigation)

On rappellera en premier lieu que les mesures qui sont usuellement préconisées à l'échelle du bâtiment dans le cadre de la protection contre les crues fluviales restent la plupart du temps applicables dans le cadre des crues torrentielles. Le *"Référentiel de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant"* (METL-MEDDE 2012) préconise et décrit la mise en œuvre de batardeaux sur les ouvertures (fenêtres, portes), le colmatage des voies d'eau, la mise en œuvre de clapets sur les réseaux.... D'autres éléments plus généraux sur la protection des bâtis contre les dégâts liés à la submersion sont présentés dans Salagnac et al. (2014).

Dans le cas torrentiel, la présence d'une fraction solide importante dans les écoulements, les volumes dépôts considérables et les affouillements marqués amènent toutefois à préconiser la mise en œuvre de mesures complémentaires.

On se référera encore une fois à Givry and Peteuil (2011) pour avoir des détails sur les préconisations spécifiques au contexte torrentiel. Ces préconisations sont inspirées des recommandations suisses applicables aux contextes similaires et portent sur des adaptations concernant :

- Les réflexions à mener vis-à-vis des possibilités et conditions d'évacuation du bâti (vulnérabilité humaine) ;
- La protection contre les affouillements des fondations ;
- Les renforts de pieds de murs aux angles des bâtiments ;
- Les liaisons, chaînages et autres dispositions complémentaires sur les parties structurantes du bâti ;
- Les reprises en sous-œuvre et ajouts sur des bâtiments existants ;
- La protection des réseaux enterrés ;
- La protection des ouvertures par des parois déflectrices ou par des huisseries particulières.

3.4.2 Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection contre les crues torrentielles ont historiquement été adaptés à partir de leurs équivalents mis en œuvre dans le contexte de la protection contre les crues de plaine. L'endiguement des torrents sur leur cône de déjection a toutefois rapidement montré ses limites. Les problématiques d'engravement pouvaient, en particulier, être aggravées par la diminution de l'espace laissé au torrent. A la suite de Surell (1841), de nombreux praticiens se sont intéressés à la "correction" des torrents durant le XIX^{ème} siècle et par la suite (Piton et al. 2017).

La problématique est plus compliquée, voire plutôt plus complexe (Keiler 2011), que dans le cas des crues de plaine parce que les ouvrages sont conçus pour jouer des rôles très divers sur les processus de crue. C'est la typologie de la crue, caractérisée par un (ou des) processus torrentiel(s), qui provoque son effet destructeur (laves torrentielles ou non, embâcles ou non). Cette typologie dépend de couplages complexes entre les dynamiques du lit du torrent et des sources sédimentaires : une incision réactivant par exemple un glissement de terrain pourra générer de nouvelles laves torrentielles. Il ne faut donc pas seulement comprendre les

conditions locales d'écoulement (relation hauteur-débit), mais aussi l'ensemble de la chaîne causale des crues et comment les ouvrages influencent cette dernière. Il a ainsi été observé, lors des exercices de réalisation d'une étude de danger d'un système d'endiguement d'un torrent des Hautes-Alpes (La Salle-les-Alpes), que l'absence d'une étude d'aléa torrentiel du bassin versant amont rendait le diagnostic du seul système d'endiguement très compliqué et incertain (Mériaux et al. 2013).

