



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET DE LA COHÉSION  
DES TERRITOIRES**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# **GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'ÉLABORATION DES PLANS DE PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATION DES COURS D'EAU TORRENTIELS**



Édition 2023

# Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels

Ce document a été réalisé sous la maîtrise d'ouvrage  
de la direction générale de la prévention des risques (DGPR)  
du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT)

Coordination de la rédaction  
DGPR / SRNH / SdCAP / BRIL

Comité de pilotage  
ONF / RTM  
INRAE / UR ETNA

Crédit photo (couverture) : crue du Bastan de juin 2013 à Luz-Saint-Sauveur  
©DDT 65 (page principale) et à Barège ©ONF/RTM (médaillon).



# Préface

La sécurité et la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens revêtent une importance particulière en montagne où l'espace est souvent soumis à de nombreux phénomènes naturels. Dans ces zones, les phénomènes naturels gravitaires (avalanches, érosion et crues torrentielles, chutes de blocs, glissements de terrain, risques d'origine glaciaire et périglaciaire) constituent une composante fondamentale du cadre de vie quotidien. Ces phénomènes présentent certaines spécificités : multiplicité et superposition sur un même territoire ; violence et soudaineté ; prévisibilité et prédictibilité difficiles voire parfois impossibles, etc. Les risques induits sont par ailleurs susceptibles d'évoluer avec le changement climatique et les dynamiques démographiques en zone de montagne.

La prise en compte de cette réalité, de la part de l'État et des collectivités territoriales, conduit à mettre en œuvre une politique de prévention adaptée, consistant à diagnostiquer les risques, à évaluer et, si possible, anticiper leur évolution, et à mettre en œuvre les moyens de les prévenir et d'atténuer leurs conséquences, en tenant compte de l'ensemble des contraintes des territoires, et notamment les limites de ses espaces de développement.

Parmi tous les phénomènes naturels de montagne, les crues des cours d'eau torrentiels sont, de loin, ceux qui concernent le plus grand nombre d'enjeux humains et matériels. En effet, l'homme s'est souvent installé à proximité des cours d'eau, sur les cônes de déjection des torrents, puis en bordure de rivières torrentielles. Il s'expose ainsi aux conséquences de leurs crues, dont les plus importantes sont souvent dramatiques. Les crues des Pyrénées en juin 2013 et dans les Alpes-Maritimes en octobre 2020 l'ont malheureusement rappelé. En France, les Pyrénées et les Alpes sont les chaînes de montagne qui rassemblent la majeure partie des cours d'eau rentrant dans cette catégorie. D'autres territoires en métropole et outre-mer – comme le Massif central, les Vosges, la Corse, la Réunion, la Martinique et la Guadeloupe – sont néanmoins régulièrement confrontés à des catastrophes provoquées par le débordement de cours d'eau torrentiels en crue.

Par rapport aux crues des rivières de plaine, qualifiées de crues « liquides », les crues des cours d'eau torrentiels sont caractérisées par une importante charge en matériaux sédimentaires. Le transit de ces matériaux intervient principalement sous forme de charriage ou, parfois, de laves torrentielles. Il est directement lié aux phénomènes d'érosion qui affectent les bassins dégradés de montagne et à l'énergie dont disposent les cours d'eau torrentiels du fait de leurs fortes pentes. En période de crue, cette capacité de transport solide considérable génère, en plus de la submersion éventuelle des terrains, des érosions et des dépôts sédimentaires remarquables. Ces effets se manifestent notamment par des affouillements de berges ou par l'alluvionnement des terrains alentour, et sont à l'origine de la divagation des lits des cours d'eau.

Les cours d'eau torrentiels (torrents et rivières torrentielles) nécessitent par conséquent des approches spécifiques pour qualifier l'aléa, et *in fine* adapter l'urbanisme et les constructions des territoires concernés afin de maîtriser le risque pour les vies humaines et la vulnérabilité matérielle. Ce constat a motivé la rédaction du présent guide, afin d'apporter un cadrage méthodologique à l'élaboration des plans de prévention des risques relatifs à ces cours d'eau. Il complète les guides déjà réalisés dans le domaine des PPRN d'inondation en développant les éléments propres aux cours d'eau torrentiels.

En 2011, le ministère chargé de l'écologie (MEDDTL à l'époque) a diffusé un guide « Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel » qui proposait déjà des critères de qualification des aléas relatifs aux torrents. Les phénomènes d'inondation présentent toutefois un continuum entre l'amont (torrents et rivières torrentielles) et l'aval (rivières de plaine). Afin de proposer une politique de prévention des inondations cohérente sur l'ensemble des bassins versants et adaptée aux territoires de montagne, le ministère (MTECT aujourd'hui) a souhaité la mise en place d'une doctrine permettant une transition logique au niveau des interfaces entre les différents types de cours d'eau. C'est pourquoi, en complément des critères d'intensité des inondations de plaine (où l'aléa « débordement de cours d'eau » est qualifié en fonction de la hauteur d'eau et de la dynamique des écoulements), des critères d'intensité plus spécifiques aux cours d'eau torrentiels (hauteur d'engravement, profondeur d'affouillement, impacts dynamiques, etc.) sont pris en compte.

Les PPRN ont pour objectif principal la bonne prise en compte des risques dans les décisions d'aménagement du territoire. Ils considèrent ainsi, en plus des aléas, les enjeux présents ou futurs potentiellement affectés par les aléas pour en qualifier l'exposition et la vulnérabilité. En montagne, l'espace est contraint et les enjeux se concentrent souvent dans un même secteur géographique. Une approche PPRN « multirisques » est généralement adaptée pour apprécier l'ensemble des risques et définir au mieux les secteurs les moins exposés pouvant accueillir les besoins futurs d'aménagement.

Plus encore qu'ailleurs, la démarche doit également reconnaître les enjeux indispensables au bon fonctionnement de la collectivité, notamment ceux qui sont liés à la gestion de crise.



# Sommaire

<b>Préface.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Introduction générale.....</b>	<b>7</b>
1.1. Les cours d'eau torrentiels.....	7
1.2. Exemples d'évènements dommageables ou de catastrophes.....	8
1.3. Les plans de prévention des risques.....	10
1.4. Les objectifs du guide.....	11
1.5. Le périmètre du guide.....	11
<b>2. Les spécificités du processus d'élaboration des PPRi de cours d'eau torrentiels....</b>	<b>12</b>
2.1. L'association des personnes et organismes associés.....	13
2.2. L'évaluation environnementale (examen au cas par cas).....	13
2.3. La prescription du PPRN.....	13
2.4. L'élaboration du dossier de PPRN.....	14
2.5. La consultation des collectivités et des services.....	14
2.6. La concertation du public.....	15
2.7. L'enquête publique.....	15
2.8. L'approbation du PPRN.....	15
2.9. L'application anticipée.....	15
2.10. La modification et la révision du PPRN.....	15
<b>3. La caractérisation et la qualification des aléas torrentiels.....</b>	<b>16</b>
3.1. Les crues des cours d'eau torrentiels.....	16
3.1.1. Les cours d'eau torrentiels.....	16
3.1.1.1. Les caractéristiques des cours d'eau torrentiels.....	16
3.1.1.2. La typologie des cours d'eau.....	17
3.1.1.3. « Portrait-type » d'un torrent.....	17
3.1.1.4. « Portrait-type » d'une rivière torrentielle.....	19
3.1.2. Les spécificités des crues des cours d'eau torrentiels.....	19
3.1.2.1. L'hydrologie.....	20
3.1.2.2. L'hydraulique.....	21
3.1.2.3. Le transport solide.....	22
3.2. La cartographie de l'aléa de référence des cours d'eau torrentiels.....	32
3.2.1. La détermination du (des) scénario(s) de référence.....	33
3.2.1.1. La caractérisation d'un évènement torrentiel.....	33
3.2.1.2. La possibilité de déterminer la période de retour des événements.....	34
3.2.1.3. La caractérisation synthétique des évènements de référence.....	34
3.2.1.4. La prise en compte du changement climatique.....	35
3.2.2. L'identification des sous-scénarios d'un scénario de référence.....	36
3.2.2.1. Pourquoi des sous-scénarios ?.....	36
3.2.2.2. Les principes généraux relatifs aux sous-scénarios.....	36

3.2.3. La prise en compte des ouvrages anthropiques dans la caractérisation de l'aléa de référence des PPRi de cours d'eau torrentiels.....	37
3.2.3.1. Les ouvrages anthropiques rencontrés en contexte torrentiel.....	37
3.2.3.2. Les défaillances d'ouvrage.....	37
3.2.3.3. La prise en compte des défaillances par les sur-aléas.....	39
3.2.3.4. La prise en compte des défaillances par les sous-scénarios.....	40
3.2.3.5. Synthèse sur la prise en compte des ouvrages anthropiques.....	41
3.2.4. La détermination des niveaux d'aléas.....	56
3.2.4.1. L'intensité.....	56
3.2.4.2. La probabilité d'atteinte.....	65
3.2.4.3. Les niveaux d'aléa pour chaque scénario de référence.....	66
3.2.5. L'aléa de référence du PPRi.....	67
3.2.6. Synthèse relative à l'élaboration de la carte d'aléa.....	67
3.2.7. Les aléas relatifs à d'autres périodes de retour et l'emprise des lits majeurs.....	70
3.2.7.1. La cartographie des lits majeurs.....	70
3.2.7.2. Les évènements fréquents.....	71
<b>4. Les enjeux.....</b>	<b>72</b>
4.1. Les objectifs de l'analyse des enjeux.....	72
4.2. L'analyse du fonctionnement du territoire au regard de l'aléa.....	72
4.2.1. Les infrastructures, équipements et enjeux particuliers existants.....	72
4.2.2. Les projets et les potentialités d'aménagement futur.....	73
4.3. La cartographie des niveaux d'urbanisation.....	73
4.3.1. Les centres urbains.....	74
4.3.2. Les espaces urbanisés, hors centres urbains.....	74
4.3.3. Les espaces non urbanisés.....	74
<b>5. L'élaboration de la partie réglementaire.....</b>	<b>75</b>
5.1. Introduction.....	75
5.2. Le zonage réglementaire.....	76
5.2.1. Les principes généraux.....	76
5.2.2. Les centres urbains.....	76
5.2.3. Les zones urbanisées hors centres urbains.....	77
5.2.4. Les zones non urbanisées.....	77
5.2.5. Les exceptions à l'interdiction dans les PPRi de cours d'eau torrentiels.....	78
5.2.6. Les zones non directement exposées à l'aléa de référence.....	79
5.2.7. Le cas particulier des zones en aléa de niveau « très fort aggravé ».....	79
5.3. Le règlement.....	79
5.3.1. La structuration du règlement.....	79
5.3.2. Rappel de quelques principes généraux.....	80
5.3.2.1. La forme.....	80
5.3.2.2. La compatibilité entre les phénomènes.....	80
5.3.2.3. L'identification d'obligations de résultats plutôt que de solutions techniques.....	80
5.3.2.4. La reconstruction après sinistre.....	80
5.3.2.5. Les projets et travaux de réduction de la vulnérabilité.....	81
5.3.2.6. Conseils et guides.....	81

5.3.3. La réglementation des projets.....	81
5.3.3.1. Les notions et règles générales fréquemment utilisées dans les règlements de PPRi torrentiels.....	81
5.3.3.2. Exemples indicatifs de formulations pour les règlements.....	84
5.3.4. Les mesures de prévention, protection et de sauvegarde.....	88
5.3.5. Les mesures de réduction de la vulnérabilité des biens et activités existants....	88
5.3.5.1. La hiérarchisation des mesures.....	88
5.3.5.2. Le recours à la prescription d'un diagnostic du bâti.....	88
5.3.5.3. Exemples.....	88
<b>6. Le dossier de PPRi.....</b>	<b>92</b>
Introduction.....	92
<b>6.1. La note de présentation.....</b>	<b>92</b>
6.1.1. Le contexte de la prévention des risques.....	92
6.1.2. La justification de la mise en œuvre du PPRi sur le territoire.....	92
6.1.3. La présentation du territoire.....	92
6.1.4. Les aléas.....	93
6.1.4.1. L'aléa de référence.....	93
6.1.5. Les enjeux.....	93
6.1.6. L'élaboration du règlement.....	93
6.1.6.1. Le zonage réglementaire.....	93
6.1.6.2. Le règlement.....	93
6.1.7. Les annexes.....	94
6.1.7.1. Les cartes.....	94
6.1.7.2. Les compléments, rapports ou études.....	95
<b>6.2. La partie réglementaire.....</b>	<b>100</b>
6.2.1. Le zonage réglementaire.....	100
6.2.2. Le règlement.....	102
<b>7. Annexes.....</b>	<b>103</b>
7.1. Le cas particulier des confluences.....	104
7.2. La méthodologie d'identification des sous-scénarios.....	105
7.3. La protection active et la protection passive.....	106
7.4. La méthodologie d'estimation des probabilités d'atteinte.....	107
7.4.1. La probabilité de survenue des sous-scénarios (étape A).....	107
7.4.2. L'agrégation des sous-scénarios (étape B).....	108
7.4.3. La prise en compte des divagations (étape C).....	108
7.5. Les spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport aux digues fluviales.....	109
7.6. L'effet des ouvrages de protection active (tableau de synthèse).....	111
7.7. Les principes de traduction réglementaire (tableau de synthèse).....	116
7.8. Glossaire.....	117
7.9. Liste des signes et abréviations.....	120
7.10. Index des illustrations, figures et photographies.....	121
7.11. Index des tableaux.....	123
7.12. Bibliographie.....	124



# I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1.1. Les cours d'eau torrentiels

Les cours d'eau torrentiels sont des cours d'eau se caractérisant par une forte pente (généralement supérieure à 1 %, cf. §3.1.1) et un charriage important de matériaux solides. **Selon la définition utilisée dans le présent guide, un cours d'eau est considéré comme torrentiel si le transport solide aggrave de façon significative les dommages associés aux évènements, du fait notamment d'engravements, d'érosions et/ou d'impacts de blocs et de flottants.**

A *contrario*, dans le domaine fluvial, l'aléa est considéré principalement *via* le prisme du phénomène d'inondation, ayant pour effet l'envahissement et la submersion par les eaux<sup>1</sup>.

Les principaux types de cours d'eau torrentiels sont les torrents et les rivières torrentielles.

### **Précisions sur le vocabulaire (voir aussi le glossaire en fin de guide)**

Le nom « torrent » et l'adjectif « torrentiel » ont aussi des sens figurés utilisés dans des expressions devenues communes, ce qui peut entraîner des confusions. Pour minimiser ces confusions, le présent guide s'attache à :

- ne pas utiliser le nom ou l'adjectif dans un sens figuré (il ne sera pas fait mention de « pluies torrentielles » par exemple) ;
- n'utiliser le nom « torrent » que pour un type de cours d'eau précis, tel que défini dans ce guide ;
- n'utiliser l'adjectif « torrentiel » que dans son acception restreinte et conforme au présent guide, c'est-à-dire « qui appartient aux torrents ou aux rivières torrentielles ».

La formulation « **crues de cours d'eau torrentiels** » sera donc préférée à celle de « crues torrentielles », qui décrit généralement une crue violente et brève dans tous types de cours d'eau, y compris de plaine.

La principale exception aux règles ci-dessus concerne le **régime d'écoulement**, pour lequel le terme « torrentiel » peut être utilisé dans un sens différent. En hydraulique, le régime d'écoulement est qualifié de torrentiel (ou de super-critique) si les conditions d'écoulement à l'amont ne sont pas influencées par les conditions hydrauliques à l'aval (nombre de Froude supérieur à 1) et de fluvial (ou de sub-critique) dans le cas contraire. Ainsi, le « régime d'écoulement torrentiel » n'est nullement réservé aux seuls « torrents » (il peut exister dans tous les types de cours d'eau) et un « torrent » a souvent par endroit des « écoulements fluviaux », c'est-à-dire en régime fluvial.

Les crues des cours d'eau torrentiels sont sensiblement différentes de celles des cours d'eau de plaine :

- en termes de phénomènes : les écoulements se propagent quasiment systématiquement à vitesse élevée du fait des fortes pentes, les érosions et les transports de matériaux peuvent engendrer des modifications morphologiques de grande ampleur, des écoulements sous forme de laves torrentielles peuvent apparaître ;
- et en termes de mesures de prévention adéquates : la prise en compte du transport solide et de la dynamique des écoulements associée à la pente sont fondamentales dans l'adaptation des projets, la nature et le dimensionnement des renforcements nécessitent des réflexions spécifiques pour les façades comme pour les fondations, les ouvrages de protection sont différents et leurs défaillances ont d'autres conséquences.

L'analyse des aléas torrentiels et la prise en compte des risques afférents s'inscrit ainsi dans une double approche :

- prise en compte des spécificités de ces cours d'eau et des territoires concernés ;
- prise en compte du continuum des risques entre l'amont (crues de torrents et de rivières torrentielles) et l'aval (crues de rivières de plaines), pour une politique de prévention des risques naturels cohérente sur l'ensemble des territoires, permettant notamment une transition logique au niveau des interfaces entre différents types de cours d'eau.

<sup>1</sup> Les aggravations locales associées aux phénomènes de transport solide sont toutefois indirectement prises en compte par exemple à travers les bandes de précaution à l'arrière des ouvrages hydrauliques (sur-aléa) dans les PPR inondation de plaine.

Les risques liés aux cours d'eau torrentiels se manifestent au moment des crues, du fait de débordements, d'érosions, d'engravements, d'embâclement par les flottants et d'impacts par les matériaux transportés. Les cônes de déjection des torrents et les vallées alluviales des rivières torrentielles, où les phénomènes torrentiels sont susceptibles de se produire, sont en effet historiquement des sites privilégiés d'implantations humaines pour de multiples raisons (exploitabilité et qualité des terroirs agricoles, accès à l'eau, faible exposition aux aléas de versants comme les avalanches, glissements de terrain et chutes de blocs - Antoine et Desailly, 2001). Les secteurs urbains les plus anciens sont souvent situés sur des points hauts un peu plus à l'abri des aléas des torrents et des crues et divagations des rivières torrentielles (Antoine, 2011). Les secteurs urbanisés plus récemment ont peu à peu occupé des zones moins sûres ou protégées par des ouvrages plus ou moins adaptés. La vulnérabilité des bâtiments et infrastructures modernes a par ailleurs beaucoup augmenté en comparaison de l'habitat historique préindustriel des vallées de montagne. Le caractère rare mais violent des crues torrentielles majeures rappelle malheureusement régulièrement que les cônes de déjection et les fonds de vallée ont été formés par ces cours d'eau qui y ont divagué par le passé et peuvent y revenir.

Des phénomènes torrentiels, c'est-à-dire « aggravés par le transport solide », peuvent être observés aussi hors des territoires de montagne, dans des régions vallonnées où des talwegs ont entaillé des versants érodables, ainsi qu'au droit de certains secteurs localisés concentrant des écoulements sur des zones localement raides et affouillables (par exemple les remblais routiers – Illustration ci-dessous).



**Illustration 1 :** la crue du Trapel (affluent de l'Aude) a emporté un pont à Villegailhenc (©AFP, 2018).

## 1.2 Exemples d'évènements dommageables ou de catastrophes

Le transport solide par charriage<sup>2</sup> est un phénomène observé dans tous les cours d'eau dont le lit est composé de blocs, de galets ou de sable. Lors des crues majeures, ces cours d'eau ont naturellement tendance à éroder, affouiller et déposer des quantités plus ou moins considérables de sédiments, générant parfois des catastrophes ou événements très dommageables, comme par exemple :

- juin 1957 : crues dans les bassins versants de l'Arc (Savoie), du Guil (Hautes-Alpes) et de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence) par un « retour d'est » ;
- juillet 1987 : 23 victimes dans un camping au Grand-Bornand (Haute-Savoie) ;
- juin 2013 : 3 victimes lors des crues dans les Pyrénées (Hautes-Pyrénées et Haute-Garonne) ;
- octobre 2020 : crues dans les vallées de la Vésubie et de la Roya (Alpes-Maritimes) à la suite de la tempête Alex ; 10 morts et 8 disparus et des dommages matériels estimés à environ 1 milliard d'euros.

<sup>2</sup> Termes définis plus loin dans le présent guide, voir aussi le glossaire en page 118.





**Illustration 2 :** 1957, Ristolas – Hautes Alpes (©Henri Vincent).



**Illustration 3 :** 1987, Grand-Bornand – Haute Savoie (©ONF-RTM).



**Illustration 4 :** 2013, Barèges – Hautes Pyrénées (©ONF-RTM).



**Illustration 5 :** 2020, vallée de la Vésubie – Alpes Maritimes (©Cerema).

De tous les phénomènes de transport solide, les laves torrentielles<sup>3</sup> sont parmi les plus rares, mais aussi les plus dangereux. Plusieurs exemples de catastrophes anciennes rappelés ci-dessous illustrent le danger de ces phénomènes :

- 14 juin 1827 : 27 morts et entre 50 à 60 personnes disparues à Goncelin (Isère) : un décrochement (glissement de terrain ou éboulement) dans le ravin de Sollières amorça un phénomène de lave torrentielle d'environ 50 000 m<sup>3</sup> ; 47 maisons furent emportées et 94 autres furent dégradées ;
- 23 juin 1875 : 81 victimes à Verdun (Ariège) : un glissement de terrain de 100 000 m<sup>3</sup> généra une lave torrentielle sur le ruisseau des Moulines à Verdun (Ariège) qui « emporta tout sur son passage » et fit 81 morts ;
- 11-12 juillet 1892 : 175 victimes à Saint-Gervais (Haute-Savoie) : la rupture d'une poche glaciaire de 200 000 m<sup>3</sup> (au niveau du glacier de Tête Rousse) généra une lave torrentielle d'environ un million de m<sup>3</sup> et fit plus de 175 victimes entre le hameau de Bionnay et la plaine du Fayet. La crue causa également la destruction des deux tiers de l'établissement thermal de Saint-Gervais.

<sup>3</sup> Termes définis plus loin dans le présent guide, voir aussi le glossaire en page 118.





**Illustration 6** : 1875, Verdun sur Ariège (©M. D'Ussel).



**Illustration 7** : 1892, Hameau de Bionnay (©C. Kuss).

### 1.3 Les plans de prévention des risques

État et collectivités disposent de plusieurs leviers complémentaires pour améliorer la sécurité des personnes et des biens dans les territoires exposés à des phénomènes naturels :

- des mesures de **protection**, afin de limiter l'aléa (mesures situées aux sources du phénomène limitant sa fréquence et/ou sa magnitude, mesures collectives ou individuelles réduisant l'intensité des événements au niveau d'enjeux, travaux de protection, etc.) ;
- des mesures de **prévention** par réduction de la vulnérabilité, qui visent à limiter l'exposition des enjeux sur le territoire (contrôle de l'urbanisme) et à les adapter (développement d'un urbanisme résilient, réduction de la vulnérabilité de l'existant, etc.) ;
- des mesures de **gestion de crise**, dont l'objectif est de maximiser l'efficacité de la réponse en cas d'évènement (prévision, surveillance, alerte, évacuation, secours, etc.) ;
- des mesures d'**amélioration des connaissances**, qui permettent de mieux comprendre et anticiper les risques (études, modélisations, retours d'expériences, etc.) ;
- des mesures d'**information** et de **sensibilisation**, afin de développer une culture du risque favorisant l'implication des citoyens et les bons comportements.

Les plans de prévention des risques naturels (PPRN) constituent l'outil de référence de l'action de l'État pour **porter la politique de prévention des risques naturels**. Ce sont des documents élaborés sous la responsabilité du préfet (article L.562-1 du code de l'environnement), en association avec les collectivités et en concertation avec le public.

Les plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels sont des cas particuliers de plans de prévention des risques naturels, traitant des risques de crues sur les torrents et les rivières torrentielles. Il peut exister des PPRi dédiés aux risques torrentiels, mais souvent ceux-ci sont intégrés dans des PPRN dits « multirisques », traitant également des risques associés aux avalanches, aux chutes de blocs, aux glissements de terrain et/ou aux ruissellements.

Le PPRN constitue à son approbation une servitude d'utilité publique. En particulier, ses dispositions doivent être respectées dans le cadre de l'instruction des demandes d'autorisation du droit de sols (permis de construire, permis d'aménager, déclarations préalables, certificats d'urbanisme, etc.).

## 1.4 Les objectifs du guide

Ce guide méthodologique a pour ambition de fournir aux services déconcentrés de l'État, maîtres d'ouvrage des PPRN, et aux bureaux d'études qui les accompagnent, les éléments utiles permettant d'élaborer un plan de prévention des risques relatif aux cours d'eau torrentiels. Il traite notamment :

- des spécificités relatives aux PPRi des cours d'eau torrentiels ;
- des méthodes permettant d'établir la cartographie des aléas de cours d'eau torrentiels ;
- des points de vigilance relatifs à l'analyse des enjeux en contexte torrentiel ;
- des clés méthodologiques pour l'élaboration du règlement ;
- du contenu détaillé du dossier de PPRN.

## 1.5 Le périmètre du guide

Sujets couverts par le présent guide	Sujets non couverts par le présent guide
<b>Généralités</b>	
Les spécificités des cours d'eau torrentiels et des risques associés.	Le contexte général relatif à la prévention des inondations : les leviers de la gestion des risques d'inondation, la réglementation relative aux cours d'eau, la réglementation relative à la prévention des risques et à la gestion des cours d'eau (DCE, DI, SNGRI, PGRI, SDAGE, TRI, SLGRI, SAGE, etc.) <sup>4</sup> , les responsabilités des différents acteurs, etc.
<b>Aléas</b>	
Les crues des torrents (y compris les érosions de berge et les laves torrentielles). Les crues de rivières torrentielles (y compris les érosions de berge subséquentes).	Les écoulements de versant (coulées de boue, ravinements, ruissellement sur versant) caractérisés par l'absence de chenal qui concentre les écoulements. Les déstabilisations massives de versants qui ont d'autres origines que le seul sapement en pied par le cours d'eau qui relèvent donc des mouvements de terrains. Les autres types d'inondation (fleuves ou rivières de plaine, remon-tées de nappe, submersion marine, ruissellement, etc.).
<b>Éléments du dossier de PPRN</b>	
La qualification des aléas relatifs aux cours d'eaux torrentiels. L'analyse des enjeux sur les points spécifiques aux cours d'eau torrentiels. Les principes de traduction réglementaires.	Les éléments généraux relatifs aux PPRN qui sont traités dans d'autres guides (notamment le guide général des PPRN) : le cadre réglementaire et la procédure d'élaboration générale d'un PPRN, l'identification des enjeux en général, les règles de rédaction d'un règlement, etc.

**Tableau 1** : périmètre du guide PPR d'inondation de cours d'eau torrentiels.

<sup>4</sup> Une liste des sigles et abréviations utilisées dans le guide est fournie en page 143.

## II. LES SPÉCIFICITÉS DU PROCESSUS D'ÉLABORATION DES PPRI DE COURS D'EAU TORRENTIELS

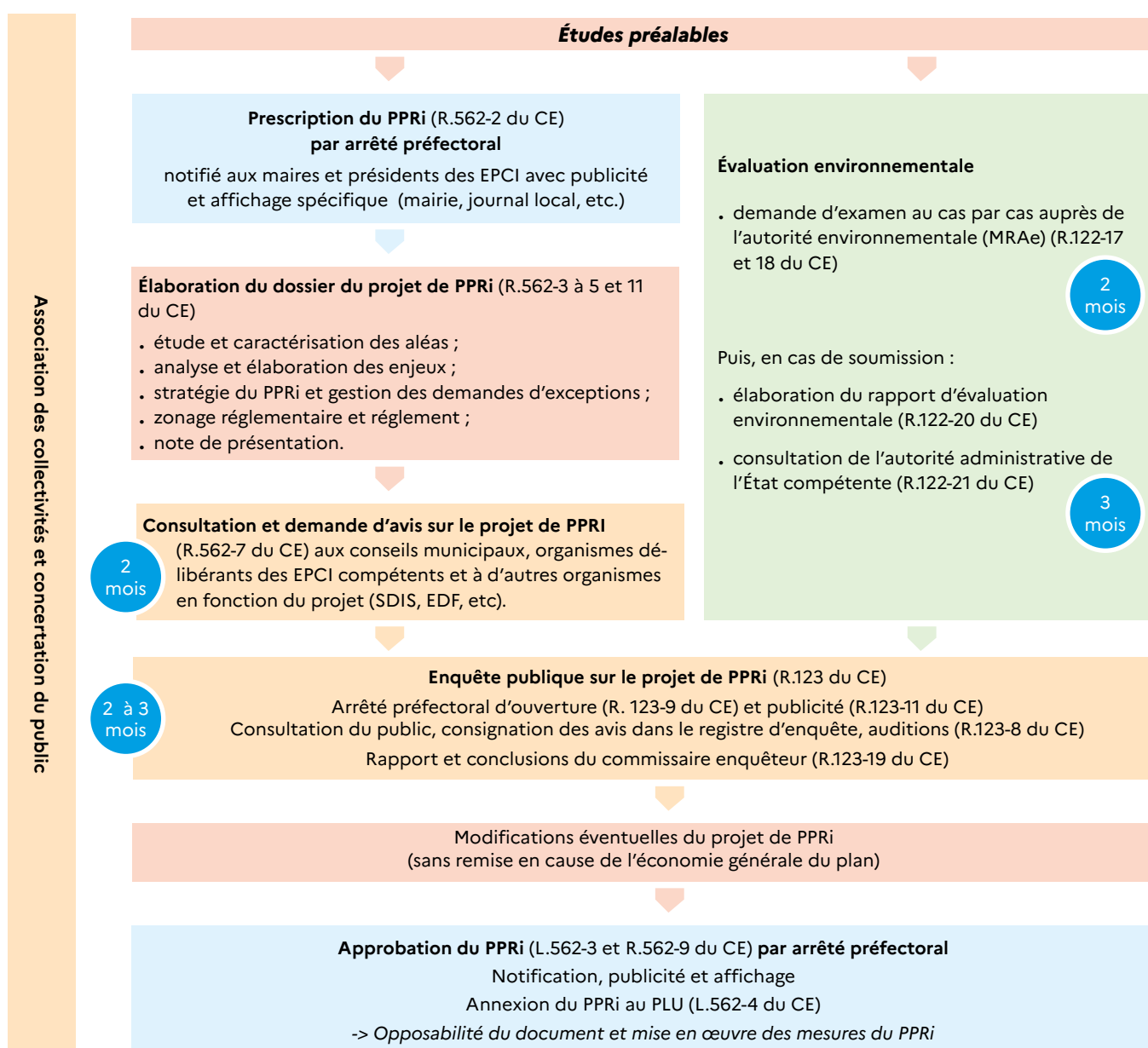
Les PPRI de cours d'eau torrentiels répondent aux dispositions législatives et réglementaires des PPRN, codifiées par les articles L. 562-1 à L. 562-9 et R. 562-1 à R. 562-10 du code de l'environnement.

Différents guides complètent le code de l'environnement, notamment :

- le guide général « plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) », qui fournit les éléments utiles pour mener à bien leur élaboration dans le cas général ;
- le guide méthodologique « Plans de prévention des risques naturels (PPRN). Risques d'inondation ».

Le présent guide n'a pas vocation à reprendre les éléments généraux présentés dans ces documents. Il rappelle toutefois certains points à titre informatif afin de mieux contextualiser des développements relatifs aux spécificités des cours d'eau torrentiels. Pour toute question relative à la procédure PPRN dans le cadre général, il convient de se référer aux documents précités, ou à leurs successeurs, qui font référence.

L'articulation générale de la procédure d'élaboration des PPRN inondation des cours d'eau torrentiels est rappelée dans le schéma ci-dessous.



**Illustration 8 :** démarche générale d'élaboration d'un PPRN (hors procédure d'application anticipée).



## 2.1. L'association des personnes et organismes associés

Les responsabilités et missions de l'État et des collectivités étant partagées en matière de prévention des risques, une coordination étroite est nécessaire tout au long de l'élaboration d'un PPRN.

L'association correspond aux échanges menés entre les services chargés de l'élaboration du PPRN et les personnes et organismes associés au PPRN. Souvent exercée sous forme de réunions de travail, elle est pilotée par les services de l'État et commence le plus en amont possible dans le but d'instaurer un climat de confiance entre les différents acteurs, et de permettre la meilleure compréhension et appropriation des choix effectués.

Les personnes et organismes associés (POA) à l'élaboration du projet de PPRN sont définis dans l'arrêté de prescription du PPRN. Ce sont généralement les représentants des collectivités concernées : la ou les communes concernées par le PPRN ainsi que l'établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP) ou le groupement d'EPCI-FP ayant la compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI). En dehors des services de l'État, d'autres organismes peuvent être associés aux différentes étapes de l'élaboration du PPRN en fonction du contexte et des enjeux propres au territoire : commission locale de l'eau, syndicats mixtes, établissement public de schéma de cohérence territoriale (SCoT), conseil départemental, conseil régional, service départemental d'incendie et de secours (SDIS), chambre d'agriculture, chambre de commerce et de l'industrie, direction interdépartementale des routes, Centre national de la propriété forestière (CNPF), parcs naturels régionaux (PNR), etc.

## 2.2. La prescription du PPRN

La prescription, par arrêté préfectoral, est la décision administrative par laquelle le préfet de département formalise l'initialisation d'une procédure d'élaboration de PPRN (articles R. 562-1 et 2 du code de l'environnement).

Conformément au code de l'environnement, l'arrêté de prescription précise notamment le périmètre d'étude, la nature des risques, les modalités de la concertation et de l'association, les éléments relatifs à l'évaluation environnementale, le service de l'État chargé d'instruire le projet, et le délai d'élaboration.

Dans le cadre des PPRi des cours d'eau torrentiels, le périmètre de prescription couvre souvent l'ensemble d'un territoire communal. Le territoire d'étude, qui intègre a minima le bassin versant et le cône de déjection, peut être plus étendu.

Pour ce qui relève de l'identification de la nature des risques, il s'agit souvent de PPRN multi-risques traitant l'ensemble des risques naturels du territoire. Il est recommandé de reprendre la nomenclature de l'application GASPARE, à savoir, pour les débordements de cours d'eau torrentiels : « inondation par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau » et/ou « inondation par lave torrentielle (torrent et talweg) ».

## 2.3. L'évaluation environnementale (examen au cas par cas)

Une évaluation environnementale vise à estimer les conséquences d'un dispositif sur l'environnement. Pour les PPRN, le code de l'environnement introduit une procédure d'examen préalable pour apprécier, au cas par cas, le besoin d'une telle évaluation (articles L. 122-4 et suivants, R. 122-17 II-2° et R. 122-18).

Depuis la publication du décret du 22 juin 2023, la décision prise par l'autorité environnementale de soumettre ou non le projet de PPRi à évaluation environnementale à la suite de l'examen au cas-par-cas ne fait plus partie des pièces réglementaires à joindre à l'arrêté de prescription. La demande d'examen au cas-par-cas peut ainsi être faite après la prescription du PPRN et les premiers échanges avec les collectivités, tout en restant suffisamment en amont de la procédure.

Cette évolution vise à permettre au service chargé de l'élaboration du plan de fournir à la mission régionale de l'autorité environnementale (MRAe) l'ensemble des informations lui permettant de se prononcer sur l'intérêt de réaliser ou non une évaluation environnementale (article R. 122-18 du code de l'environnement), et notamment *a minima* :

- une première connaissance des aléas d'inondation, généralement sous forme d'une cartographie provisoire des emprises inondables, éventuellement complétées par des informations de hauteurs et de vitesse. Cela nécessite en particulier d'avoir déterminé à ce stade l'évènement de référence, ainsi que les principaux sous-scénarios à prendre en compte (notamment de défaillance des ouvrages), et d'avoir réalisé de premières modélisations ;

- une bonne connaissance du fonctionnement du territoire, de son exposition aux inondations, de sa vulnérabilité, de ses contraintes, et des grandes orientations relatives à l'aménagement ;
- une évaluation générale du zonage pressenti et de ses conséquences potentielles en termes d'urbanisation au sein des différents espaces (urbanisés, à urbaniser, agricoles, naturels, etc.).

Il peut être utile d'échanger avec la MRAe en amont de la demande d'examen au cas par cas afin qu'elle partage les éléments qu'elle juge nécessaires au bon traitement du dossier.

## 2.4 L'élaboration du dossier de PPRN

Les réflexions menées lors de l'élaboration du PPRN aboutissent à la mise en place d'un zonage réglementaire et d'un règlement écrit. Ces documents définissent les règles qui s'appliquent sur le territoire, constituent les pièces opposables du PPRN et correspondent aux documents utilisés en pratique pour les instructions d'urbanisme. Une note de présentation explique et justifie en complément l'ensemble des éléments du PPRN.

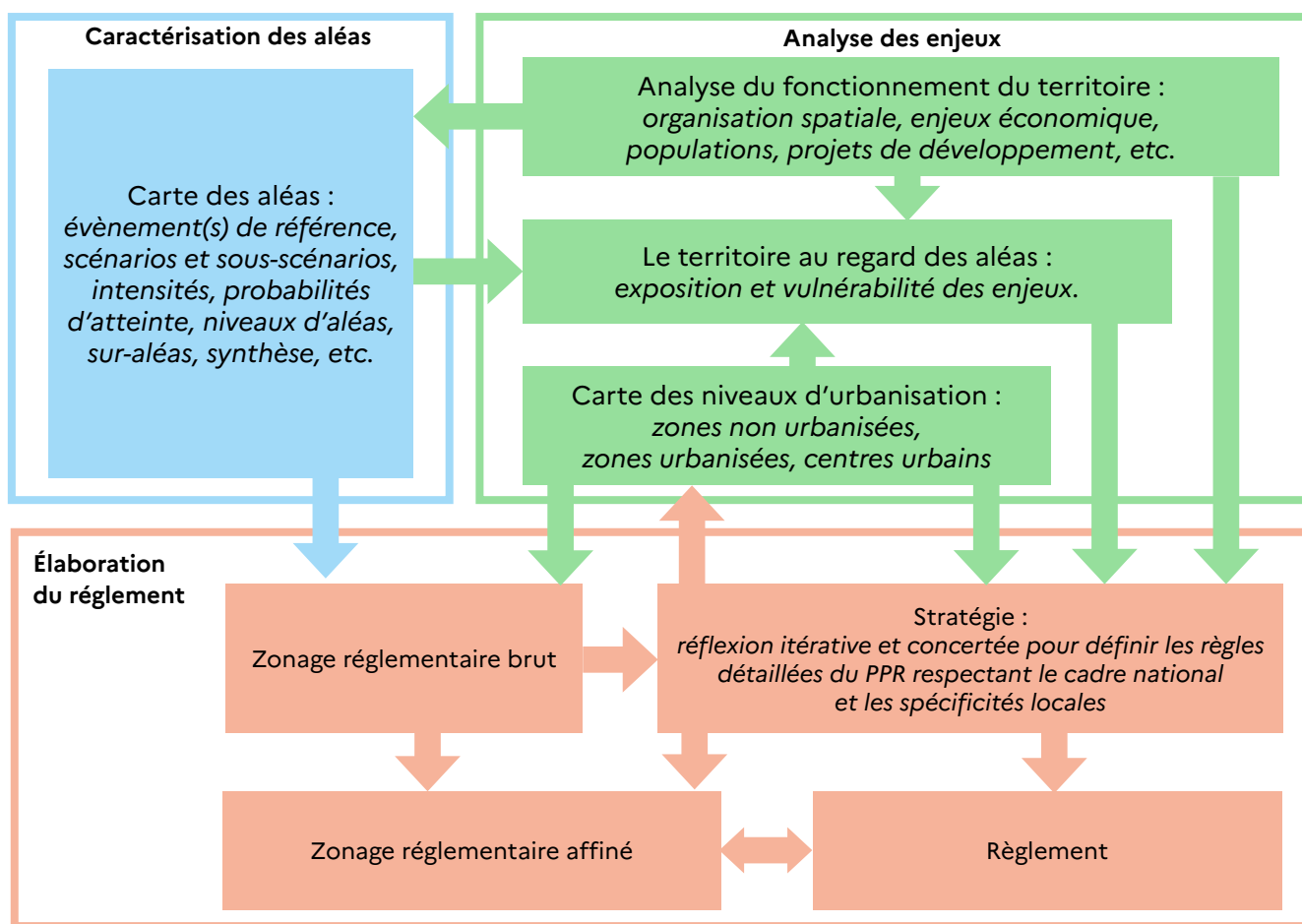


Illustration 9 : articulation des grandes étapes techniques de l'élaboration d'un dossier de PPRN.

## 2.5. La consultation des collectivités et des services

Lorsqu'un projet de dossier de PPRN est élaboré, il est formellement soumis à la consultation des collectivités et de différents services qui formalisent un avis sur le projet de plan. Cette étape est une phase obligatoire de la démarche d'association définie par le code de l'environnement (article R. 562-7). Le dossier relatif à la procédure du PPRN contient un bilan de la consultation, conformément à l'article R. 123-17 du code de l'environnement.

Cette étape ne présente pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

1 Le Décret n° 2023-504 du 22 juin 2023 portant diverses dispositions relatives à l'évaluation environnementale des plans et programmes supprime le deuxième alinéa de l'article R.562-2 du code de l'environnement, qui précisait : « l'arrêté de prescription mentionne si une évaluation environnementale est requise en application de l'article R.122-18. Lorsqu'elle est explicite, la décision de l'Etat compétente en matière d'environnement est annexée à l'arrêté. »

## 2.6. La concertation du public

La concertation regroupe l'ensemble des démarches permettant un échange et une discussion publique entre les différents acteurs sur le projet touchant au territoire et à leurs occupants. Elle peut revêtir plusieurs formes : réunions publiques, sites internet, forums d'échange, registres dans les mairies, etc.

La formalisation de l'ensemble des actions de la concertation menée depuis le début de la démarche jusqu'à l'enquête publique est réalisée dans le cadre d'un bilan obligatoire de concertation (article R. 123-8 du code de l'environnement).

Cette étape ne présente pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

## 2.7. L'enquête publique

L'enquête publique est une étape obligatoire de l'élaboration des PPRN (article R. 562-8 du code de l'environnement) qui a lieu à l'issue de la consultation. C'est une procédure réglementée d'information et de concertation dont l'objectif est de recueillir les observations, remarques, avis et proposition des personnes concernées par le plan (article R. 123-6 à R. 123-23 du code de l'environnement et décret n°2011-2018 du 29 décembre 2011).

Elle est réalisée sous l'égide d'un commissaire enquêteur ou d'une commission d'enquête indépendants, sélectionnés par le tribunal administratif au regard d'aptitudes techniques, juridiques et administratives (article R. 123-5 du code de l'environnement). Dans le cadre des PPRi de cours d'eau torrentiels, il s'agit par exemple d'anciens architectes ou de fonctionnaires de police à la retraite.

Cette étape ne présente pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

## 2.8. L'approbation du PPRN

À l'issue de l'enquête publique, et après intégration des modifications mentionnées précédemment, le PPRN est approuvé par arrêté préfectoral (R.562-9 du code de l'environnement).

Cette étape ne présente pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

## 2.9. L'application anticipée

La procédure d'application anticipée est définie aux articles L. 562-2 et R. 562-6 du code de l'environnement. Lorsque le projet de PPRN est suffisamment avancé, le préfet peut, si l'urgence de la situation le justifie, et après consultation des maires concernés, rendre immédiatement opposable certaines dispositions du projet de PPRN.