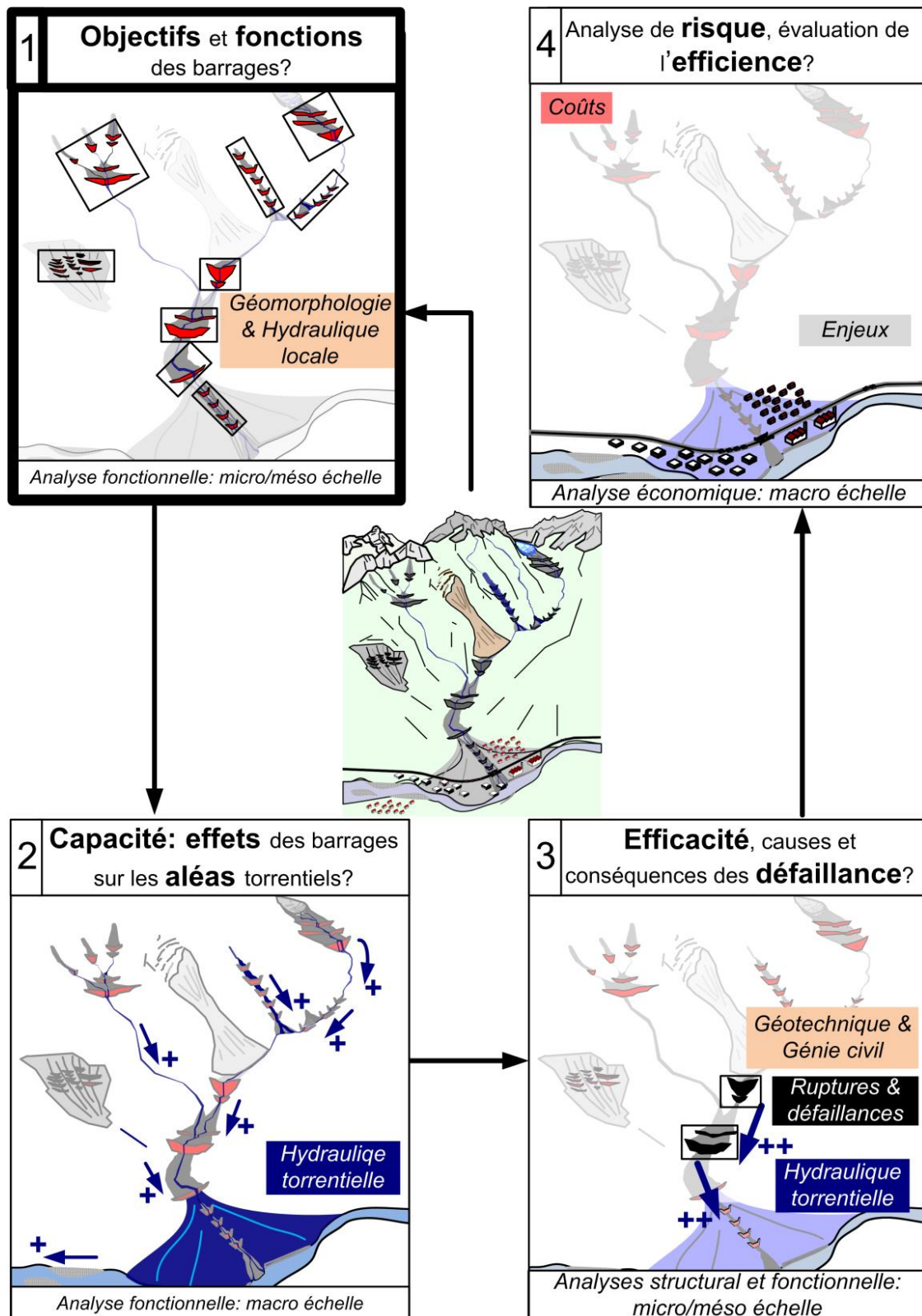


Figure 24 : Etapes d'estimation de l'efficacité d'un système de protection contre les crues torrentielles : 1 : caractérisation des fonctions de chaque ouvrage (rôle qualitatif) ; 2 : estimation des capacités unitaires des ouvrages (rôle quantitatif) et estimation de l'effet cumulé du système de protection ; 3 : estimation des causes et des conséquences des potentielles défaillances des ouvrages et 4 : estimation économique de l'efficacité. Figure traduite de Piton et al. (2017)

La Figure 24 résume les étapes à mener dans l'étude de l'efficacité et de l'efficience d'un système de protection contre les risques torrentiels (ici appliqué aux barrages de correction torrentielle). On se rapportera aux travaux de Carlados (2017) pour en avoir un aperçu plus détaillé. Le concept d'efficacité correspond à la comparaison entre une capacité technique et d'un objectif associé. Par exemple, l'objectif de conception (besoin) d'un barrage peut être de stocker 10 000m³, tout le volume provenant d'un glissement. Si l'ouvrage n'en stocke que 8000 ou si l'estimation du volume est erronée, l'ouvrage pourra être considéré comme inefficace. On mesure ici la difficulté d'appréciation de l'efficacité qui reste un concept relatif par rapport à une référence qui n'est pas toujours explicitée clairement. L'approche globale proposée dans les travaux de recherche récents consiste ainsi à identifier les objectifs, les capacités, les modes de défaillance possibles des ouvrages par rapport à leurs fonctions puis à qualifier le niveau d'efficacité et d'efficience (comparaison entre l'efficacité et les coûts associés).

En première approche, la Table 4, tiré de Carlados et al. (2016), synthétise les différents types d'ouvrages de protection contre les crues torrentielles et tente de préciser leurs fonctions (description qualitative d'effets sur le système torrentiel), les effets escomptés sur le processus de crue, la capacité des ouvrages (estimation quantitative de cet effet) et les caractéristiques du système torrentiel qui influencent cette capacité.

Une étape d'agrégation des évaluations d'indicateurs relatifs aux effets des ouvrages est ensuite à mener et fait l'objet de recherches.

L'évaluation quantitative de la capacité des ouvrages s'est longtemps basée sur un processus d'expertise peu formalisé. Il en résulte, par exemple, qu'à l'heure actuelle, la description du mode de prise en compte des ouvrages de protection dans les plans de prévention des risques torrentiels reste malheureusement souvent partielle et toujours très hétérogène, confirmant un besoin accru de traçabilité⁸ (Philippe et al. 2016). Les recommandations ministérielles⁹ applicables au risque d'inondation, visant à exclure toute prise en compte des ouvrages de protection (digues essentiellement), sont difficilement applicables au contexte torrentiel, du fait notamment des profondes modifications des chenaux occasionnées par l'installation d'ouvrages de correction ainsi que de leur effet sur la magnitude des événements (réduction du volume transporté) et non seulement sur leur extension. Des recommandations sur les conditions et les techniques de prise en compte des ouvrages de protection torrentielle doivent voir le jour, de nombreux verrous techniques persistent toutefois dans la détermination des capacités des ouvrages (étape 2 de la Figure 24), c'est-à-dire de leur effet quantitatif sur les processus de crue (Piton and Recking 2016a, 2016b, 2016c).

La réalisation d'AMC dans le cadre torrentiel doit en conséquence faire apparaître, de façon très claire la fonction des ouvrages programmés. Le tableau ci-dessus illustre bien la fonction des digues et protections de berge est unique : elle est donc implicite dans la plupart des études de définition d'un système de protection. La complexité des systèmes montagnards faisant émerger plusieurs fonctions potentielles pour un ouvrage type, l'étape de définition des fonctions des ouvrages doit faire l'objet de plus d'attention et d'un affichage clair dans le programme du PAPI.

⁸ Les nouveaux guides PPR (pilotage Ministère Transition Ecologique et Solidaire/DGPR) en cours de rédaction font référence à ces prescriptions et recommandations

⁹ MTES/DGPR.

Table 4 : Ouvrages de protection, fonctions, capacités, paramètre dimensionnant principal et effets escomptés

Ouvrage	Fonction	Effets escomptés sur les crues	Capacité	Facteur d'influence de la capacité
Digues	Maintenir l'écoulement dans un cheminement donné	Diminuer la fréquence d'inondation par débordement	Magnitude de l'évènement maximum contenu par le système	Type de processus torrentiel, niveau d'écoulement
Protection de berges	Prévenir les divagations de l'écoulement hors d'une zone donnée	Diminuer les érosions latérales	Longueur et profondeur de zone protégée	Type de processus torrentiel, sensibilité d'affouillement et d'érosion des berges
Barrages et seuils de correction torrentielle	Stabiliser le lit du torrent	Diminuer la production diffuse de sédiment sur le long terme, faciliter la reprise de la végétation	Volume de sédiment potentiellement érodé par incision et érosion de berge maintenu sur le long terme	Géologie, profondeur potentielle d'érosion, morphologie de la vallée
	Consolider les versants instables	Empêcher la fourniture massive de sédiments	Volume de glissement de terrain ou d'avalanche rocheuse maintenu dans le versant	Géologie, géométrie et caractéristiques géotechniques du mouvement de masse, hydrogéologie
	Diminuer les pentes du torrent	Prévenir les fortes intensités de transport et le transport de gros blocs	Diminution de capacité de transport en volume et en taille des blocs transportés	Hydrologie, fourniture sédimentaire, granulométrie du lit et des apports
	Piéger durablement les sédiments	Piégeage durable des sédiments jusqu'à remplissage de l'ouvrage	Volume total piégé par l'ouvrage	Fourniture sédimentaire, géométrie de la vallée
	Réguler le transport solide	Diminuer les intensités de transport	Volume tamponné par l'ouvrage	Fréquence et intensité de la fourniture sédimentaire, largeur et longueur des biefs entre structures, type de processus torrentiel

Suite Table 4 : Ouvrages de protection, fonctions, capacités, paramètre dimensionnant principal et effets escomptés