Cette étape ne présente pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

## 2.10. La modification et la révision du PPRN

Deux procédures peuvent faire évoluer le PPRN approuvé :

- **la modification** (articles L.562-4-1 et R.562.10-1 du code de l'environnement), qui porte sur des changements ne portant pas atteinte à l'économie générale du plan (par exemple la rectification d'une erreur matérielle ou la modification d'un élément mineur pour prendre en compte un changement dans les circonstances de fait) ;
- **la révision** (articles L.562-4-1 et R.562.10 du code de l'environnement), qui porte sur des changements modifiant l'économie générale du plan (par exemple à la suite de la survenue d'un événement majeur remettant en cause l'évènement de référence ou la morphologie des terrains, ou après la mise en place d'aménagements de nature à faire substantiellement évoluer l'aléa).

Ces étapes ne présentent pas de spécificité particulière pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.

## III. LA CARACTÉRISATION ET LA QUALIFICATION DES ALÉAS TORRENTIELS

Un aléa est la manifestation plus ou moins probable, en un point donné, d'un phénomène susceptible de survenir et de causer des dommages aux personnes, aux biens et plus généralement à l'environnement. Dans le cadre des PPRi de cours d'eau torrentiels, il est identifié en pratique, pour un scénario de probabilité d'occurrence donnée, sur **une carte d'aléa qui résulte du croisement entre un niveau d'intensité et une probabilité d'atteinte en chaque point de la zone d'étude**. La carte d'aléa localise ainsi les zones potentiellement affectées par ces phénomènes, et précise un niveau d'aléa prévisible (« faible », « moyen », « fort », « très fort » et « très fort aggravé ») sur chaque secteur.

Le présent guide porte sur les crues des cours d'eau torrentiels : les torrents et les rivières torrentielles. Il s'y produit des phénomènes de transport solide avec charriage et/ou avec laves torrentielles. Les aléas potentiellement générés par ces phénomènes, de manière indépendante ou cumulative, sont :

- des écoulements liquides et des inondations ;
- des engravements dus au transport de matériaux sous forme de charriage ;
- des impacts dynamiques dus au transport de blocs ou de flottants ;
- des érosions avec recul des berges le long du chenal d'écoulement et/ou suite aux divagations hors de son chenal d'écoulement ordinaire ;
- des écoulements et des dépôts sous forme de laves torrentielles.

L'objectif de cette partie est de présenter les éléments utiles à la compréhension des aléas relatifs aux cours d'eau torrentiels. Elle précise la définition retenue des différents cours d'eau torrentiels et les spécificités des crues associées (hydrologie, hydraulique, phénomènes de transport solide, etc.). Elle présente ensuite comment élaborer la cartographie des aléas dans le cadre de la procédure d'élaboration d'un PPRi de cours d'eau torrentiels.

### 3.1 Les crues des cours d'eau torrentiels

#### 3.1.1. Les cours d'eau torrentiels

##### 3.1.1.1. Les caractéristiques des cours d'eau torrentiels

Les **cours d'eau torrentiels** sont caractérisés par :

- des pentes fortes (généralement supérieures à 1 % - voir encadré ci-après) ;
- la présence de matériaux érodables dans le bassin versant susceptibles de charger les écoulements en matériaux solides (en leur absence, les phénomènes relèvent de simples inondations ou ruissellements et ne sont pas traités par le présent guide) ;
- un chenal qui concentre les écoulements (ce qui écarte les phénomènes de versants de type ruissellements ou coulées boueuses).

Ils se rencontrent généralement dans les massifs montagneux (métropole et outre-mer), mais aussi hors zones de montagne, dans des régions vallonnées où des talwegs peuvent entailler des versants érodables.

Certains cours d'eau torrentiels peuvent être intermittents.



### **Cours d'eau torrentiel ou fluvial ?**

Les crues intenses des cours d'eau torrentiels sont très souvent associées à un transport solide beaucoup plus conséquent qu'en contexte fluvial. Cela se traduit par des **modifications morphologiques brutales** qui surviennent en quelques minutes à quelques heures, telles que des **aggradations (élévations) ou des incisions (abaissements) du fond de lit** pouvant atteindre plusieurs mètres, des **élargissements marqués de la bande active** ou des **déplacements du lit mineur**.

Le transport solide, et les évolutions morphologiques qui en sont la conséquence, concourent généralement aux dégâts observés au moins autant et souvent plus que le débit liquide lui-même et la submersion qui est liée.

### **Quand faut-il prendre en compte le transport solide dans les analyses des aléas ?**

Il est difficile de donner une limite inférieure de pente à partir de laquelle il faudrait systématiquement prendre en compte le transport solide et ses conséquences. Pour des pentes supérieures à 1 %, les précautions propres au domaine torrentiel doivent systématiquement être prises en compte (Piton et al., 2018).

Dans la gamme de pentes intermédiaires, il faudra déterminer à travers des indices historiques et géomorphologiques si les spécificités du domaine torrentiel concernent le site. Un cours d'eau ne sera ainsi pas considéré comme torrentiel si les dommages associés aux crues relèvent systématiquement et strictement de phénomènes d'inondations et que les érosions et dépôts de matériaux solides ne génèrent que des dommages marginaux.

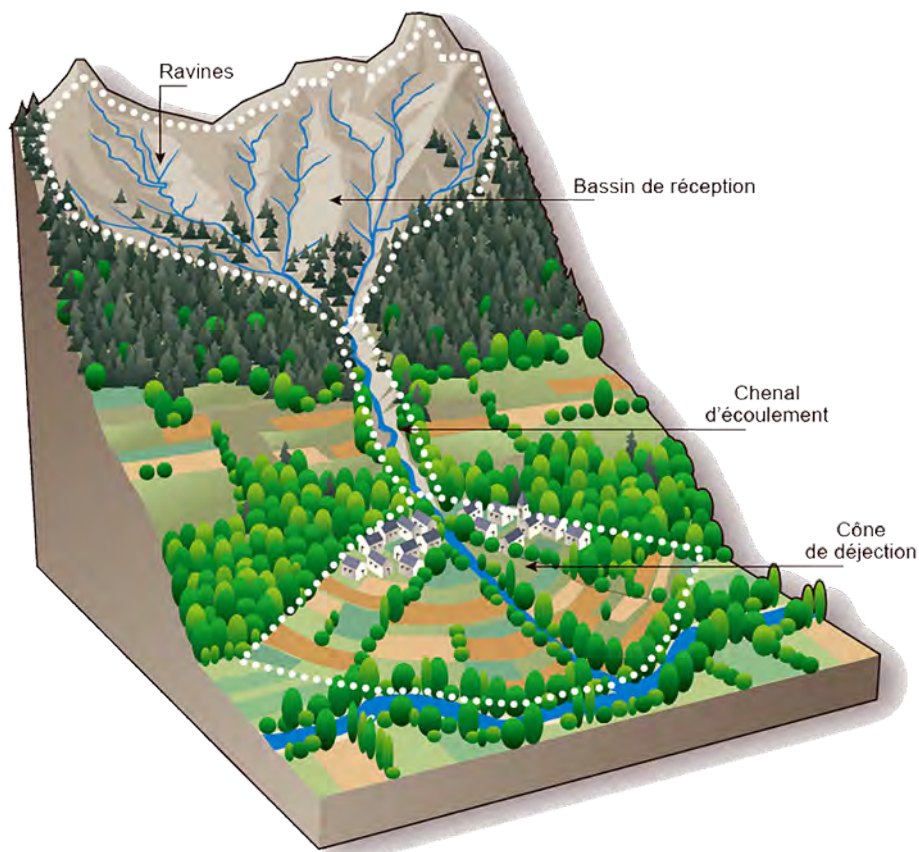
### **3.1.1.2. La typologie des cours d'eau**

Le guide apporte ici une définition des termes qui diffère sur certains aspects de celles utilisées historiquement, notamment celle de Surell (1841). Dans ce guide, deux types de cours d'eau torrentiels sont approfondis : les torrents et les rivières torrentielles. Ces derniers se démarquent de deux autres types de cours d'eau dits « fluviaux » : les ruisseaux et les rivières.

- Les **torrents** présentent la caractéristique de transporter de grandes quantités de matériaux pendant leurs crues majeures (ainsi que parfois pour les crues mineures). Ils drainent des bassins versants de taille limitée (en général inférieur à quelques dizaines de km<sup>2</sup>) et présentent des pentes fortes (souvent supérieure à 6 %, quasiment toujours supérieure à 2 %). Le phénomène de lave torrentielle ne se rencontre que dans les torrents.
- Les **rivières torrentielles** s'écoulent en fond de vallée. Elles présentent la caractéristique principale de divaguer et de générer ainsi des dommages par érosion de berge et de versant. Leur pente est toujours inférieure à 6 % et souvent supérieure à 1 %. Certaines rivières torrentielles, alimentées par de nombreux torrents et/ou à l'hydrologie particulière, sont très actives et maintiennent leur comportement torrentiel en deçà d'une pente de 1 %.
- Les **ruisseaux** peuvent drainer tout type de pente mais ils se distinguent des torrents par l'absence de transport solide majeur. Leurs crues ne génèrent ainsi des dommages que par des phénomènes d'inondation et ils sont à ce titre, et quelle que soit leur pente, considérés comme des cours d'eau fluviaux du point de vue des aléas dans le présent guide.
- Les **rivières** s'écoulent aussi dans les vallées mais les dommages associés à leurs crues relèvent quasi-exclusivement du domaine des inondations. Ces rivières restent actives géomorphologiquement mais leur divagation et leur activité géomorphologique en général est plus lente et plus continue que les changements rapides et brutaux des rivières torrentielles. Leur transport solide prend majoritairement la forme d'un transport par suspension.

### **3.1.1.3. « Portrait-type » d'un torrent**

La superficie des bassins versants des torrents est, au plus, de quelques dizaines de km<sup>2</sup>. Schématiquement, un torrent présente généralement trois zones fonctionnelles bien distinctes (Surell, 1841), comme le montre l'illustration 10.



**Illustration 10 :** décomposition schématique d'un bassin versant torrentiel (©Naaim Bouvet et Richard 2015).

En amont, le bassin de réception constitue la zone d'alimentation solide. Le bassin versant hydrologique peut être plus large mais le bassin de réception produit souvent l'essentiel des ruissellements et surtout la majeure partie de l'érosion des versants. Les lits torrentiels (ou ravines), parfois nombreux, y sont au contact direct de versants escarpés, fournisseurs de matériaux de toutes dimensions, depuis les argiles jusqu'aux blocs rocheux.

Le chenal d'écoulement constitue la zone de transport. Les ravines du bassin de réception convergent vers une partie du réseau hydrographique, souvent encaissée, où transitent des écoulements déjà formés. D'importants phénomènes d'érosion peuvent s'y développer par sapement des pieds de versants et provoquer des apports massifs de matériaux dans les écoulements. Des phénomènes de dépôt peuvent aussi y être observés.

Le cône de déjection constitue la zone de dépôt. À l'arrivée dans la vallée, le torrent se déleste d'une part significative de sa charge en sédiments, à la faveur de la réduction brusque de la pente et aussi éventuellement de l'élargissement de l'espace disponible pour ses divagations. Le cône de déjection est important à plus d'un titre :

- cette vaste zone correspond aux divagations historiques et potentielles du torrent : c'est généralement la principale zone inondable de l'appareil torrentiel ;
- à l'abri des crues de la rivière du fond de la vallée, le cône de déjection concentre souvent de nombreux enjeux (bâtiments, voies de communication, terres agricoles, etc.) ;
- formation entièrement façonnée par le torrent, il témoigne du fonctionnement de celui-ci. En particulier, l'analyse des ruptures de pentes du profil en long permet d'estimer le niveau de « maturité » du cône de déjection, et d'appréhender les volumes qui y seront déposés lors des futures crues :
  - sur un torrent avec transport solide important, ancien et dans une vallée principale relativement étroite, les apports historiques ont généralement déjà permis d'approcher un profil en long d'équilibre (même si l'équilibre « parfait » n'est jamais atteint), la continuité sédimentaire est plutôt forte et les dépôts de matériaux sont moins fréquents ;
  - sur un torrent plus récent, où les dépôts torrentiels n'ont qu'esquissé un cône de déjection depuis les dernières glaciations ou lorsque des aménagements ont déconnecté le torrent de sa rivière tribulaire<sup>5</sup>, chaque crue déposera la quasi-totalité de ses matériaux sur le cône en formation.

<sup>5</sup> La rivière tribulaire d'un torrent est la rivière dans laquelle se jette le torrent.



**Illustration 11** : les torrents du Grésivaudan en Isère.

Dans les vallées très larges et aménagées, et dans des reliefs encore jeunes comme les Alpes, la géomorphologie n'a pas retrouvé d'équilibre depuis les dernières glaciations et de nombreux torrents sont « mal » connectés aux rivières aval. Les torrents du Grésivaudan en Isère par exemple présentent des réductions de pente importantes dans leur partie basse, et des dépôts massifs à chaque crue (@Géoportail).

#### 3.1.1.4. « Portrait-type » d'une rivière torrentielle

La superficie du bassin versant d'une rivière torrentielle peut atteindre quelques centaines de km<sup>2</sup>.

Le transport sédimentaire par charriage dicte la morphologie des rivières torrentielles. Le transport sédimentaire total des rivières torrentielles est supérieur à celui des torrents mais il est plus fréquent et dilué, et ainsi moins intense. Il peut toutefois être très significatif, en particulier lors de crues longues.

Leur caractère torrentiel s'exprime d'autant plus régulièrement qu'un grand nombre de torrents leur fournit des apports massifs en matériaux solides. Certaines rivières torrentielles n'ayant pas subi de crues majeures depuis longtemps peuvent avoir été partiellement recolonisées par la végétation. À l'occasion d'un épisode majeur, elles retrouvent naturellement un caractère divaguant, érodant et transportant les matériaux solides et ligneux de leurs anciennes terrasses alluviales. Ces cycles de contraction progressive suivis d'élargissements soudains de la bande active (lit mineur transportant la charge sédimentaire par charriage) sont naturels et inévitables (Arnaud-Fasseta et Fort, 2004).

Un trait morphologique qui distingue les rivières torrentielles des torrents est la présence, notamment sur les tronçons situés les plus en aval, d'une plaine alluviale où divague la rivière torrentielle. La plaine alluviale déconnecte le transport sédimentaire entre la rivière torrentielle et ses versants. La fourniture sédimentaire a alors pour origine principale le lit et les berges de la rivière torrentielle, ainsi que les torrents affluents.

Vers l'aval, la pente et l'intensité des phénomènes de transport solide se réduisent progressivement jusqu'au raccordement avec le domaine des « rivières » non-torrentielles (de plaine). Les confluences entre rivières torrentielles et rivières de plaine peuvent aussi mériter une analyse détaillée de leur dynamique morphologique, en particulier si une réduction nette de pente laisse présager un fort potentiel de dépôt.

#### 3.1.2. Les spécificités des crues des cours d'eau torrentiels

L'objectif de cette partie est de présenter la variabilité des conséquences des crues de cours d'eau torrentiel, afin de donner les clés de compréhension relatives aux modalités d'élaboration de la carte d'aléa du PPRi, qui doit, d'une manière ou d'une autre, prendre en compte l'ensemble de ces différentes conséquences.



### 3.1.2.1. L'hydrologie

#### 3.1.2.1.1. La durée des crues

L'analyse de Evin et Piton (2020) montre que les crues des cours d'eau des Alpes et des Pyrénées peuvent s'inscrire dans différents types de régimes hydrologiques. Certains bassins versants, en particulier autour de l'arc méditerranéen, sont plus soumis à un régime de crues éclairs, où les crues les plus fortes restent relativement brèves. À l'opposé du spectre, certains bassins versants ont plutôt un régime de crues longues où les événements les plus forts sont aussi ceux qui durent le plus. **Les crues sont souvent plus longues que l'intuition ne le laisse penser**, même dans des bassins versants de relativement petite taille (quelque km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup>). On retient ainsi par expérience que deux grands types de crues génèrent des aléas sur les cours d'eau torrentiels :

- **les crues brèves** : elles se produisent plutôt en été (de juin à septembre) à la suite d'orages localisés de quelques heures. Ces crues sont généralement les plus dangereuses, notamment pour des installations de type « campings », du fait de la rapidité de montée des eaux combinée à la forte occupation des infrastructures touristiques et à la fréquente méconnaissance des lieux et des risques par des occupants. Le volume de matériaux transportés et les manifestations morphologiques restent généralement limités par un volume total d'eau moindre que dans d'autres situations. Si le bassin versant y est propice, des laves torrentielles peuvent toutefois se déclencher pendant de tels épisodes.
- **les crues longues** : elles peuvent durer plusieurs jours (les crues de 1957 à l'est des Alpes, résultant d'un épisode pluvieux long sur des bassins versants partiellement enneigés, ont par exemple duré cinq jours), généralement en automne ou au printemps, plus exceptionnellement en hiver. Le volume d'eau est alors très important, de même que le volume des matériaux transportés.

#### 3.1.2.1.2 Le laminage des crues

Le débit liquide ne peut pas être écrêté sur les torrents et les rivières torrentielles, où les pentes sont fortes et où l'écoulement est proche du régime critique. De plus, le débordement modifie la forme de la section mouillée mais modifie peu les conditions d'écoulement et ne conduit donc pas, ou peu, à un étalement des hydrogrammes. Ainsi, à la différence des écoulements à faible pente, **la préservation de champs d'expansion de crue avec pour objectif le laminage des pointes de crues n'est le plus souvent pas justifiée sur les cours d'eau torrentiels**. Par contre, la régulation des transports solides, le maintien de l'équilibre des transits sédimentaires et la divagation des lits justifient souvent de **maintenir des lits larges**.

#### 3.1.2.1.3 Les conséquences de la vitesse de formation et de montée des crues

L'ensemble de la séquence « pluies importantes / formation de la crue / écoulement de la crue jusqu'aux premiers tronçons urbanisés dans les vallées » peut ne durer que quelques dizaines de minutes sur les petits bassins versants (quelques km<sup>2</sup>) à quelques heures sur les bassins versants plus importants (quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>)<sup>6</sup>.

**Dans les torrents sujets aux laves torrentielles**, les enjeux peuvent être atteints de façon très soudaine et le temps disponible pour réagir être extrêmement bref. L'évacuation préventive n'est ainsi souvent pas réalisable, faute de temps. La faible extension spatiale des phénomènes permet parfois des évacuations d'urgence pendant l'évènement mais ces dernières restent souvent périlleuses.

**Dans les torrents ne connaissant que du transport solide par charriage**, les phénomènes d'érosions et de dépôts peuvent être rapides. La plupart du temps, ils ne permettent pas de mettre à l'abri le mobilier et les véhicules. Des opérations d'évacuation d'urgence peuvent parfois avoir lieu mais elles sont risquées : en cas d'obstruction du chenal ou de surverse par-dessus les berges, les écoulements peuvent très soudainement emprunter de nouveaux cheminements et tout balayer sur leur passage.

**Les crues des rivières torrentielles** peuvent avoir des temps de montées rapides et, malgré des tailles de bassins versants plus importants, les délais permettant la réalisation d'éventuelles opérations d'évacuation préventives sont courts, de l'ordre de quelques heures dans le meilleur des cas.

En synthèse, les événements sévissant dans les cours d'eau torrentiels sont la plupart du temps rapides à très rapides. Les **comportements adaptés** pour les personnes consistent alors, pour l'essentiel, à ne pas rester à l'extérieur lorsque des menaces de débordement de cours d'eau torrentiels sont détectées. La **tenue des bâtiments exposés** est ainsi un enjeu fort pour assurer la sécurité des personnes.

<sup>6</sup> De nombreux éléments sont fournis dans l'analyse des temps de montée de Quefféléan (2015).



### 3.1.2.2. L'hydraulique

#### 3.1.2.2.1. Les vitesses d'écoulement, les hauteurs d'eau et la submersion relative

En rivière de plaine, l'écoulement présente des caractéristiques bien connues (distribution des vitesses, turbulence développée, etc.) et les paramètres pertinents (section mouillée, pente, profondeur d'eau, rugosité) ont une signification physique non ambiguë.

La spécificité des écoulements sur forte pente apparaît progressivement lorsque la pente dépasse 1 % (valeur purement indicative, fortement liée à la granulométrie du lit). Les équations classiques de l'hydraulique (loi de frottement de type Strickler, par exemple) perdent progressivement de leur validité (Recking *et al.* 2013), rendant alors beaucoup moins pertinente la mise en œuvre d'un modèle numérique d'hydraulique classique.

La spécificité de l'écoulement à forte pente se manifeste déjà en basses eaux : le lit apparaît comme une succession de discontinuités, la pente locale est très variable, la position du lit ainsi que celle de la surface libre sont fluctuantes rendant la hauteur d'eau difficilement mesurable, les ressauts hydrauliques brisent l'écoulement. Les éléments du lit ont un diamètre de l'ordre de la profondeur de l'écoulement et les filets liquides doivent se faufiler entre les blocs. La distribution de vitesses prend un caractère entièrement tri-dimensionnel, loin de la distribution des vitesses observée en rivière.



**Illustration 12** : écoulement sur forte pente, très irrégulier, avec dissipation de l'énergie dans les ressauts ; la submersion relative est faible (Torrent de l'Yse – Luz-Saint-Sauveur - © un riverain).

L'écoulement est ainsi d'autant plus « troublé » (voir illustration 12), dominé par des zones de dissipation d'énergie, d'accélération et de décélération, avec un régime d'écoulement tantôt torrentiel (super-critique), tantôt fluvial (sub-critique), que la taille des sédiments est forte par rapport à la hauteur d'écoulement. « *Dans les torrents, il est pratiquement impossible de déterminer la profondeur beaucoup plus précisément que l'ordre de grandeur parce que l'on n'a pas de mesure précise et que la rugosité est très difficile à déterminer (et même à définir)* » (Rickenmann, 1992).

La **hauteur de charge hydraulique**<sup>7</sup> est une grandeur beaucoup moins variable que la hauteur d'eau. Hors cas particulier des anti-dunes<sup>8</sup>, elle permet, si la cote du fond est correctement estimée, de définir les hauteurs d'écoulement maximales en intégrant par exemple l'effet des vagues et des autres instabilités de la surface de l'eau. En contexte torrentiel, elle est généralement plus appropriée pour analyser les sections d'écoulement et les risques de débordement.

<sup>7</sup> La hauteur de charge hydraulique correspond à l'énergie mécanique. Elle est définie par  $H = h + V^2/2g + z$  avec  $h$  la hauteur d'écoulement (m),  $V$  la vitesse moyenne dans la lame d'eau (m/s),  $g$  l'accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) et  $z$  la cote du fond du lit (m).

<sup>8</sup> L'anti-dune est un mécanisme rencontré en cas d'interaction entre un écoulement et un fond érodable : la forme du fond gouverne l'écoulement, et l'écoulement modifie la forme du fond par érosion et sédimentation.

Sur les torrents, pour approcher les vitesses et hauteurs d'eau en crue, les calculs peuvent souvent être effectués en considérant un écoulement proche du régime critique dans le lit. Sur des pentes moins fortes et dans une majorité de rivières torrentielles (hors des tronçons singuliers), la hauteur redevient progressivement grande devant la taille des sédiments et les alternances entre régimes torrentiel et fluvial sont moins fréquentes : un régime d'écoulement fluvial peut s'installer pendant la crue sur des tronçons plus longs.

#### 3.1.2.2. Les conséquences des effets dynamiques des écoulements

Dans les zones de débordement à fortes pentes, l'écoulement est souvent de faible hauteur mais les vitesses d'écoulement dépassent généralement des valeurs supérieures à quelques mètres par seconde. De nombreux critères ont été proposés pour qualifier la stabilité des piétons dans des gammes variables de hauteurs et de vitesses d'écoulements (Musolino et al. 2020). Ils indiquent tous qu'au-delà de vitesses de plusieurs mètres par seconde, il n'est possible de se mouvoir que dans des lames d'eau très limitées (quelques décimètres). **Les écoulements issus de débordements de cours d'eau torrentiels sont ainsi généralement de nature à menacer directement les personnes en extérieur.**

Les **véhicules** peuvent évoluer dans des écoulements aux vitesses légèrement supérieures si les lames d'eau sont de l'ordre de quelques décimètres (Arrighi et al. 2017). Ils sont par contre plus sensibles à la flottaison que les piétons et **sont inutilisables quand les profondeurs deviennent supérieures à quelques décimètres et atteignent les châssis.**

Ces vitesses d'écoulement élevées sont par ailleurs une des principales causes du développement d'affouillements qui déstabilisent les constructions et sont sources de dommages importants.

En cohérence avec le cadre des PPRi fluviaux, les **conséquences prévisibles des écoulements sur les déplacements participent à la définition des niveaux d'aléas pour les PPRi de cours d'eau torrentiels.**

#### **3.1.2.3. Le transport solide**

##### 3.1.2.3.1 L'érosion et le transport solide dans les bassins versants torrentiels

Le transport solide désigne la mise en mouvement et le transport de matériaux solides par les écoulements du cours d'eau. Les matériaux transportés peuvent être très variables, de la particule sédimentaire au bloc rocheux de plusieurs centaines de tonnes.

Le transport solide est un élément essentiel du fonctionnement des cours d'eau torrentiels et de leurs crues. Il est très lié à la pente qui accentue l'énergie et les vitesses d'écoulement et, par suite, les forces d'arrachement et d'entraînement des matériaux.

Différents processus d'érosion dans les bassins versants alimentent les écoulements en matériaux solides lors des crues des cours d'eau torrentiels. Les sources de sédiments sont les versants (altération et fragmentation des roches ou des terrains affleurants), ainsi que les stocks dans les ravines ou les fonds et berge des lits (matériaux déjà partiellement déplacés antérieurement ou hérités de périodes plus anciennes comme les dépôts fluvioglaciers).

Ces matériaux sont mobilisables en présence d'écoulements suffisamment intenses, par ravinement et/ou affouillement des lits et des berges. Ils participent alors aux écoulements en crue et sont, soit transportés loin en aval, soit redéposés à d'autres endroits, notamment dans des tronçons moins pentus, où ils constituent des stocks eux-mêmes remobilisables par d'autres crues ou à d'autres moments de la même crue. Ces déplacements de matériaux et ces formations ou remobilisation de stocks alluvionnaires sont à l'origine de fluctuations des fonds de lit et de son tracé, qui peuvent être de grande ampleur, notamment sur les tronçons proches des sources principales de sédiments.





a) très fortes fluctuations du niveau du fond de lit à la sortie des gorges, en amont de la zone alluvionnaire (©ETRM)

b) transport solide et niveau du fond déjà très régulés, à une centaine de mètres en aval de la sortie des gorges (©ETRM)



Illustration 13 : le torrent de la Malsanne (Isère), après une forte crue.

### 3.1.2.3.2. L'analyse du profil en long : fondamentale pour appréhender le transport solide

La pente est une variable de première importance pour déterminer les volumes transportés par les cours d'eau torrentiels et pour anticiper les évolutions possibles du fond du lit lors des crues. Le profil en long des torrents et des rivières torrentielles doit en conséquence faire l'objet d'une attention particulière, notamment au niveau des variations locales de la pente. De l'amont vers l'aval, les réductions de pente constitueront ainsi des zones de dépôt privilégiées, alors qu'inversement, les zones où la pente augmente feront plutôt l'objet d'une reprise d'érosion s'ils ne sont pas pavés ou inaffouillable (substratum rocheux).

Deux types de pentes sont à considérer dans un cours d'eau :

- la « **pente géométrique** », qui est celle du lit mesurée sur site. Elle donne une première approximation de la pente de la ligne de charge en crue, qui détermine la capacité hydraulique et la capacité de transport solide du tronçon ;
- la « **pente d'équilibre** », ou pente représentative des apports solide, qui est une pente théorique permettant aux écoulements de disposer d'un niveau d'énergie suffisant pour assurer le transit des matériaux vers l'aval, sans érosion du lit du cours d'eau. En rivière torrentielle, les zones alluvionnaires en amont régulent la fourniture en matériaux et la pente d'équilibre est spatialement assez régulière et peu variable temporellement. La pente géométrique est alors sensiblement égale à la pente d'équilibre.

Lorsque la pente géométrique est inférieure à la pente d'équilibre, les apports solides venant de l'amont ne peuvent pas tous transiter et le cours d'eau dépose des matériaux. La pente géométrique augmente alors jusqu'à atteindre la pente d'équilibre.

Lorsque la pente géométrique est supérieure à la pente d'équilibre, les apports venant de l'amont sont inférieurs à la capacité de transport et le cours d'eau dispose d'un surplus de capacité de transport :

- si les matériaux sont érodables, le lit va se creuser et sa pente géométrique va diminuer jusqu'à tendre vers la pente d'équilibre (illustration 14). Le tronçon joue alors un rôle de régulation du transport solide ;
- lorsque l'érosion des matériaux est impossible, ou très difficile (par exemple en cas de lit pavé, comme pour l'illustration 15), la capacité de transport excède les apports amont qui transitent directement. Le lit est « stable » à court terme mais connaît une lente tendance - irréversible - au creusement sur le très long terme.



Une reprise d'érosion dans un tronçon ne peut donc être prédit à la seule observation d'une pente plus raide. Il est très fréquent que la forte pente d'un tronçon (par rapport aux tronçons amont) soit uniquement due à la présence d'affleurements rocheux ou d'un pavage. **L'analyse du profil en long doit ainsi nécessairement être complétée par une lecture attentive du terrain.**



**Illustration 14 :** bras de Mahavel (Réunion).

La pente est forte mais il s'agit bien de la pente d'équilibre car le tronçon est alluvionnaire (matériaux des berges issus de crues antérieures, blocs du lit régulièrement remaniés lors des crues). Le transport solide est très intense. Il s'agit d'un torrent avec de fortes évolutions du lit (©ETRM).



**Illustration 15 :** Haut Tavignano, Corte (Haute-Corse).

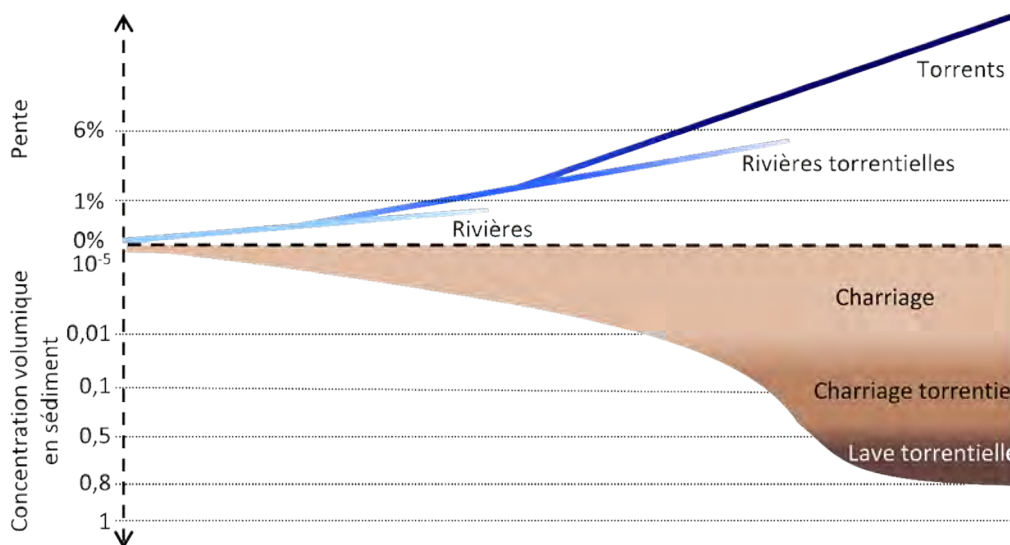
La pente géométrique est forte (supérieure à 6 %) mais le lit est pavé par des blocs très peu mobiles et du substratum rocheux. Le transport solide est faible (pente d'équilibre inférieure à 1 % dans les zones alluvionnaires). Il s'agit d'un ruisseau selon la classification utilisée dans le présent guide. (© ETRM).



### 3.1.2.3.3. Les différents types de transport solide

Le transport solide des torrents et rivières torrentielles prend plusieurs formes :

- les écoulements par **suspension** et par **charriage**, ainsi que le transport **de bois flottant**, assez comparables à ceux observés en rivière mais atteignant généralement des concentrations bien supérieures ;
- les **laves torrentielles**, qui sont un phénomène tout à fait spécifique des torrents.



**Illustration 16** : correspondance et continuité entre pente, type de cours d'eau, type de transports solides et concentration volumique des écoulements.

Le charriage torrentiel est l'apanage des torrents et de quelques rivières torrentielles. Les laves torrentielles sont observées exclusivement dans les torrents (adapté de Besson, 2005).

#### 3.1.2.3.3.1. La suspension

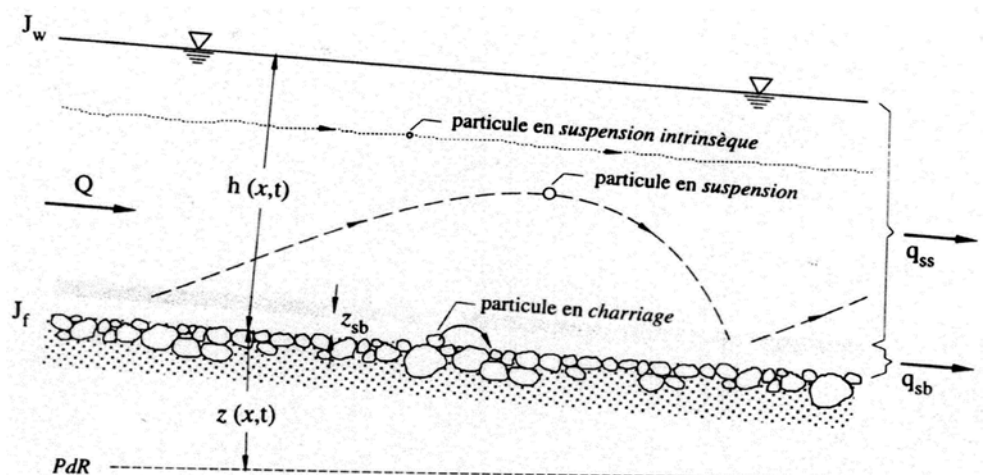
Le transport solide par suspension correspond au transport de matériaux légers dans la masse du flot. Pour les torrents comme pour les rivières, la turbulence maintient des éléments fins en suspension. Les concentrations rencontrées dans les torrents, variables selon la géologie du bassin versant, sont souvent plus élevées qu'en rivière.

Les traces morphologiques liées à la suspension sont réduites à quelques détails tels que les laisses de crues. Dans l'ensemble, ce mode de transport n'a d'influence sur les rivières à forte pente que lorsque la concentration est assez considérable pour influencer la viscosité du fluide (bassin versant dans les Terres Noires par exemple) ou dans les lacs de retenue. Le transport en suspension joue toutefois un rôle essentiel dans la formation des lits majeurs et des terrasses alluvionnaires élevées.

#### 3.1.2.3.3.2. Le charriage

Le charriage correspond au transport de matériaux plus grossiers et plus lourds par un mouvement de roulement ou de glissement sur le fond, ou encore de saltation (succession de petits sauts au cours desquels les particules se séparent du fond du lit durant de très courtes périodes).

**Illustration 17** : schéma des modes de transport solide (©Graf & Altinakar, 2000).



L'intensité du transport par charriage est très corrélée à la pente<sup>9</sup>. Des ruptures de pentes franches peuvent en conséquence donner l'impression que la quasi-totalité du transport solide s'est déposée après une crue.

<sup>9</sup> Plus précisément : à la pente à une puissance de l'ordre de 1.5 à 2 – Meunier 1989, Recking *et al.* 2013.

L'illustration 16 montre que la concentration solide augmentant, le charriage devient progressivement du « charriage torrentiel ». Le domaine du charriage torrentiel caractérise les processus de charriage pour lesquels l'activité morphologique et le taux de transport sont tels qu'il devient difficile de définir la notion même de hauteur d'écoulement, le lit étant très mobile en plan comme dans la verticale (Meunier, 1994). Les volumes transportés durant des crues de charriage torrentiel peuvent être très significatifs, dépassant plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes. À la différence des laves torrentielles, le charriage torrentiel reste toutefois un phénomène biphasique où la phase liquide se distingue de la phase solide.

### 3.1.2.3.3 Les laves torrentielles

Les laves torrentielles sont un phénomène spécifique des torrents. Elles se forment généralement à la faveur des fortes pluies, sur des pentes fortes et lorsque le site permet la formation d'un mélange concentré d'eau et de matériaux solides de granulométrie étendue, allant des argiles à des blocs de dimensions métriques. L'ensemble a un aspect monophasique de boue chargée de blocs rocheux.

Les laves torrentielles ne se forment pas sur tous les torrents, loin s'en faut. Et, lorsqu'il existe, le transport solide par laves torrentielles n'est généralement pas exclusif : un transport solide intense par charriage peut aussi se produire entre des écoulements de laves torrentielles.

Les rivières torrentielles ont très généralement une pente trop faible pour permettre la propagation de laves torrentielles. L'occurrence d'une lave torrentielle sur un torrent affluent peut par contre barrer cette dernière et entraîner un remous en amont.

#### ♦ Les principales caractéristiques des laves torrentielles

Comparées aux écoulements avec transport par charriage, les laves torrentielles présentent généralement les caractéristiques suivantes :

- contrairement au charriage dont le débit moyen varie de façon graduelle, l'écoulement des laves est très transitoire, constitué essentiellement sous la forme de vagues successives indépendantes qui peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur, se propageant à une vitesse de quelques mètres par seconde ;
- leur concentration en matériau solide est très élevée. Généralement supérieure à 50 % en volume, elle peut atteindre plus de 80 % (tandis que cette dernière ne dépasse pas 20 à 40 % pour les écoulements avec charriage) ;
- le matériau solide des coulées présente une large étendue granulométrique (si la géologie du bassin versant le permet) ; des éléments fins, tels que des argiles, contribuent, en mélange avec l'eau, à la présence d'un fluide interstitiel aux propriétés déterminantes pour le comportement d'ensemble de la coulée ;
- leur comportement est relativement homogène, d'apparence monophasique, contrairement aux écoulements impliquant du charriage qui sont clairement biphasiques ;
- le tri granulométrique est faible tout au long de l'écoulement et lors de la phase de dépôt ;
- leur comportement est intermédiaire entre fluide et solide et, sur beaucoup d'aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler ;
- lorsqu'une zone de pente plus faible est atteinte, leur arrêt se fait « en masse », avec une épaisseur de dépôt importante et la présence d'un bourrelet frontal ;
- lors de la propagation des bouffées, une certaine quantité de matériau peut se déposer sur les bords du chenal et former des bourrelets latéraux linéaires.

Chacun de ces critères, pris indépendamment, ne suffit pas à caractériser une lave torrentielle. Il est indispensable de croiser les informations disponibles avant de conclure à l'occurrence probable de laves torrentielles sur un site donné, notamment lors de l'observation de traces de crues anciennes.

**L'identification de la capacité à engendrer des laves torrentielles est un élément essentiel de toute analyse de torrent. Une erreur à ce niveau invalide généralement toute la suite de l'étude.** Ce point est d'autant plus délicat qu'un transport solide intense par charriage peut aussi se produire entre les écoulements de laves torrentielles, perturbant ou effaçant leurs traces morphologiques.

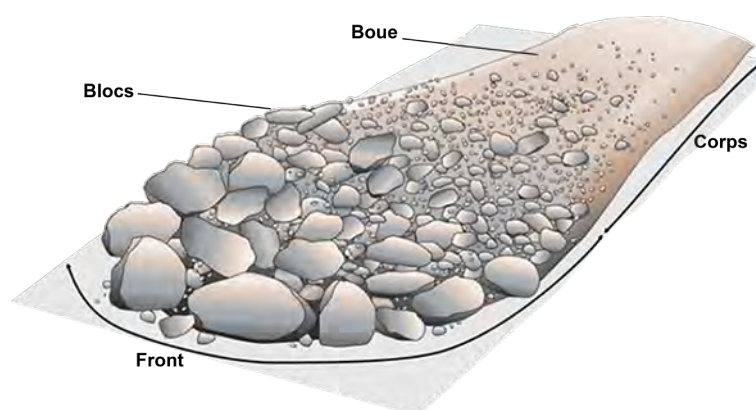
#### ♦ Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle : front, corps, queue

Une lave torrentielle, au moins lorsqu'elle s'écoule dans un chenal suffisamment marqué, est généralement constituée de trois parties (illustrations 18 et 19) :

- un **front granulaire** généralement raide, constitué des plus gros blocs (la section d'écoulement la plus importante de chaque bouffée se situe généralement au niveau du front) ;

- **un corps**, qui suit le front et présente généralement un aspect plus boueux (blocs plus ou moins noyés dans un fluide interstitiel) ;
- **une queue de coulée**, qui correspond au passage progressif vers un écoulement moins concentré.

Le comportement de la lave dépend largement de la teneur en éléments fins (argiles et silts – Chambon et Laigle, 2013). Ceci amène à faire une distinction entre les laves boueuses et les laves granulaires (pour lesquelles les outils hydrauliques existant à ce jour présentent des degrés d'avancement différents).



**Illustration 18** : profil schématique d'une bouffée de lave torrentielle (©Naim-Bouvet et Richard, 2015).



**Illustration 19** : lave torrentielle - torrent de l'Illgraben - La Souste Valais CH – (© WSL).

#### ♦ La formation et l'écoulement des laves torrentielles

Trois facteurs sont principalement à l'origine de la formation des laves torrentielles :

- **un évènement pluvieux intense**, souvent une pluie orageuse de forte intensité (quelques minutes à quelques heures) survenant sur des sols préalablement imbibés par des précipitations prolongées, la fonte des neiges ou des apports hydrogéologiques ;
- **la disponibilité d'une quantité importante de matériaux solides altérés**, déstructurés et de granulométrie variée (dans le bassin versant ou par un apport massif localisé comme lors d'un glissement de versant) ;
- **la pente**, souvent supérieure à 30 % (même si certaines laves torrentielles peuvent toutefois se déclencher dans des chenaux torrentiels aux pentes plus modestes, de l'ordre de 15 %).

Certaines études ont pu mettre en évidence des courbes enveloppes intensité - durée des précipitations pouvant générer des laves torrentielles. Si ces courbes présentent un intérêt pour l'émission d'avertissements régionaux, elles ne sont toutefois pas extrapolables en dehors de la zone géographique dans laquelle elles ont été établies. Leur interprétation doit par ailleurs être reliée avec la disponibilité en matériaux solides et l'imbibition préalable des sols.

Sur le territoire français, les laves torrentielles présentent très fréquemment des volumes de quelques dizaines de milliers de mètres cubes (occurrence annuelle). Des volumes de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes restent fréquents (occurrence de l'ordre de 5 à 10 ans), tandis que des volumes de l'ordre du million de mètres cubes sont exceptionnels. En France, les écoulements peuvent atteindre quelques mètres de hauteur, pour des vitesses le plus souvent inférieures à 10 m/s. De par leur très forte charge solide, les laves torrentielles présentent une masse volumique très élevée (de l'ordre de 2 000 kg/m<sup>3</sup>). Elles ont également la capacité de transporter de très gros blocs pouvant aisément atteindre plusieurs centaines de tonnes.

Les laves torrentielles présentent un **potentiel destructeur extrêmement élevé**. Les débordements qui peuvent affecter des enjeux hors du lit ont plusieurs origines possibles :

- une capacité hydraulique insuffisante du chenal d'écoulement au niveau d'un point de faiblesse, entraînant un débordement latéral localisé ;
- l'obstruction d'un ouvrage ponctuel (ponts notamment) par des blocs ou des bois flottants, entraînant un débordement latéral localisé ;
- le dépôt au niveau d'une réduction de pente, entraînant un engravement du lit et un débordement latéral plus ou moins généralisé, notamment lorsque plusieurs bouffées se succèdent.