Ouvrage	Fonction	Effets escomptés sur les crues	Capacité	Facteur d'influence de la capacité
Plages de dépôts, pièges à blocs et pièges à flottants	Piéger les apports d'une crue	Piéger la charge solide à l'échelle d'une crue	Volume piégé par l'ouvrage pour être ensuite curé	Volume de l'évènement
	Trier les éléments grossiers indésirables	Piéger les éléments qui aggravent le risque en aval : gros flottants et blocs	Diminution dans la taille des plus gros blocs et flottants transportés	Type et taille des matériaux à piéger
	Moduler le pic de crue	Diminuer les niveaux au pic par diminution du débit au pic	Diminution du débit instantané (eau ou sédiment)	Type de processus torrentiel (charriage, lave torrentielle)
	Dissiper l'énergie de l'écoulement	Diminuer l'érosion du chenal, meilleur transfert aval par diminution des bouffées de laves torrentielles	Diminution dans le nombre de fronts granulaires de laves torrentielles	Taille des blocs transportés, nombre caractéristiques de bouffées
Influences des forêts de protection et de la petite correction de versants sur les aléas torrentiels	Maintenir les sédiments sur les versants	Réduire la fourniture régulière de sédiment et la charge sédimentaire à des échelles locales et plus larges	Volume maximal potentiellement érodé fixé par la forêt	Surface et profondeur d'érosion potentielle couverte.
	Limiter les ruissellements	Réduire les débits de crue (peu efficace sur les crues extrêmes)	Volume d'eau tamponné	Intervalle de temps entre les événements de pluie, intensité des événements, pédologie et surface de sol couvert
	Stopper la propagation des chutes de blocs	Réduire la fourniture du torrent en élément grossiers (blocs)	Volume global de blocs retenus sur les versants	Volume des blocs, type de peuplement
	Fixer le manteau neigeux dans les zones de départ d'avalanches	Réduire la fourniture des torrents en flottants et solides transportés par les avalanches	Volume global de neige retenue sur les versants	Pente et potentielles pentes amont non reboisables (falaises, haute altitude, glaciers)

4 Conclusions et perspectives pour la phase 2 : évaluation quantitative et/ou qualitative des dommages

L'étude globale dans le cadre duquel sont réalisés ces travaux vise à analyser les modalités d'application des analyses multicritères de type coût-bénéfices étendues au contexte torrentiel. Cette première partie a rappelé les principales caractéristiques des phénomènes torrentiels avec pour objectif d'en illustrer les spécificités par rapport au contexte plus classique des crues et inondations de plaine. Il s'agit également d'une part d'identifier les verrous relatifs à l'application de la méthode générique conçue et développée pour les inondations classiques et, d'autre part, de décrire comment il est possible ou pas de progresser pour adapter la méthode au contexte torrentiel. Dans ce cadre, la méconnaissance des fonctions d'endommagement, qui relient les caractéristiques physiques d'un phénomène aux effets sur des enjeux est un point critique. La phase 2 traite de cet aspect. Nous proposons de retenir du présent rapport les éléments suivants :

- Certaines crues présentent des caractéristiques "torrentielles" qui doivent être prises en compte dans la caractérisation (nature) et la quantification (physique, économique¹⁰) des dommages. Ces conséquences négatives (regroupées sous le concept de dommages) sont liées à leur capacité à impacter des structures, à éroder les berges et le lit des cours d'eau, à transporter et déposer des matériaux solides (principalement bois et sédiments) pouvant modifier considérablement le niveau du lit lors des crues et causer des affouillements ou des débordements beaucoup plus importants. Ce caractère s'exprime dans de nombreux contextes : les torrents alpins évidemment, mais aussi dans des configurations de ruissellement extrême (en contexte rural, péri-urbain), de crues cévenoles, d'onde de submersion liée à une rupture de lac, etc. Nous recommandons donc de considérer l'ensemble de ces contextes dans l'analyse à venir. La méthodologie visera donc un niveau suffisant de polyvalence pour être adaptée à l'ensemble des problématiques précitées.
- Il n'est pas simple de proposer une méthode générique d'estimation des dommages liés aux crues torrentielles parce qu'elles regroupent des phénomènes physiques différents (laves torrentielles, charriage, débâcles). La qualification de ces phénomènes en terme d'aléa doit donc être multifactorielle pour prendre en compte non pas le seul effet de submersion, classiquement retenu dans le contexte des inondations, mais aussi le dépôt, l'érosion, l'impact, les salissures dont les manifestations ont des extensions spatio-temporelles variables. Les dynamiques d'endommagement sont directement reliées à la multiplicité de ces processus, pourtant usuellement souvent regroupés sous le terme "d'aléa torrentiel" qu'il faudrait qualifier de phénomène torrentiel. Nous préconisons en effet une plus grande rigueur terminologique pour faire la différence entre l'intensité et la fréquence d'un phénomène (et non pas d'un aléa) qui définissent un niveau d'aléa (faible, moyen, fort..).
- Proposer l'adoption de critères d'intensité adaptés est un objectif essentiel. Nous recommandons de caractériser les dommages aux enjeux sur la base de critères d'intensité de phénomène cohérents avec le guide PPR torrent (en cours d'élaboration), même si certains jalons clés peuvent être modifiés. Les modèles numériques actuels ont des performances limitées dans la caractérisation des intensités de phénomène sur les sites montagnards à l'activité géomorphologique maximale (contexte de forte pente). Leur usage doit en conséquence être limité aux sites complexes, à fort enjeux et avec des moyens d'étude suffisants.

Il est toutefois important de noter que dans les sites intermédiaires entre montagne et plaine, il peut devenir très compliqué d'estimer l'effet géomorphologique de la crue (érosion/dépôt) alors qu'on approche le domaine d'application des modèles numériques plus classiques. Dans ce cas, on pourrait envisager l'utilisation d'un critère d'intensité relatif aux « écoulements torrentiels » dont la grandeur caractéristique la plus représentative semble être le débit linéique (produit de la hauteur par la vitesse) en remplacement de la seule hauteur d'inondation classiquement retenue. .

¹⁰ Mais aussi sociale, humaine d'un point de vue général

Un travail d'analyse plus complet de la littérature et des bases de données existantes sur les dommages sera conduit pour voir dans quelle mesure il est possible d'adapter ou de créer de nouvelles fonctions d'endommagement prenant en compte l'ensemble des critères d'intensités retenus.

- L'effet des ouvrages de protection a été analysé dans l'action 4. Ici aussi la question est plus complexe dans le cas torrentiel que dans le cas fluvial. Cette situation est le fruit des fonctions de correction "active", c'est-à-dire à la source de production des sédiments, de bon nombre d'ouvrages de correction torrentielle. Ils influencent ainsi plus la magnitude de la crue (réduction du volume et du débit), que l'extension de l'inondation, comme le font les endiguements en plaine ou en vallée. Ces effets de couplage entre activité torrentielle et capacité des ouvrages induisent de très nombreux verrous scientifiques.

On propose donc ici aussi de coordonner les développements avec le groupe de travail "prise en compte des ouvrages" dans le guide PPR torrent et d'adapter leurs recommandations au cas spécifique des AMC et ACB. Il faut toutefois s'attendre à la rémanence d'une inévitable part d'imperfection et de doute quant au choix des méthodes et des hypothèses les plus adéquates. La nature, la forme des imperfections (conflit, imprécision, incomplétude et incertitude) devraient, à minima, être explicitées. Leur quantification devrait être faite à l'aide de techniques et formalismes appropriés (logique floue) pour aider à l'interprétation des résultats des AMC et ACB.