### 3.1.2.3.4. Les effets directs du transport solide

Les effets directement produits par les processus de transport solide sont de trois types : affouillements (liés aux érosions), engravements (liés aux dépôts) et impacts (surtout dans le cas des laves torrentielles).

#### 3.1.2.3.4.1 Les affouillements

Un **affouillement** désigne un phénomène d'érosion par une crue pouvant résulter de :

- l'incision du profil en long qui peut **déstabiliser tout un tronçon** (lit, berges et ouvrages de protection compris). Les affouillements peuvent alors être de grande ampleur et affecter les deux berges. Ils peuvent aussi provoquer ou réactiver des glissements de versant, alors sources d'importants apports en matériaux supplémentaires (illustration 20) ;



**Illustration 20** : incision généralisée du lit du torrent de la Ravoire, Bourg Saint Maurice - 1981 (©ONF-RTM).

- **l'érosion des berges du lit mineur** (même sans incision du profil en long) avec, parfois, des reculs importants accompagnés d'attaques sur la berge opposée quelques dizaines de mètres plus en aval (illustration 21) ;
- **la divagation du cours d'eau** hors de son chenal d'écoulement ordinaire (lit mineur). Ce type d'érosion peut être assez spectaculaire, même loin du lit initial, avec des affouillements de plusieurs mètres de profondeur possibles. Cette situation est particulièrement dommageable dans le cas d'un bâtiment implanté sur un terrain en remblai (illustration 22) ;
- **survitesses locales** du fait de la concentration des écoulements (angle de bâtiments, piles de ponts, pieds de digues, ...). Généralement, le surcreusement induit est plutôt ponctuel mais peut suffire à provoquer l'écroulement des structures insuffisamment fondées (illustration 23).



**Illustration 21** : affouillements de berges – Le Bastan en amont de Barèges – juin 2013 (©sécurité civile).



**Illustration 22** : affouillements par le Bastan à Barèges, Hautes-Pyrénées – juin 2013 (©ONF-RTM).





**Illustration 23** : dégâts causés à l'angle d'un bâtiment du fait de la concentration des écoulements - Saint Martin d'Uriage, 2005 (© IRMA).

En supprimant les terrains sur lesquels étaient fondés les bâtiments et infrastructures, les affouillements sont les principaux mécanismes responsables des dommages structuraux observés lors des crues des cours d'eau torrentiels (Piton et al. 2018).

#### 3.1.2.3.4.2. Les engravements

Un **engravement** correspond au dépôt d'un volume significatif de matériaux. Compte tenu de l'importance des volumes sédimentaires susceptibles d'être transportés jusque dans les zones aménagées à l'aval, toute une série de désordres et de dommages peuvent résulter des dépôts de sédiments : débordements (par engravement du lit et réduction de la section disponible à l'écoulement), envahissement massif du cône de déjection, divagations du cours d'eau vers des zones inhabituelles, obstruction de ponts, etc., souvent fortement aggravés par la présence de débris végétaux (« flottants »).

Les engravements ont préférentiellement lieu au niveau des ruptures de pentes, mais aussi dans des zones où l'écoulement s'étale parce qu'il n'est plus confiné par des berges ou des digues. Des dépôts massifs sont aussi souvent observés quand des écoulements chargés pénètrent dans une zone d'écoulement plus lent telle que dans le remous d'un ouvrage ou dans un lac.



**Illustration 24** : engravements - a) par dépôts de lave torrentielle (Modane, Juillet 2014, ©ONF-RTM) et b) par dépôts de charriage (Lumbin, Janvier 2022, ©MOCEAN, O. Lefebvre).

#### 3.1.2.3.4.3. Les forces d'impacts

La densité des écoulements chargés de matériaux solides est plus forte que celle de l'eau, de l'ordre de deux fois dans le cas des laves torrentielles. Leur front est par ailleurs souvent chargé en gros blocs. L'ensemble est donc susceptible de générer des pressions dynamiques extrêmement importantes lors de chocs sur le pavage du lit et ses berges dans les chenaux ainsi que sur les ouvrages de protection, les infrastructures ou les bâtiments. Ces forces d'impact jouent vraisemblablement un rôle dans la capacité des événements torrentiels majeurs à remobiliser des lits parfois stables depuis longtemps. Compte tenu des caractéristiques dynamiques du phénomène de lave torrentielle, dans toute zone atteinte par ces écoulements, **il y a mise en danger de la vie humaine, y compris, très fréquemment, à l'intérieur des bâtiments touchés.**





**Illustration 25** : dommages provoqués par une lave torrentielle à Modane en juillet 2014 (© INRAE, G.Piton).

### 3.1.2.3.5. Les effets collatéraux du transport solide

Des effets collatéraux, conséquence des érosions, engravements et impacts, sont aussi couramment observés sur les cours d'eau torrentiels. Il s'agit notamment d'un lissage des pentes (effet s'exprimant dans la direction verticale), de divagations latérales ou du recrutement de grandes quantités de bois flottant.

#### ♦ Le lissage de la topographie initiale des terrains submergés

Fréquemment, le comblement des dépressions existantes et l'affouillement des terrains en situation de remblai entraîne un « lissage » général du terrain naturel (illustration 26). Dans la majeure partie des cas, ce lissage suit la pente du cône de déjection ou de la zone d'alluvionnement. Le phénomène est analogue au lissage du profil en long dans un lit alluvionnaire sur de longues échelles de temps, il peut être très marqué à l'échelle d'une seule crue torrentielle en conséquence de l'intensité des phénomènes.



**Illustration 26** : lissage de la topographie selon la pente. Le Nant St-Claude au Champet, Savoie - 1883 (©ONF-RTM).

#### ♦ La divagation des lits torrentiels

L'instabilité de la section d'écoulement est un trait caractéristique des écoulements ayant une forte concentration de sédiments. Des phénomènes locaux d'affouillement et d'engravement ont en réalité lieu sans cesse pendant les crues morphogènes. Qu'il soit confiné dans son lit ordinaire ou qu'il en soit sorti, un cours d'eau torrentiel en crue façonne et modifie ainsi en permanence son chenal d'écoulement. Le phénomène est partiellement aléatoire et trouve son origine dans de multiples processus (tri granulométrique, présence de points durs ou d'obstacles, chute et transport de flottants).

Dans un lit mineur assez large, l'écoulement n'a souvent pas lieu sur toute la largeur disponible, mais se concentre dans un ou plusieurs bras actifs qui se déplacent et divagent de manière incessante. Le phénomène a ainsi parfois lieu à des niveaux supérieurs aux terrains environnant, l'écoulement s'auto-chenalisant dans ses propres dépôts. Ce comportement est très différent de celui des crues des cours d'eau fluviaux où la zone inondable est généralement envahie dans son ensemble.



Lors des crues de charriage, dès qu'un débordement s'initie, les débits sortis du chenal sont « perdus » et ne participent plus au transport par charriage qui a lieu dans le chenal principal. Cette « perte » se traduit par une chute de la capacité de transport et un engrèvement du chenal (entraînant souvent une aggravation du débordement en cours). On peut alors observer un fonctionnement en « tout ou rien » avec comblement et abandon du lit mineur initial et bifurcation des écoulements avec ouverture d'un nouveau lit (illustration 27). Ce phénomène est nommé « avulsion ». Il est aussi régulièrement observé sur les torrents à laves torrentiels où le dépôt prend la forme de « lobes » déposés puis contournés successivement.



**Illustration 27** : divagations du torrent du Cristillan, juin 1957 - Ceillac - Hautes-Alpes (©Henri Vincent).

#### ♦ *Le recrutement de bois flottant (et autres éléments flottants)*

La déstabilisation des lits torrentiels et des versants attenants, ainsi que les érosions de berges, touchent souvent des zones boisées. Une conséquence naturelle de cette activité morphogène est donc que des quantités importantes de bois flottants sont recrutés par les écoulements. Les berges boisées des cours d'eau et les glissements de terrain sont les principaux pourvoyeurs de bois flottants.

Le transport de quantités significatives de bois flottants est ainsi quasi systématiquement observé pendant les crues majeures des cours d'eau torrentiels (illustration 28), en particulier dans les cours d'eau subissant des crues de charriage. Dans les torrents à lave torrentielle, comme la violence des écoulements broie souvent les branches et troncs d'arbres, les pièces résiduelles ont une influence marginale en comparaison des blocs rocheux transportés.

On note une croyance tenace que les bois flottants sont issus d'arbres morts présents, avant la crue, dans le lit des cours d'eau. Or, il est prouvé que **la majorité des flottants formant les embâcles pendant les crues majeures sont issus d'arbres sains** (Comiti et al, 2016). Un indice évident de ce phénomène est l'élargissement des lits des cours d'eau torrentiels lors des épisodes de crues majeures, élargissement qui implique le recrutement par les flots de nombreuses zones boisées (Arnaud-Fassetta et Fort, 2004). **La présence de flottants lors des crues majeures est ainsi inévitable.**

La prise en compte de la présence de flottants dans les études des crues des cours d'eau torrentiels doit être systématique. Des guides ont été édités sur cette thématique fournissant des approches et méthodes permettant d'en estimer la quantité et les dimensions, mais aussi de qualifier les probabilités de blocages d'ouvrages hydraulique (OFEV, 2019, Quiniou et Piton, 2022).



**Illustration 28** : dépôt massif de flottants.

a) usine Miva (Saint-Bueil, crue de l'Ainan, 6 juin 2002, source : Alp'Géorisques) ; b) l'usine hydro-électrique (Ferrière-d'Allevard, crue du massif de Belledonne, 24 août 2005, source : Gominet).

Les flottants ont tendance à obstruer et à faciliter les débordements des chenaux étroits ou présentant des obstacles (pile de pont, ouvrage hydraulique). **Il faut donc maintenir les lits des cours d'eau torrentiels aussi larges et libres d'obstacles que possible et dans les zones étroites, limiter la présence de bois flottants**, ce qui implique :

- le **traitement préventif dans ces secteurs** (suppression des ligneux dont la longueur est plus importante que la largeur du chenal, promotion du stade arbustif) ;
- la **préservation, hors zones d'enjeux, des zones de dépôt préférentiel** que sont les zones suffisamment larges pour permettre le développement de morphologies en tresses (chenaux multiples) qui favorisent la régulation du transport sédimentaires mais aussi du transport des flottants.

Notons par ailleurs qu'un certain nombre d'éléments anthropiques sont susceptibles d'être transportés lors des crues des cours d'eau torrentiels : véhicules, caravanes, citernes, dépôts de matériaux, dépôts de bois coupé, déchets divers, etc. Leur mobilité, très en lien avec leur flottabilité et leur résistance aux attaques des écoulements, est très variable. La concentration de tels éléments en amont d'ouvrages susceptibles d'être obstrués doit être relevée (par exemple le dépôt inondable d'une scierie en amont d'un pont, ou un parking inondable en amont de dalots<sup>10</sup>). Si le recrutement par les écoulements des éléments mobilisables est considéré probable, ou même certain, ce phénomène doit être pris en compte dans l'analyse des sous-scénarios d'obstruction des ouvrages.

### 3.2. La cartographie de l'aléa de référence des cours d'eau torrentiels

Les étapes techniques de caractérisation de l'aléa dans le cadre d'un PPRi de cours d'eau torrentiels sont (des détails sont fournis sur chacune d'entre elles dans les sections qui suivent) :

- **étape 1** : définition d'un (ou plusieurs) « **scénario(s) de référence** » ;
- **étape 2** : définition d'un (ou plusieurs) « **sous-scénario(s) de référence** », traduisant la variabilité potentielle des manifestations des scénarios de référence, du fait notamment de la multiplicité des comportements possibles d'éléments anthropiques ou de caractéristiques secondaires des événements ;
- **étape 3**<sup>11</sup> : évaluation des niveaux d'intensité pour les sous-scénarios de référence retenus, puis élaboration d'**une carte des niveaux d'intensité** par scénario de référence, **retenant en chaque point l'intensité maximale identifiée** pour les sous-scénario associés ;
- **étape 4** : élaboration d'**une carte de probabilité d'atteinte** par scénario de référence, en s'appuyant notamment sur les enveloppes des cartes d'intensité par sous-scénario ;
- **étape 5** : élaboration d'**une carte d'aléa** par scénario de référence, sur la base d'un **croisement entre intensité et probabilité d'atteinte** ;
- **étape 6** : évaluation des **sur-aléas** éventuels résultant de la défaillance d'éléments anthropiques ;

<sup>10</sup> Un dalot est un ouvrage hydraulique semi-enterré, de forme rectangulaire, généralement placé sous les remblais des routes ou des voies ferrées pour y permettre l'écoulement des eaux.

<sup>11</sup> Le présent guide propose une méthodologie adaptée dans la plupart des cas. Dans certaines configurations, des variantes aux étapes 3, 4 et 5 peuvent être envisagées. La méthode doit être validée par le service de l'État, chargé de l'élaboration du PPR. Par exemple, lorsque le nombre de sous-scénarios est très limité, il peut être retenu d'élaborer une carte d'intensité, de probabilité d'atteinte et d'aléa pour chaque sous-scénario.

- **étape 7** : élaboration de la **carte de synthèse** de l'aléa de référence du PPRi, reprenant les sur-aléas et le niveau d'aléa maximal sur l'ensemble des scénarios de référence.

**Chacune de ces étapes, et tout particulièrement les deux premières, font l'objet d'une validation par le maître d'ouvrage, sur proposition motivée du bureau d'étude qui élabore la carte d'aléa.**

### 3.2.1. La détermination du (des) scénario(s) de référence

L'aléa du PPRi est déterminé à partir d'un (ou de plusieurs) scénario(s) de référence décrivant le type d'évènement dont le PPRi cherche à prévenir les conséquences. Dans la mesure du possible, le type d'évènement est associé à une période de retour, qui traduit la probabilité qu'un évènement de la même magnitude, ou d'une magnitude supérieure, se produise dans une année.

La première étape de la détermination des scénarios de référence consiste à identifier les évènements historiques et à en évaluer la période de retour. Cependant, **pour les crues des cours d'eau torrentiels, la détermination de la période de retour des évènements historiques n'est possible que dans des situations favorables particulières.** Ainsi, deux cas de figure sont à considérer :

- **lorsqu'il est possible de caractériser un (ou plusieurs) évènement(s) historique(s) d'occurrence au moins centennale**, le(s) scénario(s) de référence est (sont) déterminé(s) à partir du plus important évènement de ce type ;
- **lorsque cela n'est pas possible**, le(s) scénario(s) de référence est (sont) déterminé(s) à partir d'un évènement théorique d'occurrence centennale, à construire.

#### Qu'est-ce qu'un évènement centennal ?

Un évènement centennal est un évènement qui a chaque année une probabilité de 1 % d'être « atteint ou dépassé ». Cette dénomination n'a pas de valeur prédictive. En effet, si une crue centennale se produit statistiquement une fois tous les 100 ans en moyenne, un cours d'eau peut connaître deux crues centennales la même année, ou aucune pendant plusieurs siècles. Cette notion s'appréhende de manière statistique. Ainsi, il y a :

- une probabilité de 26 % qu'un évènement centennal se produise au moins une fois en 30 ans (durée de l'ordre de grandeur de celle d'un prêt immobilier) ;
- une probabilité de 55 % en 80 ans (durée de l'ordre de grandeur de celle d'une vie) ;
- une probabilité de 63 % sur une période de 100 ans.

#### 3.2.1.1. La caractérisation d'un évènement torrentiel

Les principales caractéristiques permettant de décrire une crue de cours d'eau torrentiel sont :

- le mode de transport solide (charriage ou lave torrentielle) ;
- celles qui décrivent la magnitude (paramètre caractérisant l'ensemble de l'évènement) et qui peuvent être évaluées au prisme de différentes grandeurs ou caractéristiques :
  - les débits (aussi bien les débits liquides que les débits solides, et leur ratio qui permet d'estimer la concentration solide),
  - les volumes en jeu pendant la totalité de l'évènement (le volume total d'eau et le volume total de matériaux transportés ou déposés),
  - le temps de montée de la crue ou la durée de l'évènement,
  - la dimension d'éléments solides aggravants (flottants, gros blocs) ;
- celles qui décrivent l'intensité de la crue qui, contrairement à la magnitude, varient spatialement dans la zone exposée :
  - les affouillements ou les dépôts de matériaux,
  - les vitesses et les hauteurs d'écoulement,
  - les impacts des blocs ou flottants,
  - la soudaineté des phénomènes et la vitesse locale de montée des eaux.



### 3.2.1.2. La possibilité de déterminer la période de retour des événements

La définition de la période de retour est univoque quand la magnitude de l'évènement est décrite par un seul paramètre. Des méthodes existent pour mener à bien des analyses statistiques dans un cadre multivarié, c'est-à-dire décrivant la magnitude d'un évènement selon plusieurs paramètres (Brunner *et al.*, 2016). Elles restent toutefois compliquées à utiliser et plusieurs définitions de la période de retour existent dans ce cadre, ce qui ne facilite pas son utilisation opérationnelle (Evin et Piton, 2020). Il est donc conseillé de caractériser les évènements par un seul paramètre principal, considéré comme le plus significatif sur les intensités des phénomènes.

**Si les données disponibles le permettent, il est recommandé d'estimer la période de retour d'un évènement sur un paramètre unique décrivant sa magnitude.** Le choix du paramètre utilisé dépend de l'objet de l'étude : le débit de pointe, le volume de crue ou le volume solide sont classiquement les plus retenus dans les études de PPRi (cf. tableau ci-dessous). Les données sur les évènements de forte magnitude touchant les cours d'eau torrentiels étant lacunaires, il est rare de pouvoir mener une telle analyse et les évènements de références sont souvent bâtis par croisement des données historiques avec des observations géomorphologiques et des approches hydrologiques et hydrauliques (Tableau 2).

Type d'évènement	Laves torrentielles	Crue de charriage (torrent)	Crue de charriage (rivière torrentielle)
Paramètre descripteur de la magnitude le plus fréquemment utilisé	Volume de lave torrentielle	Débit de pointe ou volume d'apport solide	Débit de pointe
Données permettant de caractériser la période de retour	Rarement disponibles	Rarement disponibles	Aux stations hydrologiques publiques et privées
Méthodes d'analyse permettant de caractériser l'évènement	Analyses historiques, géomorphologiques et hydrologiques	Analyses historiques, géomorphologiques, hydrologiques et calculs de capacité de transport dans les zones alluvionnaires	Analyses historiques, géomorphologiques, hydrologiques et calculs de capacité de transport dans les zones alluvionnaires
Sources notables d'incertitudes	Activité des glissements de terrains et du permafrost, taux d'érosion dans les chenaux, activation simultanée de plusieurs branches torrentielles	Activité des processus de source sédimentaire, disponibilité sédimentaire et régulation du transport solide sur les tronçons intermédiaire, hydrologie des petits bassins versants de montagne	Pluviométrie des bassins versants de montagne, effet orographique, effet de la neige

**Tableau 2 :** approches retenues usuellement pour la caractérisation de l'évènement de référence.

### 3.2.1.3. La caractérisation synthétique des évènements de référence

Bien que la magnitude puisse être qualifiée sur un paramètre principal, elle peut également être affinée au regard de paramètres secondaires : par exemple la durée de l'évènement, la présence et les dimensions typiques des bois flottants, ou la granulométrie et les volumes mobilisés. Définir aussi les valeurs de ces paramètres est important dans la mesure où elles sont utiles pour réaliser la carte d'aléa du PPRi. Une valeur unique peut être retenue pour les paramètres secondaires n'influençant pas, ou peu, la carte d'aléa (par exemple : « la présence de flottants est quasi-certaine pour l'évènement de référence »). Si au contraire, plusieurs modes de fonctionnement drastiquement différents peuvent être liés à différentes valeurs du paramètre dans sa gamme de variation associée à la magnitude retenue, il sera indiqué que ce paramètre est susceptible de varier (par exemple : « la taille des plus gros blocs transportés varient dans la gamme 1 à 3 m, les plus gros ne pouvant pas passer le pont »). Ces paramètres guideront l'analyse des défaillances d'ouvrages en aval et serviront à étayer la nécessité d'analyser plus ou moins de sous-scénarios.

Pour les torrents qui connaissent les deux types de transport solide (charriage et laves torrentielles), chacun de ces types d'écoulement fera l'objet d'au moins un scénario de référence afin de tenir compte des dynamiques très différentes (débits de pointe et volumes solides différent beaucoup entre laves torrentielle et charriage dans un même bassin versant). En guise d'exemple, le tableau 3 décrit deux scénarios de référence qui pourraient être retenus pour le torrent du Manival (Isère).

Scénario	Laves torrentielles	Crue de charriage (rivière torrentielle)
Zone principale concernée	Partie haute du cône de déjection	Partie intermédiaire et basse du cône de déjection
Magnitude	30 000 m <sup>3</sup> (volume de lave torrentielle)	14 m <sup>3</sup> /s (débit de pointe)
Gamme d'incertitude	4 000 – 57 000 m <sup>3</sup>	± 50 %
Mode de construction	Croisement de données historiques, géomorphologiques et hydrologiques sommaires	Analyse hydrologique sommaire
Paramètres secondaires notables	<p><i>Rhéologie</i> : mal connue, hypothèse de paramètre <math>t_c/\rho = 0.5 - 1.5</math> issue des valeurs classiquement retenue en France.</p> <p><i>Débit de pointe</i> : mal connu, valeur retenue de 65 m<sup>3</sup>/s issue de la formule de Mizuyama, gamme d'incertitude : 32 - 130 m<sup>3</sup>/s.</p> <p><i>Blocométrie</i> : relativement faible en lien avec la géologie, présence probable de blocs de diamètres 0.5 – 1.5 m, issue des observations sur les berges du torrent.</p> <p><i>Flottants</i> : globalement absents ou réduits en pièces de faible dimension.</p>	<p><i>Volume solide charrié</i> : variable avec la durée de l'évènement, valeur retenue de 15 000 m<sup>3</sup>, issue de calcul de transport par charriage sur crue longue.</p> <p><i>Blocométrie</i> : relativement faible en lien avec la géologie, présence possible de blocs de diamètres 0.3 - 1 m, issue des observations dans le lit du torrent.</p> <p><i>Flottants</i> : présence très probable de flottants ayant été affouillés sur les berges, principalement de jeunes arbres mais quelques gros éléments peuvent être présents.</p>

**Tableau 3** : exemple de description synthétique des scénarios de référence d'un torrent, les détails des analyses aboutissant à ces valeurs sont à fournir dans l'étude hydraulique associée.

### Synthèse sur l'identification des scénarios de référence

Chaque scénario de référence décrit un évènement de crue ou de lave torrentielle. **Il est caractérisé a minima par une magnitude**, souvent la valeur du débit de pointe ou le volume solide apporté par la crue sur la zone d'étude. Le choix du paramètre décrivant la magnitude est justifié par son caractère prépondérant dans les effets de la crue. Les incertitudes associées à sa valeur doivent être indiquées.

**La méthodologie d'identification des scénarios de référence** est indiquée : référence à un (des) évènement(s) historique(s) ou scénario bâti par une analyse croisant plusieurs approches.

**Les paramètres secondaires** décrivant l'évènement et **pouvant influencer significativement son déroulement et ses effets** seront aussi identifiés, ainsi que leurs valeurs retenues et les incertitudes associées (par exemple le volume solide total ou le débit de pointe si l'autre paramètre a été utilisé pour décrire la magnitude, mais aussi la concentration solide, la quantité et la taille des bois flottants et / ou de gros blocs).

Si le domaine étudié comprend plusieurs bassins versants (plusieurs torrents, ou une rivière torrentielle et ses affluents), un scénario de référence doit a minima être identifié pour chaque bassin versant. Dans la plupart des cas, les processus d'un bassin versant sont peu, ou pas, influencés par ceux des bassins versants voisins. Une hypothèse simple et unique sera ainsi généralement prise sur l'hydrologie des autres bassins versants pour le scénario de référence d'un bassin versant donné. Cependant, si l'état d'un cours d'eau est variable et influence de façon prépondérante les phénomènes du bassin versant étudié, des sous-scénarios intégrant cet effet peuvent être retenus. C'est par exemple le cas de certaines confluences (cf. annexe 7.1).

#### 3.2.1.4. La prise en compte du changement climatique

Il reste à ce jour des incertitudes scientifiques pour caractériser l'impact du changement climatique sur les aléas des cours d'eau torrentiels à l'échelle locale d'un PPRi. Des travaux sont en cours et les connaissances dans ce domaine évoluent rapidement. Le présent guide ne propose donc pas de modalités de prise en compte du changement climatique.

L'élaboration du PPRi peut être une opportunité pour étudier, à titre informatif, un (ou plusieurs) scénario(s) se basant sur une période de retour plus élevée que celle de l'aléa de référence, par exemple pour identifier d'éventuels effets de seuil. Comme indiqué au §3.2.7, ces analyses ne font toutefois pas *stricto sensu* partie du PPRi. Elles contribuent à la connaissance générale du risque et permettent d'intégrer les conséquences potentielles du changement climatique dans les choix d'aménagement du territoire.

## 3.2.2. L'identification des sous-scénarios d'un scénario de référence

### 3.2.2.1. Pourquoi des sous-scénarios ?

Un scénario de référence est caractérisé par une magnitude. Deux événements ayant la même magnitude peuvent cependant engendrer des phénomènes naturels sensiblement différents. Par exemple, pour un même débit de pointe, les débordements peuvent être localisés dans des secteurs variés selon la tenue ou la rupture d'ouvrages<sup>12</sup> de protection, ou en cas d'obstruction ou de transparence d'un pont. Afin de prendre en compte la variabilité des phénomènes pouvant avoir lieu, il peut ainsi être nécessaire d'identifier et d'étudier des sous-scénarios représentatifs des différentes déclinaisons possibles du scénario de référence.

Le choix de définir un ou plusieurs sous-scénarios de référence dépend des spécificités locales et **sa validation relève du service chargé de l'élaboration du PPRi, sur la base de propositions motivées du bureau d'étude.**

### 3.2.2.2. Les principes généraux relatifs aux sous-scénarios

Les sources de variabilité des effets d'un événement justifiant potentiellement l'émergence de sous-scénarios peuvent être associées (Piton *et al.* 2022) :

- au comportement d'ouvrages (érosion d'une berge, brèche dans une digue, embâcle d'un pont), ces sous-scénarios sont discutés plus en détail en partie 4.2.3 ;
- à un paramètre secondaire (par exemple durée de la crue, quantité et taille de bois flottant, viscosité de la lave torrentielle) pouvant influencer sensiblement les conditions d'écoulements, de dépôts, et les modes de comportement des ouvrages (par exemple la présence de flottants générant des obstructions des ponts) ;
- à une variabilité des conditions aval (le niveau d'une retenue dans lequel se jette le cours d'eau ou l'hydrologie de la rivière réceptrice, voir notamment les éléments sur le cas particulier des confluences dans l'annexe 7.1).

La décomposition en sous-scénarios permet de tracer le raisonnement menant à la construction d'une carte d'aléa pour un scénario de référence et de justifier de la bonne prise en compte de la variabilité des manifestations potentielles associées à un scénario.

Afin de limiter l'effort d'étude et de faciliter la communication, et malgré le nombre élevé de variables, **l'aléa de référence est à établir à partir d'un nombre limité de sous-scénarios.** Il n'est pas possible de fixer un nombre recommandé de sous-scénarios car certains sites ont des fonctionnements très complexes. En guise de recommandation, soulignons que **pour les cas les plus simples, un scénario de référence sans sous-scénario peut être utilisé. Sur les sites nécessitant une décomposition en sous-scénarios, il est préférable de limiter leur nombre à 3 ou 4.**

Les étapes et arguments permettant de proportionner l'analyse sont présentées en annexe 7.2.

**Chaque sous-scénario ne fera par ailleurs pas nécessairement l'objet d'une démarche complète allant jusqu'à une cartographie exhaustive et précise des intensités.** Une approche simplifiée est souvent possible, même sur certains cours d'eau à enjeux. Par ailleurs, il est parfois possible de s'appuyer sur des éléments disponibles dans des études préexistantes hors du cadre du PPR (études de danger, études réalisées dans le cadre de PAPI, etc.). Pour des questions de traçabilité, il est recommandé d'identifier clairement dans le rapport de présentation les sous-scénarios retenus comme possibles et ceux qui ont été analysés plus en détail.

En cas d'incertitudes importantes sur un paramètre ou une variable (viscosité ou volume des laves torrentielles, pente d'équilibre, stabilité d'un pavage, etc.), des **tests de sensibilité** peuvent être faits pour appréhender les conséquences des choix retenus. Par défaut, lorsque les incertitudes ne peuvent pas être levées, un choix allant dans le sens de la sécurité sera retenu.

<sup>12</sup> Le traitement des ouvrages dans les (sous-)scénarios est détaillé dans la section 3.2.3.



### 3.2.3. La prise en compte des ouvrages anthropiques dans la caractérisation de l'aléa de référence des PPRi de cours d'eau torrentiels

Le paragraphe précédent présente l'approche générale pour l'identification des sous-scénarios, et porte sur l'ensemble des modes de défaillance possibles d'un tronçon (ouvrages, paramètres secondaires, conditions aval, etc.). La prise en compte des ouvrages anthropiques dans ce cadre appelle des précisions complémentaires, développées ci-après.

#### 3.2.3.1. Les ouvrages anthropiques rencontrés en contexte torrentiel

##### 3.2.3.1.1. Les ouvrages de protection torrentielle

Il s'agit des ouvrages conçus et réalisés afin de protéger des enjeux vis-à-vis d'un ou plusieurs phénomènes intéressant les torrents et/ou les rivières torrentielles en réduisant la magnitude, la fréquence, l'extension ou l'intensité des phénomènes.

Les ouvrages de protection ont été mis en place pour assurer différentes fonctions : piéger des matériaux solides pour les plages de dépôts, éviter l'érosion pour les protections de berges, empêcher le débordement jusqu'au niveau de protection pour les systèmes d'endiguement, etc. (voir tableau 4 page 42).

La protection contre les phénomènes torrentiels est usuellement dissociée en deux grandes familles complémentaires : la protection active et la protection, ou défense, passive.

La **protection active** agit sur les causes du transport solide. Il s'agit par exemple des ouvrages de correction torrentielle (terrasses, seuils et barrages placés en travers des lits, drains, etc.) ou des travaux de végétalisation (reboisement, etc.).

La **défense passive** vise à réduire les effets dommageables en cas d'évènement torrentiel. Elle porte notamment sur les plages de dépôt, les pièges à flottants, les protections de berge ou les digues.

La description de ces différents types d'équipement est développée en annexe 7.3.

##### 3.2.3.1.2. Les autres ouvrages hydrauliques

D'autres ouvrages (ponts, buses, etc.), qui ne sont pas considérés comme des ouvrages de protection, ont toutefois aussi une fonction hydraulique : celle de contenir ou de faire transiter les écoulements. Des défaillances de cette fonction sont souvent observées, par exemple à l'occasion d'embâcle de bois flottant ou d'obstruction par des blocs. Ces ouvrages sont donc également susceptibles de modifier fortement les écoulements. **Leurs éventuels effets négatifs doivent être intégrés dans la cartographie des aléas** et si des incertitudes persistent quant à leur bon ou mauvais fonctionnement, des sous-scénarios peuvent être considérés.

#### 3.2.3.2. Les défaillances d'ouvrage

##### 3.2.3.2.1. Principe général

**Aucun ouvrage de protection ne permet d'assurer une protection absolue contre « toutes » les crues sur le long terme. La probabilité de dépassement ou de défaillance de l'ouvrage peut être faible mais jamais nulle. Les conséquences des dépassements et/ou de défaillances structurales des ouvrages de protection doivent être évaluées dans le cadre du PPRi et prises en compte dans la carte d'aléa.**

Situés en travers ou en bordure de torrents ou de rivières torrentielles, les dispositifs de protection sont directement exposés à des actions violentes résultant du fort transport solide qui caractérise les écoulements torrentiels (charriage, laves torrentielles, flottants, gros blocs, etc.), mais aussi, potentiellement, à d'autres phénomènes spécifiques du milieu montagneux (avalanches, mouvements de terrain, etc.). Les phénomènes torrentiels sont susceptibles de provoquer des évolutions morphologiques importantes du lit durant les crues et sur ses berges en cas de débordements. Les ouvrages de protection doivent ainsi résister aux différents mécanismes de dégradation auxquels ils sont soumis (érosions externes, incision généralisée du lit, affouillements localisés, impacts et chocs localisés, surverse, etc.) et qui peuvent compromettre leur stabilité.

De surcroît, la pérennité des ouvrages de défense passive et de leur niveau de protection n'est pas garantie dans le temps long dans des conditions identiques aux conditions actuelles. Plusieurs configurations, prévisibles ou non, peuvent conduire à une diminution du niveau de protection à long terme : difficulté des gestionnaires d'ouvrages à faire face aux dépenses d'entretien ; aggravation de l'aléa dans le temps, entraînant, à ouvrage identique, une augmentation de la probabilité de dépassement ; survenue d'un évènement de magnitude particulièrement importante qui fragiliserait ou détruirait l'ouvrage ; etc.

Or, l'urbanisation d'un secteur acte un changement d'affectation des sols à très long terme (plusieurs décennies à plusieurs siècles). Une portion de territoire construite n'est que très rarement rendue à la nature. Ainsi, dans le cadre de l'élaboration des PPRi, **les secteurs protégés par des systèmes d'endiguement doivent toujours être affichés avec un aléa correspondant à des scénarios de défaillance, intégrant le fait que ces secteurs sont intrinsèquement inondables, et par ailleurs soumis à un risque de sur-aléa en cas de rupture de l'ouvrage.**

### 3.2.3.2.2. Les défaillances fonctionnelles (dépassement de l'ouvrage)

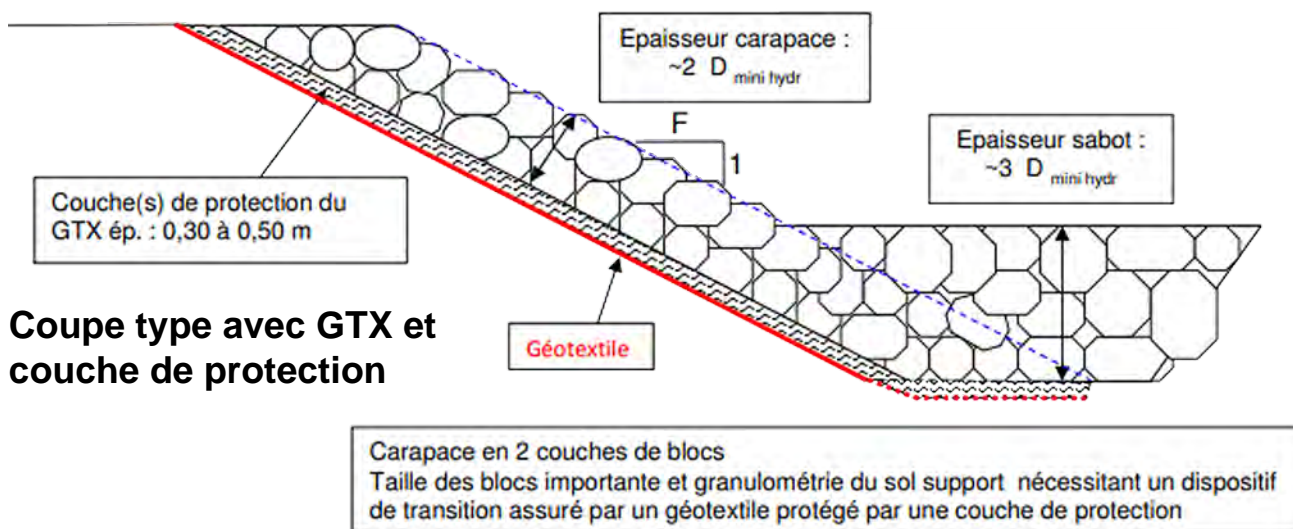
En cas de **dépassement**, l'ouvrage n'est plus en capacité d'assurer pleinement la fonction pour laquelle il a été construit. Un dépassement de l'ouvrage se produit généralement lorsque l'événement qui se produit est supérieur à celui pris en compte pour son dimensionnement. L'occurrence de facteurs aggravants (embâcles par des flottants ou des gros blocs, etc.) peut également conduire à un dépassement « prématuré » de la capacité de l'ouvrage (sauf si ces facteurs ont été pris en compte dans le scénario de projet<sup>13</sup> qui a guidé la conception du dispositif). Le risque de dépassement d'un ouvrage ne peut jamais être totalement exclu.

Pour une plage de dépôt, il s'agit typiquement du dépassement de sa capacité de stockage. Pour une digue ou une protection de berge, cela correspond au dépassement de leur niveau de protection. Pour un pont, il peut s'agir d'un embâcle entraînant des dépôts et débordements en amont.

Le dépassement de la crue de projet ne conduit pas systématiquement à une défaillance structurale de l'ouvrage si celui-ci a été conçu à cet effet. La majorité des plages de dépôts dispose par exemple d'une cuvette déversoir dont le dimensionnement peut permettre de faire transiter le débit de pointe sans compromettre la stabilité de l'ouvrage. La défaillance des ouvrages de protections équipés de dispositifs de sécurité permettant le transit sans dommages d'évènements supérieurs à l'évènement de projet est ainsi moins probable que celle d'ouvrages non équipés, beaucoup plus sensibles à des dépassements de capacité. En fonction du type d'ouvrage concerné, la probabilité de survenue d'un éventuel sous-scénario pourra être nuancée en conséquence.

### 3.2.3.2.3. Les défaillances structurales

Les **défaillances structurales** correspondent à une rupture partielle ou totale de l'ouvrage. Ces défaillances peuvent survenir brutalement avant une défaillance fonctionnelle. Il peut s'agir de l'ouverture d'une brèche dans une digue par érosion latérale, de la destruction d'une protection de berge (qui survient très souvent par insuffisance de la protection parafouille), de la rupture brutale d'un ouvrage rigide, etc.



**Illustration 29** : exemple de dispositifs de protection parafouille.

Parmi tous les modes de défaillance structurales, les érosions externes et les affouillements en pied des ouvrages restent de loin les mécanismes de dégradation prédominants pour les ouvrages de protection longitudinaux en contexte torrentiel (digues torrentielles, protection de berges, etc.).

<sup>13</sup> Le scénario de projet (ou crue de projet) d'un ouvrage correspond à l'évènement pris comme référence pour sa conception et son dimensionnement. Cette crue peut être différente de la crue de référence du PPRi.



**Illustration 30** : large brèche due à une érosion externe sans débordement - Var - Guillaumes (06) - 1994 (©ONF).

La résistance des ouvrages longitudinaux dépend de leur conception, en particulier de la présence indispensable d'une protection parafouille correctement dimensionnée (plus en termes de volumes de blocs qu'en termes de taille de blocs) et de la qualité de leur mise en œuvre (bon appareillage des blocs au niveau des perrés).

Les ouvrages de protection transversaux (barrages et seuils de correction torrentielle, ouvrages de fermeture de plages de dépôts, pièges à blocs, radiers parafouille, épis transversaux, etc.), de même que les ouvrages de franchissement, sont quant à eux par ailleurs fortement exposés aux chocs frontaux et impacts dynamiques (laves torrentielles, gros blocs, avalanches, etc.). Les modes de défaillance préférentiels restent tout de même souvent liés à des phénomènes d'affouillement de leur fondation et à leur contournement en cas de surverse au droit de l'ouvrage ou en amont.

#### **3.2.3.2.4. La prise en compte des défaillances dans un PPRi**

Dans un PPRi, la prise en compte des différentes défaillances potentielles des ouvrages se fait en :

- identifiant d'éventuels sur-aléas liés à ces défaillances ;
- et en considérant systématiquement des sous-scénarios de défaillance représentatifs de la variabilité des défaillances possibles.

#### **3.2.3.3. La prise en compte des défaillances par les sur-aléas**

Lors d'un évènement, un « sur-aléa » correspond à une augmentation du niveau d'intensité des phénomènes en cas de défaillance d'un élément anthropique (par exemple, une rupture de digue) par rapport au niveau d'intensité que le même évènement aurait engendré en cas d'absence de cet élément anthropique. La brutalité du phénomène en cas d'insuffisance de l'ouvrage est alors souvent prépondérante, en particulier pour la sécurité des personnes.

Dans un PPRN, le « sur-aléa » est évalué en comparant une situation avec et sans ouvrage, et en considérant leurs différents modes de défaillance ou de dépassement. La notion de « sur-aléa » n'a donc de sens qu'en présence d'un ouvrage de protection susceptible de générer un « sur-aléa ». L'objectif est de vérifier si le phénomène qui se produit avec dépassement ou défaillance de l'ouvrage de protection se manifeste avec une intensité supérieure à celle du même phénomène qui se serait produit sans ouvrage. La défaillance d'un élément anthropique ne crée donc pas systématiquement de sur-aléa, par exemple dans le cas où une hypothèse de transparence est plus « pénalisante » qu'une hypothèse de rupture.

Cette problématique se décline pour les différents types d'ouvrages classiquement rencontrés en contexte torrentiel : ouvrages de correction (seuils et barrages), de sédimentation (plages de dépôts) ou de transit (chenaux, digues). Des travaux se sont plus spécifiquement intéressés aux ouvrages de type digues, a priori les plus sensibles vis-à-vis de ces questions (Quefféléan *et al.*, 2019). Il est important de noter que les spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles sont sensiblement différentes de celles des digues fluviales. Comparativement aux digues fluviales, le « sur-aléa » lié à la rupture d'une digue torrentielle est généralement moins marqué.



En l'absence de digue, des débordements et/ou des changements de lit se produisent sur le cône ou en fond de vallée, et présentent des écoulements souvent aussi intenses que ceux en cas de rupture. Dans les deux cas, les débordements peuvent avoir des conséquences graves, notamment du fait des vitesses toujours très élevées sur fortes pentes. La comparaison des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport à ceux des digues fluviales est développée en annexe 7.5.

Les « sur-aléas » doivent conduire à mettre en place des « bandes de précaution ». Aussi, les zones soumises à ces « sur-aléas » sont caractérisées en aléa « très fort aggravé » sur la carte d'aléa de référence. Les modalités d'identification des « sur-aléas » sont précisées dans le tableau 4 page 42 pour les différents types d'ouvrages.

### 3.2.3.4. La prise en compte des défaillances par les sous-scénarios

#### 3.2.3.4.1. Le cas particulier des protections actives, intégrées directement dans la définition des scénarios de référence

Les mesures de protection active, agissant sur la source des phénomènes, peuvent avoir un effet sur la magnitude et la fréquence des événements. Leur analyse, au regard de la configuration existante au moment de l'élaboration du PPRi, fait donc partie intégrante de l'étude permettant la définition du (ou des) scénario(s) de référence.

Les dispositifs de protection active n'ont par contre a priori pas vocation à faire l'objet de sous-scénarios prenant en compte leurs défaillances éventuelles. Il peut en effet être considéré que ces ouvrages, ainsi que la couverture végétale des versants, sont largement situés à distance des enjeux et font partie du paysage et de la dynamique à long terme du bassin versant.

La comparaison des paysages actuels avec les images d'archives des mêmes sites démontre l'efficacité des travaux de restauration des terrains en montagne menés fin XIX<sup>e</sup> - début XX<sup>e</sup> et maintenus, renforcés et complétés depuis lors. Le couvert végétal a recolonisé ces bassins versants et l'intensité des phénomènes érosifs a beaucoup faibli. Ces ouvrages et reboisements sont désormais si anciens et si bien intégrés dans le paysage qu'il est souvent impossible de caractériser les aléas en leur absence : leur effet est trop profond sur les dynamiques végétales, écologiques, géomécaniques, hydrologiques et morphologiques pour être caractérisé (Piton *et al.* 2019). On peut considérer que ces opérations de restauration ainsi que le reboisement spontané associé à la déprise rurale constituent « un changement dans les circonstances de fait » qui justifie légalement une prise en compte dans les PPRN (article R. 562-10-1 du code de l'environnement).

Si des changements majeurs sont observés (à la suite d'un très important feu de végétation par exemple), une analyse de la durabilité des changements et de leurs conséquences sur la fréquence et la magnitude des événements torrentiels doit toutefois être menée. En cas de changement significatif durable, ce qui devrait toutefois être rarement le cas, une révision du PPRi peut être nécessaire.

#### 3.2.3.4.2. Les différents types de sous-scénarios associés aux ouvrages anthropiques

Les nombreux ouvrages anthropiques rencontrés sur les cours d'eau torrentiels, et notamment les dispositifs de protection passive et les ouvrages hydrauliques présents dans les zones d'écoulement, sont susceptibles d'influencer significativement les manifestations d'un scénario de référence et sont donc une source majeure de l'émergence de sous-scénarios. L'étude de l'aléa de référence du PPRi doit ainsi appréhender les trois types de sous-scénarios ci-dessous.

**1. Sous-scénario dans lequel les ouvrages de protection passive n'existent pas :** ce sous-scénario correspond à l'application de la doctrine nationale de qualification et de cartographie des aléas de référence des PPRi considérant que la pérennité des ouvrages et leur niveau de protection ne peuvent être garantis à long terme (défaut d'entretien, évolution des aléas dans le temps avec l'impact du changement climatique, etc.).

L'analyse de ce sous-scénario est classique et assez intuitive dans le cas des ouvrages de défense passive. Pour les systèmes d'endiguement ou les plages de dépôts, on considère par exemple leur effacement intégral (c'est à dire une configuration dans laquelle l'ouvrage n'existe pas).

**2. Sous-scénarios avec défaillance des ouvrages :** rupture d'ouvrages de protection, obstruction d'ouvrages de franchissement (pont, dalot...), déviation ou concentration de certains écoulements du fait de la présence d'infrastructures ou bâtiments, etc.

Les retours d'expérience montrent que les niveaux de protection ne sont pas garantis à long terme, et que tout ouvrage anthropique peut être défaillant. Cela peut par exemple se rencontrer en cas de dépassement « prématuré » de la capacité de l'ouvrage (notamment du fait de facteurs aggravants : embâcles par des flottants ou des gros blocs), ou en cas d'événement supérieur à celui pris en compte pour le dimensionnement de l'ouvrage (crue de projet). Il est par ailleurs impossible d'avoir des garanties du bon entretien de l'ouvrage et/ou du cours d'eau à long terme.

**3. Sous-scénario dans lequel les ouvrages existent et jouent leur rôle, sans défaillance :** ce sous-scénario permet de définir la ligne d'eau de référence et d'identifier les points de débordement en situation nominale. Dans certains cas, ce sous-scénario peut aussi être le plus pénalisant pour certaines zones non protégées.

En présence d'ouvrage anthropique clairement inadapté ou indubitablement sous-dimensionné pour le scénario de référence, ce sous-scénario peut être écarté (cas des buses de faible section par exemple).

**Les sous-scénarios à considérer selon les types d'ouvrages anthropiques sont précisés dans le tableau 4.** Il y est notamment rappelé que chaque système d'endiguement doit faire l'objet de sous-scénarios considérant des hypothèses de tenue de l'ouvrage, et de sous-scénarios considérant des hypothèses d'effacement et/ou de rupture.

### 3.2.3.5. Synthèse sur la prise en compte des ouvrages anthropiques

Le tableau suivant, adapté de Favier et al. (2019) qui reprenait les éléments tirés de Carlados (2013), synthétise les différents types d'ouvrages hydrauliques ou de défense passive contre les crues torrentielles et précise pour chacun d'entre eux :

- leurs fonctions et effets escomptés sur le processus de crue ;
- les modes de défaillance, de dépassements et leurs conséquences ;
- le principe général de prise en compte dans les PPRN ;
- les sous-scénarios à envisager pour l'élaboration de la carte d'aléa ;
- les sur-aléas induits à cartographier pour le PPRN.

**Un tableau équivalent est fourni à titre informatif en annexe 7.6 pour les ouvrages de protection active.** Ce tableau peut être utile à la caractérisation de la magnitude des événements mais rappelons que ces dispositifs ne sont pas de nature à faire émerger des sous-scénarios dédiés.

**Tableau 4 :** synthèse sur la prise en compte des ouvrages dans l'élaboration des PPRI de cours d'eau torrentiels.

Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Digues / systèmes d'endiguement		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● empêcher le débordement jusqu'au niveau de protection au sens des études de danger (EDD).</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● maintien des écoulements dans un espace donné ;</li> <li>● diminution de la probabilité de débordement ;</li> <li>● diminution des phénomènes de divagations, de la probabilité de changement de chenal d'écoulement.</li> </ul> <p><b>Effets négatifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● risque d'incision du lit ;</li> <li>● accélération des écoulements si le lit est trop étroit.</li> </ul>
			
			
			




Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><u>Par rupture (en gras les mécanismes prépondérants) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>affouillement du pied des ouvrages</b>, qui peut provoquer la déstabilisation et l'effondrement de l'ouvrage : lit trop étroit, coudes, contraction de l'écoulement contre la digue, etc. ;</li> <li>● <b>érosion externe</b> (attaques de berges) : liée aux divagations, aux cheminements aléatoires des écoulements, aux déviations par des obstacles naturels ou artificiels, flottants, etc. ;</li> <li>● <b>surverse</b> : zone de réduction de pente, zone de confluence, amont d'un fort rétrécissement, extrémité aval d'un endiguement, etc. ;</li> <li>● <b>érosion interne</b> : phénomène minoritaire, voire marginal en bordure de torrent, inexistant en présence de laves torrentielles.</li> </ul> <p><u>Par dépassement/débordement du fait :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● d'une insuffisance de la section ;</li> <li>● d'un engravement du lit ;</li> <li>● d'une obstruction partielle ou totale par des flottants ou des gros blocs.</li> </ul> <p><u>Probabilité de défaillance :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● rare, mais possible en deçà du niveau de protection (avec un risque résiduel associé à une probabilité de rupture inférieure à 5 %) ;</li> <li>● probable au-delà du niveau de sûreté<sup>14</sup> ;</li> <li>● quasi-certain au-delà du niveau de danger.</li> </ul>	<p><u>Règle générale :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Les secteurs protégés par des systèmes d'endiguement sont toujours considérés et affichés comme soumis à un aléa, correspondant aux sous-scénarios ci-contre.</li> </ul>	<p>Un sous-<u>scénario sans rupture</u>. Il permet notamment de mettre en évidence les zones vers lesquelles les écoulements sont renvoyés par l'ouvrage.</p> <p>+ un/des sous-<u>scénarios avec effacement*</u> (par berge et/ou sur toutes les berges) : dans ce sous-scénario, les ouvrages sont considérés comme transparents. Cela traduit par exemple les situations où l'ouvrage serait supprimé ou inefficace ;</p> <p>+ un/des sous-<u>scénarios de brèches*</u> : positionnés de manière à couvrir les différents secteurs situés derrière la digue. Des ruptures ne pouvant généralement pas être étudiées en détail en tout point du linéaire, un travail « d'interpolation » permet d'estimer l'intensité en cas de rupture dans les secteurs situés entre les brèches étudiées ;</p> <p>+ des sous-<u>scénarios de ruptures (et/ou d'effacement) en cascade</u> sur plusieurs rangs lorsque cette configuration existe.</p> <p><b>* En fonction des situations, il peut être considéré, dans un souci de simplification, que les sous-scénarios d'effacement (avec bande de précaution) remplacent ceux de rupture (ou inversement). Il est en effet souvent pertinent de ne pas cumuler ces deux types de scénarios.</b></p>	<p><b>En bordure de rivière torrentielle :</b> bande de précaution à l'arrière des ouvrages, identifiant les zones où <math>H \times V &gt; 2m^2/s</math> en cas de brèche. La largeur minimale de la bande de précaution est fixée au maximum des valeurs suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 20 fois la hauteur de mise en charge maximale de la digue (pouvant être supérieure à la charge pour l'évènement de référence) ;</li> <li>● 10 mètres.</li> </ul> <p><b>En bordure de torrent :</b> bande de précaution réduite, car la rupture de digues de torrent génère peu de sur-aléa. La largeur minimale de la bande de précaution est fixée au maximum des valeurs suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 5 x hauteur de mise en charge maximale de la digue (pouvant être supérieure à la charge pour l'évènement de référence) ;</li> <li>● valeur minimale de 10 m.</li> </ul> <p><b>Il est important de vérifier que cette largeur minimale est suffisante pour se prémunir de phénomènes d'érosion de berge plus importants liés notamment aux divagations des cours d'eau torrentiels.</b></p> <p>Dans des configurations particulières (lits perchés, digues de grande hauteur, etc.), la bande de précaution est plus large.</p>

<sup>14</sup> Le niveau de sûreté est un niveau compris entre le niveau de protection et le niveau de danger, et correspond à la situation au-delà de laquelle la probabilité de défaillance de l'ouvrage n'est plus négligeable (notion non réglementaire).


Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Chenaux d'écoulement, chenaux à biefs affouillables		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● canaliser/maintenir les écoulements dans un cheminement donné.</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● diminution de la probabilité de débordement en facilitant l'écoulement de la crue et en améliorant le transit des matériaux charriés ;</li> <li>● diminution de la probabilité de changement de chenal d'écoulement en le confinant dans un lit mineur.</li> </ul> <p><b>Effets négatifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● accélération des écoulements si le lit est trop étroit, risque d'incision du lit.</li> </ul>
			

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><u>Par rupture :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>incision du lit et/ou affouillement du pied des ouvrages</b>, qui peuvent provoquer la déstabilisation et l'effondrement de l'ouvrage : lit trop étroit, coudes, contraction de l'écoulement contre la digue, etc. ;</li> <li>● <b>érosion externe</b> (attaques de berges) : liées aux divagations, aux cheminements aléatoires des écoulements, aux déviations par des obstacles naturels ou artificiels, flottants, etc. En général, moindre risque d'érosion en présence de laves torrentielles ;</li> <li>● à la suite d'un débordement par-dessus le niveau de protection (pouvant provoquer une érosion et une déstabilisation par l'arrière).</li> </ul> <p><u>Par dépassement/ débordement du fait :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● d'une insuffisance de la section ;</li> <li>● et/ ou d'un engrèvement du lit ;</li> <li>● et/ou d'une obstruction partielle ou totale par des flottants, des gros blocs, etc.</li> </ul>	<p><u>Règle générale :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● si la capacité du chenal est supérieure au niveau maximal d'écoulement estimé pour le scénario de référence (en prenant en compte l'évolution probable du fond durant la crue et les réductions de section liées aux éventuelles obstructions par les flottants ou des blocs), il peut être considéré qu'il n'y a pas de débordement sur les berges.</li> </ul> <p>Dans le cas contraire, les conséquences des débordements seront étudiées et cartographiées.</p> <p>Si l'ouvrage n'est pas protégé contre l'érosion ou si la pérennité de la protection ne peut être garantie, l'aléa d'érosion sera cartographié (recul de berge).</p>	<p>Un sous-<u>scénario sans défaillance</u> + un <u>sous-scénario avec rupture</u> si l'ouvrage ne présente pas les garanties suffisantes de résistance contre les érosions, affouillements et surverses : les érosions potentielles doivent alors être cartographiées ; + <u>un sous-scénario en cascade</u> (obstruction -&gt; débordement -&gt; destruction des protections du chenal) si la configuration le justifie.</p>	<p>Lorsque la berge est érodable, identification d'une bande de précaution pour se prémunir d'une érosion de berge.</p> <p>La largeur minimale de la bande de précaution est fixée à 5 fois la hauteur de berge en l'absence de protection et 2 fois la hauteur de berge en présence d'une protection, avec une valeur minimale de 10 m.</p> <p>Il s'agit ici d'une valeur minimale, <b>il appartient au bureau d'études de définir l'emprise de la zone susceptible d'être érodée selon les différents scénarios et sous-scénarios envisagés, zone qui sera alors classée en aléa « très fort aggravé ».</b></p>





Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Protections de berge		<p><b><u>Fonctions :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● protéger une berge et/ou le pied de versant contre l'érosion.</li> </ul> <p><b><u>Effets positifs sur les crues :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● prévenir les érosions latérales ;</li> <li>● éviter les divagations hors d'une zone donnée.</li> </ul> <p><b><u>Effets négatifs sur les crues :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● accroissement potentiel des érosions en fond de lit (si non protégé), sur la rive opposée ou en aval immédiat.</li> </ul>

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRi	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRi	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><b>Par rupture :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>incision du lit et/ou affouillement du pied des ouvrages</b>, qui peuvent provoquer la déstabilisation et l'effondrement de l'ouvrage : lit trop étroit, coudes, contraction de l'écoulement contre la digue, etc. ;</li> <li>● <b>érosion externe</b> (attaques de berges) : liées aux divagations, aux cheminements aléatoires des écoulements, aux déviations par des obstacles naturels ou artificiels, flottants, etc. En général, moindre risque d'érosion en présence de laves torrentielles ;</li> <li>● à la suite d'un débordement par-dessus le niveau de protection (pouvant provoquer une érosion et une déstabilisation par l'arrière).</li> </ul> <p><b>Par dépassement :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● au-delà du niveau de protection (i.e. arase supérieure de la protection de berge).</li> </ul> <p><b>Probabilité de défaillance :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● dépend du niveau de résistance de la protection par rapport au niveau de sollicitations ;</li> <li>● très probable en cas d'érosion du pied et en l'absence de dispositif parafouille (sabot, poutre, radier, etc.) ;</li> <li>● probable en cas de dépassement (débordement sur la berge) ou de contournement.</li> </ul>	<p><b>Règle générale :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● quel que soit le dispositif de protection existant et le niveau de protection associé, les secteurs à l'arrière de protections de berges sont toujours affichés comme soumis à un aléa d'érosion (recul de berge), correspondant aux sous-scénarios ci-contre.</li> </ul>	<p>Un sous-<b>scénario sans défaillance</b> notamment pour évaluer l'impact de la protection de berge sur la rive opposée et sur les tronçons en aval. Ces ouvrages peuvent en effet orienter et/ou accélérer les écoulements sur les secteurs adjacents, par exemple en cas de lit étroit ou de parement lisse.</p> <p>Sur la berge opposée, en l'absence d'un diagnostic approfondi y garantissant une protection pour le scénario de référence du PPRi, il sera considéré une bande en aléa « très fort aggravé » d'une largeur égale à la valeur maximale entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 10 m ;</li> <li>● 2 x hauteur de berge ;</li> <li>● la largeur définie par l'analyse du chargé d'étude (qui peut être beaucoup plus importante dans certaines situations).</li> </ul> <p>+ un/des sous-scénario(s) considérant l'effacement des protections de berges et l'absence de protection associée. L'étude de ce sous-scénario consiste notamment à appréhender l'érosion susceptible de se produire à l'arrière de l'ouvrage. Cette érosion se traduit par une bande en aléa « très fort aggravé », d'une largeur égale à la valeur maximale entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 10 mètres ;</li> <li>● 1 x la hauteur de berge ;</li> <li>● la largeur définie par l'analyse du chargé d'étude.</li> </ul>	<p>Pas de sur-aléa par rapport aux sous-scénarios étudiés. (Il est considéré qu'une défaillance/rupture de protection de berge n'aggrave pas l'aléa par rapport à une situation en l'absence de la protection de berge).</p>

Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Plage de dépôts		<p><b><u>Fonctions :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● piéger et stocker temporairement tout ou partie des matériaux solides transportés (graviers, blocs, flottants, etc.).</li> </ul> <p><b><u>Effets positifs sur les crues :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● réduction du volume d'apport solide de l'évènement à l'aval de l'ouvrage (visant à limiter l'exhaussement du lit en aval).</li> </ul> <p><b><u>Effets négatifs sur les crues :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● arrêt excessif du transport solide incision du lit en aval ;</li> <li>● pas d'influence sur le débit liquide, la plage de dépôts n'ayant pas vocation à stocker de l'eau.</li> </ul>




Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● érosion ou surverse sur les digues latérales ;</li> <li>● impact sur l'ouvrage de sortie ;</li> <li>● affouillement de la fondation de l'ouvrage de sortie.</li> </ul> <p><b><u>Par dépassement :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● au-delà de la capacité de stockage (volume de matériaux de la crue supérieur à la capacité de stockage, défaut de curage, etc.) ;</li> <li>● gabarit insuffisant de la cuvette déversoir ;</li> <li>● pentes de digues latérales trop faibles.</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● très rare (dommages observés : destruction de grilles ou de barres, quelques cas connus de surverse sur les digues latérales ou sur les ailes du barrage de fermeture).</li> </ul>	<p><b><u>Règle générale :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● les secteurs protégés par une plage de dépôts sont toujours affichés comme soumis à un aléa, correspondant aux sous-scénarios de défaillance ci-contre.</li> </ul>	<p><b><u>Un sous-scénario sans défaillance de l'ouvrage</u></b> + <b><u>un sous-scénario avec effacement de l'ouvrage</u></b> (absence de l'ouvrage). Les sous-scénarios avec dépassement de capacité sont écartés car ils correspondent à une version minorée du scénario avec absence d'ouvrage.</p>	<p>Le « sur-aléa » est limité à l'aval immédiat de l'ouvrage (l'aléa résultant est globalement plus faible qu'en l'absence de plage de dépôts).</p> <p>En cas de rupture, tout le volume de matériaux stockés ne sera pas forcément repris. Le volume d'eau stocké reste faible. Pour prendre en compte le risque de rupture, il est toutefois identifié une bande de précaution à l'aval de l'ouvrage dont la largeur minimale est fixée à 2 x hauteur de la digue de fermeture (mesurée à l'aval) avec une largeur minimale de 20 m.</p>




Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Piège à blocs		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● arrêter les gros blocs des fronts granulaires des laves torrentielles.</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● piégeage des gros blocs ;</li> <li>● déstructuration des fronts granulaires ;</li> <li>● limitation de la hauteur du front et de l'impact défavorable des gros blocs en aval.</li> </ul>
	Piège à flottants		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● arrêter les flottants.</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● limitation de l'impact défavorable des flottants en aval (érosion de berges, réduction capacité d'écoulement, obstruction des ponts, etc.).</li> </ul> <p><b>Effets négatifs sur les crues :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● arrêt incontrôlé de matériaux sédimentaires.</li> </ul>

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● impact dynamique sur l'ouvrage de sortie ;</li> <li>● affouillement de la fondation de l'ouvrage de sortie.</li> </ul> <p><b><u>Par dépassement :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● au-delà de la capacité de stockage ;</li> <li>● seuls les gros blocs de la première bouffée sont souvent arrêtés ;</li> <li>● gabarit insuffisant de la cuvette déversoir.</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● très rare si l'ouvrage est correctement conçu.</li> </ul>	<p><b><u>Règle générale :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● les secteurs protégés par un piège à blocs sont toujours affichés comme soumis à un aléa, correspondant aux sous-scénarios de défaillance ci-contre.</li> </ul>	<p><b><u>Un sous-scénario sans défaillance de l'ouvrage</u></b> + <b><u>un sous-scénario avec effacement de l'ouvrage</u></b> (absence de l'ouvrage). Les sous-scénarios avec dépassement de capacité sont écartés car ils correspondent à une version minorée du scénario avec absence d'ouvrage.</p>	<p>Pour prendre en compte le risque de rupture, il est identifié une bande de précaution à l'aval de l'ouvrage dont la largeur minimale est fixée à 2 fois la hauteur de l'ouvrage (mesurée à l'aval), avec une largeur minimale de 20 m.</p>
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● impact dynamique sur l'ouvrage de sortie ;</li> <li>● affouillement de la fondation de l'ouvrage de sortie.</li> </ul> <p><b><u>Par dépassement :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● au-delà de la capacité de stockage ;</li> <li>● hauteur insuffisante des pieux (relargage des flottants piégés, voir les critères fournis par Quiniou et Piton, 2022) ;</li> <li>● contournement de l'ouvrage en cas d'absence de protection de berge au droit de l'ouvrage.</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● très rare si l'ouvrage est correctement conçu.</li> </ul>	<p><b><u>Règle générale :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● les secteurs protégés par un piège à flottants sont toujours affichés comme soumis à un aléa, correspondant aux sous-scénarios de défaillance ci-contre.</li> </ul>	<p>Un sous-scénario en tenant compte de l'ouvrage sans défaillance + un sous-scénario avec effacement de l'ouvrage (absence de l'ouvrage). + un (ou plusieurs) sous-scénarios de défaillance de l'ouvrage, par exemple de relargage en cas de surverse probable ou de contournement de l'ouvrage si les berges ne sont suffisamment protégées.</p>	<p>Sur-aléa potentiel : relargage soudain des flottants piégés en cas de surverse significative ou de contournement de l'ouvrage par érosion de berge.</p>



Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection passive	Zone de régulation du transport solide		<p><b><u>Fonctions :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● réguler le transport solide en façonnant les lits larges.</li> </ul> <p><b><u>Effets positifs sur les crues :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● diminution de la valeur du pic de débit solide ;</li> <li>● en général pas ou peu d'opérations de curage pratiquées sur les zones de régulation à l'inverse des plages de dépôt.</li> </ul>

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● érosions externes (attaques de berges) : liées aux divagations, aux cheminements aléatoires des écoulements, ... En général, moindre risque d'érosion en présence de laves torrentielles ;</li> <li>● incision du lit et/ou affouillement du pied des ouvrages, qui peuvent provoquer la déstabilisation et l'effondrement de l'ouvrage (risque plus réduit que pour un chenal plus étroit).</li> </ul> <p><b><u>Par dépassement :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● d'une insuffisance de la section ;</li> <li>● et/ ou d'un engravement du lit ;</li> <li>● et/ou d'une obstruction partielle ou totale par des flottants, des gros blocs, etc.</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● très faible, bien moindre que pour un chenal étroit.</li> </ul>	<p>Si la capacité du chenal est supérieure au niveau maximal d'écoulement estimé pour le scénario de référence (en prenant en compte l'évolution probable du fond durant la crue et les réductions de section liées aux éventuels flottants), l'ouvrage peut être pris en compte (pas de débordement sur les berges).</p> <p>Dans le cas contraire, les conséquences des débordements seront cartographiées.</p> <p>Si l'ouvrage n'est pas protégé contre l'érosion ou si la pérennité de la protection ne peut être garantie, l'intensité d'érosion sera cartographiée (recul de berge).</p>	<p>Un sous-<b><u>scénario sans défaillance</u></b> + un sous-<b><u>scénario avec rupture</u></b> si l'ouvrage ne présente pas les garanties de résistance + un <b><u>sous-scénario de destruction des protections de berges</u></b> (les érosions potentielles doivent alors être cartographiées) en cas de présence de protection de berges + un <b><u>sous-scénario en cascade</u></b> (obstruction -&gt; débordement -&gt; destruction des protections du chenal) si la configuration le justifie.</p>	<p>Pas de sur-aléa.</p> <p>À signaler tout de même que la confection de zones larges peut favoriser les divagations qui peuvent provoquer des érosions de berges.</p> <p>D'où le maintien d'une bande de précaution pour se prémunir d'une érosion de berge.</p> <p>La largeur minimale de la bande de précaution est fixée à 2 x hauteur de berge avec une valeur minimale de 10 m.</p>

Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Autres ouvrages	Ouvrages de franchissement (ponts, passerelles, etc.)		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● assurer le passage des écoulements en crue sans débordement (sans accrochage de la sous-poutre).</li> </ul> <p><b>Effets négatifs potentiels :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● il ne s'agit pas d'un ouvrage de protection ; en revanche il peut avoir un impact sur la crue et sur les zones inondées, engravées ou érodées en cas d'obstruction partielle ou totale.</li> </ul>
		 	



Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa » identifié en aléa de niveau « très fort aggravé »
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● obstruction de ponts par des flottants ;</li> <li>● effondrement de pont par affouillement des fondations ;</li> <li>● pont détruit à la suite d'une surverse, d'un contournement, de l'impact d'une lave ;</li> <li>● tablier emporté par une lave torrentielle.</li> </ul> <p><b><u>Par dépassement/ débordement du fait :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● d'une insuffisance de la section ;</li> <li>● et/ ou d'un engravement du lit ;</li> <li>● et/ou d'une obstruction partielle ou totale par des flottants, des gros blocs...</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● plus ou moins forte selon le gabarit de la buse ou du pont (portée, tirant d'air) et surtout la présence de flottants de grande taille qui peuvent s'amonceler devant le pont.</li> </ul>	<p>Les ouvrages de franchissement constituent en général des points critiques. Il convient d'analyser la probabilité d'obstruction de chaque ouvrage, à évaluer notamment en fonction de leur portée par rapport à la taille potentielle des flottants (défini en caractère secondaire du scénario de référence), de leur position sur le profil en long (les zones de dépression notamment sont défavorables du fait des risques de comblement du lit), de la présence de piles centrales, de seuil de mise en vitesse, de convergent progressif ...</p> <p>Les ouvrages de faible gabarit ou implanté dans des zones de dépôts préférentiels seront généralement considérés comme défaillants pour tous les scénarios.</p>	<p>Pour tous les ouvrages pour lesquels un scénario d'obstruction ne peut pas être écarté mais n'est pas certain :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- prise en compte d'un <b><u>sous-scénario d'obstruction</u></b> (en général totale),</li> <li>+ prise en compte d'un <b><u>sous-scénario de non obstruction</u></b>.</li> </ul> <p>En cas de modélisation hydraulique, le sous-scénario d'obstruction pourra être analysé en simulant cette obstruction dans le modèle utilisé.</p>	<p>En cas d'obstruction, sur-aléa potentiel en amont, et de part et d'autre de l'ouvrage (débordement, divagations, avulsions, érosion de berge...)</p> <p>En l'absence d'obstruction, sur-aléa potentiel d'érosion en aval de l'ouvrage (accélération des écoulements, dépôt de matériaux favorisant les divagations, érosions de berge...).</p>

### 3.2.4. La détermination des niveaux d'aléas

Les niveaux d'aléas (« faible », « moyen », « fort », « très fort » et « très fort aggravé ») traduisent une information synthétique relative aux manifestations locales de l'évènement étudié. Leur caractérisation est une étape indispensable du processus d'élaboration du PPRi et est une des données majeures d'entrée pour l'élaboration du zonage réglementaire.

Dans l'état des connaissances scientifiques actuelles, la détermination précise des conditions d'écoulement est souvent très complexe au regard du caractère chaotique de certains phénomènes (cheminement aléatoire, respirations, divagations, érosions des terrains parcourus, effets des flottants, etc.). Cette variabilité spécifique aux crues des cours d'eau torrentiels ne peut pas être traduite de manière simple uniquement à partir de variables quantifiées du type hauteur d'eau ou dynamique d'écoulement. Dans ces conditions, une approche adaptée pour qualifier l'aléa sur un secteur consiste à prendre en compte les effets dommageables sur les personnes et les biens en cas d'atteinte d'une part, et la probabilité d'atteinte de ce secteur d'autre part. Dans le cas des **cours d'eau torrentiels**, le principe général de qualification des niveaux d'aléas d'un (sous-)scénario repose ainsi sur un croisement entre :

- une **intensité**, qui traduit les effets et dommages prévisibles sur des enjeux en cas d'atteinte ;
- et une **probabilité d'atteinte**, qui traduit la prédisposition d'un site à être affecté par les débordements et les conséquences associées.

Chaque scénario de référence fait l'objet d'une caractérisation des niveaux d'aléas.

**L'aléa de référence du PPRN est ensuite construit en retenant, par secteur exposé, le niveau d'aléa le plus élevé parmi les niveaux identifiés par chaque scénario de référence.**

Plusieurs démarches permettent de déterminer les niveaux d'aléas d'un scénario de référence :

[1] dans le cas général, la démarche consiste à croiser une carte « globale » d'intensité au niveau du scénario avec une carte « globale » de probabilité d'atteinte au niveau du scénario ;

[2] dans un certain nombre de configurations, notamment dans le cas où le nombre de sous-scénarios est très limité, il est possible de cartographier les aléas au niveau de chaque sous-scénario dans un premier temps, puis à regrouper les cartographies d'aléa au niveau du scénario dans un second temps.

Le choix de la méthodologie est à valider par le service de l'État chargé de l'élaboration du PPRi, sur proposition du bureau d'études.

Ce guide détaille l'approche [1], qui repose sur quelques hypothèses simplificatrices, mais qui présente l'avantage d'être globalement plus pragmatique.

#### 3.2.4.1. L'intensité

##### 3.2.4.1.1. Les paramètres de qualification de l'intensité

Dans le cas des PPRN d'inondations de plaine, l'intensité du phénomène est évaluée au moyen des caractéristiques physiques de l'écoulement liées à la submersion des terrains (hauteur d'eau et dynamique, traduite par la vitesse d'écoulement et la vitesse de montée des eaux). Cette approche est trop restrictive en contexte torrentiel en raison de la multiplicité des processus d'endommagement.

D'autres critères de qualification de l'intensité de l'aléa doivent ainsi être considérés pour prendre en compte toutes les spécificités des écoulements torrentiels. L'analyse des effets sur des enjeux potentiels fait ainsi émerger les paramètres prépondérants pour estimer les conséquences potentielles des débordements et, *in fine*, les niveaux d'intensité :

- **les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement ;**

L'intégration des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement dans la définition des niveaux d'intensité permet de prendre en compte les effets dynamiques des écoulements décrits précédemment dans le guide.

Même si différentes méthodes peuvent être exploitées, la détermination de valeurs quantitatives est un exercice délicat, particulièrement lorsque l'écoulement a lieu en dehors du lit ordinaire du cours d'eau. En particulier, l'absence de prise en compte du transport solide dans la plupart des modèles numériques rend leur pertinence limitée en contexte torrentiel.

Par ailleurs, le développement des outils numériques de modélisation, associé à la mise à disposition de MNT de bonne qualité, ne doit pas conduire à la seule prise en compte de hauteurs et vitesses issues de résultats de modélisation pour qualifier l'intensité. Ces résultats doivent systématiquement faire l'objet d'une expertise complémentaire sur la base des éléments détaillés ci-dessous.

■ la **hauteur de l'engravement** qui peut affecter les terrains exposés et la **profondeur des affouillements** possibles localement ;

**L'analyse et la prise en compte des phénomènes morphologiques est indispensable pour déterminer l'intensité sur un secteur.** L'expérience montre que la hauteur de l'engravement qui peut affecter les terrains exposés ou la profondeur des affouillements susceptibles de se produire localement sont des paramètres directement représentatifs des dommages provoqués par un évènement en contexte torrentiel.

Les affouillements liés à des érosions de berge (avec ou sans protections) doivent faire l'objet d'une attention particulière. Ils peuvent notamment être appréhendés au regard de l'analyse des évènements historiques, de l'étude de la stabilité géotechnique des berges et de la présence d'indices d'instabilité.

**La taille des plus gros blocs transportés** et des **bois flottants** sont des éléments d'appréciation à prendre en compte car ils renseignent sur l'effort d'impact potentiel de l'écoulement.

#### 3.2.4.1.2. L'évaluation des niveaux d'intensité

Les niveaux d'intensité sont décrits sous la forme de classes d'intensité « faible », « modérée », « forte », « très forte » et « très forte aggravée ».

Chacun des paramètres précédents permet d'estimer un niveau d'intensité selon les modalités du tableau 5 page suivante<sup>15</sup>. Puisque plusieurs critères existent, plusieurs niveaux d'intensité peuvent être assignés à un point donné. **Le niveau d'intensité retenu pour qualifier le niveau d'aléa est le niveau d'intensité maximum des niveaux d'intensité évalués selon les différents critères.** Ainsi pour définir un niveau d'intensité très forte, il suffit d'identifier un seul paramètre vérifiant une intensité très forte. Par contre, pour déterminer un niveau d'intensité plus faible, il faut vérifier que l'ensemble des paramètres d'intensité soit du niveau assigné à la zone, ou moindre.

Certains paramètres pourront ne pas être disponibles, ou ne pas être suffisamment précis (voir les développements ci-après relatifs aux estimations de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement). Il conviendra dans ce cas d'exploiter au mieux les informations disponibles, notamment historiques et géomorphologiques, et de vérifier la cohérence globale de l'analyse.


---




<sup>15</sup> Les images tirées de cas réels ont un caractère réducteur qui nécessite un certain discernement dans leur interprétation.



**Tableau 5 : niveaux d'intensité en fonction des différents paramètres.**

Paramètres	Niveaux d'intensité					
Hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement	$h > 2 \text{ m}$	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
	$1 \text{ m} < h < 2 \text{ m}$	Fort	Fort	Fort	Très fort	Très fort
	$0,5 \text{ m} < h < 1 \text{ m}$	Modéré	Modéré	Fort	Fort	Très fort
	$0,2 \text{ m} < h < 0,5 \text{ m}$	Faible	Modéré	Fort	Fort	Fort
	$0 \text{ m} < h < 0,2 \text{ m}$	Faible	Faible	Modéré	Modéré	Fort
	Hauteur d'eau / Vitesse d'écoulement	$v < 0.2 \text{ m/s}$	$0.2 \text{ m/s} < v < 0.5 \text{ m/s}$	$0,5 \text{ m/s} < v < 1 \text{ m/s}$	$1 \text{ m/s} < v < 3 \text{ m/s}$	$3 \text{ m/s} < v$

	Très fort aggravé	Très fort	Fort	Modéré	Faible
<b>Hauteur d'engravement</b> 	La hauteur d'engravement dépasse 2 m.	La hauteur d'engravement est comprise entre 1 et 2 m.	La hauteur d'engravement est comprise entre 0,5 et 1 m.	La hauteur d'engravement est inférieure à 0,5 m.	La hauteur d'engravement est marginale.
<b>Profondeur des affouillements verticaux</b> 	Les affouillements verticaux ont une profondeur supérieure à 2 m.	Les affouillements verticaux ont une profondeur entre 1 et 2 m.	Les affouillements verticaux ont une profondeur entre 0,5 et 1 m.	Les affouillements verticaux ont une profondeur inférieure à 0,5 m.	Les affouillements verticaux ont une profondeur négligeable.
<b>Taille des plus gros sédiments transportés</b> 	La taille des plus gros blocs transportés excède 1 m.	La taille des plus gros sédiments transportés est entre 0.5 et 1 m, quelques éléments plus grossiers peuvent être ponctuellement présents.	La taille des plus gros sédiments transportés est entre 10 et 50 cm, quelques éléments plus grossiers peuvent être ponctuellement présents.	La taille des plus gros sédiments transportés est inférieure à 10 cm, quelques éléments plus grossiers peuvent être ponctuellement présents.	Les sédiments transportés sont de taille centimétrique ou inférieure, quelques éléments plus grossiers peuvent être ponctuellement présents.
<b>Nombre et taille de flottants</b> 	De nombreux flottants de très grande taille et de gros diamètres (> 50 cm) sont susceptibles d'atteindre la zone.	De nombreux flottants de grande taille (arbres) sont susceptibles d'atteindre la zone.	Peu de flottants de grande taille sont susceptibles d'atteindre la zone.	Les flottants susceptibles d'atteindre la zone sont de petite taille uniquement.	Les flottants susceptibles d'atteindre la zone sont de petite taille uniquement.

	Très fort aggravé	Très fort	Fort	Modéré	Faible
Atteinte par des laves torrentielles	Le secteur à forte pente est situé dans l'axe potentiel des laves torrentielles si elles venaient à sortir de leur lit. Il serait alors atteint par des écoulements de laves en pleine puissance et/ou des laves pouvant contenir des blocs de plus de 1 m de diamètre.	Le secteur est en zone de transit de laves torrentielles ou en zone de dépôts épais 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.		
					

### Point de vigilance vis-à-vis des modélisations numériques 2D

En sortant de leur lit, les écoulements torrentiels peuvent modifier fortement la topographie des terrains submergés. En déposant leur charge sédimentaire, les eaux redeviennent agressives et creusent de nouveaux lits. Les outils de modélisation numérique 2D à géométrie fixe, conçus pour le fluvial, ne sont ainsi pas adaptés pour les cônes de déjection ou pour le lit majeur de certaines rivières torrentielles à fortes pentes. Ils pourraient modéliser un étalement à forte vitesse sur une faible hauteur et une grande surface, alors que les écoulements tendent plutôt à se concentrer en un ou plusieurs bras fortement mobiles ravinant les terrains alentours. Si de tels modèles sont utilisés, un premier contrôle de pertinence consiste à vérifier que la gamme de vitesses obtenue est compatible avec l'hypothèse de non-érosion des terrains sur lesquels ils s'écoulent. En première approximation, elles ne devraient pas dépasser 2 à 3 m/s (à adapter selon la nature du terrain), ce qui est rarement le cas avec de fortes pentes. Leur utilisation devrait être exclue sur les cônes de déjection et en bordure de rivières torrentielles dès lors que les pentes dépassent 1,5-2 %. Dans ces conditions, les résultats de modélisations ne sont éventuellement représentatifs que des cheminements des tout premiers débordements (ce qui peut déjà être utile).

Certains modèles numériques 2D couplent la résolution des équations de Saint-Venant et celles d'Exner pour modifier la géométrie du terrain durant la crue en fonction du transport solide. Bien que prometteurs, des validations probantes manquent encore dans des contextes de fortes pentes où le caractère chaotique et aléatoire des divagations s'oppose parfois aux évolutions systématiques simulées par les modèles bidimensionnels. Leur utilisation devrait pour l'heure être réservée à des cas à forts enjeux, avec un calage rigoureux, des études de sensibilité suffisantes, et autant que possible un contrôle sur des données n'ayant pas servi au calage.

Que les modèles numériques incluent ou non le transport solide, il est systématiquement nécessaire d'opérer une interprétation experte des résultats permettant d'intégrer la variabilité réelle des processus modélisés (interprétation aidée par des tests de sensibilité) et les effets des phénomènes non modélisés (érosions additionnelles associées aux chutes d'arbres et instabilités géomécaniques, effets des véhicules, etc.).

**La fourniture de résultats de modélisation numérique bruts en guise de carte d'intensité n'est ainsi jamais recevable : la modélisation doit être systématiquement croisée avec une approche experte basée sur l'ensemble des paramètres décrits au tableau 5.**

À ce jour, les connaissances relatives aux crues des cours d'eau torrentiels sont encore fragmentaires et les incertitudes souvent importantes. La compréhension des phénomènes repose largement sur des approches expertes se basant sur les analyses historiques (ampleur et conséquences des crues historiques connues) et hydro-géomorphologiques (analyse du profil en long, analyse diachronique, analyse des MNT, traces d'événements passés, identification des situations propices à des débordements, etc.), les indispensables reconnaissances de terrain et les retours d'expérience (observations d'écoulement en crue et des dégâts post-crues). Les éléments d'appréciation qualitative estimés avec ces approches complètent ainsi les valeurs quantitatives obtenues par modélisation.

Pour chaque site, un optimum entre d'une part les moyens d'étude mis en œuvre, et d'autre part l'importance des aléas, des enjeux ou des incertitudes, est à rechercher. L'association des approches historique et hydro-géomorphologique, avec des éléments simplifiés d'hydrologie et d'hydraulique, peut suffire pour qualifier l'intensité des aléas torrentiels dans certains cas, tandis que des modélisations poussées pourront être justifiées dans d'autres configurations.

### 3.2.4.1.3. Les niveaux d'intensité en termes de dommages potentiels

Comme indiqué précédemment, les niveaux d'intensité traduisent le « potentiel de dommages » de l'évènement sur des enjeux-types. Ces niveaux d'intensité ont été affinés par rapport aux classes considérées dans le guide « Construire en Montagne » (Givry et Peteuil, 2011). La limite entre les classes d'intensité faible et moyenne est principalement définie par la dangerosité des phénomènes pour les piétons à l'extérieur. Au contraire, les classes d'intensité supérieures sont principalement définies au regard des dommages prévisibles aux bâtis (la plupart des décès associés aux crues des cours d'eau torrentiels touchant des personnes réfugiées dans les habitations).

**Tableau 6 : correspondance entre niveau d'intensité et dommages prévisibles sur les enjeux.**

Enjeux	Effets prévisibles sur les enjeux				
	Très forte aggravée	Très forte	Forte	Modérée	Faible
Personnes	Probabilité de décès quasi-certaine.	Probabilité de décès quasi-certaine.	Déplacements dans les écoulements quasi-impossibles pour les piétons, probabilité de décès importante.	La capacité de déplacement des « adultes sportifs » est réduite. Pour les autres piétons, la probabilité de se faire emporter par les écoulements est élevée.	La mobilité de la plupart des personnes est possible. Des personnes vulnérables peuvent toutefois se retrouver en difficulté.
Véhicules	Mobilité impossible de tout type de véhicules dans l'écoulement.	Mobilité impossible de tout type de véhicules dans l'écoulement.	Mobilité très difficile de véhicules dans l'écoulement, même pour les véhicules lourds d'intervention et engins de terrassement.	Mobilité possible, mais difficile, de véhicules lourds ou tout-terrains ou d'engins de terrassement. Les voitures « normales » sont instables et potentiellement emportées.	La mobilité des véhicules est difficile. Il est fortement déconseillé de se déplacer en voiture.