5 Bibliographie

- Ancey, C. 2013. Zonage avalanche et outil numérique: point sur un état de l'art. . EPFL.
- Bernard, C. 1927. Cours de restauration des montagnes. Page 788 (E. N. des Eaux et Forêt, Ed.). . Ecole normale des eaux et forêts.
- 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.
- Castelli, B. 1628. della misura dell'acque correnti [traite de la mesure des eaux courantes].
- CEPRI. 2013. Evaluation des dommages aux logements liés aux submersions marines - Adaptation des courbes de dommages au contexte littoral. . Centre Européen de Prévention du Risque Inondation.
- CGDD. 2014. Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. . Commissariat général au développement durable.
- Cipriani, T., T. Toilliez, and E. Sauquet. 2012. Estimation régionale des débits décennaux et durées caractéristiques de crue en France. La Houille Blanche:5–13.
- 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.
- Comiti, F., A. Lucia, and D. Rickenmann. 2016. Large wood recruitment and transport during large floods: A review. Geomorphology 269:23–39.
- 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.
- DDT65. 2015. AMC et Aléas en torrentiel - Comment caractériser les aléas en contexte torrentiel pour mener une Analyse Multi-critères (AMC) ou une Analyse Coût-Bénéfices (ACB)? Direction départementale des territoires des Hautes-Pyrénées - Direction Mission Post Crues.
- 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.
- Fabre, J.-A. 1797. Essai sur la théorie des torrents et des rivières. Page 342. . Bidault Libraire, Paris.
- Fauré, A. 2015. Une méthodologie pour une analyse coût-bénéfice adaptée au torrentiel. . Univ. Paul-Valéry Montpellier 3.
- 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.
- Hubl, 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., S. Leroueil, and L. Picarelli. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides 11:167–194.
- 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.
- Keiler, M. 2011. Geomorphology and complexity - Inseparably connected? Zeitschrift für Geomorphologie 55:233–257.
- Kleinhaus, M. G., R. I. Ferguson, S. N. Lane, and R. J. Hardy. 2013. Splitting rivers at their seams: Bifurcations and avulsion. Earth Surface Processes and Landforms 38:47–61.
- Kuss, C. 1900. Restauration et conservation des terrains en montagne. Les Torrents glaciaires. Page 88 (M. de l'Agriculture. Administration des eaux et forêts., Ed.). . Imprimerie Nationale.
- Lagasse, P. F., P. E. Clopper, L. W. Zevenbergen, W. J. Spitz, and L. G. Girard. 2010. Effects of debris on bridge pier scour. . Transportation Research Board.
- Laigle, D., and S. Carladous. 2015. REPORT FINALE Azione 3.2 / RAPPORT FINAL Action 3.2 - Etude de l'onde de rupture d'un barrage incluant le transport solide et la potentialité de formation de laves torrentielles. . IRSTEA.
- Lamand, E., G. Piton, and A. Recking. 2015. Hydrologie et hydraulique torrentielle, étude d'un cas pratique: la Roize. . IRSTEA.
- Lefort, P. 1996. Transports solides dans le lit des cours d'eau. Page 225 p. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble - Institut National Polytechnique De Grenoble.
- Leone, F. 1996. Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes naturels de mouvements de terrain. . Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1 - Sciences, Techniques et Médecine.
- Malavoi, J. R., C. C. Garnier, N. Landon, A. Recking, and P. Baran. 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Page 216 (V. Barre, Ed.). . Onema.
- MEDD, and CEMAGREF. 2004. Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations - Guide des aménagements associant l'épandage des crues dans le lit majeur et leur écrêtement dans de petits ouvrages. . Ministère de l'Écologie et du Développement Durable.
- MEDDE. 2012. Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en oeuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (NOR : DEVP1228419C). . Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.
- Mériaux, P., D. Richard, H. Félix, D. Laigle, M. Bon, G. Astier, I. Boncompain, and Y. Quefféléan. 2013. Etude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles: présentation du cas de l'EDD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives [Hazard study of torrential floods protection dikes: case study of the La

- Salle torrent, recommandations and perspectives]. Pages 164–175 in Paul Royet and Stéphane Bonelli, editors. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions-2e colloque national-Dignes 2013. . Lavoisier, Paris.
- METL-MEDDE. 2012. Référentiel de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant. . Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature, Sous-direction de la qualité et du développement durable dans la construction - Direction générale de la prévention des risques, Service des risques naturels et hydrauliques.
- Meunier, M. 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche* 5:361–376.
- Meunier, M. 1991. *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Cemagref, Antony.
- 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.
- Mougin, P. 1914. Les torrents de Savoie. Page 1251.
- Philippe, F., S. Carlados, J.-M. Tacnet, and P. Bouvet. 2016. Taking into account protective works in land-use planning for mountain torrential floods: state of the art of French practices. 3rd European Conference on Flood Risk Management Innovation . Implementation . Integration. . Lyon, France.
- Piton, G. 2016. Sediment transport control by check dams and open check dams in Alpine torrents. . Univ. Grenoble Alpes, IRSTEA - Centre de Grenoble.
- Piton, G., S. Carlados, A. Recking, F. Liebault, J. Tacnet, D. Kuss, Y. Quefféléan, and O. Marco. 2017. Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surface Processes and Landforms* 42:91–108.
- 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. 2016c. Effects of check dams on bed-load transport and steep slope stream morphodynamics. *Geomorphology* 291:94–105.
- 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* (in press).
- Piton, G., D. Vázquez-Tarrío, and A. Recking. 2016. Can bed-load help to validate hydrology studies in mountainous catchment? The case study of the Roize (Voreppe – FR). Page 04020 *E3S Web of Conferences*. . EDP Sciences.
- Quefféléan, Y. 2015. Evaluation du temps de montée des crues torrentielles rapides. . ONF-RTM.
- Recking, A., F. Liébault, C. Peteuil, and T. Jolimet. 2012. Testing bedload transport equations with consideration of time scales. *Earth Surface Processes and Landforms* 37:774–789.
- Recking, A., D. Richard, and G. Degoutte. 2013. *Torrents et rivières de montagne: Dynamique et aménagement*. . Editions Quae.
- 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.
- Schuster, R. 2000. Outburst debris-flows from failure of natural dams. Pages 16–20 *Proceedings 2nd International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation*.
- Scorpio, V., S. Zen, W. Bertoldi, N. Surian, M. Mastrorunzio, E. Dai Pra, G. Zolezzi, and F. Comiti. 2018. Channelization of a large alpine river: what is left of its original morphodynamics? *Earth Surface Processes and Landforms* (under review).
- Surell, A. 1841. *Etude sur les torrents des Hautes Alpes* (1st edition). Page 280 (Carilian-Gœury and Vor Dalmont, Eds.). . Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.
- Tacnet, J.-M., S. Carlados, C. Curt, Y. Legat, B. Rulleau, and C. Wery. 2016. Combiner les modèles d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des infrastructures. *Sciences Eaux et Territoires*:90–97.
- Vischer, D. L. 2003. Histoire de la protection contre les crues en Suisse, Des origines jusqu'au 19^e siècle. . OFEG, Série Eaux.