Enjeux	Effets prévisibles sur les enjeux				
Intensité	Très forte aggravée	Très forte	Forte	Modérée	Faible
<b>Bâtiments</b>	La quasi-totalité des bâtiments sont détruits.	<p>Les dégâts sont majeurs et structurels sur un bâtiment « renforcé » vis-à-vis des aléas torrentiels, les bâtiments « standard » sont détruits.</p> <p>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.</p>	<p>Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent endommager gravement des façades et les structures non renforcées mais sont insuffisantes pour endommager des façades renforcées.</p> <p>Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions fondées à au moins 1 m de profondeur.</p>	<p>Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont modérées et n'endommagent pas les façades ni les structures, même non renforcées. Des dégâts limités peuvent apparaître sur les bâtis les plus fragiles.</p> <p>Les affouillements prévisibles sont faibles et ne menacent pas les fondations des bâtiments normaux.</p> <p>L'activité ou les usages peuvent être perturbés (eaux pénétrant dans les bâtiments, jardins endommagés, etc.).</p>	<p>Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont faibles et n'endommagent pas les façades ni, en général, les ouvertures.</p> <p>Les affouillements prévisibles sont négligeables.</p> <p>L'activité ou les usages peuvent être perturbés (eaux pénétrant dans les bâtiments, jardins endommagés, etc.).</p>
<b>Infrastructures et ouvrages</b>	Destruction des infrastructures et ouvrages de tous types.	<p>Les routes, infrastructures, ouvrages et équipements (pylônes, captages, etc.) faisant obstacle aux divagations sont détruits ou ensevelis par des dépôts. Les ponts sont engravés, submergés ou emportés, de longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.</p>	<p>Les dégâts aux routes, infrastructures, ouvrages et équipements (pylônes, captages, etc.) restent modérés ou ponctuels et leur remise en service peut être rapide.</p>	<p>Les routes, infrastructures, ouvrages et équipements (pylônes, captages, etc.) peuvent être submergés mais sans endommagement structurel hors ravinements légers sur les chaussées non protégées et avec possibilité de remise en service rapide.</p>	<p>Les routes, infrastructures, ouvrages et équipements (pylônes, captages, etc.) peuvent être submergés mais sans endommagement structurel et avec possibilité de remise en service rapide.</p>
<b>Espaces naturels et agricoles</b>	Les phénomènes d'engravement ou d'érosion dus aux divagations du lit du torrent sont de grande ampleur et conduisent à des remaniements des terrains exposés sur plusieurs mètres d'épaisseur.	Les phénomènes d'engravement ou d'érosion dus aux divagations du lit du torrent sont de grande ampleur et conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.	Les phénomènes d'engravement ou d'érosion des espaces naturels et agricoles restent d'ampleur limitée (moins de 1 m soit en exhaussement soit en affouillement).	<p>Les écoulements prévisibles sont de faible hauteur. Les dépôts peuvent être boueux mais sans matériaux de plus de 10 cm.</p> <p>Les affouillements prévisibles sont faibles.</p>	<p>Les espaces naturels et agricoles peuvent être recouverts de dépôts boueux, mais sans matériaux de plus de 10 cm.</p> <p>Les affouillements prévisibles sont marginaux.</p>

### 3.2.4.2. La probabilité d'atteinte

#### 3.2.4.2.1. Pourquoi prendre en compte une probabilité d'atteinte ?

L'une des caractéristiques des crues des cours d'eau torrentiels est le caractère partiellement aléatoire de la répartition spatiale des écoulements à l'intérieur de la zone potentiellement exposée (cf. exemple de l'illustration 31). Les modalités de submersion aux cours d'événements similaires (par les débits, les durées, etc.), peuvent être, sur certains secteurs, très différentes d'un événement à un autre. Il est ainsi fréquent que, lors d'une crue, seule une partie de la zone exposée soit submergée, et que sans changement notable de l'occupation des sols, une autre partie de cette zone soit touchée par une autre crue de même type. Les éléments entraînés par un cours d'eau torrentiel (sédiments, flottants, débris, véhicules, etc.) ou les obstacles (ponts, ouvrages ou bâtiments résistants, etc.) ainsi que les dommages structuraux aux ouvrages (brèches, ruptures) peuvent modifier les écoulements et l'emprise de la zone de divagation de manière peu prévisible. La topographie convexe des cônes de déjection amplifie ce comportement : les écoulements ayant quitté le chenal ne sont pas naturellement redirigés vers ce dernier.

**La notion de probabilité d'atteinte caractérise la plus ou moins grande prédisposition d'une zone à être affectée par les débordements du scénario de référence.** Il est ainsi reconnu qu'à probabilité d'occurrence donnée d'un événement (celle du scénario de référence), toutes les zones exposées ne sont pas toujours atteintes. La caractérisation des niveaux d'aléas intègre cette notion en faisant une distinction, à niveau d'intensité équivalent, entre les secteurs très exposés et submergés quasiment à chaque débordement et ceux bénéficiant d'une situation plus favorable et plus rarement atteints.

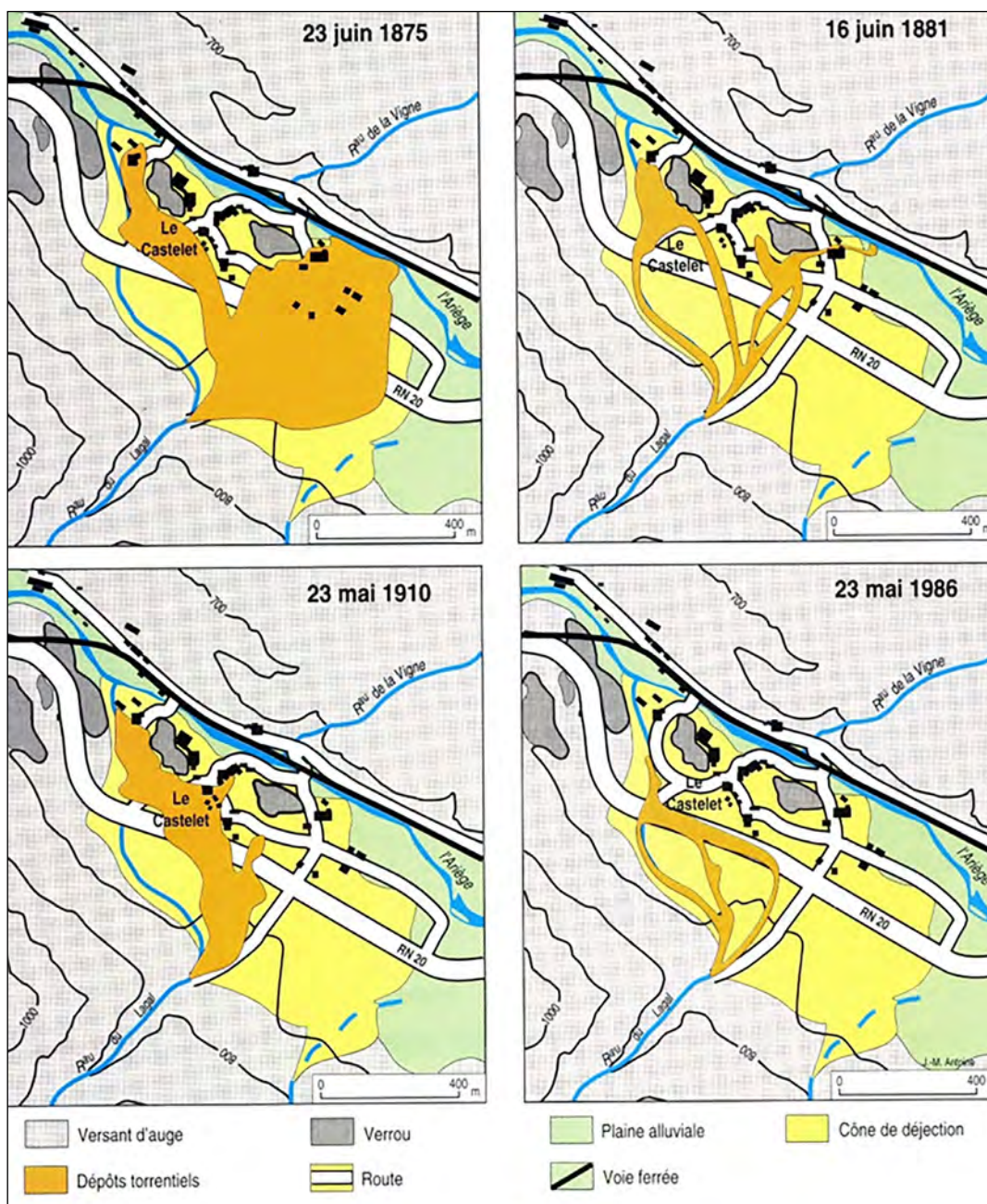


Illustration 31 : emprises des débordements historiques d'un « ruisseau » du Galag à Perles-et-Castelet – Ariège (09).

### 3.2.4.2.2. Les différents niveaux de probabilité d'atteinte

De façon analogue aux intensités, des classes de probabilité d'atteinte sont proposées. Le Tableau 7 détaille la signification des différents niveaux retenus dans ce guide. Dans la quasi-totalité des cas, il ne sera possible que d'utiliser la description littérale. La valeur numérique proposée est une convention, fournie à titre indicatif, pour l'évaluation subjective de cette probabilité d'atteinte, à la manière de la démarche mise en œuvre par le GIEC (Mastrandrea et al. 2011)<sup>16</sup>.

Probabilité d'atteinte (convention pour les PPRi de cours d'eau torrentiels)		
Qualification de la probabilité d'atteinte	Description littérale	Probabilité d'atteinte (en %)
<b>Forte</b>	La zone est régulièrement atteinte lorsque survient le scénario de référence.	Supérieure à 50 %
<b>Modérée</b>	La submersion de la zone est possible en cas de survenue du scénario de référence, mais est loin d'être systématique.	10 – 50 %
<b>Faible</b>	La submersion de la zone est rare et correspond à au moins l'un des sous-scénarios du scénario de référence avec concomitance de plusieurs facteurs aggravants.	5 – 10 %
<b>Très faible</b>	La zone n'est pas atteinte dans les sous-scénarios du scénario de référence, mais les incertitudes liées à la nature et à la propagation des phénomènes ne permettent pas de conclure que la probabilité d'atteinte est nulle ; par exemple, la zone est située dans l'emprise géomorphologique du cône de déjection ou du lit majeur de la rivière.	1 – 5 %
<b>Quasiment nulle</b>	La zone est située en dehors de l'emprise géomorphologique du cône de déjection ou du fond de vallée alluviale, ou est dans une situation topographique qui la met à l'abri des phénomènes, même de très faible probabilité d'occurrence.	0 – 1 %

**Tableau 7 :** probabilité d'atteinte – description sous forme littérale des différentes classes de probabilité qualitative et valeurs semi-quantitatives indicatives associées.

### 3.2.4.2.3. L'évaluation des probabilités d'atteinte pour un scénario de référence

L'approche qualitative<sup>17</sup> proposée ici (croisement d'une probabilité d'atteinte globale et d'une carte d'intensité globale au niveau du scénario de référence) peut être mise en œuvre dans de nombreuses configurations. Elle fonctionne avec assez peu de données et est robuste, dans le sens où elle est sécuritaire.

Dans certains cas toutefois, notamment lorsque les intensités peuvent être quantifiées, une démarche différente peut être retenue sur proposition du bureau d'études et sous réserve d'une validation par les services de l'État<sup>18</sup>.

Pour un scénario de référence, la probabilité qu'une zone du lit majeur soit atteinte dépend de sa **situation** par rapport aux axes de propagation des écoulements et aux points de débordement potentiels d'une part, et de la **probabilité de survenue des débordements** associés d'autre part.

Sur cette base, la méthode proposée par le présent guide pour estimer les probabilités d'atteinte pour un scénario de référence, repose sur les trois étapes suivantes (voir illustrations dans la partie synthèse) :

- **étape A :** estimation des probabilités de survenue de chaque sous-scénario ;
- **étape B :** réalisation d'une première cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario de référence, en affectant en chaque point la probabilité d'atteinte correspondant à la somme des probabilités de survenue des sous-scénarios affectant ce point ;

<sup>16</sup> D'autres conventions, par exemple celle de Vick (1997), comprenant parfois plus de formes littérales, existent. Elles peuvent également être utiles à la réflexion, sous réserve de bien spécifier la convention utilisée.

<sup>17</sup> Dans la plupart des cas, il n'est pas possible d'estimer quantitativement l'aléa, car il n'est pas possible de quantifier les intensités, ni d'étudier l'ensemble des sous-scénarios plausibles.

<sup>18</sup> Dans ce cas, une vigilance particulière sera apportée aux règles d'agrégation des informations pour la construction du scénario de référence, notamment pour ce qui concerne la prise en compte de la probabilité de survenue des sous-scénarios.



■ **étape C** : ajustements experts des probabilités d'atteinte, en fonction notamment des axes naturels d'écoulement et des secteurs plus rarement atteints. Concrètement, il s'agit de diminuer la probabilité d'atteinte des secteurs affectés uniquement en cas de divagations amples, d'embâcles nombreux ou de facteurs aggravants rares.

Une carte unique de probabilité d'atteinte est ainsi préparée pour chaque scénario de référence.

Le détail de la mise en œuvre de ces trois étapes est présenté en annexe 7.4.

### 3.2.4.3 Les niveaux d'aléa pour chaque scénario de référence

Les niveaux d'aléa sont déterminés sur la base d'une grille de cotation combinant les critères d'intensité et de probabilité d'atteinte pour chaque scénario de référence selon la grille suivante :

Niveau d'aléa		Probabilité d'atteinte			
		Forte	Modérée	Faible	Très faible
Intensité	Très forte aggravée	Aléa très fort aggravé	Aléa très fort aggravé	Aléa très fort	Aléa fort
	Très forte	Aléa très fort	Aléa fort	Aléa fort	Aléa moyen
	Forte	Aléa fort	Aléa moyen	Aléa moyen	Aléa faible
	Modérée	Aléa moyen	Aléa moyen	Aléa faible	Aléa faible
	Faible	Aléa faible	Aléa faible	Aléa faible	Aléa faible

**Tableau 8** : niveau d'aléa en fonction de l'intensité et de la probabilité d'atteinte.

Pour chaque zone cartographiée, il est important de garder la traçabilité des critères qui ont conduit à retenir tel ou tel niveau d'aléa. En effet, les prescriptions associées à un projet autorisé devront être adaptées à l'intensité identifiée, et non au niveau d'aléa. Un affichage possible des différents niveaux d'aléa est présenté ci-après à titre d'exemple. Il présente un intérêt pour améliorer l'information des populations et la justification des niveaux d'aléas.

Niveau d'aléa		Probabilité d'atteinte			
		Forte	Modérée	Faible	Très faible
Intensité	Très forte aggravée	T <sub>5</sub> TF-f	T <sub>5</sub> TF-m	T <sub>4</sub> TF-fa	T <sub>3</sub> TF-tfa
	Très forte	T <sub>4</sub> tf-f	T <sub>3</sub> tf-m	T <sub>3</sub> tf-fa	T <sub>2</sub> tf-tfa
	Forte	T <sub>3</sub> f-f	T <sub>2</sub> f-m	T <sub>2</sub> f-fa	T <sub>1</sub> f-tfa
	Modérée	T <sub>2</sub> m-f	T <sub>2</sub> m-m	T <sub>1</sub> m-fa	T <sub>1</sub> m-tfa
	Faible	T <sub>1</sub> fa-f	T <sub>1</sub> fa-m	T <sub>1</sub> fa-fa	T <sub>1</sub> fa-tfa

**Tableau 9** : niveau d'aléa, selon l'intensité et la probabilité d'atteinte, avec traçabilité de ces critères.

Sont par ailleurs classées en niveau d'aléa « très fort aggravé » :

- les zones de sur-aléa liées à des défaillances (présentées au 3.2.3.3) ;
- le lit mineur (jusqu'au sommet des berges) ;
- les chenaux de divagations les plus probables.

### 3.2.5. L'aléa de référence du PPRI

Les niveaux d'aléa sont déterminés par croisement de l'intensité avec la probabilité d'atteinte pour chaque scénario de référence. **L'ensemble de ces informations est ensuite rassemblé dans la carte d'aléa de référence du PPRI, en prenant en tout point le niveau d'aléa le plus élevé identifié dans les différents scénarios de référence.**

Les secteurs protégés par des systèmes d'endiguement sont toujours affichés comme soumis à un aléa, correspondant à des sous-scénarios de défaillance. Dans la mesure du possible et si cela ne nuit pas à sa lisibilité (représentation spécifique par hachurage, indice particulier, etc.), la carte des aléas peut localiser, pour les différents ouvrages de protection, les zones éventuelles de sur-aléa (bandes de précautions), qui correspondent par ailleurs à un niveau d'aléa « très fort aggravé ».

En présence d'un système d'endiguement dont le niveau de protection est au moins égal à la magnitude des scénarios de référence du PPRI, la carte d'aléa pourra également indiquer les zones identifiées comme protégées par le gestionnaire du système d'endiguement. La définition de ces zones ne relève pas du cadre de l'élaboration du PPRI. Cela suppose donc que les études de dangers définissant le niveau de protection et la zone protégée aient été réalisées par ailleurs. **Cette représentation cartographique est toutefois purement informative et sans incidence directe sur l'aléa de référence ou le règlement.**

### 3.2.6. Synthèse relative à l'élaboration de la carte d'aléa

Cette partie reprend de manière synthétique les étapes relatives à l'élaboration de la carte des aléas présentées précédemment. Les exemples proposés sont illustratifs.

#### Étape 1 : définition d'un (ou plusieurs) scénario(s) de référence

**1.a.** Identification et analyse des événements historiques, et recherche de leurs périodes de retour.

**1.b.** Construction d'un ou plusieurs scénarios de référence, soit directement à partir d'un événement historique bien documenté et d'occurrence au moins centennale, soit indirectement à partir d'un événement d'occurrence centennale à construire.

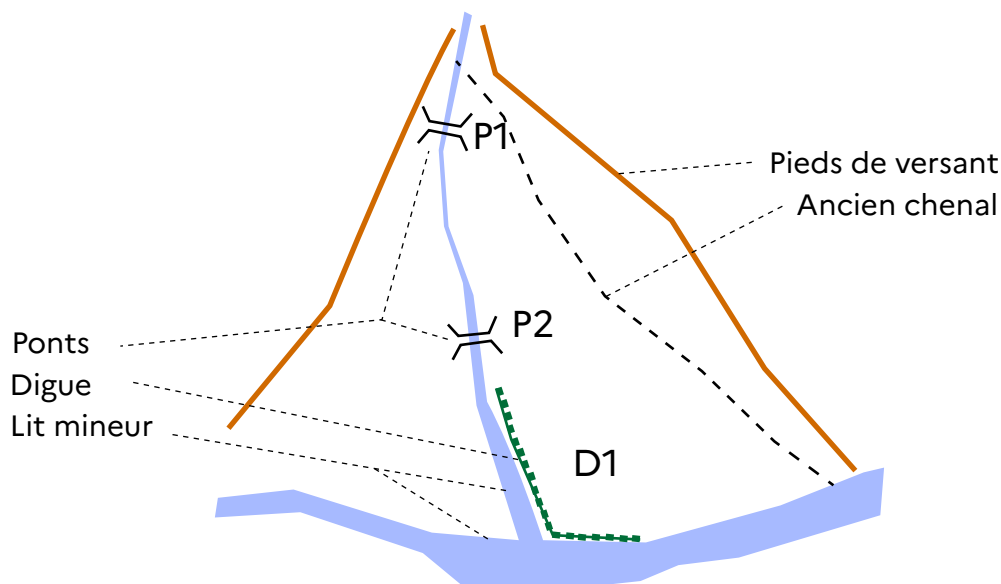
Exemple :

Scénario de référence 1 (S1)	Scénario de référence 2 (S2)
<i>Crue de charriage avec flottants</i> Magnitude (M) : $V_{S1}$ (volume solide) Paramètres secondaires : <ul style="list-style-type: none"><li>● Q (débit liquide de pointe)</li><li>● <math>L_{BF}</math> (longueur des bois flottants)</li><li>● <math>V_{BF}</math> (volume de bois flottants)</li></ul>	<i>Lave torrentielle</i> Magnitude (M) : $V_{S2}$ (volume solide) Paramètres secondaires : <ul style="list-style-type: none"><li>● <math>T_b</math> (taille des gros blocs)</li><li>● Présence ou non d'un front granulaire</li></ul>

**Tableau 10 :** exemples illustratifs de scénarios de référence.

#### Étape 2 : définition d'un (ou plusieurs) sous-scénario(s) pour chaque scénario de référence

**2.a.** Analyse de la configuration du site, des éléments guidant ou interférant avec les écoulements, inventaire des éléments anthropiques et analyse des défaillances associées à chaque tronçon.



**Illustration 32 : exemple de configuration de site.**

Exemple pour le scénario 1 :

Pont P1 : obstruction très improbable (probabilité estimée subjectivement inférieure à 10 %).

Pont P2 : obstruction improbable (probabilité estimée subjectivement de l'ordre de 40 %).

Digue D1 : défaillance possible, indépendamment du niveau de protection (par défaut dans un PPRi).

**2.b.** Identification (quasi-)exhaustive des sous-scénarios potentiels du scénario 1 et du scénario 2, et notamment des différentes combinaisons de défaillance possibles.

**2.c.** Priorisation, tri et agrégation éventuelle des sous-scénarios au regard d'une analyse experte évaluant la plausibilité des sous-scénarios, les grandes zones de débordement associées, les redondances, la bonne représentativité des comportements possibles, etc.

Exemple « d'analyse experte » pour le scénario 1 :

En cas d'obstruction de P1, ce qui est rare mais pas impossible, des écoulements peuvent bifurquer en rive gauche et rejoindre l'ancien lit du cours d'eau → nécessité d'un sous-scénario.

En cas d'obstruction de P2, ce qui a un peu moins d'une chance sur deux de se produire en cas d'évènement de référence, des écoulements vont déborder sur les deux rives. Cette configuration est par ailleurs sensiblement différente de la précédente → nécessité d'un sous-scénario.

L'obstruction simultanée de P1 et P2 est d'une part extrêmement improbable, et d'autre part est majorée par les sous-scénarios précédents → pas de sous-scénario retenu.

D1 est une digue → par défaut, au moins un sous-scénario avec tenue et un sous-scénario avec défaillance (effacement et/ou rupture) sont à retenir.

Etc.

**2.c. Bis.** Priorisation de manière plus formalisée, pouvant par exemple passer par la construction d'un « arbre de probabilité » estimant, pour l'intégralité des sous-scénarios (toutes les combinaisons de défaillance/non défaillance de chaque élément anthropique), la probabilité finale de survenue du sous-scénario.

**2.d.** Formalisation des sous-scénarios retenus pour chaque scénario de référence.

Exemple de sous-scénarios retenus pour le scénario 1 :

Sous-scénario 1.1 : P1 et P2 non obstrué, pas de défaillance de D1.

Sous-scénario 1.2 : obstruction de P1, P2 non obstrué, pas de défaillance de D1.

Sous-scénario 1.3 : P1 non obstrué, obstruction de P2, pas de défaillance de D1.

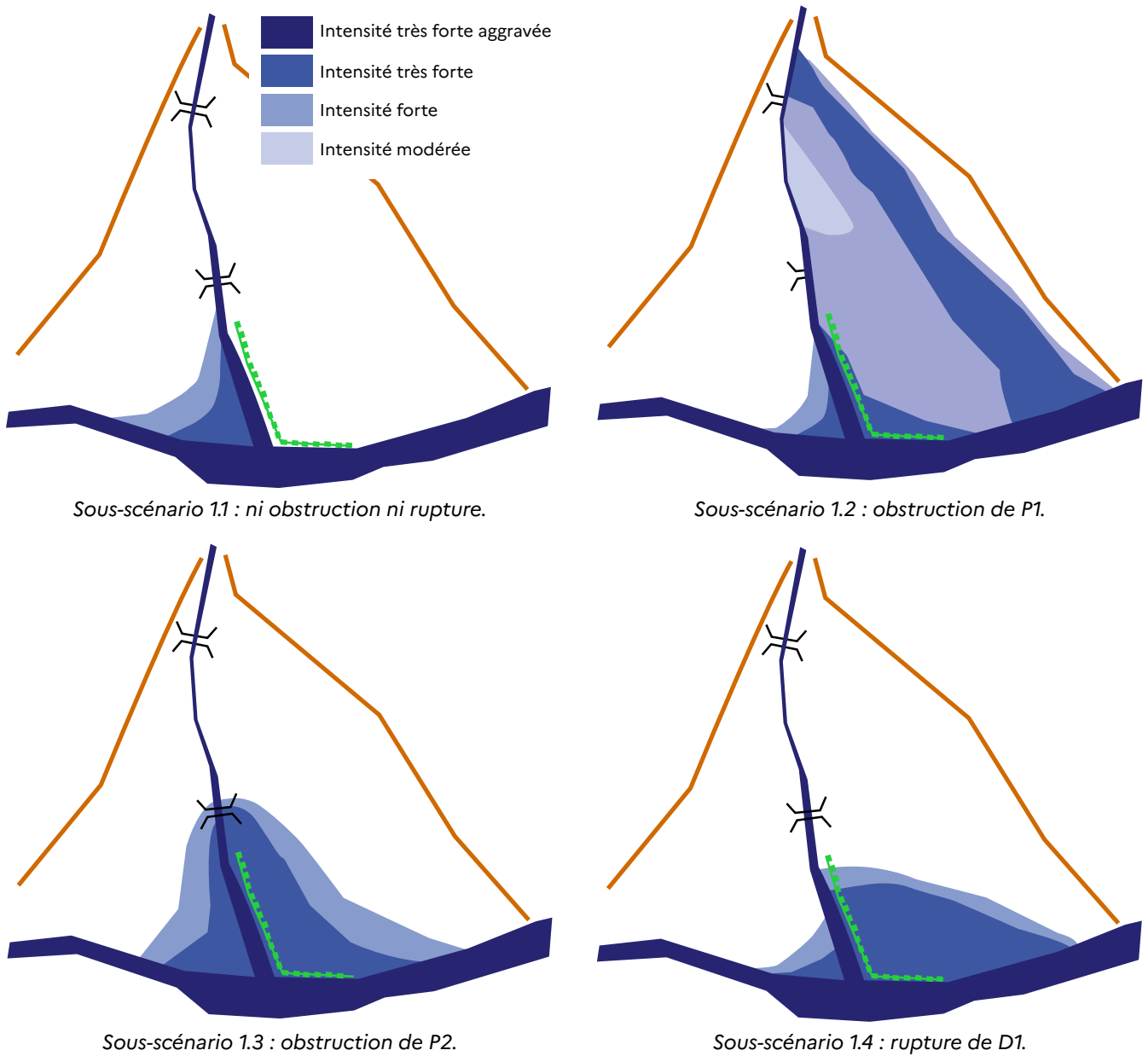
Sous-scénario 1.4 : P1 et P2 non obstrué, rupture de D1.

### **Étape 3 : évaluation des niveaux d'intensité de chaque scénario de référence**

**3.a.** Évaluation des niveaux d'intensité pour chaque sous-scénario, par application de la grille de qualification des intensités (tableau 5 pages 58 et 59).



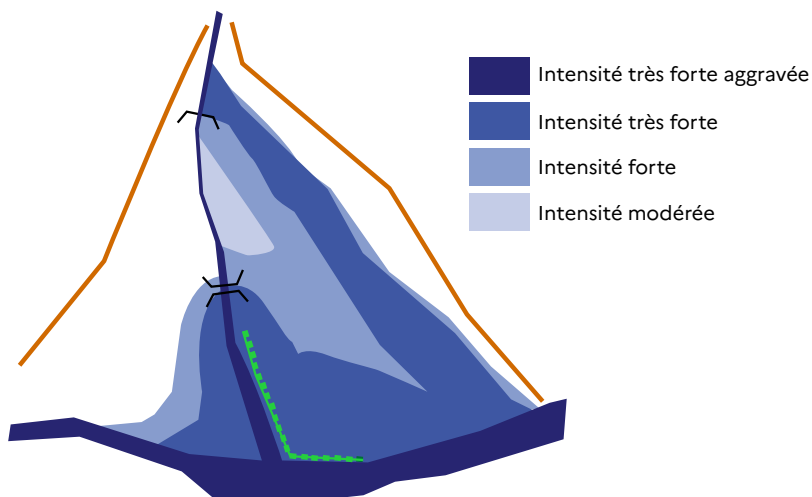
Exemple de cartes d'intensité pour les sous-scénarios retenus pour le scénario 1 :



**Illustration 33 :** exemple de carte d'intensité pour chaque sous-scénario du scénario de référence S1

**3.b.** Construction de la carte des niveaux d'intensité pour le scénario de référence, en prenant en tout point le niveau d'intensité maximal de chaque sous-scénario.

Exemple de carte d'intensité pour le scénario 1 :

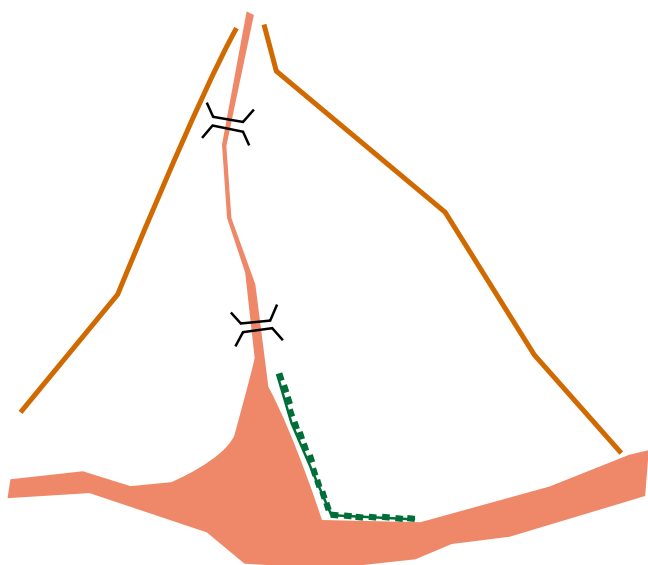


**Illustration 34 :** exemple de carte d'intensité pour un scénario de référence.

#### Étape 4 : élaboration de la carte des probabilités d'atteinte

4.a. Première estimation de probabilités d'atteinte par sous-scénario en associant, à chaque zone affectée par un sous-scénario, une probabilité d'atteinte traduisant la probabilité de survenue du sous-scénario (étape A).

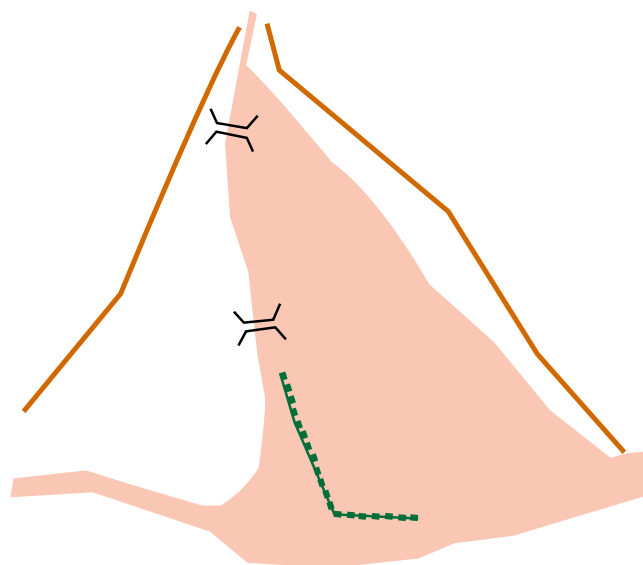
Exemple pour les sous-scénarios retenus pour le scénario 1 :



Sous-scénario 1.1.

Probabilité de survenue du sous-scénario : de l'ordre de 40 %.

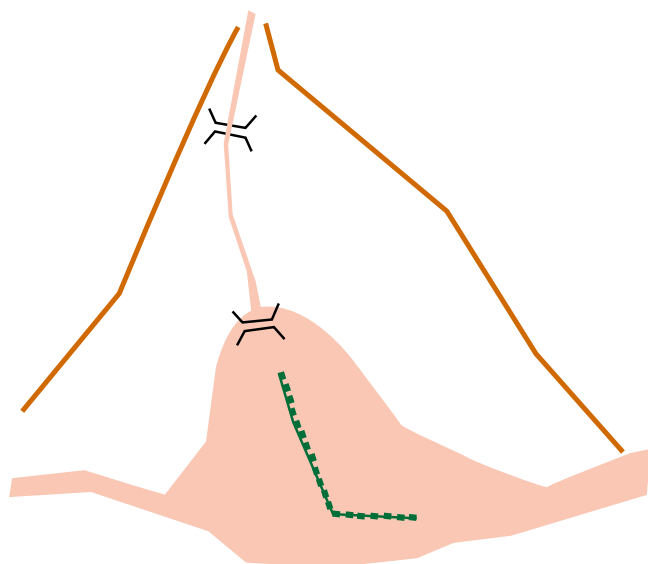
Probabilité d'atteinte des zones affectées par ce seul sous-scénario (première approche) : modérée.



Sous-scénario 1.2.

Probabilité de survenue du sous-scénario : inférieure à 10 %.

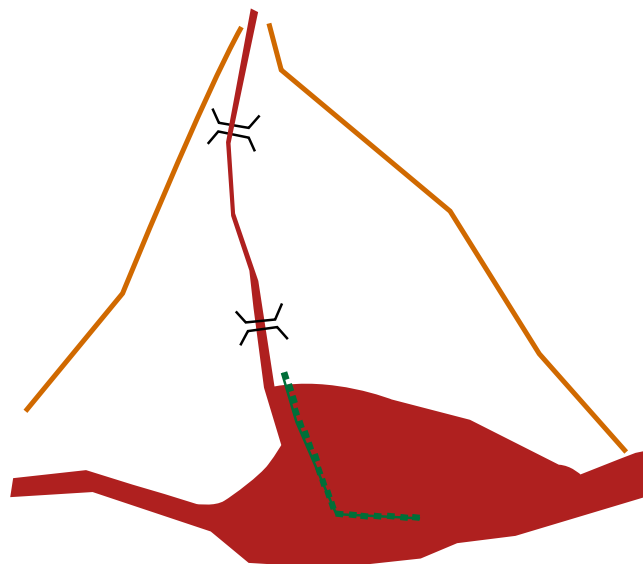
Probabilité d'atteinte des zones affectées par ce seul sous-scénario (première approche) : faible.



Sous-scénario 1.3.

Probabilité de survenue du sous-scénario : de l'ordre de 40 %.

Probabilité d'atteinte des zones affectées par ce seul sous-scénario (première approche) : modérée.



Sous-scénario 1.4.

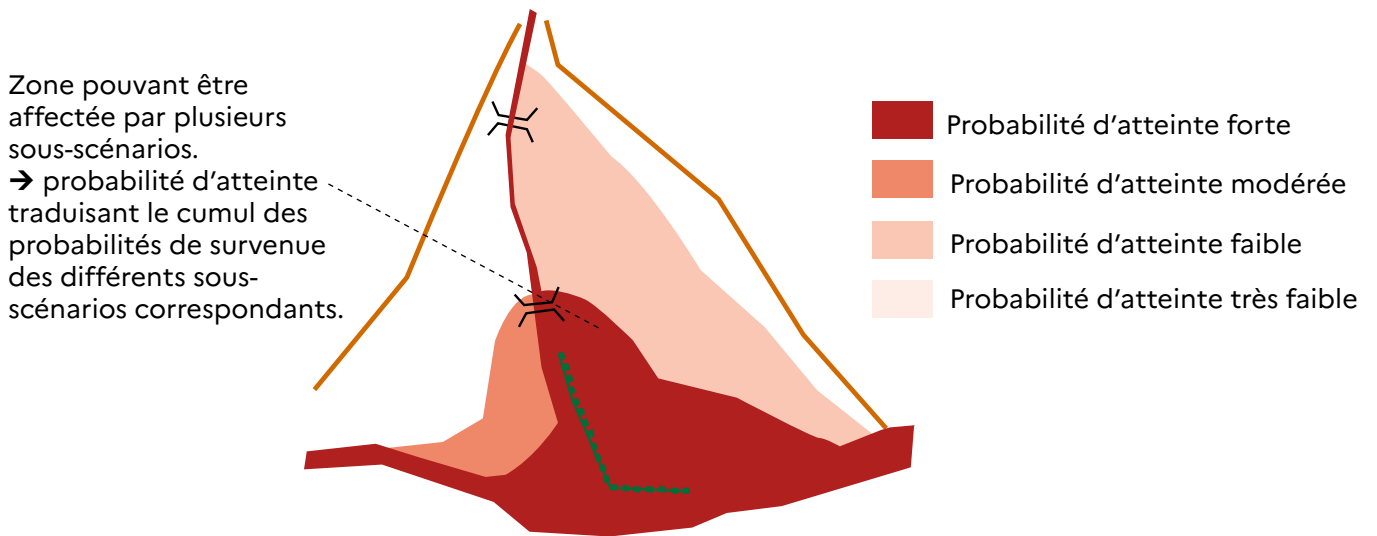
Probabilité de survenue du sous-scénario : par défaut maximale (dans le cadre de la convention de l'approche PPRi).

Probabilité d'atteinte des zones affectées par ce seul sous-scénario (première approche) : forte.

**Illustration 35** : exemples de cartes d'exposition (enveloppe des zones touchées par les écoulements) des sous-scénarios du scénario 1.

**4.b.** Première estimation de la cartographie des probabilités d'atteinte pour chaque scénario de référence, par agglomération des emprises des différents sous-scénarios, et assignation d'une probabilité d'atteinte représentative en tout point de la somme des probabilités de survenue des sous-scénarios susceptibles d'affecter la zone (étape B).

Exemple pour le scénario 1 :

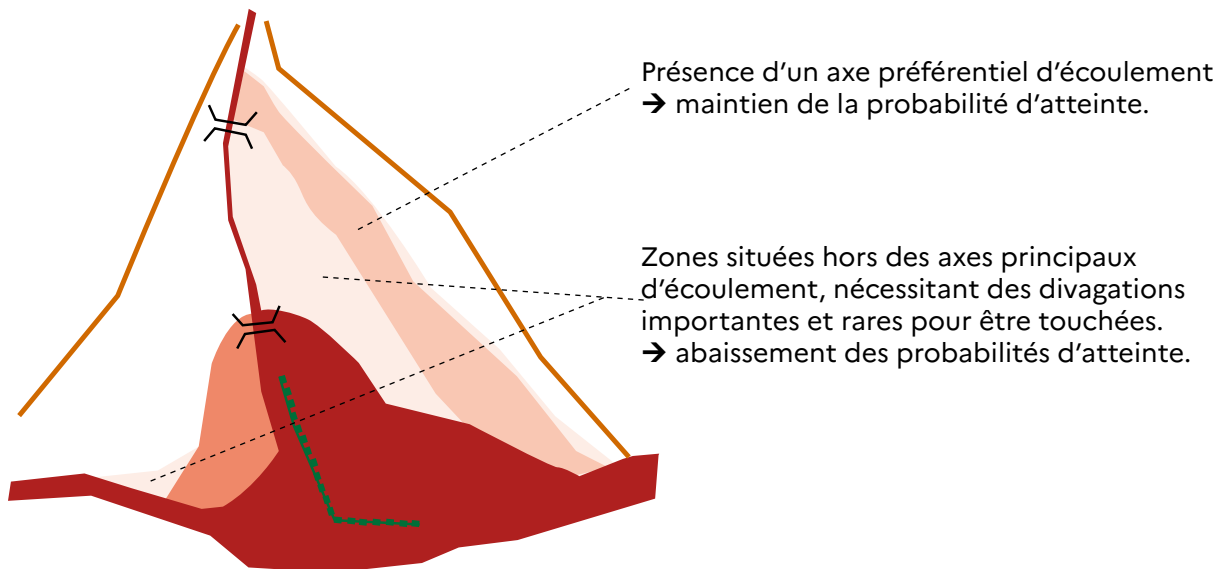


**Illustration 36 :** exemple de première estimation de carte de probabilité d'atteinte pour un scénario de référence.

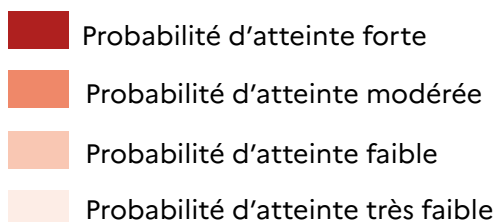
Agrégation des cartes d'exposition des sous-scénario pondérées par leur probabilité de survenue.

**4.c.** Finalisation, à dire d'expert, de la carte des probabilités d'atteinte du scénario de référence, en prenant en compte le caractère incertain des divagations (en diminuant les probabilités d'atteinte sur certains secteurs) (étape C).

Exemple pour le scénario 1 :



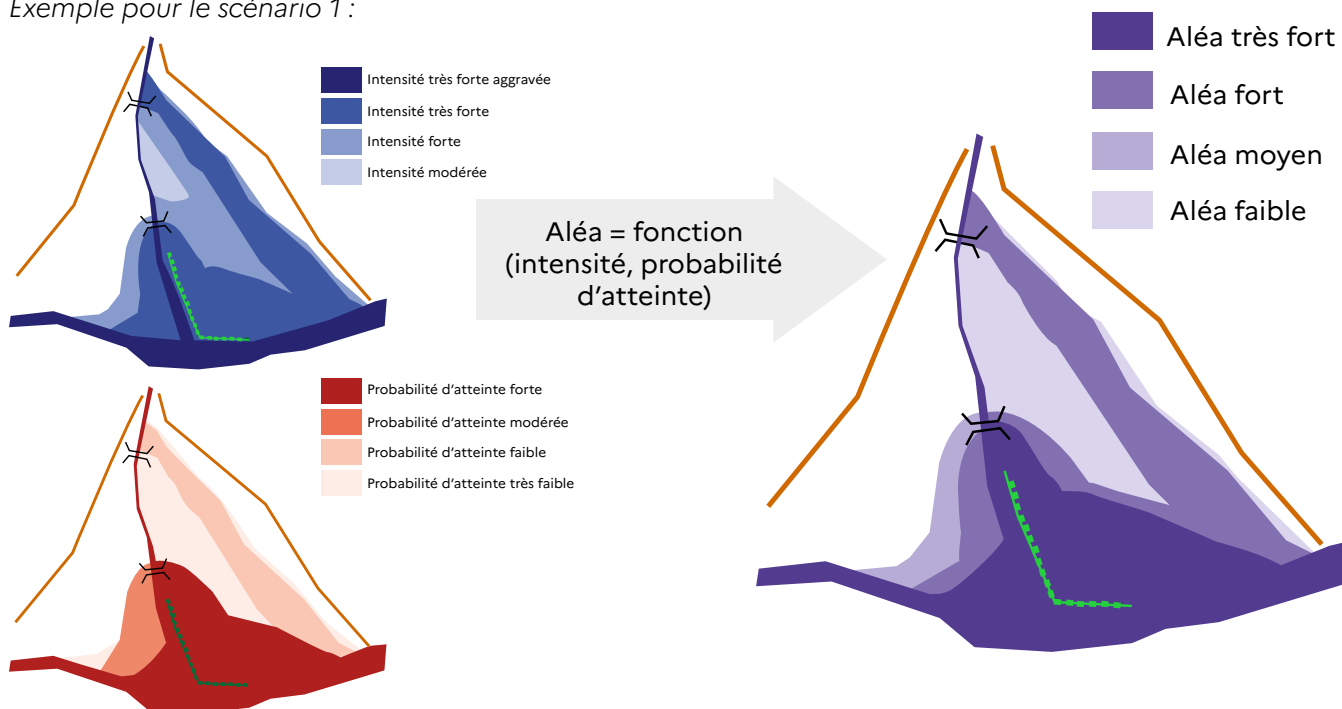
**Illustration 37 :** exemple de carte de probabilité d'atteinte affinée pour un scénario de référence.





**Étape 5 : élaboration d'une carte d'aléa par scénario de référence**, par croisement de la carte d'intensité et de la carte de probabilité d'atteinte du scénario de référence.

Exemple pour le scénario 1 :



**Illustration 38** : exemple de carte d'aléa pour un scénario de référence.

a. Carte d'intensité du scénario de référence - b. Carte de probabilité d'atteinte du scénario de référence - c. Carte d'aléa du scénario de référence.

**Étape 6 : évaluation des sur-aléas éventuels**, et notamment des bandes de précaution à l'arrière des digues.

**Étape 7 : élaboration de la carte de synthèse de l'aléa de référence du PPRi**, reprenant les sur-aléas et le niveau d'aléa maximal sur l'ensemble des scénarios de référence.

### 3.2.7. Les aléas relatifs à d'autres périodes de retour et l'emprise des lits majeurs

L'aléa de référence du PPRi est celui défini par les scénarios de référence. Le zonage réglementaire comme le règlement sont établis au regard du croisement entre cet aléa de référence avec les différents types d'enjeux.