Table des figures et tableaux

Figure 1 : Exemple d'expression du caractère torrentiel d'un écoulement normalement confiné suite au disfonctionnement d'un ouvrage - Barrage d'Orroville en Californie, crise de février 2017 : (a) évacuateur de crue en béton armé, fonctionnement normal avec écoulement rapide (supercritique), blanchi par l'entraînement de l'air mais sans transport solide ; (b) rupture partielle du radier de l'ouvrage générant un écoulement sur le versant, des érosions massives et un risque de vidange incontrôlée du réservoir si l'érosion se propage jusqu'au lac ; (c) état final après 20 jours d'écoulements, érosion massive du versant n'atteignant pas le lac, végétation, matériaux mobiles et roche mère attaqués, impressionnante expression de la torrentialité d'un système normalement sous contrôle (photos © Paul Hames / California Department of Water Resources, Josh Edelson/AFP/Getty Images et <i>San Francisco Chronicle</i>)	7
Figure 3 : Diagramme conceptuel des limites ruisseaux – torrents – rivières torrentielles – rivières défini selon des considérations de pentes et de fréquence d'activité géomorphologique	12
Figure 4: Différents types d'écoulements torrentiels (Meunier 1989)	14
Figure 5 : Erosion par charriage sur le cône de déjection du Bastan à Luz-Saint-Sauveur (65) pendant (a) et après (b) la crue de 18 juin 2013 (© Sécurité Civile et ONF-RTM65). Les pluies très fortes tombées durablement sur de grandes épaisseurs de neige lors d'un épisode de redoux ont généré une crue exceptionnelle par ses débits liquides mais surtout par sa durée. Dans la zone aval du Bastan, les matériaux transportés ont obstrué et rempli le lit original (situé dans le corridor boisé) et débordé dans les champs du cône de déjection érodant et transportant d'importants volumes de sédiments	15
Figure 6 : Erosion par charriage hyper-concentré dans le lit amont du Bastan à Barèges (65) pendant (a) et après (b) la crue de 18 juin 2013 (© Sécurité Civile et Guillaume PITON). Le même épisode que celui de la Figure 5 a généré plus haut dans le bassin versant, là où les pentes sont plus fortes, des dépôts au droit du camping de Barèges, faisant déborder l'écoulement principal vers le centre du camping. Encore plus haut sur le cours d'eau, les berges ont été attaquées profondément, le pavage du torrent pourtant stable et constitué de blocs métriques a été détruit et remanié, la largeur du lit a augmenté.	15
Figure 7 : (a) Blocs rocheux transportés par des laves torrentielles (diamètre 2 à 3 mètres) pendant la crue torrentielle du Saint Antoine de juillet 2014, déposant des dizaines de milliers de mètres cubes de matériaux dans la zone industrielle de Modane (73). (b) Bloc estimé à 700 tonnes transporté sur quelques centaines de mètres par le Boscodon en 1998 (© Guillaume PITON et ONF-RTM05)	16
Figure 8 : Exemple d'hydrogrammes et de sédimentogrammes tiré des calculs de taux de transports pour des pentes de 12% (amont du cône de déjection – à gauche) et de 4% (aval du cône de déjection – à droite), formule de Piton (2016 p. 83).....	17
Figure 10 : Dépôt massif de flottants dans le village Italien de Caprile en 1966 et sur un pont de la province italienne de la Spezia, images tirées de Comiti et al. (2016)	19
Figure 11 : (a) Lit du torrent de Bionasset après le passage du GLOF de Tête Rousse à l'emplacement d'un ancien moulin, lit ravagé et végétation emportée sur un grand gabarit ; (b) Hameau de Bionnay sur le Bon Nant plus loin en aval, la lave torrentielle a ici déposé des flottants en nombre dans le hameau, détruit des maisons, couvert le lit majeur de dépôts et généré des érosions de berges (Kuss,(1900)	19
Figure 12 : Formulation complète du risque, le type d'effet étant une de ses composantes.....	23
Figure 13 : (a et b) Envahissement de constructions : Saint-Chaffrey, crue du Peytavin, 1995. Les escaliers empruntés par la boue et les dégâts au niveau inférieur (© ONF-RTM 05) et (c) crue de charriage hyper-concentré du torrent du Grand Rocher, Chantelouve, 2014 : traces laissées après dégagement des graviers qui atteignaient presque les poutres du plafond du rez de chaussée de la maison de Chantelouve (même maison que celle vue d'extérieur sur la Figure 17b). (© Guillaume PITON).....	24
Figure 14 : Photos d'épisodes d'engravement marqué : (a) Brigue-Glis, Suisse, 1993 (© Jean-Pierre Jordan OFEG) et (b) Baltschieder, Valais, 2000 (© Andreas Götz PLANAT-OFEG).....	24
Figure 15 : Affouillements : (a) baraque RTM de Barège sur le Bastan en Juin 2013 (© ONF-RTM65) et (b) maison de particulier plus en amont (© Guillaume PITON)	25
Figure 16 : Vulnérabilité des angles des bâtiments en maçonnerie ((a) © photo d'époque DR, (b) ONF-RTM 38 et (c) Yannick Guigal, IRMa)	26

Figure 17 : Illustration de la résistance des murs structurants : (a) Modane (73), lave torrentielle du Saint Antoine de 2014, vue amont du dépôt de bus. Les tôles de couvertures ont été arrachées alors que la structure en béton semble relativement intacte, la lave torrentielle a pourtant laissé des marques jusqu'au deuxième étage (© Guillaume PITON) et (b) crue de charriage hyper-concentré du torrent du Grand Rocher, Chantelouve (38) 2014, le bâtiment engravé jusqu'au niveau du premier étage ne porte pourtant pas de trace de dommages mises à part les traces d'humidification (© Marie Spitoni)	26
Figure 18 : Accumulation de flottants venus impacter un bâtiment avec pourtant un minimum de dégâts : Valais suisse, 2000 (© Robert Marie, ONF-RTM38).....	27
Figure 20 : Destruction de murs par impact de blocs : Val d'Aoste 2000 (© Région Autonome Vallée d'Aoste)	27
Figure 21 : Destruction des ouvertures, (a) garages de Barège après la crue du Bastan de 2013 (© Guillaume PITON) et (b) Brigue-Glis, Suisse, 1993 (© Roberto Loat OFEG).....	28
Figure 22 : Les crues torrentielles peuvent causer des dégâts sur des infrastructures critiques (réseaux de transport, énergie...) (Tacnet et al. 2016)	29
Table 2 : Relations entre critère d'intensité et classes d'aléas (Guide PPR Torrent, version de travail)	32
Figure 23 : Courbes de dommage de Clausen and Clark (1990) pour des bâtiments en maçonnerie et briques, suite à la reconstitution de la rupture du barrage de Dale (UK, 1864).....	34
Figure 24 : Etapes d'estimation de l'efficience d'un système de protection contre les crues torrentielles : 1 : caractérisation des fonctions de chaque ouvrage (rôle qualitatif) ; 2 : estimation des capacités unitaires des ouvrages (rôle quantitatif) et estimation de l'effet cumulé du système de protection ; 3 : estimation des causes et des conséquences des potentielles défaillances des ouvrages et 4 : estimation économique de l'efficience. Figure traduite de Piton et al. (2017).....	36
Table 4 : Ouvrages de protection, fonctions, capacités, paramètre dimensionnant principal et effets escomptés	38

Citation : Piton. G., Philippe. F., Richard, D. & Tacnet, J.-M. (2018). Analyse comparative des méthodes dites « multicritère » dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 1 : Caractérisation des phénomènes torrentiels. Rapport IRSTEA. Commissariat général au développement durable (CGDD), 46 p. [hal-02132339](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132339)

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