L'étude des aléas dans le cadre d'une démarche PPRi peut toutefois être une opportunité pour améliorer la connaissance relative à d'autres occurrences de crues, plus rares ou plus fréquentes, ce qui présente plusieurs avantages : économie d'échelle, cohérence des différentes cartographies, etc. La cartographie des aléas pour ces autres occurrences est facultative et ne fait pas *stricto sensu* partie de la démarche d'élaboration du PPRi. L'opportunité de les réaliser est à l'appréciation du service chargé de l'élaboration du PPRi, et elles ont une vocation purement informative par rapport au PPRi. Dans l'éventualité où elles sont réalisées, elles peuvent être mises en annexe de la note de présentation du PPRi.

#### 3.2.7.1. La cartographie des lits majeurs

L'emprise du lit majeur des cours d'eau torrentiels est souvent une information très utile pour comprendre le fonctionnement de l'appareil torrentiel. Sans chercher à y qualifier les aléas (ni en période de retour, ni en intensité ou probabilité d'atteinte), la délimitation de cette emprise (et de ses changements éventuels à l'occasion d'événements futurs) sur la carte des phénomènes (ou sur une carte spécifique) permet de localiser les zones susceptibles d'être atteintes par des événements dépassant largement les scénarios de référence du PPRi.

Les phénomènes torrentiels extraordinaires observés en octobre 2020 pendant la tempête Alex dans les vallées de la Vésubie et de la Roya (Alpes-Maritimes) ont touché de façon très préférentielle les enjeux situés dans l'emprise du lit majeur mais pas exclusivement : certains enjeux situés sur des terrains considérés comme appartenant aux versants ont été touchés par les phénomènes ayant lieu dans le fond de vallée. Les érosions de berges et divagations des lits ont été d'une telle intensité qu'ils ont endommagé et détruit des enjeux situés plus de 10 m au-dessus du lit majeur et en recul des berges.

Cette emprise peut être délimitée à partir des sources d'informations disponibles (cartes géologiques, atlas des zones inondables (AZI), enveloppes approchées des inondations potentielles (EAIP), etc.), confirmées ou complétées par des observations morphologiques usuelles (analyse diachronique, MNT, etc.) intégrant éventuellement les dynamiques érosives des versants. Cette identification informative est utile aussi bien pour les torrents (limites morphologiques du cône de déjection) que pour les rivières torrentielles (lit majeur en fond de vallées souvent délimitées par des versants raides).

### **3.2.7.2. Les évènements fréquents**

Dans la même logique, il est souvent pertinent de profiter de l'opportunité offerte par le PPRi pour améliorer la connaissance relative aux crues fréquentes. L'analyse des crues fréquentes donne aussi des indices précieux sur les dysfonctionnements potentiels à attendre au droit des ouvrages de traversée et des ouvrages de protection : les traces de réparation d'urgence sur des protections de berges sont généralement un signe de l'insuffisance de leur résistance aux phénomènes ; les volumes de curages des plages de dépôts et autres curages d'urgences sont aussi utile à définir la magnitude des évènements rares (Morel et al. 2022).

## IV. LES ENJEUX

### 4.1. Les objectifs de l'analyse des enjeux

Les enjeux sont les personnes, les biens, les activités, les moyens et le patrimoine susceptibles d'être affectés, directement ou indirectement, par les aléas étudiés.

Dans le cadre de l'élaboration d'un PPRN, l'analyse des enjeux du territoire porte sur deux sujets :

- l'analyse du fonctionnement du territoire, notamment au regard de l'aléa de référence ;
- la cartographie des niveaux d'urbanisation, permettant de faire le zonage réglementaire brut par croisement avec la cartographie des aléas de référence.

Il est recommandé d'impliquer fortement les services urbanisme et planification des DDT dans l'analyse des enjeux, ces sujets relevant largement de leurs domaines de compétence.

**L'analyse des enjeux n'est pas spécifique aux PPRi de cours d'eau torrentiels. On ne se référera donc qu'aux références législatives et réglementaires, ainsi qu'au guide général pour les principes globaux d'élaboration des PPRN.**

### 4.2. L'analyse du fonctionnement du territoire au regard de l'aléa

Les premiers éléments de cette analyse servent lors de la demande d'examen au cas par cas pour l'évaluation environnementale, au début de la démarche d'élaboration du PPRi. Une fois complète, cette analyse sert ensuite à mettre en place la stratégie du PPRi et donne des clés pour affiner le zonage réglementaire et le règlement. Elle peut aussi être un support utile pour le dossier que les collectivités concernées doivent établir pour les demandes d'exception prévues au 5.2.5 ci-après.

Son périmètre est *a minima* celui du PPRi, avec des éléments d'appréciation élargis au bassin de vie<sup>19</sup> lorsque cela est nécessaire. Cette analyse permet :

- de comprendre le fonctionnement du territoire, et notamment :
  - le contexte naturel, et les contraintes et atouts associés pour le territoire,
  - l'organisation spatiale des différents éléments (espaces naturels, zones agricoles, habitats, services ou commerces, entreprises et activités économiques, équipements publics, etc.) et les relations entre ces éléments ou avec l'extérieur (réseaux et infrastructures, échanges et interrelations, etc.),
  - les acteurs (habitants, socioprofessionnels, populations saisonnières ou touristiques, etc.) et leurs interactions avec le territoire ;
- d'évaluer les impacts des aléas naturels sur ce territoire et sur les différents enjeux ;
- de justifier l'intérêt de la réalisation du PPRi, et ainsi faciliter la sensibilisation au risque et l'acceptabilité du plan ;
- d'identifier les mesures de prévention ou de réduction de la vulnérabilité qu'il faudrait mettre en œuvre pour les enjeux existants ;
- de mettre en évidence les contraintes ou les possibilités de développement au regard de la problématique des risques naturels.

La finesse de cette analyse est à adapter aux enjeux et à la complexité du territoire vis-à-vis des risques. Elle peut comprendre tout ou partie des éléments ci-dessous.

#### 4.2.1. Les infrastructures, équipements et enjeux particuliers existants

Il s'agit notamment d'analyser et de cartographier :

- la présence de populations (nombre, densités, dynamiques, etc.) ;
- les enjeux stratégiques pour la gestion de crise (PC de crise, centre de secours, ERP pouvant servir d'hébergement, centraux téléphoniques, centrales électriques, etc.) ;
- les bâtiments, si possible en fonction de leur typologie (maison de plain-pied, maison avec étage, collectif, etc.) ;

<sup>19</sup> Définition INSEE : « Le bassin de vie constitue le plus petit territoire sur lequel les habitants ont accès aux équipements et services les plus courants ».

- les établissements sensibles ou difficilement évacuables (crèches, écoles, hôpitaux, maisons de retraite, centres pénitentiaires, installations classées, patrimoine, etc.) ;
- les équipements collectifs du type ERP ou espaces publics ouverts (qui regroupent, ponctuellement ou périodiquement en un point donné du territoire, un nombre important de personnes dont les conditions d'évacuation ou de mise en sécurité doivent être étudiées) ;
- les campings et l'hôtellerie de plein air (quel que soit l'aléa considéré, ces établissements accueillent une population vulnérable, qui ne connaît généralement pas les aléas locaux et des comportements à adopter) ;
- les différents réseaux (avec leur vulnérabilité et les effets de leurs dysfonctionnements).

Le croisement entre ces éléments et la carte d'aléa de référence permet d'appréhender l'exposition et la vulnérabilité de l'existant. Il pourra ainsi être utile de quantifier les enjeux en zone exposée, avec un niveau de détail à l'appréciation du service instructeur.

Type d'enjeux	En aléa fort ou supérieur	En aléa moyen ou inférieur	Total en zone exposée
<b>Bâtiments</b>	81 maisons individuelles 20 collectifs	49 maisons individuelles 16 collectifs	130 maisons individuelles 36 collectifs
<b>Population</b>	350 personnes	200 personnes	550 personnes
<b>Établissements sensibles</b>	1 école primaire	1 maison de retraite	1 école primaire 1 maison de retraite
<b>Autres</b>	...	...	...

**Tableau 11 : exemple illustratif d'analyse de la vulnérabilité du territoire au regard des aléas.**

Cette étape met notamment en évidence les vulnérabilités spécifiques de certains bâtiments, équipements, quartiers, secteurs, etc., et permet de cibler les mesures de prévention ou de réduction de la vulnérabilité<sup>20</sup> que le règlement du PPRi pourrait utilement prescrire.

#### 4.2.2. Les projets et les potentialités d'aménagement futur

L'analyse des enjeux :

- peut être affinée par la mise en évidence des projets d'aménagements futurs (notamment ceux définis par les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme ou les cartes communales) ;
- est une étape privilégiée pour vérifier la comptabilité de ces projets avec la prévention des risques naturels prévisibles.

**Travailler en étroite association avec les collectivités** permet d'intégrer la connaissance fine des enjeux et des perspectives d'aménagement des acteurs locaux. Pour être pertinente, cette analyse doit être multi-risques et porter sur un périmètre suffisamment grand, dépassant généralement le périmètre d'étude du PPRi.

#### 4.3. La cartographie des niveaux d'urbanisation

Pour chacun des niveaux d'urbanisation, il conviendra d'interpréter les textes en vigueur, les orientations du guide général et celles proposées ci-dessous de manière adaptée aux spécificités des territoires de montagne. La caractérisation des notions de densité, de continuité, voire de mixité, peuvent notamment être ajustées en comparaison à d'autres territoires, pour tenir compte des différences de caractéristiques et d'organisation.

<sup>20</sup> Sur ce point, le guide « Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel » (2011 - Marc Givry et Christophe Peteuil pour le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement) donne des clés pour des analyses plus détaillées en matière de réduction de la vulnérabilité du bâti.



### **4.3.1. Les centres urbains**

Les centres urbains se caractérisent par une occupation du sol importante, une continuité bâtie et une mixité des usages entre logements, commerces et services. Il s'agit de zones denses dans lesquelles il reste peu de secteurs non construits et où, en conséquence, les constructions nouvelles n'augmenteront pas de manière substantielle les enjeux exposés. De surcroît, le caractère historique de la zone peut être un élément d'éclairage.

Le centre urbain justifie une identification particulière pour donner lieu à un zonage et à des règlements adaptés à ses spécificités (équipements publics particuliers, fonctionnement des commerces, problématiques des bâtiments mitoyens ou en pâtés de maisons, etc.).

### **4.3.2. Les espaces urbanisés, hors centres urbains**

Les espaces urbanisés sont les bourgs, les villages, les hameaux et les groupes de constructions traditionnelles ou d'habitations existants. Si le contexte le justifie, ils peuvent contenir certains secteurs limités en continuité immédiate de l'urbanisation existante.

### **4.3.3. Les espaces non urbanisés**

Les espaces non urbanisés sont ceux qui ne sont pas situés dans les parties urbanisées : espaces agricoles, espaces forestiers, bâtis isolés, etc.

## V. L'ÉLABORATION DE LA PARTIE RÉGLEMENTAIRE

### 5.1. Introduction

La présente partie développe les aspects des parties réglementaires des PPRi des cours d'eau torrentiels. On se référera au guide général PPRN pour les développements sur les aspects plus transversaux.

Le code de l'environnement (article L. 562-1) définit l'objet des PPRN. Pour en retenir l'essentiel :

- un PPRN **délimite les zones exposées aux risques** ;
- dans les zones le nécessitant, il **interdit tout type de projet** ;
- il définit des **mesures d'interdiction ou des prescriptions** dans les zones indirectement exposées mais où des projets pourraient aggraver les risques ;
- dans le cas où des projets peuvent être autorisés, il **prescrit les conditions** de réalisation, d'utilisation ou d'exploitation des projets autorisés ;
- il définit les **mesures de prévention, de protection et de sauvegarde** à prendre par les collectivités et par les particuliers dans le cadre de leurs compétences et responsabilités respectives ;
- il définit les **mesures sur l'existant** à prendre par les propriétaires, exploitants ou utilisateurs.

La partie réglementaire du PPRN (plan de zonage réglementaire et règlement) porte les mesures précitées.

Le croisement entre un niveau d'aléa et un niveau d'enjeu (associé à un niveau de vulnérabilité de l'enjeu par rapport à l'aléa) définit un niveau de risque. À chaque niveau de risque est associé un ensemble de règles qui correspond aux mesures à mettre en œuvre pour rendre ce niveau de risque acceptable en termes humains, matériels et économiques. En pratique dans un PPRN, ces règles<sup>21</sup> traduisent notamment un niveau de constructibilité, identifié par un index alpha-numérique appelé « zonage réglementaire ». Les zonages réglementaires peuvent transcrire un principe général de constructibilité sous réserve du respect de prescriptions (identifié par exemple par un zonage « Bt », pour « zone bleue »), ou traduire un principe général d'inconstructibilité sauf exceptions (identifié par exemple par un zonage « Rt », pour « zone rouge »).

Une grille de croisement permet de définir les zonages réglementaires en fonction des niveaux d'aléa de référence et des enjeux, caractérisés pour cet exercice par des niveaux d'urbanisation. Ces zonages sont cartographiés sur le « **plan de zonage réglementaire** ». Ce plan permet d'appréhender directement les grandes lignes des règles applicables, mais pas leur détail. Les précisions sur la nature des projets autorisés ou interdits ou sur les prescriptions à respecter pour les projets autorisés sont précisées pour chaque zonage réglementaire dans le **règlement** associé au plan de zonage réglementaire. Ce règlement définit également les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde (article R. 562-4 du code de l'environnement) ainsi que les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation de l'existant (article L. 562-5 du code de l'environnement).

Les principes généraux de traduction réglementaire sont définis par un cadre national, présenté dans le guide PPRN général et dans le présent guide, qui permet la mise en place d'un règlement « type ». Ce cadre réglementaire national présente toutefois des marges d'appréciation. Il doit être confronté aux spécificités du territoire d'étude et des adaptations peuvent être faites lorsque cela est justifié. La réflexion menée pour mettre en adéquation le dossier de PPRN avec les spécificités et les demandes du territoire, **tout en restant dans le cadre national**, s'appelle la « stratégie du PPRN ». Elle se construit itérativement, sous la responsabilité des services de l'État, en **association avec les personnes et organismes associés**, notamment les collectivités et en **concertation avec le public**.

La mise en œuvre de cette stratégie porte sur :

- l'identification des enjeux, et notamment la cartographie des niveaux d'urbanisation, afin de prendre en compte les projets d'aménagement et de développement des collectivités lorsqu'ils sont compatibles avec les objectifs de prévention ;
- le plan de zonage réglementaire, en particulier pour déterminer les modalités de lissage et gérer, en les justifiant, différents cas particuliers ;
- le règlement, afin de définir des règles opérationnelles et adaptées au territoire.

<sup>21</sup> Dans les PPRN, les règles sont des règles d'urbanisme (article L. 101-3 du code de l'urbanisme) ou des règles constructives (article R. 126-1 du code de la construction et de l'habitation).

Les zones de montagne peuvent être concernées par les dispositions d'urbanisme de la loi du 9 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne (articles L. 122-1 à L. 122-27 du code de l'urbanisme et leurs articles réglementaires correspondants). Si c'est le cas, ces dispositions s'appliquent et les constructions et installations évoquées dans ce guide doivent également leur être conformes.

## 5.2. Le zonage réglementaire

### 5.2.1. Les principes généraux

Les principes préconisés pour la réalisation du zonage réglementaire sont les suivants :

Niveaux d'aléa de référence	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort aggravé
Types d'enjeux					
Centres urbains	Projets soumis à prescriptions		Interdiction sauf exceptions	Interdiction sauf exceptions	Interdiction
Espaces urbanisés hors centres urbains	Projets soumis à prescriptions		Interdiction sauf exceptions	Interdiction	
Espaces non urbanisés	Interdiction sauf exceptions		Interdiction		

**Tableau 12 :** principes généraux de caractérisation des niveaux de constructibilité en fonction du niveau d'aléa et du type d'enjeux.

Une version détaillée de ce tableau est proposée en annexe 7.7.

Le PPRi ne doit pas empêcher une gestion raisonnable des zones où le principe général est l'interdiction. Certains projets, compte tenu de leur nature et du contexte, peuvent ne pas être interdits sous réserve du respect de prescriptions. Les parties 5.2.2, 5.2.3 et 5.2.4 précisent ainsi les projets « autorisés sous réserve de prescriptions adaptées » pour différents niveaux d'urbanisation et d'aléa conduisant à un principe général d'interdiction. En complément, pour tous niveaux d'aléa et tous niveaux d'urbanisation, peuvent également être autorisés (liste informative et non exhaustive) :

- les travaux d'entretien, de gestion courante et de mise aux normes des bâtiments existants (notamment les aménagements internes, les traitements de façade, la réfection des toitures, etc.) ;
- les projets de nature à améliorer la sécurité des personnes, à réduire la vulnérabilité des biens ou à réduire les aléas ;
- les infrastructures publiques de transports routier et ferroviaire, et les réseaux de distribution d'eau, de gaz et d'électricité.

Il est fortement recommandé de n'envisager ces projets qu'après concertation avec les élus, acteurs locaux, responsables économiques ou associatifs, etc.

Par ailleurs, des projets d'aménagement faisant l'objet d'une demande d'exception formalisée et portée par l'autorité compétente en matière de plan local d'urbanisme ou de document en tenant lieu peuvent être autorisés sous conditions (voir partie 5.2.5).

### 5.2.2. Les centres urbains

**Dans ces zones, lorsque l'aléa de référence est « faible » ou « moyen » :**

- les projets sont soumis à prescriptions.

**Lorsque l'aléa de référence est « fort » :**

- le principe général est l'interdiction ;
- sont toutefois autorisées, sous réserve du respect de prescriptions adaptées :
  - les constructions nouvelles dans les dents creuses,

➤ les constructions nouvelles dans le cadre d'opérations de renouvellement urbain avec réduction de la vulnérabilité<sup>22</sup> ;

■ des exceptions peuvent être autorisées si certaines conditions sont remplies (voir partie 5.2.5).

#### **Lorsque l'aléa de référence est « très fort » :**

■ le principe général est l'interdiction ;

■ sont toutefois autorisées, sous réserve du respect de prescriptions adaptées, les constructions nouvelles dans le cadre d'opérations de renouvellement urbain avec réduction de la vulnérabilité ;

■ des exceptions peuvent être autorisées si certaines conditions sont remplies (voir partie 5.2.5).

#### **Lorsque l'aléa de référence est « très fort aggravé » :**

■ le principe général est l'interdiction. Toute construction nouvelle est interdite.

### **5.2.3. Les zones urbanisées hors centres urbains**

#### **Dans ces zones, lorsque l'aléa de référence est « faible » ou « moyen » :**

■ les projets sont soumis à prescriptions ;

#### **Lorsque l'aléa de référence est « fort » :**

■ le principe général est l'interdiction ;

■ sont toutefois autorisées, sous réserve du respect de prescriptions adaptées, les constructions nouvelles dans le cadre d'opérations de renouvellement urbain avec réduction de la vulnérabilité ;

■ des exceptions peuvent être autorisées si certaines conditions sont remplies (voir partie 5.2.5).

#### **Lorsque l'aléa de référence est « très fort » :**

■ le principe général est l'interdiction ;

■ sont toutefois autorisées, sous réserve du respect de prescriptions adaptées, les constructions nouvelles dans le cadre d'opérations de renouvellement urbain avec réduction de la vulnérabilité.

#### **Lorsque l'aléa de référence est « très fort aggravé » :**

■ le principe général est l'interdiction. Toute construction nouvelle est interdite.

### **5.2.4. Les zones non urbanisées**

#### **Dans ces zones, lorsque l'aléa de référence est « faible » ou « moyen » :**

■ le principe général est l'interdiction ;

■ peuvent être toutefois autorisés<sup>23</sup>, sous réserve du respect de prescriptions adaptées, notamment l'absence de locaux de sommeil ou de zones de regroupement, et en veillant à une réduction globale de la vulnérabilité :

➤ les projets de relocalisation réduisant la vulnérabilité globale du territoire (construction nouvelle après démolition d'un bien en zone plus exposée - selon une approche multi-aléas - que la zone de construction nouvelle) ;

➤ les constructions, ouvrages, aménagements et exploitations affectées à un service public et indispensables à l'exécution de ses missions ;

➤ les constructions nécessaires aux activités agricoles, pastorales et forestières ;

---

<sup>22</sup> Les opérations de renouvellement urbain sont des opérations destinées à requalifier et renouveler (via des démolitions/reconstructions) une zone déjà urbanisée. Une telle opération peut être de taille variable : à l'échelle d'un quartier, d'un groupe de parcelles, voire, dans certains cas, d'une seule parcelle. Une opération de renouvellement urbain peut couvrir tout type de zone urbanisée : des bâtiments à usage d'habitation, des bâtiments commerciaux, des bâtiments industriels (zones industrielles), des activités économiques, etc.

Un renouvellement urbain avec une réduction globale de la vulnérabilité peut, dans certains cas, conduire à une densification et donc à une augmentation locale de la population. Cette densification est alors à envisager dans des proportions limitées, dans le cadre d'opérations de renouvellement sur un périmètre relativement large (quartier ou groupe de parcelles) et s'accompagne de compensations permettant d'assurer que la vulnérabilité est globalement réduite.

<sup>23</sup> Les ouvrages et installations autorisés par les dispositions d'urbanisme relatives à la loi Montagne doivent bien sûr être également conformes à ces dernières.



- les équipements sportifs, liés notamment à la pratique du ski et de la randonnée si aucune solution alternative moins à risque n'est possible ;
  - la restauration ou la reconstruction d'anciens chalets d'alpage ou de bâtiments d'estive, sous réserve que le bâtiment existant n'ait pas été sinistré par une crue torrentielle, ainsi que les extensions limitées de chalets d'alpages ou de bâtiments d'estive existants.
- des exceptions peuvent être autorisées si certaines conditions sont remplies (voir partie 5.2.5).

#### Lorsque l'aléa de référence, est « fort » ou supérieur :

- le principe général est l'interdiction. Toute construction nouvelle est interdite.

### 5.2.5. Les exceptions à l'interdiction dans les PPRi de cours d'eau torrentiels

Le PPR peut inclure des exceptions qui font l'objet de demandes formalisées de la collectivité lors de son élaboration. Le préfet peut autoriser, avec prescriptions adaptées, les demandes d'exception vérifiant *a minima* l'ensemble des conditions suivantes :

[1]. Le secteur, objet de la demande d'exception, est porteur d'un projet d'aménagement :

- **essentiel** à l'échelle de l'intercommunalité compétente pour le projet d'aménagement ;
- et **sans solution d'implantation alternative** raisonnable à cette échelle, ou pour lequel les éventuelles solutions d'implantations alternatives présentent des inconvénients significativement supérieurs à ceux d'une implantation sur ce secteur, notamment au regard des risques naturels.

[2]. La demande d'exception ne présente pas de **risques excessifs** auxquels il ne peut être remédié par des prescriptions. Il est ainsi possible de définir des prescriptions, reprises par le règlement du PPRi, permettant *a minima* de garantir :

- le libre écoulement des eaux, et la conservation, la restauration ou l'extension des zones de régulation du transport solide ;
- la sécurité des personnes et des biens et un retour rapide à une situation normale, au regard du niveau d'intensité maximal identifié sur la zone pour le(s) scénario(s) de référence ;
- la bonne sensibilisation des populations par le projet, afin de partager la culture du risque ;
- des dispositions adaptées en matière d'alerte et de gestion de crise, prenant en compte les délais prévisibles d'alerte et de secours adaptées aux caractéristiques de l'aléa ;

[3]. Le projet, éventuellement complété par des actions à une échelle plus large, réduit la **vulnérabilité globale « multi-aléas »** à l'échelle du bassin de vie.

[4]. Si le secteur objet de la demande d'exception est situé **en aléa de référence de niveau « fort » et dans une zone urbanisée hors centre urbain** :

- le projet doit être dans une zone protégée par un **système d'endiguement**, ou par **des aménagements hydrauliques**<sup>24</sup>, dont le niveau de protection est au moins égal à l'évènement de référence du PPRi. Le système d'endiguement, ou les aménagements hydrauliques, doivent ainsi être dimensionnés pour contenir et résister à l'évènement de référence (avec un risque résiduel inférieur à 5 %), et il doit avoir fait l'objet de descriptions, de diagnostics ou d'études détaillées permettant de conclure qu'il est sûr jusqu'au niveau de protection qui lui a été assigné<sup>25</sup> ;
- l'environnement du système d'endiguement, ou des aménagements hydrauliques, doit être bien connu (aléas naturels, scénarios et hypothèses pris en compte pour les dimensionnements, etc.) ;
- le système d'endiguement ou les aménagements hydrauliques, leur structure et leur fonctionnement doivent être bien documentés (constituants, génie civil, fondation, dimensionnements, sensibilité aux différents modes de défaillance et de rupture, etc.) ;

<sup>24</sup> Les aménagements hydrauliques mentionnés dans cette partie sont les aménagements hydrauliques au sens de l'article R. 562-18 du code de l'environnement.

<sup>25</sup> Pour les projets en zone non urbanisée ou en centre urbain, le niveau de protection du ou des éventuels systèmes d'endiguement ou de protection (protection de berge, plage de dépôts, etc.), leurs conditions d'entretien et d'exploitation, ainsi que la connaissance des écoulements des eaux pour un évènement exceptionnel peuvent être appréciés, mais ne constituent pas *stricto sensu* une condition nécessaire pour autoriser la demande d'exception.

- le responsable du système d'endiguement ou des aménagements hydrauliques doit apporter des garanties permettant de conclure que son **exploitation** et sa **surveillance** sont assurées en toutes circonstances par des moyens et une organisation adaptée aux accidents majeurs qui pourraient survenir, conformément à l'arrêté du 8 août 2022<sup>26</sup> ;
- les **sur-aléas** résultant des différents scénarios de défaillance doivent être connus et cartographiés (et pris en compte dans la carte d'aléa de référence) ;
- la commune doit être dotée d'un **plan communal de sauvegarde** détaillant les mesures d'alerte et de mise en sécurité des personnes en cas de rupture ou de dépassement des ouvrages.

Il convient de signaler à l'autorité compétente en matière de plan local d'urbanisme ou de document en tenant lieu, qu'il lui revient d'**adresser la demande d'exception au préfet sous la forme d'une délibération motivée**, au plus tard à l'occasion de la consultation des organes délibérants de la collectivité prévue aux articles R. 562-7 et R. 562-10 du code de l'environnement.

Il est également recommandé que la demande d'exception soit accompagnée d'un avis de l'autorité compétente en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations. Cette demande serait alors à annexer au registre d'enquête dans les conditions prévues par l'article R. 123-13 du code de l'environnement.

Le préfet se prononce après avoir examiné la demande au regard des éléments d'appréciation fournis pour justifier le respect de chacun des points présentés précédemment.

**Si cette demande fait l'objet d'un avis favorable, le règlement du PPRi précisera la nature des exceptions autorisées et les prescriptions associées. Le zonage réglementaire correspondant sera toutefois toujours affiché comme répondant à un principe général d'interdiction.**

### 5.2.6. Les zones non directement exposées à l'aléa de référence

Il est possible de réglementer des **zones non directement exposées** à l'aléa, mais « où des constructions, des ouvrages, des aménagements ou des exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux » (article L. 562-1-II-2° du code de l'environnement). Pour les phénomènes torrentiels, cela pourrait s'appliquer à des zones sensibles dans des bassins versants torrentiels où certains aménagements pourraient, par terrassement ou imperméabilisation, réduire le temps de concentration des écoulements, accroître les volumes ou les débits écoulés, provoquer des ravinements, des reprises d'érosion ou toute autre déstabilisation augmentant les transports solides.

### 5.2.7. Le cas particulier des zones en aléa de niveau « très fort aggravé »

Au-delà de la procédure du PPRi *stricto sensu*, il est recommandé d'apporter une attention particulière aux enjeux exposés à des aléas de niveau « très fort aggravé » au regard de la menace grave pour les vies humaines dans ces zones, y compris dans des bâtiments renforcés. Il convient notamment d'étudier si la mise en œuvre des mesures « acquisition amiable de biens exposés à un risque naturel majeur » et "expropriation de biens exposés à un risque naturel majeur" du guide relatif à la mobilisation du FPRNM pourrait y être envisagée.

## 5.3. Le règlement

Le règlement précise les règles s'appliquant à chaque zonage réglementaire. Il définit les conditions de réalisation de tout projet, les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui incombent aux particuliers ou aux collectivités, mais aussi les mesures applicables aux biens et activités existants. Les dispositions réglementaires ont pour objectifs, d'une part d'améliorer la sécurité des personnes, d'autre part, de réduire vulnérabilité des biens et des activités.

### 5.3.1. La structuration du règlement

Pour tenir compte des différentes mesures définies par l'article L. 562-1 du code de l'environnement, il est préconisé de structurer le règlement en quatre titres :

1. la portée du PPRN, dispositions générales ;
2. la **réglementation des projets** : mesures s'appliquant aux projets établis à la demande des pétitionnaires, qu'il s'agisse de projets nouveaux ou de projets sur de l'existant ;

<sup>26</sup> Le système d'endiguement ou les aménagements hydrauliques doivent (évidemment) être en conformité avec la réglementation en vigueur (notamment celle relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques).

3. les **mesures de prévention, de protection et de sauvegarde** : mesures d'ensemble non liées à un projet particulier mais dont l'objet est d'assurer la sécurité des personnes et de faciliter l'organisation des secours ;

4. les **mesures sur les biens et les activités existants** : mesures imposées ou préconisées et réalisées par les particuliers, les exploitants ou les utilisateurs à la demande de l'État.

## 5.3.2. Rappel de quelques principes généraux

### 5.3.2.1. La forme

Il est important que le règlement soit rédigé en utilisant le présent. La rédaction d'une mesure du règlement doit, dans tous les cas, rester précise, compréhensible et vérifiable.

### 5.3.2.2. La compatibilité entre les phénomènes

En présence de différents types de phénomènes, il convient de veiller à ce que les mesures prescrites au titre d'un type de phénomène soient compatibles avec les mesures prescrites au titre des autres types de phénomènes, et, de manière générale, ne soient pas susceptibles d'aggraver les aléas relatifs à d'autres phénomènes.

Dans le cas de PPRN multirisques, cette vigilance est grandement facilitée. Lorsque des zones sont soumises à plusieurs types de phénomènes, le service chargé de l'élaboration du PPRN veille à retenir la présentation la plus claire possible pour les pétitionnaires ou instructeurs :

- si le nombre de combinaisons différentes entre plusieurs types de zonages réglementaires est réduit, il est souvent préférable de faire le travail de synthèse au moment de l'élaboration du PPRN. Dans ce cas, toutes les mesures applicables vis-à-vis de chaque phénomène sont regroupées et synthétisées en une seule fiche, ou chapitre, adapté(e) à chaque combinaison de zonages réglementaires rencontrée ;
- si le nombre de combinaisons est élevé, il est préférable que le règlement du PPRN soit organisé en fiches ou chapitres séparés et spécifiques à chaque type de phénomènes. Le soin de faire la synthèse et la combinaison des différentes règles applicables est alors laissé au pétitionnaire et au service instructeur, au moment de la conception et de l'instruction de chaque projet.

### 5.3.2.3. L'identification d'obligations de résultats plutôt que de solutions techniques

Différentes solutions techniques peuvent permettre d'atteindre un objectif de prévention. Il n'est ainsi pas toujours possible d'arrêter le choix optimal sans disposer de l'ensemble des paramètres liés au projet. Aussi, chaque fois que possible<sup>27</sup> le règlement du PPRi fixe le résultat à atteindre en laissant la liberté des solutions techniques au maître d'ouvrage, au propriétaire ou à l'aménageur concerné, dans une logique d'objectif de performance.

Une étude préalable au projet peut ainsi être prescrite afin de définir ses conditions de réalisation, d'utilisation ou d'exploitation. La nature des résultats de cette étude est définie précisément par le règlement du PPRi.

Compte tenu des textes réglementaires en vigueur, cette étude ne doit pas être fournie à l'instructeur du permis de construire. En revanche, le règlement du PPRi peut demander la fourniture d'une attestation, établie par l'architecte du projet ou par un expert, certifiant que cette étude a été réalisée et constatant que le projet prend en compte ces conditions au stade de la conception (article R. 431-16 du code de l'urbanisme). La prise en compte des résultats d'une telle étude relève de la responsabilité du maître d'ouvrage et du constructeur. Elle peut être contrôlée par la collectivité chargée de l'ADS (application du droit des sols) pendant les travaux ou à leur achèvement (article R. 462-7 du code de l'urbanisme).

### 5.3.2.4. La reconstruction après sinistre

La reconstruction après sinistre peut être interdite dans le cadre d'un PPRN. Cette interdiction fondée sur l'article L. 111-3 du code de l'urbanisme constitue cependant une atteinte forte au droit de propriété. Il est recommandé de la réserver aux cas exceptionnels et aux sinistres causés par l'aléa traité par le PPRN. L'interdiction de reconstruire à l'identique après un sinistre ne concernera pas uniquement le cas d'une destruction totale du bâti : cela est également susceptible d'empêcher la réalisation de travaux mineurs. Ce choix devra être donc soigneusement justifié dans la note de présentation. Des nuances entre reconstruction totale ou quasi-totale (définie, par exemple, comme une reconstruction dont l'ordre de grandeur du coût dépasse 50 % d'une reconstruction à l'identique) et reconstruction partielle (définie, par exemple, comme une reconstruction dont l'ordre de grandeur du coût est inférieur à 50 % d'une reconstruction à

<sup>27</sup> Ce type de rédaction est particulièrement adapté pour les règles de construction et pour les mesures sur les biens et activités existants.

l'identique) peuvent être apportées dans le règlement.

### 5.3.2.5. Les projets et travaux de réduction de la vulnérabilité

En toute zone, les projets et travaux de réduction de la vulnérabilité, sans augmentation de population (par exemple, les surélévations pour la création d'espaces refuges dans le cas de constructions existantes ne présentant pas de plancher hors d'eau) ne doivent pas être interdits afin de ne pas figer l'existant dans un état de vulnérabilité, dès lors qu'ils sont compatibles avec la tenue du bâtiment en cas de survenue de l'évènement de référence.

L'intensité en aléa de niveau « très fort aggravé » est telle que l'hypothèse de tenue du bâtiment sera rarement vérifiée.

### 5.3.2.6. Conseils et guides

Le guide « *Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel* », MEDDTL, 2010, donne des compléments et des conseils pour détailler les mesures usuelles des PPRi des cours d'eau torrentiels et pour proposer des réponses architecturales ou constructives adaptées.

On pourra aussi se référer au guide : « *Recommandations - Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels* » - VKF AEIA, établissements cantonaux d'assurance (Suisse) - 2005.

## 5.3.3. La réglementation des projets

### 5.3.3.1. Les notions et règles générales fréquemment utilisées dans les règlements de PPRi torrentiels

#### 5.3.3.1.1. Les façades exposées, façades latérales et façades abritées

Les règlements de PPRi relatifs aux cours d'eau torrentiels peuvent utiliser les notions de « façade exposée », de « façade latérale » ou de « façade abritée » (comme les règlements de PPRN chutes de blocs ou avalanches).

Ces notions ne peuvent exister que pour des bâtiments implantés sur une pente suffisante pour que le phénomène, arrivant par l'amont, se propage facilement vers l'aval sans pouvoir complètement entourer le bâtiment. Si le phénomène peut entourer le bâtiment, il n'existe pas de façade abritée. L'ordre de grandeur de la pente minimale nécessaire est d'environ 2 %. Cette notion existera donc souvent en bordure de torrents et rarement en bordure de rivières torrentielles (qui nécessitent donc des règlements différents).

Ces notions, simples dans beaucoup de cas, méritent d'être explicitées pour les cas complexes :

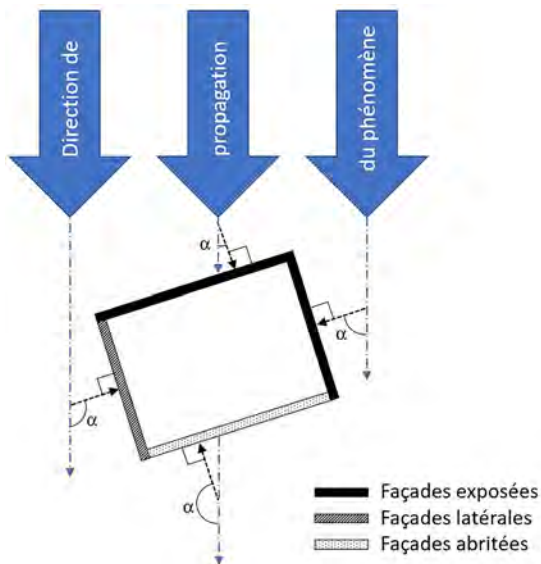
- la direction de propagation du phénomène est généralement celle de la ligne de plus grande pente (en cas de doute, la carte d'aléa doit permettre de définir sans ambiguïté le point de départ ainsi que la nature et la direction des écoulements prévisibles) ;
- elle peut s'en écarter significativement, du fait de la dynamique propre au phénomène (élargissement des trajectoires dans les zones d'étalement, etc.), d'irrégularités de la surface topographique, de l'accumulation locale d'éléments transportés (matériaux, blocs, bois, etc.) constituant autant d'obstacles déflecteurs, ou même de la présence de constructions à proximité pouvant aussi constituer des obstacles déflecteurs.

C'est pourquoi, sont considérées comme :

- exposées, les façades pour lesquelles  $0^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$  ;
- latérales, les façades pour lesquelles  $80^\circ < \alpha \leq 115^\circ$  ;
- abritées, les façades pour lesquelles  $115^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  ;

$\alpha$  étant l'angle entre la direction de propagation du phénomène et l'orientation de la façade (par exemple, quand la façade est perpendiculaire à la direction de propagation du phénomène, alors  $\alpha = 0$ ). Le mode de mesure de l'angle  $\alpha$  est schématisé page suivante :





**Illustration 39 :** schéma de définition des façades exposées, latérales ou abritées selon l'angle  $\alpha$  (entre la direction de propagation et l'orientation des façades).

Toute disposition architecturale particulière ne s'inscrivant pas dans ces schémas de principe, devra être traitée dans le sens de la plus grande sécurité.

Il peut arriver qu'un site soit concerné par plusieurs directions de propagation : toutes sont à prendre en compte.

Il peut arriver que des terrassements inadaptés contrarient le bon écoulement du phénomène vers l'aval et le ramène, au moins en partie, vers des façades potentiellement abritées. Il est conseillé d'intégrer dans le règlement du PPRi des prescriptions pour tous les projets nouveaux afin d'interdire ce type de terrassement.

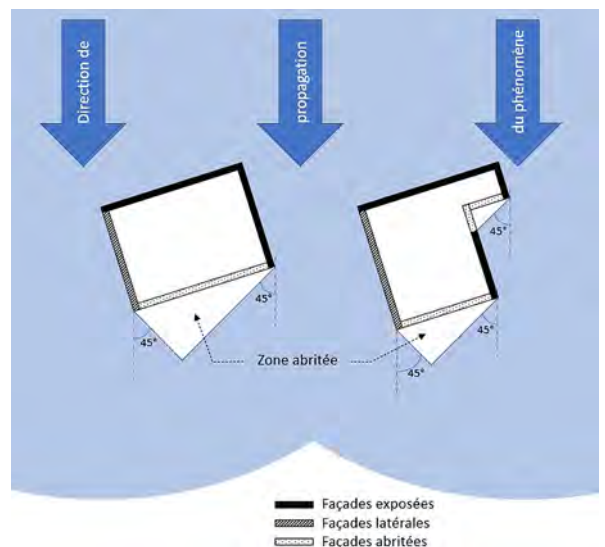
### 5.3.3.1.2. La zone abritée

Les façades exposées aux phénomènes décrits ci-dessus (écoulements avec charges solides) peuvent assurer un abri pour une zone située en aval, représentée sur les schémas ci-contre :

Cette zone abritée n'existe que si les façades exposées et latérales respectent les mesures de renforcement définies par le règlement du PPRi.

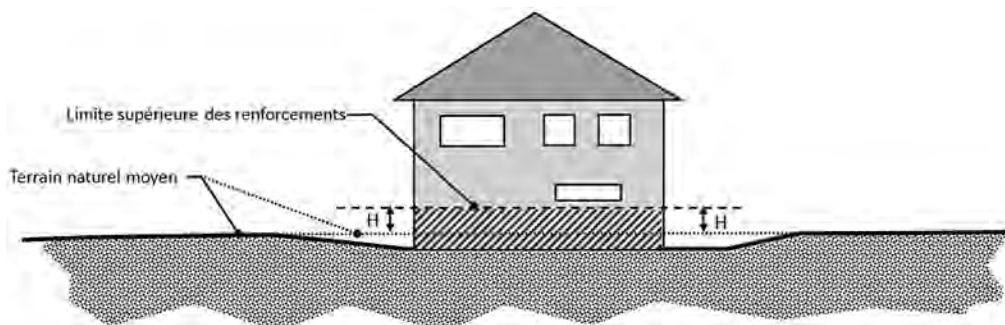
### 5.3.3.1.3. La hauteur par rapport au terrain naturel

Les règlements de PPRi relatifs aux cours d'eau torrentiels peuvent s'appuyer sur la notion de « hauteur par rapport au terrain naturel » (comme les règlements de PPRN chutes de blocs ou avalanches). Cette notion, simple dans beaucoup de cas, mérite d'être explicitée pour les cas complexes.



**Illustration 40 :** schéma de définition des zones abritées.

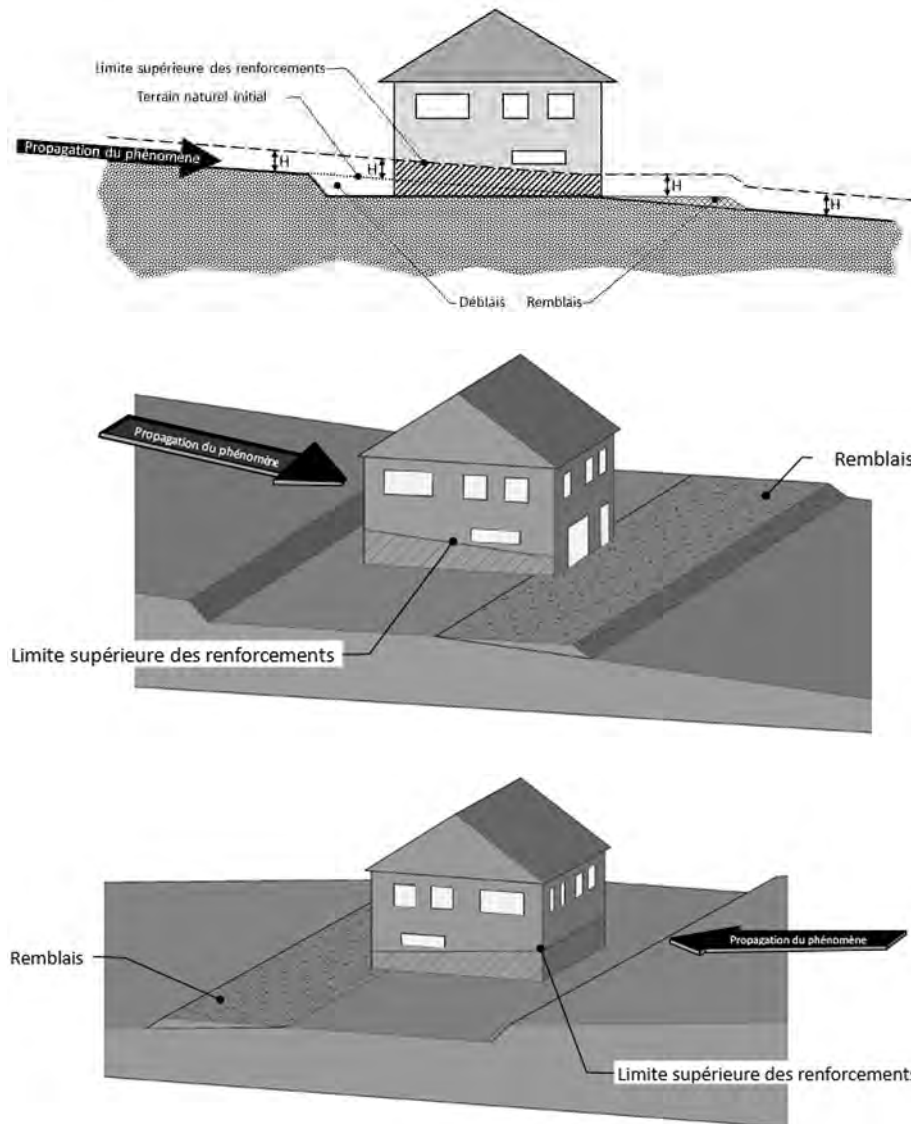
Les irrégularités locales de la topographie ne sont pas forcément prises en compte si elles peuvent facilement être comblées ou effacées par les écoulements. Dans le cas de petits thalwegs ou de petites cuvettes, la cote du terrain naturel est à considérer comme la cote des terrains environnants, conformément au schéma ci-dessous :



**Illustration 41 :** schéma permettant de déterminer la limite supérieure des renforcements et/ou des surélévations de plancher, en cas de petits talwegs ou petites cuvettes.

En cas de terrassements en déblai, la hauteur doit être mesurée par rapport au terrain naturel initial.

En cas de terrassements en remblais, ceux-ci ne peuvent remplacer le renforcement des façades exposées que s'ils sont attenants à la construction et s'ils ont été spécifiquement conçus pour cela. Dans le cas général, la hauteur à renforcer et les ouvertures éventuelles seront mesurées depuis le sommet des remblais.



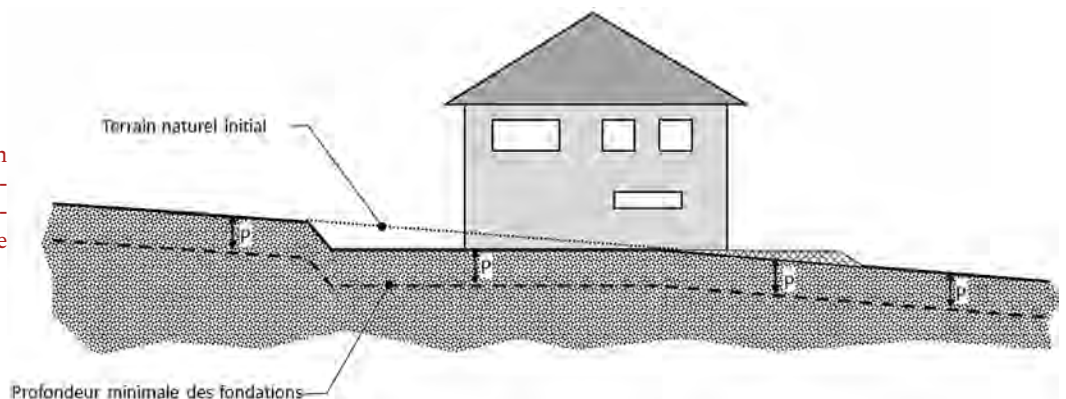
**Illustration 42 :** schémas permettant de déterminer la limite supérieure des renforcements, en cas de terrassements en déblais ou remblais.

#### 5.3.31.4. Les niveaux de fondation

Les règlements de PPRi de cours d'eau torrentiels peuvent définir une profondeur minimale des fondations (P). C'est une profondeur à mesurer, conformément au schéma ci-dessous :

- depuis le niveau du terrain naturel lorsqu'il n'a pas été remanié ;
- depuis le niveau final en cas de terrains décaissés (déblais) ;
- depuis le niveau du terrain naturel initial en cas de remblais.

**Illustration 43 :** profil en long schématique représentant la manière de déterminer la profondeur minimale de fondation (P).



Pour chaque projet, le pétitionnaire définit le niveau réel de fondation :

- pour atteindre, au moins, la profondeur minimale de fondation (P) définie ici ;
- en tenant compte des autres règles de l'art concernant les fondations (données et études géotechniques, mise hors gel, prévention des aléas de retrait-gonflement des argiles, etc.).

### 5.3.3.2. Exemples indicatifs de formulations pour les règlements

#### 5.3.3.2.1. En zones rouges

ZONE ROUGE n° ...

#### **OCCUPATIONS ET UTILISATIONS DU SOL**

Les projets de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle, sont interdits à l'exception des projets listés ci-dessous.

1. Sont autorisés s'ils n'augmentent pas les risques, n'en créent pas de nouveaux ou ne conduisent pas à une augmentation de la population exposée :

1.1. les travaux d'entretien et de gestion courants des bâtiments implantés antérieurement à l'approbation du PPRN (notamment les aménagements internes, les traitements de façade et la réfection des toitures) ;

1.2. les travaux obligatoires pour la mise en conformité aux normes réglementaires ;

1.3. les projets de nature à améliorer la sécurité des personnes, à réduire la vulnérabilité des biens ou à réduire les aléas ;

1.4. les clôtures transparentes à plus de 75 % aux écoulements.

2. Sont autorisés s'ils n'augmentent pas les risques, n'en créent pas de nouveaux ou ne conduisent pas à une augmentation de la population exposée et si la vulnérabilité du bien est diminuée :

2.1. les reconstructions et réparations d'un bâtiment sinistré si le bâtiment n'a pas été entièrement détruit par une crue de cours d'eau torrentiel ;

2.2. les créations ou extensions de terrains à vocation sportive ou de loisirs, non couverts et sans hébergement ;

2.3. les constructions et installations directement liées à l'exploitation agricole, pastorale, forestière ou piscicole des terrains, et qui ne sont pas destinées à l'habitation ;

2.4. les ouvrages et infrastructures (routes, réseaux, stations d'épuration, captages d'eau, stations de pompage, etc.) nécessaires à l'exploitation et au fonctionnement des équipements de services publics ou à la mise en valeur des ressources naturelles. Pour ces projets, le maître d'ouvrage devra démontrer qu'il n'est pas raisonnablement possible d'installer le projet dans une zone moins exposée au risque et devra analyser, dans l'hypothèse d'une crue, les conséquences de l'éventuelle mise hors service des équipements susceptibles de subir des dommages et l'impact environnemental des dommages (pollution, etc.).

### 5.3.3.2.2. En zones bleues

	ZONE BLEUE n° ...
<p>(*) Les notions de façades exposées, latérales ou abritées, de cote H, de profondeur minimale de fondation P, de terrain naturel sont définis au paragraphe « Notions et règles générales fréquemment utilisées dans les règlements de PPRN torrentiels ».</p> <p>Les valeurs correspondantes sont estimées au regard de l'intensité de l'aléa sur la zone (et non au regard du niveau d'aléa), et doivent intégrer une marge de sécurité suffisante par rapport aux seuils utilisés pour définir les niveaux d'intensité.</p>	<p>Cote H(*) = 1,5 m</p> <p>Profondeur minimale de fondation P(*) = 2 m</p>
<p><b><u>OCCUPATIONS ET UTILISATIONS DU SOL</u></b></p> <p>1. Sont interdits :</p> <p>1.1. l'implantation de bâtiments destinés aux services de secours ;</p> <p>1.2. l'implantation des établissements recevant du public de catégorie J (structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées), de catégorie O (hôtels, pensions de famille, résidence de tourisme), de catégorie U (établissements sanitaires) ou de catégorie R (crèche, école maternelle, halte-garderie, jardin d'enfants), ainsi que des établissements pénitentiaires</p> <p>1.3. toute création ou extension de surface de camping.</p> <p>2. Sont autorisés, sans prescription :</p> <p>2.1. les travaux permettant de diminuer ou de ne pas augmenter la vulnérabilité de l'existant.</p> <p>3. Sont autorisés, avec, comme seules prescriptions, les mesures constructives définies dans le présent règlement :</p> <p>3.1. les constructions et installations directement liées aux exploitations agricoles, pastorales, forestières ou piscicoles.</p> <p>4. Les autres constructions sont autorisées sous réserve de l'application de l'ensemble des prescriptions définies dans le présent règlement.</p> <p><b><u>PRESCRIPTIONS CONCERNANT LES CONSTRUCTIONS NOUVELLES ET LES EXTENSIONS AU SOL DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES</u></b></p> <p><b><i>A. Les projets doivent respecter les mesures ci-dessous.</i></b></p> <p><u>Mesures d'urbanisme et/ou d'architecture</u></p> <p>5. Sous la cote H(*), les façades exposées et latérales(*) sont aveugles.</p> <p>6. Par dérogation à la mesure précédente, les accès au bâtiment peuvent être aménagés sous la cote H(*) et en façade exposée ou latérale(*), à condition que l'ensemble du bâtiment reste non vulnérable aux écoulements torrentiels (sas de protection, porte étanche et renforcée, ...).</p> <p>7. La cote du plancher du 1<sup>er</sup> niveau aménageable se situe au-dessus de la cote H (*).</p>	



8. Par dérogation à la mesure précédente et à condition que le bâtiment principal reste non vulnérable aux écoulements torrentiels jusqu'à la cote H(\*), que le bâtiment ait au moins un autre niveau situé au-dessus de la cote H(\*) et pouvant servir de refuge et que les équipements et aménagements du 1<sup>er</sup> niveau aménageable présentent une faible vulnérabilité aux inondations, la cote du plancher du 1<sup>er</sup> niveau aménageable peut se situer :

8.1. au niveau de la cote du plancher existant, pour les extensions limitées par rapport à l'existant ;

8.2. au niveau des voies d'accès, pour les constructions annexes à un bâtiment principal et destinées au garage de véhicules ;

8.3. au niveau des trottoirs, pour les halls d'immeubles ou pour les commerces ;

8.4 à une cote inférieure au terrain naturel si des contraintes techniques ou d'accessibilité le justifient.

9. Les parkings extérieurs peuvent être réalisés au niveau des voies d'accès ou du terrain naturel.

#### Mesures constructives

10. Sous la cote H(\*), les façades exposées et latérales(\*) sont renforcées pour résister à une pression de 30 kPa.

11. Le niveau de fondation est au moins à la profondeur minimale de fondation P(\*).

12. Les constructions et les fondations doivent être renforcées pour résister à des affouillements jusqu'au niveau de fondation, aux sous-pressions hydrauliques et à la saturation des terrains de fondation.

13. Sous la cote H(\*), les matériaux utilisés doivent résister ou être efficacement protégés en cas d'inondation ou de pénétration des eaux. Ils doivent aussi empêcher les remontées d'humidité vers les niveaux supérieurs.

14. Les matériels (électriques, équipements, ...) doivent être installés hors d'eau ou être efficacement protégés des écoulements, des flottants et des engravements.

***B. En complément des dispositions du A ci-dessus, d'autres solutions peuvent être proposées pour prendre en compte les particularités locales et la configuration des lieux. Les projets doivent alors respecter les mesures ci-dessous.***

15. Préalablement à son projet, le pétitionnaire doit faire réaliser une étude définissant les conditions de réalisation, d'utilisation ou d'exploitation pour que son projet garantisse la sécurité des personnes et des biens vis-à-vis des aléas définis dans cette zone par le PPRN. Lorsque le projet concerne un ou plusieurs bâtiments, l'étude doit en particulier définir les renforcements en façades et en fondations permettant de rendre ces bâtiments non vulnérables aux aléas de référence sur la zone (pas de dommages en façades ou en fondation, pas de pénétration des eaux dans le bâtiment). Ce type d'étude n'a pas vocation à faire évoluer la carte d'aléa du PPRN, sauf si elle montre la présence d'un risque non identifié ou sous-estimé, auquel cas il conviendra de procéder à une modification du plan.

16. Au moment du dépôt du permis de construire, le maître d'ouvrage remet à l'autorité compétente en matière d'urbanisme, une attestation établie par l'architecte du projet ou par un expert certifiant la réalisation de cette étude et constatant que le projet prend en compte ces conditions au stade de la conception.

### 5.3.4 Les mesures de prévention, protection et de sauvegarde

Pour plus de clarté dans le règlement, il est proposé de distinguer les mesures de protection et de sauvegarde, des autres mesures de prévention.

Les **mesures de prévention** ont, par exemple, pour objectif :

- l'amélioration de la connaissance des aléas par des études spécifiques ;
- la mise en place de systèmes de surveillance ou d'alerte ;
- l'information des populations ;
- la réduction des aléas via la réalisation de travaux sur les réseaux pour limiter le rejet d'eaux pluviales, la purge de roches instables, les travaux de prévention afin de réduire l'aléa à la source, les travaux permettant de réduire la vulnérabilité des enjeux existants, la modification des pratiques culturelles, etc.

Les **mesures de protection** visent la réduction des aléas par :

des techniques actives réduisant la magnitude du scénario de référence retenu, comme les travaux de correction torrentielle et de végétalisation des terrains dégradé (c.f. annexe 7.6) ;

des techniques passives permettant de réduire la probabilité d'atteinte et/ou d'intensité au niveau de l'enjeu, comme les merlons, les digues, etc.

l'entretien des ouvrages de protection.

Les **mesures de sauvegarde** portent sur la gestion de la sécurité publique en cas de sinistre et ont pour objectif d'éviter les accidents sur les personnes. Ces mesures peuvent conduire à :

la réalisation d'un plan communal ou intercommunal de sauvegarde ;

l'identification d'un espace refuge pour les établissements recevant du public ;

la définition de conditions d'utilisation des infrastructures ;

la préconisation d'étude de vulnérabilité.

### 5.3.5. Les mesures de réduction de la vulnérabilité des biens et activités existants

Les PPRN approuvés peuvent rendre obligatoires des mesures sur les biens existants exposés aux risques (L. 562-1 II. 4° du code de l'environnement). Dans le cas où un PPRN impose des études ou travaux de ce type, le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM) peut être mobilisé pour contribuer au financement de ces mesures, qui constituent un volet d'action important du PPRN.

Ces mesures visent l'adaptation, par des études ou des travaux de modification, des biens situés dans les zones réglementées par le PPRN au moment de son approbation, dans l'objectif de réduire leur vulnérabilité, c'est-à-dire les dommages potentiels associés. Elles peuvent imposer aux propriétaires, utilisateurs ou exploitants de prendre des dispositions relatives à tous types de bâtiments, d'ouvrages, d'espaces agricoles ou forestiers. Elles peuvent concerner l'aménagement de ces biens, leur utilisation mais aussi leur exploitation.

#### 5.3.5.1. La hiérarchisation des mesures

Les mesures liées à la réduction de la vulnérabilité des biens peuvent être hiérarchisées en fonction de leur finalité :

- la sécurité des personnes (espaces refuges, travaux de consolidation des structures, la suppression d'ouvertures sur les murs exposés, etc.) ;
- la limitation des dommages aux biens (utilisation de matériaux plus résistants, déplacement des installations les plus sensibles, etc.) ;
- le retour à la normale (recours à des matériaux faciles à nettoyer ou à remplacer, etc.).

Les mesures doivent également être classées en fonction des catégories d'enjeux auxquels elles s'adressent : maisons individuelles, entreprises, locaux commerciaux, établissements recevant du public, etc.

Il doit être précisé clairement dans le règlement :

- la personne à qui incombe la mesure ;
- son caractère **obligatoire** ou seulement **recommandé** ;

- le délai imposé pour la réalisation de la mesure obligatoire (qui ne peut être supérieur à **cinq ans**).

### 5.3.5.2. Le recours à la prescription d'un diagnostic du bâti

La prescription d'un diagnostic sur le bâti a vocation à être utilisée dans les cas suivants :

- le diagnostic de territoire ne permet pas de définir des mesures simples et adaptées ;
- pour les particuliers dans les zones très exposées où la sécurité des personnes est en jeu ;
- pour les cas d'exposition des bâtiments ou des installations les plus sensibles tels que les ERP, les établissements industriels ou commerciaux de plus de vingt salariés et les gestionnaires de réseau (pour ces derniers, en application de l'article 6 de la loi du 13 août 2004).

Le PPRi peut se limiter à prescrire un diagnostic de danger (sécurité des personnes) et/ou de vulnérabilité (sécurité des biens) qui définira les mesures applicables au bien existant. Il peut aussi définir un catalogue de mesures limitées et réalistes de réduction de la vulnérabilité (et le diagnostic permettra alors de déterminer quelles sont les mesures du catalogue les plus adaptées au bien concerné).

Dans la majorité des cas, les mesures prescrites étant simples et limitées, un auto-diagnostic réalisé par le propriétaire du bien suffit. Dans les cas plus complexes (en raison notamment de la spécificité de certains aléas ou pour toutes les installations sensibles), le recours à un spécialiste est à privilégier<sup>28</sup>.

### 5.3.5.3. Exemples

En plus des guides déjà cités au paragraphe 5.3.2.6, le « *guide de réduction de la vulnérabilité de l'habitat en zone de montagne au risque torrentiel* » - Parc Naturel régional du Queyras - juin 2017 contient aussi des exemples et fiches conseils utiles pour des actions de réduction de la vulnérabilité.

#### 5.3.5.3.1. Les fondations

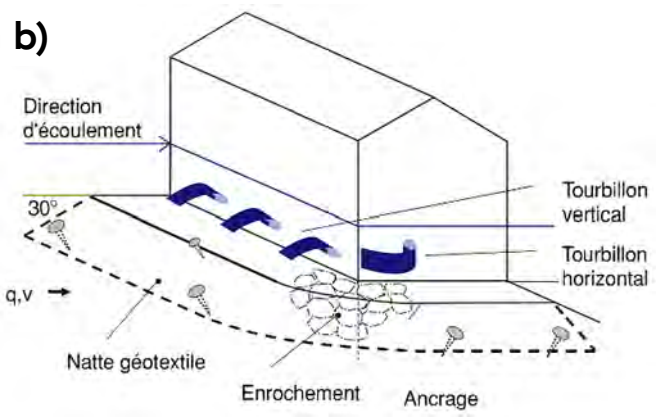
Dans les contextes torrentiels, les risques d'affouillements sont importants et de nombreuses destructions totales ou partielles de bâtiments proviennent de fondations insuffisantes (peu profondes, peu solides). Une action prioritaire de réduction de la vulnérabilité sur du bâti ancien peut souvent consister en des renforcements de fondations, soit par reprise en sous-œuvre soit, lorsque le travail en sous-œuvre n'apparaît pas possible, par renforcement par banquette ferrailée ou par protection autour du bâtiment.



**Illustration 44** : exemples d'affouillement des fondations (en particulier au niveau des angles) ©Région autonome Vallée d'Aoste.

<sup>28</sup> Il est cependant encore parfois difficile d'identifier les professionnels compétents pour réaliser ce type de diagnostic.





**Illustration 45** : exemples de renforcements ou de protection des fondations.

a) Renforcement en pied d'un mur en maçonnerie traditionnelle, par une banquette ferrillée (©SEPIA Conseils).

b) Protection des fondations contre l'affouillement (©assurances suisses VKF-AEAI).

### 5.3.5.3.2. Les chaînages et les renforcements

Les liaisons et chaînages des constructions sont obligatoires pour les bâtiments neufs (notamment au titre de la réglementation parasismique). Ces dispositions, qui assurent la rigidité et la solidité du bâtiment, présentent aussi un grand intérêt pour des bâtiments soumis à des aléas torrentiels (en cas d'affouillement partiel des fondations, en cas de pressions sur les façades, etc.).



**Illustration 46** : destruction des habitations de Ville Vieille (©fonds Paul Graber).



**Illustration 47** : bâtiment avec liaisons et chaînages, ayant subi un affouillement important sans dislocation de la structure (©CEMAGREF DR).



**Illustration 48** : maison sans liaison ni chaînage, disloquée par des affouillements sous les fondations (source : ONF-RTM).





**Illustration 49** : réalisation de liaisons lors de la réhabilitation d'un bâtiment ancien (©SEPIA Conseils).



**Illustration 50** : maison renforcée par contreforts et chaînages externes, dans ce cas particulier, pour la prévention des aléas sismiques, mais solution valable aussi pour d'autres aléas (©ONF-RTM).

### 5.3.5.3.3. Le renforcement des façades

Sur des bâtiments anciens, des murs en pierre sèche ou hourdie à la chaux sont très peu résistants aux chocs ou aux poussées horizontales. Des murs plus récents en parpaing présentent une meilleure résistance mais ne sont pas suffisants pour résister à des pressions de 20 ou 30 kPa, fréquemment atteintes lors des crues de cours d'eau torrentiels.

Des renforcements de façades sont possibles sur des bâtiments anciens (en veillant aussi à la bonne reprise des efforts par les murs de refends et/ou par les fondations du renforcement).



**Illustration 51** : façade endommagée par des impacts d'une crue torrentielle (©région autonome Vallée d'Aoste).



**Illustration 52** : reprise des maçonneries d'un bâtiment ancien (©SEPIA Conseils).

#### 5.3.5.3.4. Les ouvertures

Les ouvertures sur les façades exposées ou latérales constituent un point de fragilité évident du bâtiment. Au titre des mesures de réduction de vulnérabilité, il faut aussi envisager de déplacer, surélever ou d'obstruer ces ouvertures, de renforcer les portes conservées (solidité, étanchéité) ou de les protéger par un mur ou un sas extérieur.



**Illustration 53 :** pénétration de la crue par les vitrines du bâtiment (©Roberto Loat OFEG).



**Illustration 54 :** mur de protection pour une entrée en façade latérale (©Marc GIVRY).



## VI. LE DOSSIER DE PPRi

### Introduction

Le dossier de PPRi est l'aboutissement de la procédure d'élaboration du PPRi. Le présent guide n'a pas vocation à détailler l'ensemble du dossier, mais se focalise sur les aspects qui relèvent des cours d'eau torrentiels. Pour ce qui relève des dispositions générales, on se reportera aux différents guides publiés à la Documentation française ou disponibles auprès du ministère chargé de la prévention des risques et en particulier à la troisième partie du guide général et au « cahier de recommandations sur le contenu des PPRN ».

Un PPRN, et *a fortiori* un PPRN inondation des cours d'eau torrentiels, est constitué (R. 562-3 du code de l'environnement) :

- d'une **note de présentation**, qui explique et justifie les éléments du PPRN, et qui est accompagnée d'un ou plusieurs documents graphiques, et notamment la carte de synthèse de l'aléa de référence ;
- d'un **zonage réglementaire**, qui cartographie les niveaux de constructibilité du territoire au regard des risques prévisibles. Concrètement, le zonage réglementaire identifie les différents types de zones constructibles sous conditions (« zones bleues ») et de zones inconstructibles (« zones rouges ») ;
- d'un **règlement**, qui précise, pour chaque zone réglementée, le détail des règles applicables aux projets dans la zone. Ce règlement identifie aussi les mesures de prévention, protection et sauvegarde à prendre à différents niveaux.

### 6.1. La note de présentation

L'article R.562-3 du code de l'environnement définit le contenu de la note :

« Le dossier de projet de plan comprend :

*1° Une note de présentation indiquant le secteur géographique concerné, la nature des phénomènes naturels pris en compte et leurs conséquences possibles, compte tenu de l'état des connaissances, [...]. »*

Pour un PPRi de cours d'eau torrentiel, il est conseillé de traiter au moins les points ci-dessous.

#### 6.1.1. Le contexte de la prévention des risques

Le contexte général de la prévention des risques est présenté sommairement.

Concernant le contexte local de la prévention des risques et le cas particulier des PPRi « cours d'eau torrentiels », les démarches appliquées sur le territoire sont exposées et mises en perspective par rapport au futur PPRi, en particulier l'organisation locale prévue ou mise en place pour exercer la compétence sur la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI).

Concernant le PPRi, il convient de présenter et d'expliquer son rôle, ses principes et ses objectifs.

#### 6.1.2. La justification de la mise en œuvre du PPRi sur le territoire

Les raisons de la prescription du PPRi sont présentées. Elles s'appuient autant que possible sur des faits historiques, dont les crues constatées sur les cours d'eau torrentiels.

Les phénomènes naturels connus et pris en compte sont également présentés. Usuellement, les territoires soumis à des phénomènes torrentiels ont des reliefs marqués. Il peut être opportun de conduire l'élaboration d'un PPRN multirisques traitant des différents phénomènes potentiels sur la zone (glissement, chutes de blocs, avalanches, etc.).

#### 6.1.3. La présentation du territoire

Le territoire concerné par le PPRi est présenté de manière succincte. Les contextes géographiques, socio-économiques et environnementaux sont exposés.

Pour un PPRi de cours d'eau torrentiel, il est souvent utile de présenter aussi les contraintes liées au relief ou aux différents phénomènes naturels et qui ont influé sur l'occupation de l'espace et le développement du territoire.

## 6.1.4. Les aléas

### 6.1.4.1. L'aléa de référence

Le choix d'un (ou de plusieurs) scénario(s) de référence est un élément essentiel, qui dimensionne l'aléa de référence du PPRi. Il est particulièrement important de justifier celui (ou ceux) retenus. Ces explications sont complétées par des justifications du choix de la ou des méthodes retenues pour la qualification des aléas de référence correspondant. Les certitudes et les marges d'incertitude sont également présentées et expliquées afin que le public puisse en prendre la mesure.

Pour un PPRi de cours d'eau torrentiel, la carte de synthèse des aléas de référence est définie par l'étude d'un ou plusieurs scénarios. Pour chacun des cours d'eau étudié dans le PPRi, le rapport de présentation résume :

- les différents scénarios de référence pris en compte ;
- les éléments déterminants qui ont permis de mettre en évidence les sous-scénarios avec les tronçons ou les points de débordement, les cheminements et les emprises des débordements et, plus généralement, les éléments essentiels qui fondent la qualification des aléas de référence (y compris les modalités de caractérisation des niveaux d'aléas, les niveaux d'intensité et les probabilités d'atteinte) ;
- en particulier, la liste de l'ensemble des éléments anthropiques (localisation, description, etc.), avec une présentation de leurs défaillances possibles et une présentation des modalités de prise en compte dans la carte d'aléas de référence ;
- ce qui a été fait au titre des différentes approches (historique / hydrogéomorphologique / hydrologique - hydraulique) ;
- un effort de pédagogie particulier sera apporté sur les « sujets difficiles » (prise en compte des ruptures d'ouvrage, etc.).

Lorsque des études ou des approches approfondies ont été réalisées, elles sont restituées, principalement sous forme d'un rapport d'étude et de cartes spécifiques. Il peut s'agir de données, de traitements, d'analyses, de cartes d'intensité (et leurs critères sous-jacents : hauteurs, flottants, etc.), de cartes de probabilité d'atteinte, de cartes de synthèses ou de cartes par scénario de référence, etc.

Ce rapport et ces cartes sont inclus ou annexés au rapport de présentation.

## 6.1.5. Les enjeux

La note de présentation du dossier de PPRi présente l'étude des enjeux.

L'élaboration d'un diagnostic territorial et, en particulier, l'étude des enjeux existants ou à venir sur le territoire est une étape indispensable du PPRi. C'est sur la base de cette analyse du contexte local, croisée avec les résultats de la qualification des aléas de référence, que certains choix en matière de zonage et de règlement seront pris.

Les éléments relatifs aux modalités d'élaboration de la carte des niveaux d'urbanisation seront précisés.

Lorsque, conformément au paragraphe 5.2.5 du présent guide, la collectivité demande des exceptions au principe d'inconstructibilité sur certaines zones pour des projets essentiels, elle justifiera de l'opportunité de cette prise en compte. Le rapport de présentation rappellera les éléments essentiels de cette justification et renverra, si nécessaire, vers des annexes plus détaillées.

## 6.1.6. L'élaboration du règlement

### 6.1.6.1. Le zonage réglementaire

Les choix stratégiques conduisant à la délimitation du zonage sont précisés à partir des principes généraux définis par l'article L. 562-1 du code de l'environnement et de la prise en compte du contexte local du PPRi.

L'objectif général par zone est rappelé. Les critères conduisant aux délimitations, les choix et les adaptations issus de la concertation avec les collectivités sont explicités.

### 6.1.6.2. Le règlement

La pédagogie apportée à l'explication du règlement et de son élaboration est l'une des conditions d'acceptation et donc d'efficacité du PPRi.



La note de présentation explicite les termes de l'article L.562-1 du code de l'environnement et détaille l'objet du PPRi et les différents types de règles relatives : aux projets futurs (définition des conditions de réalisation, d'utilisation et d'exploitation), aux mesures de prévention, de protection et de sauvegarde et aux mesures sur les biens et activités existants.

Elle explique et justifie les principes ou spécificités des règlements de chacune des zones.

## 6.1.7. Les annexes

Les annexes comprendront, selon les cas et en tant que de besoin, tout ou partie des éléments ci-dessous.

### 6.1.7.1. Les cartes

#### 6.1.7.1.1. La carte informative des phénomènes naturels

Il est souvent opportun de traiter les risques des cours d'eau torrentiel à travers des PPRN multirisques. Tant que cela ne nuit pas à la lisibilité, il est souhaitable de représenter tous les phénomènes du territoire d'étude sur une seule carte informative.

Lorsque l'emprise du lit majeur des cours d'eau torrentiels est délimitée (cf. § 3.2.7.1, ci-dessus), cette information apparaît sur la carte des phénomènes (ou sur une carte spécifique).

Cette carte peut être réalisée au 1 : 25 000 sur fond IGN.

#### 6.1.7.1.2. La carte informative des phénomènes historiques

Selon les cas (plus ou moins grande quantité d'informations à faire figurer, lisibilité, ...), une carte des phénomènes historiques peut utilement compléter la carte informative des phénomènes naturels.

Cette carte peut être réalisée au 1 : 25 000 sur fond IGN.

#### 6.1.7.1.3. La carte informative des enjeux

Comme détaillé au chapitre enjeux du présent guide, cette carte fera apparaître :

- les enjeux incontournables (espaces urbanisés, centre urbain, espaces spécifiques à l'aléa torrentiel, etc.)
- éventuellement des enjeux ou éléments complémentaires (typologie du bâti, infrastructures et équipements particuliers comme les établissements sensibles ou ERP ou campings, etc.).

Cette carte peut être réalisée au 1 : 5 000 sur un fond cadastral (recalé géométriquement), avec le bâti le plus à jour possible.

#### 6.1.7.1.4. La carte des ouvrages de protection et des autres ouvrages hydrauliques

Une carte localisant avec précision les ouvrages de protection et les autres ouvrages interférant potentiellement avec les phénomènes torrentiels (ponts, dalots) complète très utilement l'information.

Il convient d'identifier les maîtres d'ouvrages et de dater la carte.

L'échelle et le fond de cette carte seront adaptés pour une bonne lisibilité, en fonction de la quantité d'information à traiter, classiquement entre le 1 : 10 000 sur fond IGN et le 1 : 5 000 sur fond cadastral.

#### 6.1.7.1.5. La carte des niveaux d'aléa

Les informations à faire apparaître sur la carte de synthèse des aléas de référence sont, pour chaque zone homogène :

- obligatoirement :
  - le niveau d'aléa ;
- si possible :
  - l'intensité et la probabilité d'atteinte ;
  - quand il y a lieu, l'existence ou non d'ouvrages de protection influant sur les aléas.

Pour une meilleure lisibilité, il est souhaitable de se limiter à une information synthétique (niveaux d'aléas et, éventuellement, présence d'ouvrages).

Le rendu optimal sera défini pour chaque PPRi.

Dans le cas de PPRN multirisques, la carte d'aléas doit aussi faire apparaître les autres types d'aléas (avalanches, chutes de blocs, glissements, ...). La superposition excessive d'informations sur une même carte nuit à sa lisibilité. Pour des PPRN multirisques, la principale carte d'aléa doit être une carte synthétique faisant apparaître tous les aléas. Si nécessaire, l'information principale donnée par la carte synthétique des aléas peut être complétée par d'autres cartes (mono aléa, avec mention de l'intensité et de la probabilité d'atteinte, avec mention des ouvrages de protection, etc.). Ces cartes plus détaillées ou avec plus d'information peuvent être données en annexes ou *via* des rapports d'études spécifiques.

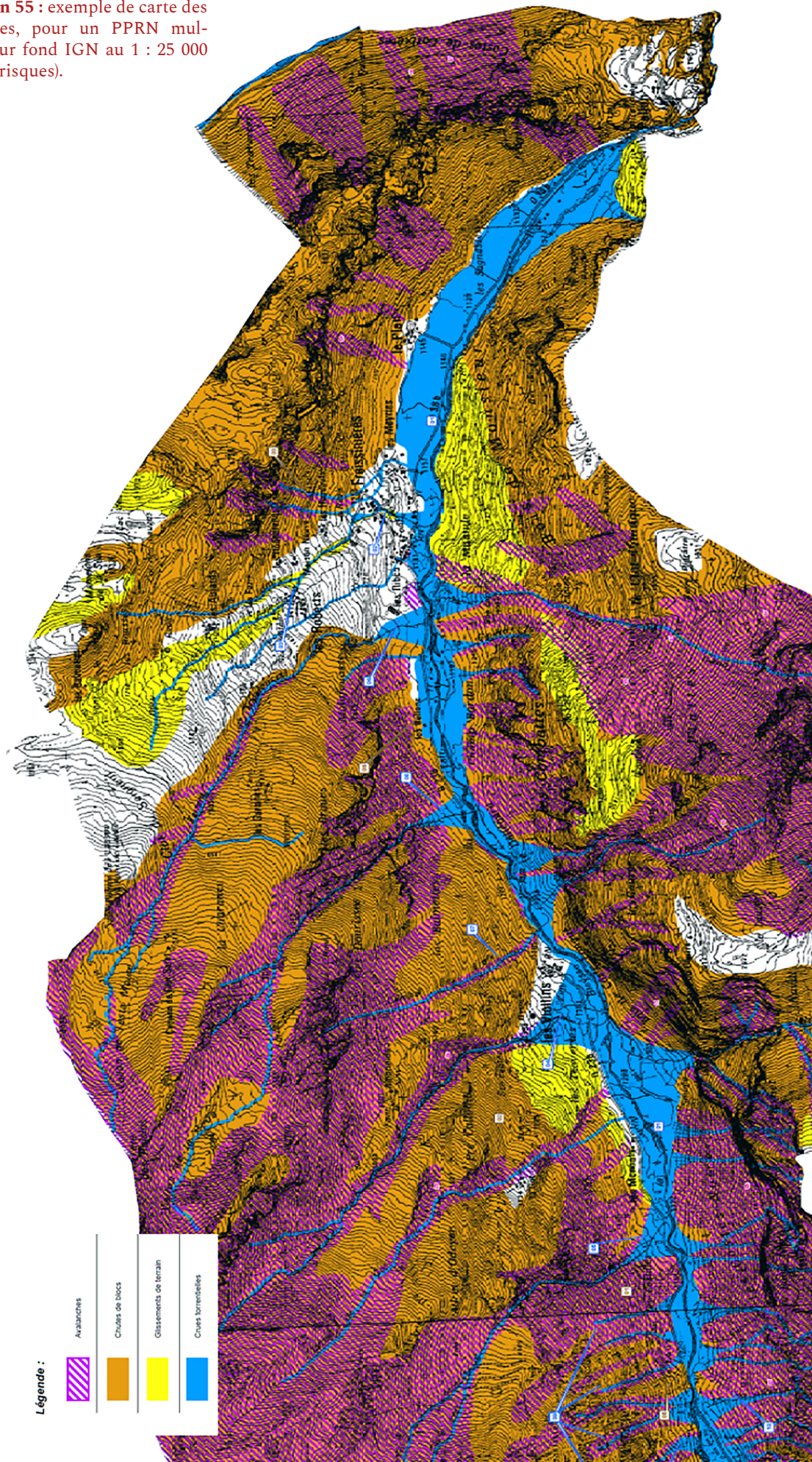
Cette carte peut être réalisée au 1 : 25 000 sur un fond cadastral ou orthophotographique. Il convient de vérifier la compatibilité des référentiels cartographiques entre les produits IGN et le cadastre de la DGI si ceux-ci sont utilisés conjointement, car il peut y avoir des décalages localement significatifs. Il est ainsi généralement préférable d'utiliser la BD Parcellaire plutôt que le cadastre DGI.

#### **6.1.7.2. Les compléments, rapports ou études**

Lorsque des études ou des approches approfondies ont été réalisées, elles seront restituées, soit en étant annexées au PPRi, soit en étant résumées dans ces annexes, soit en étant mentionnées dans la bibliographie.



**Illustration 55 :** exemple de carte des phénomènes, pour un PPRN multirisques sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques).





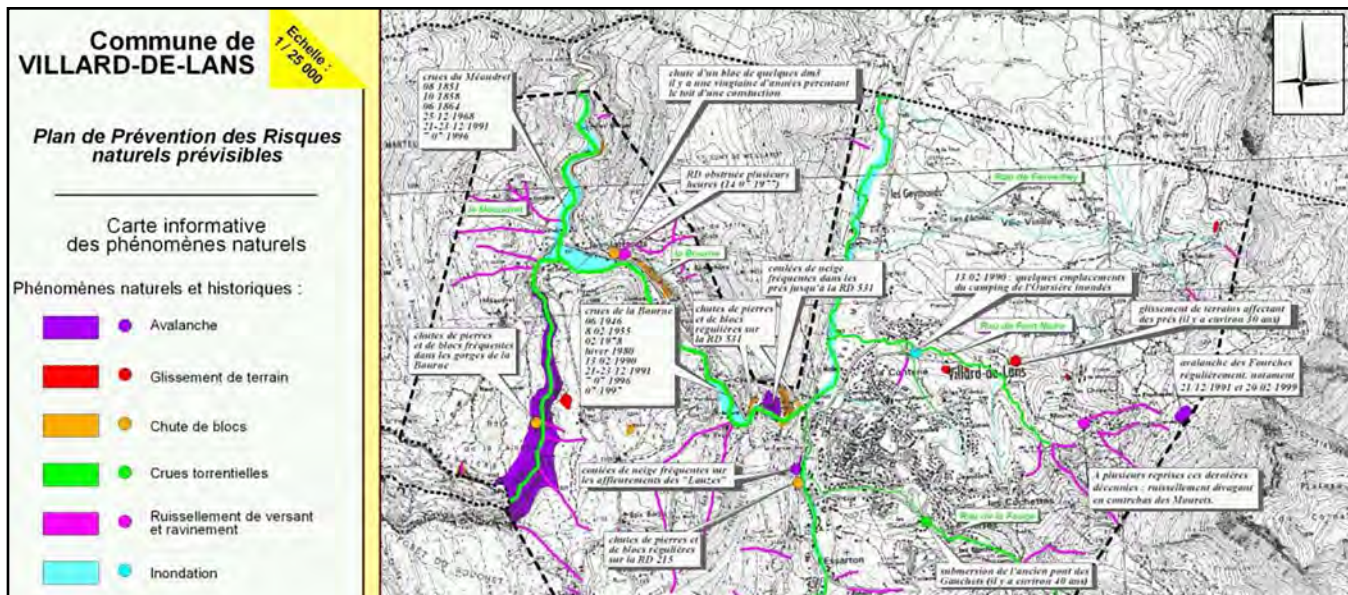


Illustration 56 : exemple de carte informative des phénomènes historiques, pour un PPRN multirisques sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques).

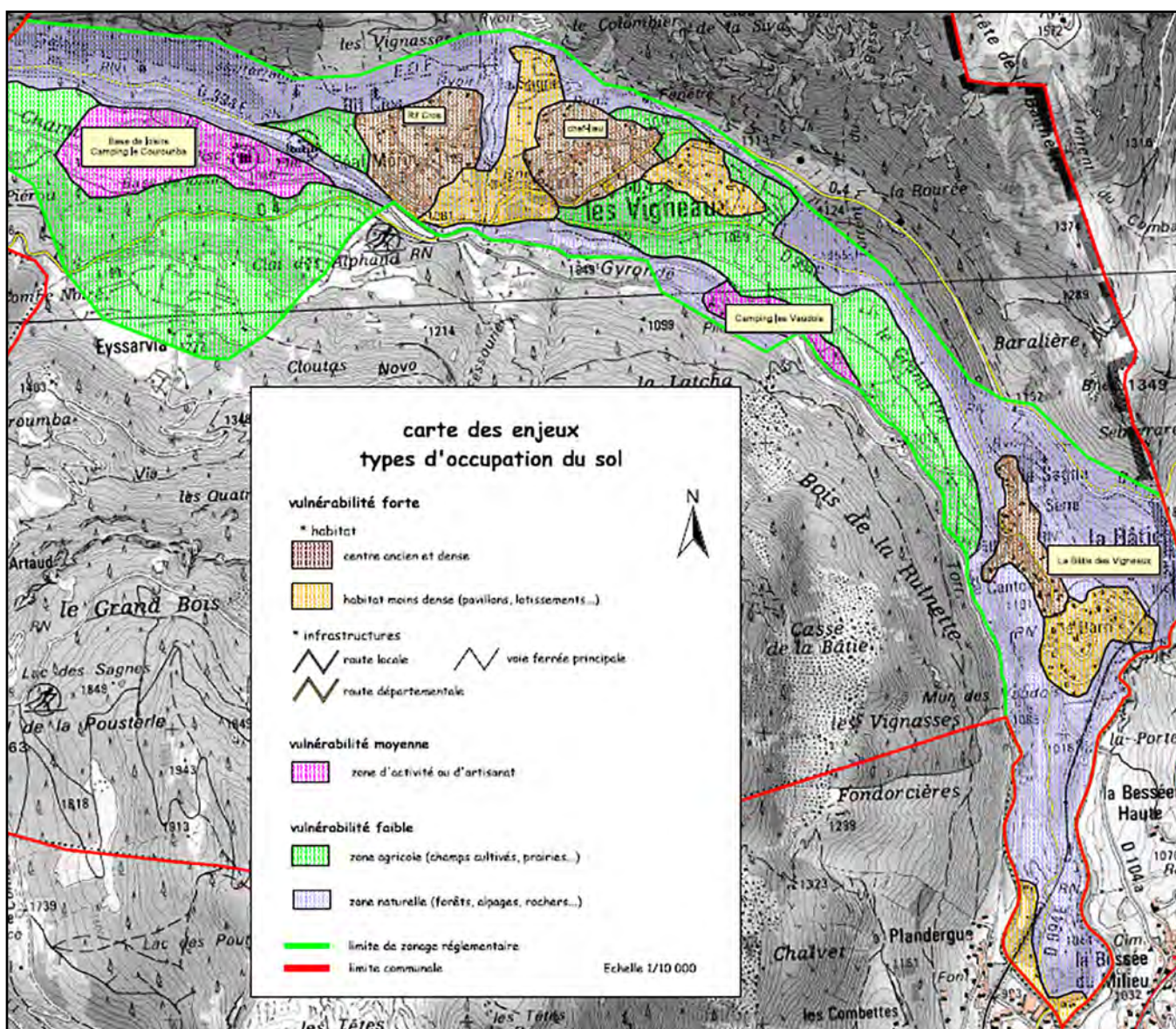
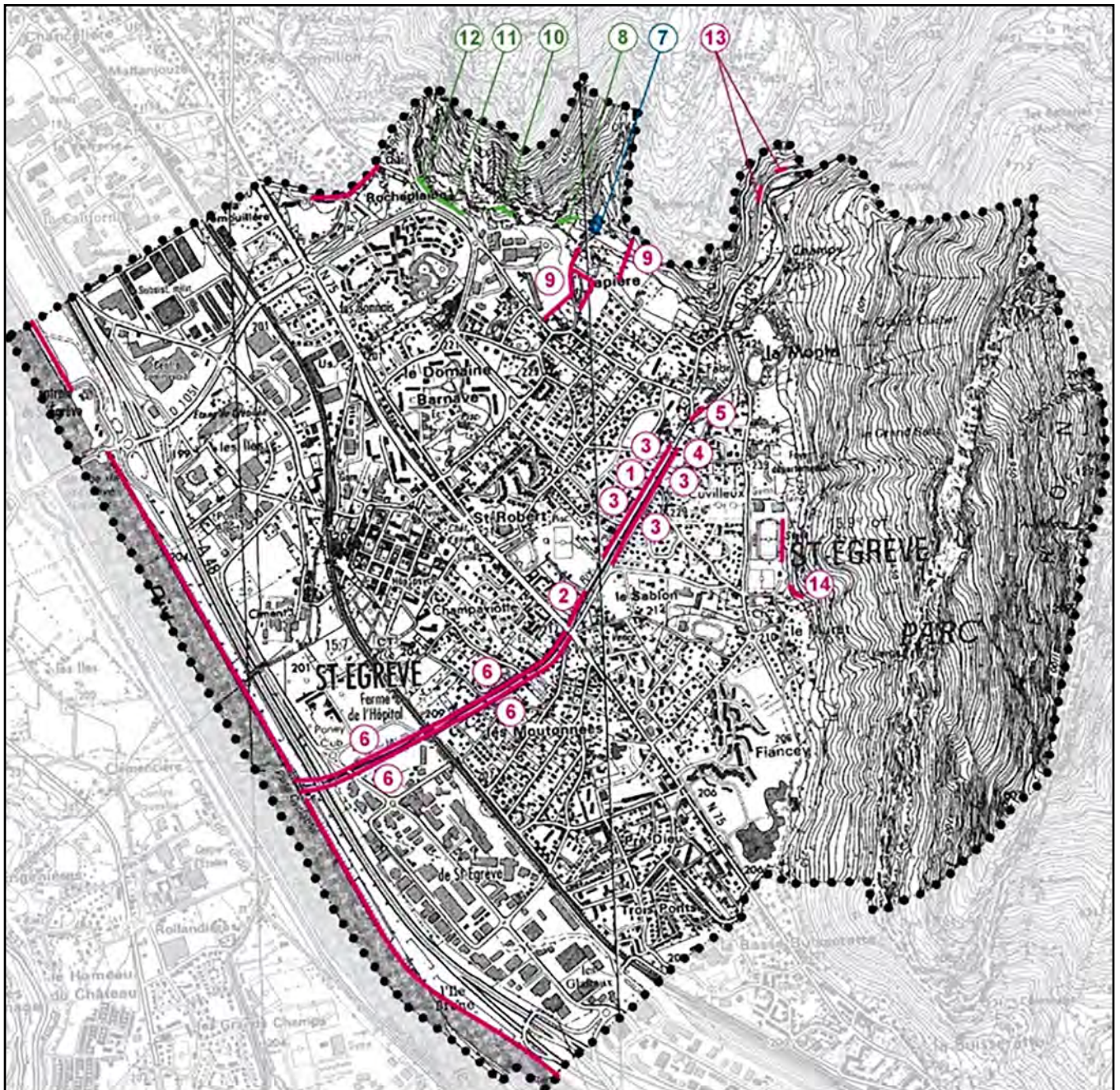






Illustration 57 : exemple de carte des enjeux sur fond IGN au 1 : 25 000 (©ONF RTM).





### Légende

-  - Dignes et ouvrages assimilés
-  - Plage de dépôt
-  - Protections pare-blocs (mérions, écrans)
-  - Numéro de renvoi dans le rapport de présentation

..... Limite communale

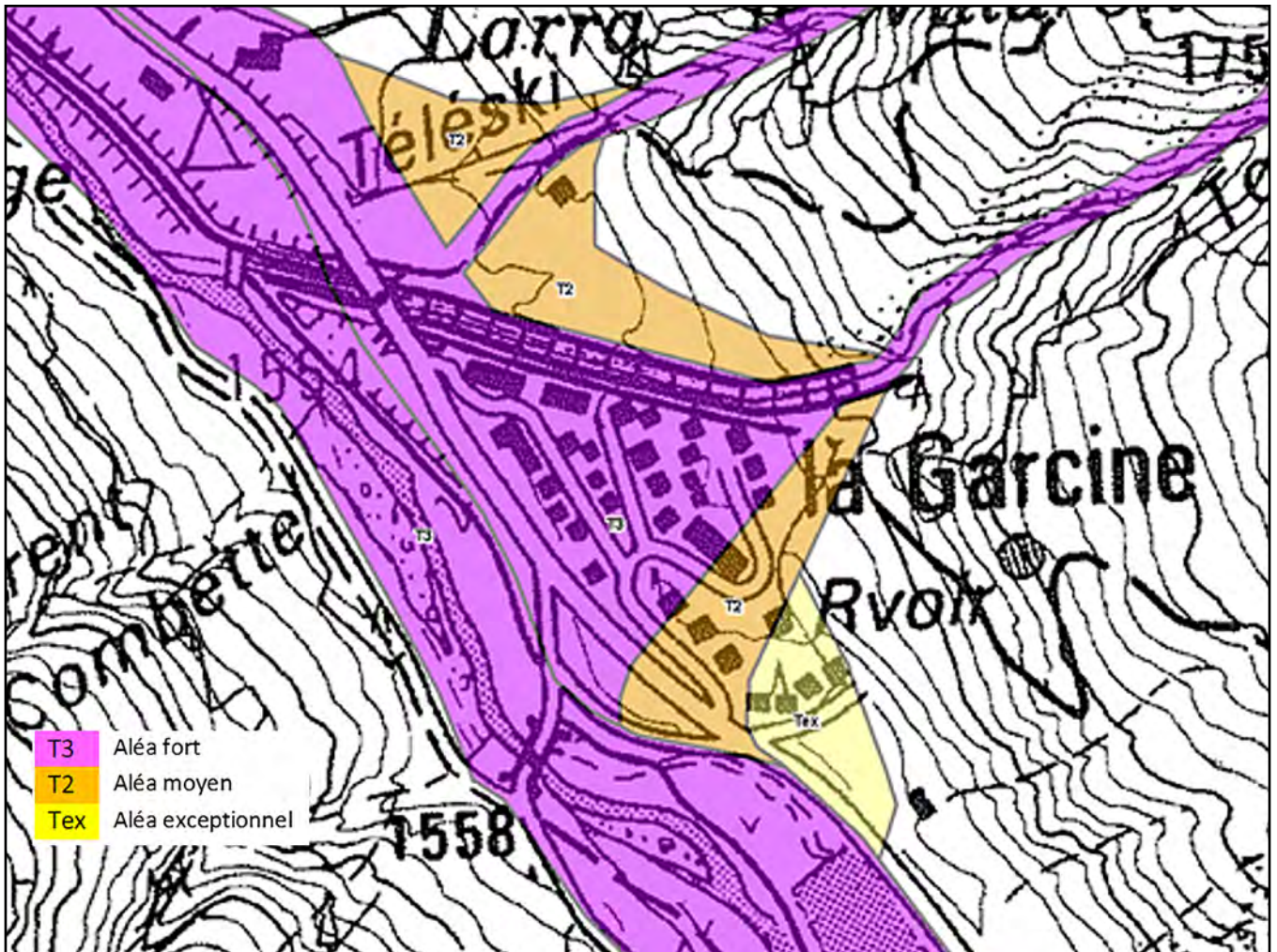
Décembre 2006

Echelle : 1/25 000

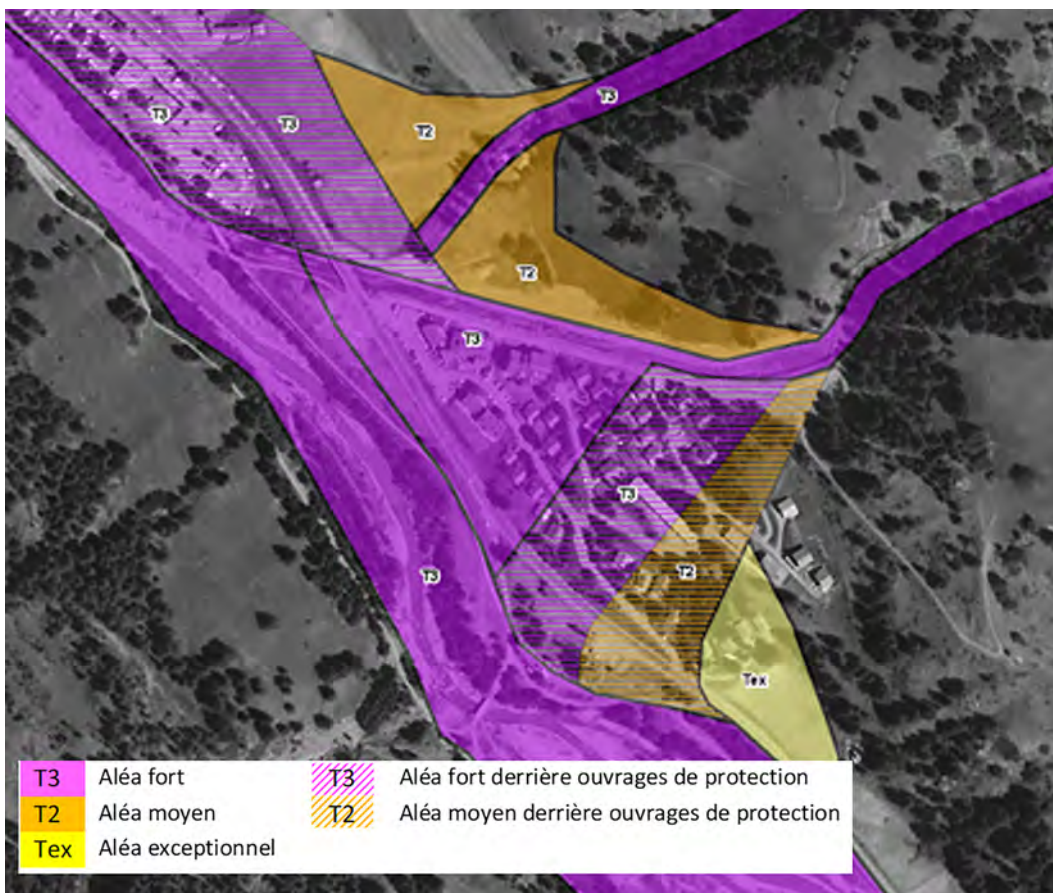


**Illustration 58** : exemple de carte des ouvrages de protection sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques).





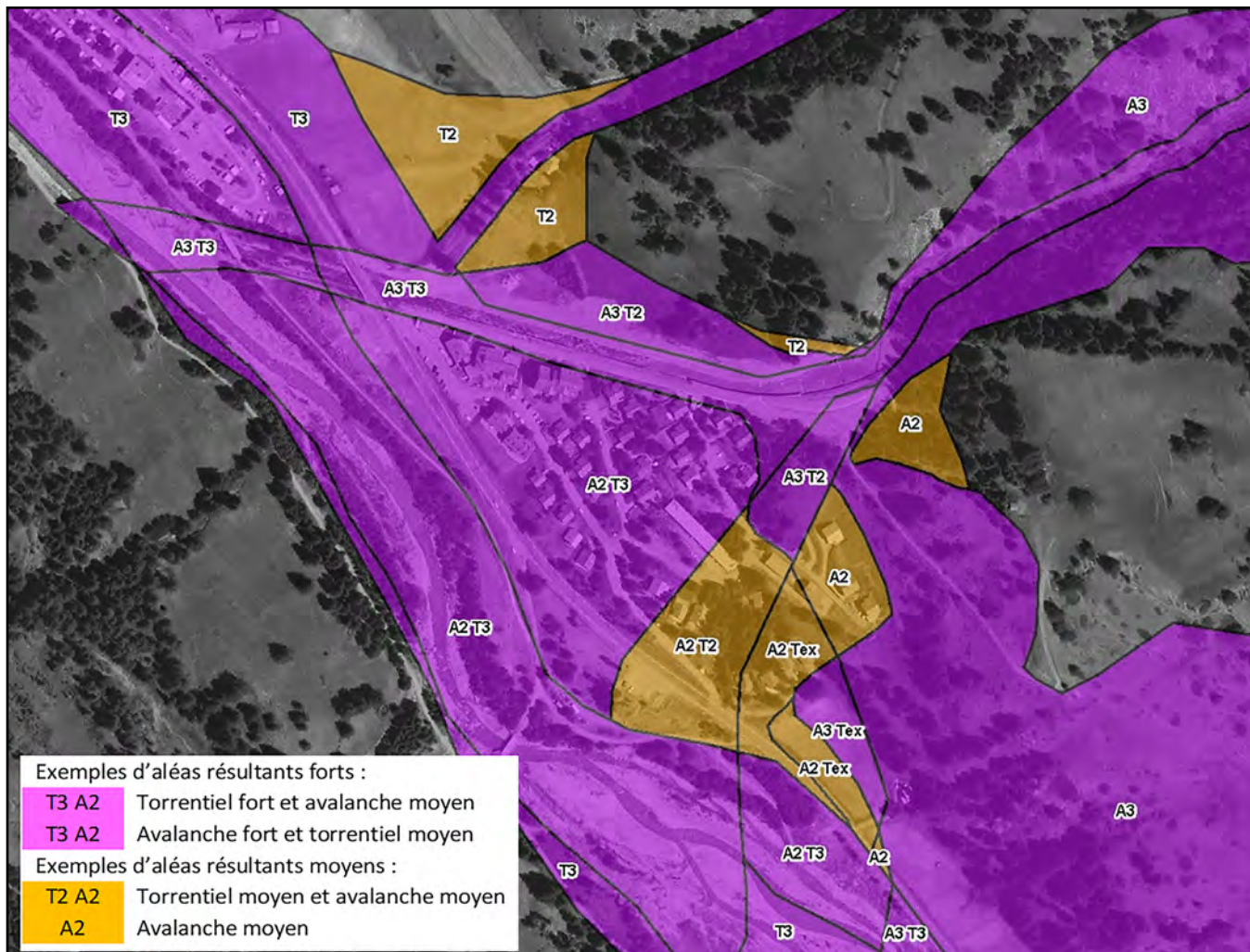
**Illustration 59** : exemple de carte synthétique, indiquant seulement les niveaux d'aléas sur fond IGN, zoomé au 1 : 10 000 (© ONF-RTM) - (NB : une carte zoomée telle que celle-ci doit être accompagnée d'un avertissement sur sa précision).



**Illustration 60** : exemple de représentation synthétique, avec niveaux d'aléas et localisation des zones protégées par des ouvrages (hachures) sur fond orthophotographique IGN, zoomé au 1 : 10 000 (©ONF-RTM).

(NB : une représentation graphique zoomée telle que celle-ci doit être accompagnée d'un avertissement sur sa précision).





**Illustration 61** : exemple de représentation graphique d'aléas multiphénomènes - superposition d'aléas torrentiels et d'aléas avalanches sur fond orthophotographique IGN, zoomé au 1 : 10 000 (©ONF-RTM) - (NB : une représentation graphique zoomée telle que celle-ci doit être accompagnée d'un avertissement sur sa précision).

## 6.2. La partie réglementaire

### 6.2.1. Le zonage réglementaire

Le plan de zonage réglementaire est un document, opposable à l'approbation du PPRi, représentant les différents zonages réglementaires.

En zones de montagne ou de relief important, le fond de plan cadastral n'est pas toujours adapté à des délimitations précises. Du fait de décalages qui peuvent être importants entre les limites cadastrales et des éléments réels bien visibles (sur le terrain comme sur orthophotos) : routes ou chemins parfois décalés de 10 à 20 m, limites de parcelles non cohérentes avec des éléments nettement apparents, bâtiments mal délimités ou décalés, manque de précision sur la position du lit et des berges des cours d'eau (qui ont aussi pu se déplacer au cours du temps), etc.

Le plan de zonage est classiquement réalisé au 1 : 10 000 ou au 1 : 5 000 sur fond cadastral ou orthophotographique, surchargé du parcellaire<sup>29</sup>. Au besoin, il est possible de réaliser des zooms sur des secteurs particulièrement denses ou complexes, pour faciliter l'utilisation ultérieure du document.

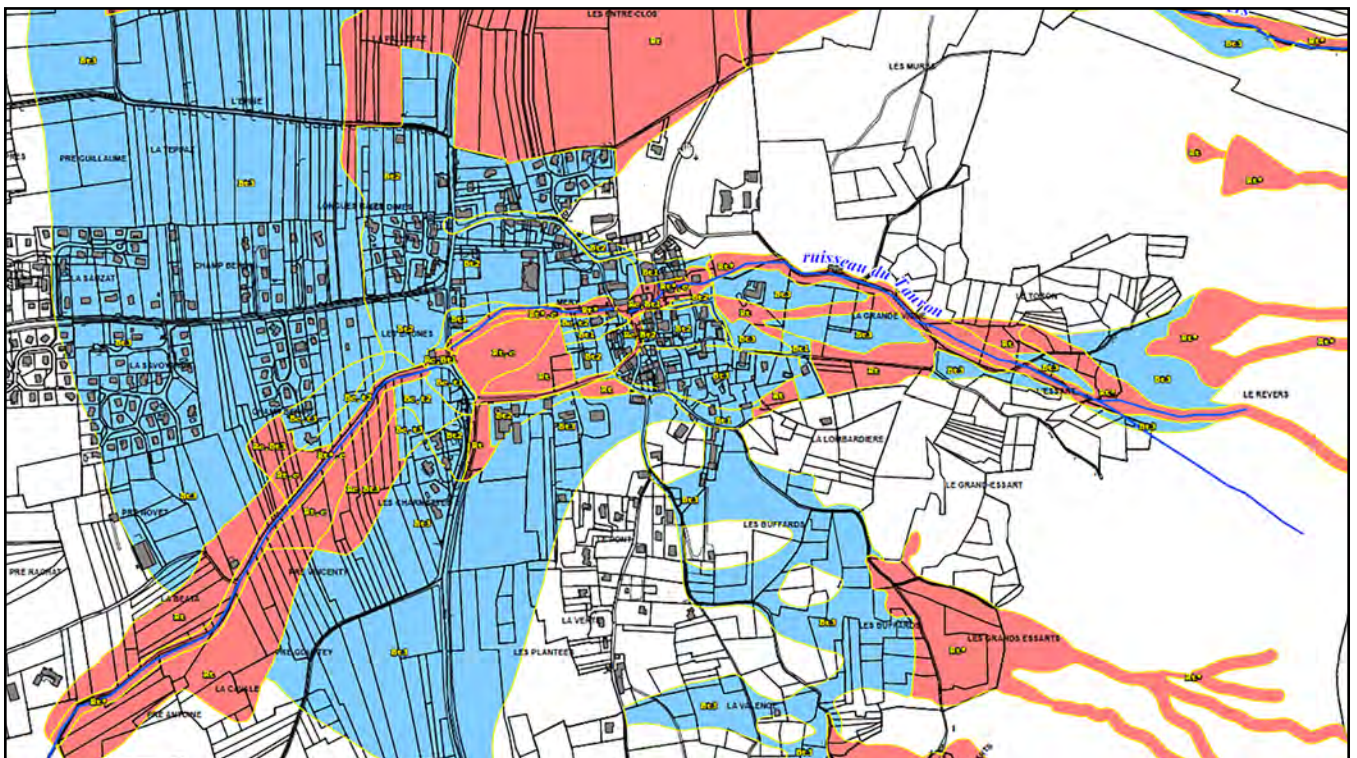
<sup>29</sup> La BD Parcellaire est généralement la donnée adaptée pour minimiser les décalages géométriques entre les couches.





**Illustration 62 :** exemple illustrant les décalages entre limites cadastrales et orthophotos (©Géoportail).

Dans ces situations, les orthophotographies (en particulier celles de la BD ORTHO® de l'IGN) sont actuellement les fonds de plans les mieux adaptés à des délimitations précises : très bonne résolution (20 cm), cohérence avec les éléments réels visibles sur le terrain et mises à jour fréquentes (tous les 3 ou 4 ans). Elles constituent le fond de plan de référence conseillé pour les PPRi des cours d'eau torrentiels (cette recommandation étant conforme à la jurisprudence<sup>30</sup>).



**Illustration 63 :** exemple de zonage réglementaire sur fond de plan cadastral au 1 : 5 000 (©Alp'Géorisques).

<sup>30</sup> Le Conseil d'État, dans sa décision du 7/11/2012 MEEM contre chambre d'agriculture du Var, PPRi du Gapeau, a considéré qu'il résulte des dispositions des articles L. 562-1, L. 562-4 et R. 562-3 du code de l'environnement « que les documents graphiques des plans de prévention des risques naturels prévisibles, dont les prescriptions s'imposent directement aux autorisations de construire, doivent, au même titre que les documents d'urbanisme, être suffisamment précis pour permettre de déterminer les parcelles concernées par les mesures d'interdiction et les prescriptions qu'ils prévoient et, notamment, d'en assurer le respect lors de la délivrance des autorisations d'occupation ou d'utilisation du sol ; que ces dispositions n'ont toutefois ni pour objet, ni pour effet d'imposer que ces documents fassent apparaître eux-mêmes le découpage parcellaire existant ».



## 6.2.2. Le règlement

Pour rappel, le règlement contient :

- un chapitre contenant les dispositions générales ;
- des chapitres détaillant, pour chaque zone :
  - la réglementation des projets : mesures s'appliquant aux projets établis à la demande des pétitionnaires, qu'il s'agisse de projets nouveaux ou de projet sur de l'existant ,
  - les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde : mesures d'ensemble non liées à un projet particulier mais dont l'objet est d'assurer la sécurité des personnes et de faciliter l'organisation des secours,
  - les mesures sur les biens et les activités existants : mesures imposées et réalisées par les particuliers, les exploitants ou les utilisateurs à la demande de l'État.

Dans le cas de PPRN multirisques et lorsque des zones sont soumises à plusieurs types d'aléas, la présentation retenue doit être la plus claire possible pour les pétitionnaires ou les instructeurs :

- soit en groupant et synthétisant toutes les mesures applicables, en une seule fiche ou chapitre adapté à chaque zone ou à chaque combinaison d'aléas rencontrée ;
- soit en gardant des fiches ou chapitres séparés et spécifiques à chaque type d'aléa (et en laissant alors au pétitionnaire et au service instructeur, le soin de faire la synthèse et la combinaison des différentes fiches applicables, au moment de la conception et de l'instruction de chaque projet).

## VII. ANNEXES

### Liste des annexes :

- 7.1. Le cas particulier des confluences
- 7.2. La méthodologie d'identification des sous-scénarios
- 7.3. La protection active et la protection passive
- 7.4. La méthodologie d'estimation des probabilités d'atteinte
  - 7.4.1. La probabilité de survenue des sous-scénarios (étape A)
  - 7.4.2. L'agrégation des sous-scénarios (étape B)
  - 7.4.3. La prise en compte des divagations (étape C)
- 7.5. Les spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport aux digues fluviales
- 7.6. L'effet des ouvrages de protection active (tableau de synthèse)
- 7.7. Les principes de traduction réglementaire (tableau de synthèse)
- 7.8. Glossaire
- 7.9. Liste des signes et abréviations
- 7.10. Index des illustrations, figures et photographies
- 7.11. Index des tableaux
- 7.12. Bibliographie

## 7.1 Le cas particulier des confluences

Tout point des cours d’eaux étudiés par le PPRi doit être couvert par un scénario correspondant à un évènement, *a minima*, de type centennal. Au niveau des confluences, l’évènement centennal pour un tronçon n’est généralement pas centennal pour un autre. Des analyses spécifiques sont nécessaires dans ces zones afin de déterminer le ou les scénarios de référence adaptés aux affluents et au cours d’eau principal.

Une situation type est la confluence entre un torrent (en pente encore forte) et une rivière principale de fond de vallée (en pente plus faible). Du fait de la différence de pente en passant du torrent à la rivière, la capacité de transport chute brutalement et peut provoquer de gros dépôts de matériaux lors des crues du torrent. L’importance du dépôt à la confluence dépend aussi des débits dans la rivière principale au même moment :

- s’ils sont faibles, la rivière reprend peu de matériaux et les dépôts à la confluence sont massifs ;
- s’ils sont forts, les dépôts à la confluence sont diminués des matériaux directement repris par la rivière (... ceux-ci risquant de se déposer massivement en aval).

Le lit de la rivière principale peut également être très étroit dans la zone de confluence (rivière repoussée par le torrent contre la berge opposée). En cas de fort débit liquide dans la rivière, les niveaux d’eau et de charge sont élevés dans la rivière et rehaussent aussi les niveaux dans le torrent affluent. Cela provoque un dépôt régressif de matériaux dans le cours aval du torrent (même si la partie des matériaux qui arrive dans la rivière principale est reprise par cette dernière).

Dans ces zones de confluence et pour définir les scénarios de référence à étudier, il sera donc souvent nécessaire de considérer plusieurs hypothèses réalistes, parmi de nombreuses combinaisons possibles. Quelques situations type sont présentées dans les exemples ci-dessous :

Scénario	Schéma illustratif	Principales causes des débordements
1	<p>Torrent affluent : forte crue</p> <p>Rivière principale : crue ordinaire</p>	<p><b>Dans le torrent affluent :</b> fort engravement du lit par des dépôts solides régressifs.</p> <p><b>Dans la rivière principale :</b> fort engravement du lit par les apports solides du torrent affluent.</p>
2	<p>Torrent affluent : crue ordinaire</p> <p>Rivière principale : forte crue</p>	<p><b>Dans le torrent affluent :</b> pas de débordement.</p> <p><b>Dans la rivière principale :</b> crue essentiellement liquide.</p>



Scénario	Schéma illustratif	Principales causes des débordements
3	<p>Torrent affluent : forte crue</p> <p>Rivière principale : forte crue</p>	<p><b>Dans le torrent affluent :</b> fort engravement du lit par dépôt solide régressif (souvent moins important que dans le cas 1 grâce à la reprise partielle de la rivière principale).</p> <p><b>Dans la rivière principale :</b> crue essentiellement liquide et fort engravement du lit par les apports solides du torrent affluent.</p>

**Tableau 13 :** exemples de scénarios en zone de confluence.

Le cas particulier des confluences illustre aussi la nécessité de l'étude de plusieurs sous-scénarios différenciés : par exemple, il n'est pas évident de savoir *a priori* quel sera le sous-scénario le plus pénalisant pour certaines parties du site. Souvent, un sous-scénario favorable sur un site sera défavorable ailleurs, car il correspond à un déplacement des zones de dépôt.

L'analyse des zones de confluence illustre aussi la difficulté de combiner plusieurs variables. En fonction des configurations, les caractéristiques de la crue sur le torrent affluent et celles de la crue sur la rivière principale peuvent être plus ou moins dépendantes. Si les deux bassins versants sont proches et peuvent réagir à un même événement pluvieux, il ne peut pas y avoir de scénario avec une forte crue sur le torrent affluent, sans crue importante sur la rivière principale. Si, de plus, les deux bassins versants sont de taille identique, il est probable que les pointes de crue soient concomitantes. À l'inverse, si les deux bassins versants ont des tailles très différentes, la probabilité est très faible que des débits de pointe élevés transitent au même moment sur les deux cours d'eau.

## 7.2. La méthodologie d'identification des sous-scénarios

Pour chaque scénario de référence, il est généralement nécessaire d'étudier plusieurs sous-scénarios qui traduisent la variabilité des phénomènes pouvant avoir lieu (obstruction ou non de ponts, tenue et défaillance d'ouvrages de protection, etc.). Afin de ne pas complexifier outre mesure la démarche d'élaboration générale, il convient d'identifier un nombre limité de configurations représentatives de la diversité des déclinaisons du scénario de référence (voir partie 3.2.2).

Piton *et al.* (2022) proposent une approche permettant de définir, de trier puis de sélectionner les sous-scénarios des événements torrentiels selon les étapes suivantes<sup>31</sup> :

1. rappel de **la magnitude du scénario de référence** et de la gamme de variation des paramètres secondaires décrivant ce dernier ;
2. identification éventuelle de sous-scénarios considérant **différentes valeurs pour les paramètres secondaires** les plus structurants ;
3. **inventaire** des tronçons homogènes des cours d'eau (secteurs ayant des capacités hydrauliques et des pentes similaires) et des ouvrages anthropiques ;
4. analyse des **modes de défaillance** des différents tronçons (débordement par dépassement de la capacité hydraulique ou par érosion de berge, engravement lié à la pente ou à un remous liquide, obstruction par des blocs ou par des flottants, ruptures d'ouvrage, etc.) permettant d'identifier :
  - a. les **défaillances quasi-certaines** touchant des tronçons manifestement inadaptés pour le scénario de référence : tous les sous-scénarios incluront alors ce mode de fonctionnement ;

<sup>31</sup> D'autres approches peuvent être utilisées, sous réserve que l'ensemble du raisonnement soit tracé.

b. les **défaillances possibles mais pas certaines** qui pourraient justifier l'émergence de plusieurs sous-scénarios pour le scénario de référence (sous-scénario A = avec défaillance ; sous-scénario B = pas de défaillance). Pour le cas particulier des défaillances de tronçon liées à des défaillances d'ouvrages, et en cohérence avec la doctrine appliquée aux autres PPRN, **toutes les digues et tous les remblais non transparents du territoire d'étude sont à considérer par défaut dans cette catégorie, quelles que soient les garanties apportées sur l'ouvrage.** Autrement dit, et comme cela est détaillé dans la partie 3.2.3, toutes les digues doivent faire l'objet de sous-scénarios considérant des hypothèses de tenue de l'ouvrage, et de sous-scénarios considérant des hypothèses d'effacement et/ou de rupture ;

c. les **défaillances très improbables**, par exemple parce que le tronçon a une capacité fonctionnelle correctement dimensionnée pour le scénario de référence, une résistance mécanique adaptée aux phénomènes en jeu et des garanties quant au maintien et à l'entretien dans le temps de cette capacité.

Les éventuels effets en cascade peuvent faire l'objet, si besoin, de sous-scénarios dédiés ;

5. les situations rencontrées étant potentiellement très variées, il n'est pas pertinent, et souvent impossible, d'étudier de manière exhaustive l'ensemble des sous-scénarios identifiés à l'étape précédente. Une **priorisation des sous-scénarios** est à effectuer, dans l'objectif de trouver un bon équilibre entre la variabilité des configurations étudiées et les moyens dédiés à l'élaboration du PPRi. Plusieurs types de simplifications sont possibles :

- a. l'agrégation des sous-scénarios ayant les mêmes conséquences sur les intensités,
- b. l'élimination des sous-scénarios « majorés » par d'autres (par exemple : un scénario d'effacement de digue combiné avec une bande de précaution forfaitaire peut parfois remplacer plusieurs scénarios de rupture),
- c. l'élimination de sous-scénarios trop improbables pour l'évènement de référence (par exemple ceux ayant une probabilité conditionnelle inférieure à 1 %, hors sous-scénario de rupture et/ou effacement de digue qui doivent être gardés),
- d. l'élimination de sous-scénarios multiples sur des secteurs où les enjeux sont faibles et où une grande finesse d'analyse n'est pas nécessaire. Pour ces secteurs, un seul sous-scénario englobant peut être retenu.

## 7.3 La protection active et la protection passive

**La protection active agit à la source sur les causes du transport solide.** Les travaux ont lieu dans la zone de déclenchement des processus érosifs (bassin de réception et chenal d'écoulement) et visent à limiter l'érosion des sols et la mobilisation des matériaux. Ils font partie intégrante du bassin versant. Il s'agit notamment :

- des ouvrages de correction torrentielle<sup>32</sup> :
  - les aménagements de traitement de versant (**banquettes, terrasses, travaux de drainage**, etc.), qui ont pour fonction de lutter contre les phénomènes d'érosion ou de glissement dans les zones de départ de matériaux ;
  - les **seuils et barrages** dits « RTM », placés en travers des lits torrentiels, qui ont pour fonction principale de stabiliser ou de consolider le profil en long et/ou en travers d'un lit torrentiel (Piton et al. 2019). Ces ouvrages limitent l'incision du lit susceptible de déstabiliser les versants et de fournir ainsi une quantité très importante de matériaux aux écoulements torrentiels ;
  - les ouvrages de défense locale des rives en érosion ou de pied de glissement, qui ont pour fonction de protéger ou de dévier localement les écoulements à l'origine du sapement de pied de berge ou de glissement (**protections de berges ou courts tronçons de digues localisées en haut des bassins, tunnels, chenaux de dérivation**, etc.) ;
  - les ouvrages visant à stabiliser les versants instables (**drains et canaux associés, barrages de consolidation**) ;

<sup>32</sup> L'article D142-17 du code forestier précise la portée du terme « correction torrentielle ». D'après sa rédaction, la correction torrentielle relève de la protection active, à l'inverse des ouvrages tels que les digues, épis, plages de dépôts, etc. qui relèvent de la protection passive.

Les travaux de correction torrentielle reposent essentiellement sur des ouvrages de génie civil, parfois de génie biologique ou d'ouvrages mixtes. Dans le présent guide, l'ensemble des ouvrages de protection active visant à corriger les lits et les versants sont considérés faisant partie des ouvrages de correction torrentielle. Cependant, dans certains contextes, le terme d'ouvrages de correction torrentielle est limité aux seuls barrages et seuils RTM de stabilisation / consolidation des lits.

➤ les ouvrages constituant des zones de régulation de matériaux (**barrage RTM de régulation, ouvrage de sortie de plage de dépôt qui n'est plus curé sous le niveau de la cuvette**, etc.). D'un point de vue fonctionnel, ces ouvrages se situent toutefois à la limite entre l'actif et le passif. Ils relèvent de l'un ou de l'autre selon leur plus ou moins grande proximité avec les enjeux protégés.

■ des travaux de végétalisation par reboisement, embroussaillage, engazonnement. La forêt et le couvert végétal en général ont un rôle très positif de lutte contre l'érosion des sols et une influence bénéfique mais plus limitée sur la réponse hydrologique du bassin versant (Cosandey et al. 2005).

#### ✦ La défense passive

**La défense passive vise à réduire les effets dommageables en cas d'évènement torrentiel.** Elle s'appuie sur des ouvrages implantés plus en aval, à « proximité » des enjeux menacés (sur le cône de déjection et/ou en bordure d'une rivière torrentielle). Ils influencent donc la probabilité d'atteinte et l'intensité des évènements sur les zones du territoire situées à proximité. Ces ouvrages, dont on peut trouver des analogies dans le domaine fluvial (barrages, digues), ont pour objectif de piéger les matériaux, de rediriger et de canaliser les écoulements et/ou d'empêcher les débordements torrentiels.

Il s'agit notamment :

■ des **plages de dépôt, pièges à blocs, pièges à flottants**, qui ont pour fonction de retenir temporairement les matériaux (blocs, graviers) et/ou les flottants issus d'une crue, en attendant de leur curage ;

■ des **chenaux d'écoulement**, endigués ou non, qui permettent de contenir et de faire transiter les écoulements en limitant leurs divagations ;

■ des **protections de berges**, qui permettent de limiter les érosions latérales et les changements de chenaux d'écoulement à proximité des enjeux ;

■ les **digues (organisées en systèmes d'endiguement)**<sup>34</sup> qui ont pour fonction d'empêcher le débordement. Dans le contexte torrentiel, le bon fonctionnement et la stabilité de ces digues sont dépendants des conditions de transport solide (érosions, dépôts) et de la présence d'ouvrages annexes comme :

➤ des seuils ou radiers de stabilisation du fond du lit qui limitent son incision et l'affouillement de pied des digues, ce qui réduit la probabilité de rupture,

➤ des plages de dépôt implantées en amont qui agissent sur le transport solide et, de fait, influencent significativement les évolutions du fond de lit au niveau de l'endiguement et donc la probabilité de surverse associée,

➤ ou encore, des épis et des protections de berges, des dispositifs parafoilles (poutre, sabot ...), qui réduisent la probabilité de rupture.

## 7.4. La méthodologie d'estimation des probabilités d'atteinte

La présente annexe détaille les étapes A, B et C de la méthode proposée en partie 3.2.4.2.3 pour estimer les probabilités d'atteinte d'une zone.

### 7.4.1. La probabilité de survenue des sous-scénarios (étape A)

Le caractère plus ou moins probable de la survenue de chaque sous-scénario est à étudier. Formellement, cela revient à estimer leurs probabilités d'occurrence, conditionnées aux hypothèses retenues pour le scénario de référence correspondant (en particulier sa magnitude).

Sur les rivières torrentielles, la probabilité de survenue des sous-scénarios associés à la variabilité de l'hydrologie peut généralement être estimée à l'aide d'analyses des crues passées sur des bassins versants du secteur dont l'hydrologie est documentée (instrumentation ou témoignages), ainsi qu'éventuellement à l'aide de simulations hydrologiques. Sur les torrents, les données sont usuellement si lacunaires que cette probabilité ne peut souvent être qu'approximative. Elle est alors évaluée par une analyse experte reposant sur un faisceau d'indices (des exemples de critères sont fournis par Piton et al., 2022).

Les probabilités de survenue des sous-scénario traduisant les différents effets des aménagements hydrauliques (ponts, dalots) sont à adapter à l'efficacité et à la robustesse de l'ouvrage : l'obstruction des dalots sera par exemple souvent considérée comme probable, tandis que l'embâclement d'un pont de grand gabarit par rapport à la taille prévisible des flottants pourra être évalué comme très improbable.

<sup>34</sup> Au sens des articles L. 566-12-1, R. 562-13 et R. 214-113 du code de l'environnement.



Pour rappel, chaque système d'endiguement doit faire l'objet d'au moins un sous-scénario considérant sa défaillance. **La probabilité de survenue de chaque sous-scénario prenant comme hypothèse la défaillance d'un système d'endiguement, est ainsi, par convention dans le cadre de l'élaboration des PPRN, considérée comme maximale.**

### 7.4.2. L'agrégation des sous-scénarios (étape B)

Une première cartographie des probabilités d'atteinte pour le scénario de référence est déduite de l'étape A en superposant toutes les emprises potentiellement affectées par l'ensemble des sous-scénarios du scénario de référence (sans distinction par rapport aux niveaux d'intensité ni par rapport aux éventuelles divagations) et en affectant en tout point de cette emprise globale la « probabilité » d'atteinte prise égale à la somme des probabilités de survenue des sous-scénarios susceptibles de provoquer l'immersion de ce point<sup>35</sup>.

Le tableau illustratif ci-dessous propose quelques exemples pour cette première estimation de la probabilité d'atteinte d'une zone en fonction des sous-scénarios susceptibles de l'affecter.

Sous-scénarios susceptibles de provoquer l'immersion de la zone considérée	Première estimation de la probabilité d'atteinte de la zone pour le scénario de référence
Un seul sous-scénario	Probabilité d'atteinte correspondant à la probabilité de survenue du sous-scénario.
Trois ou quatre sous-scénarios de probabilité de survenue faible	La somme des probabilités de survenue des sous-scénarios est comprise entre 15 % et 40 % <sup>36</sup> . La probabilité d'atteinte est <b>modérée</b> .
Deux ou trois sous-scénarios de probabilité de survenue modérée	La somme des probabilités de survenue des sous-scénarios est supérieure à 20 %. Une estimation fine des probabilités de survenue permet de conclure si la probabilité d'atteinte est <b>modérée ou forte</b> . Dans l'éventualité où cette estimation fine n'est pas possible ou trop incertaine, une probabilité d'atteinte forte est retenue.
Au moins un sous-scénario de probabilité de survenue forte (par exemple un sous-scénario de rupture de digue)	La probabilité d'atteinte est <b>forte</b> .

**Tableau 14 : exemples indicatifs de première estimation de la probabilité d'atteinte d'une zone en fonction des sous-scénarios susceptibles de l'affecter.**

### 7.4.3. La prise en compte des divagations (étape C)

Les variations aléatoires des cheminements des écoulements ajoutent un degré de variabilité à la probabilité d'atteinte. L'analyse experte de ces variations peut généralement être menée au niveau du scénario de référence. Dans certains cas (sous-scénarios à l'origine de l'immersion de la zone très différents, topographie atypique, etc.), il peut toutefois être pertinent de la réaliser au niveau du sous-scénario avant de l'intégrer à la cartographie globale du scénario.

Les principaux éléments d'appréciation de ces variations sont :

- la situation topographique des parcelles, plus ou moins hautes ou plus ou moins proches des zones de débordement ou des chenaux préférentiels ;

<sup>35</sup> Les sous-scénarios ne sont pas nécessairement exclusifs l'un de l'autre, et la probabilité de survenue d'un sous-scénario de défaillance d'ouvrage est prise égale à 100 % par convention (cf. étape A). Avec ces conventions, la somme des probabilités de survenue des différents sous-scénarios peut dépasser 100 %. Dans ce cas, il convient de considérer la probabilité d'atteinte comme certaine. (NB : la méthode ne consiste pas à sommer les intensités pondérées par les probabilités conditionnelles).

<sup>36</sup> Conformément au tableau 7.

- l'état du lit, la solidité apparente de son pavage et la nature des berges, plus ou moins minéralisées et protégées par la végétation. Ces caractéristiques peuvent influencer la fréquence à laquelle des érosions de berge ont lieu dans les zones où les lits sont confinés entre les versants ainsi que l'intensité du processus ;
- la présence d'arbres sur les berges dont la chute lors des érosions de berges tend à dévier les écoulements, voire à les barrer si le chenal est relativement étroit ;
- la présence d'autres flottants potentiels à proximité du chenal (dépôt de matériaux, parkings, etc.), en particulier en amont de ponts ou de dalots de faible gabarit ;
- la géomorphologie de la zone de divagation et d'alluvionnement (chenaux, axes préférentiels, zones d'érosion ou sédimentation, encaissements géomorphologiques, cône de divagation, fond de vallée alluviale, etc.) ;
- les informations sur les crues historiques avec l'emprise et les cheminements d'événements passés ;
- la présence d'un aménagement qui n'aurait pas justifié l'émergence d'un sous-scénario (y compris les dispositifs de protection), de bâtiments ou d'infrastructures mais dont la présence peut influencer significativement la propagation des débordements.

Par exemple, l'atteinte d'une parcelle située dans le prolongement d'un axe préférentiel d'écoulement (comme un ancien chenal de divagation ou une voie de circulation) en lien direct avec un point de débordement sera quasi-systématique. Dans ce cas, la probabilité d'atteinte estimée à l'issue de l'étape B est inchangée.

Si la configuration topographique du terrain naturel limite les possibilités de submerger une parcelle en cas de survenue d'un des sous-scénarios susceptibles de provoquer son immersion, la probabilité d'atteinte de la parcelle pourra être diminuée par rapport à la somme des probabilités de survenue des sous-scénarios associés. Dans ce cas, la probabilité d'atteinte estimée à l'étape B est abaissée d'un niveau. Toutefois, si la parcelle considérée est susceptible d'être inondée en cas de rupture d'ouvrage dans au moins un sous-scénario, cette étape C ne pourra pas réduire sa probabilité d'atteinte.

On ne se limitera pas à un croisement brut de polygones issus des analyses précédentes. Une telle cartographie doit être retravaillée et lissée de façon experte pour éviter les mosaïques de petites zones exposées à des degrés proches et tirer l'essence des cheminements préférentiels et plus exceptionnels des phénomènes torrentiels.

**Les raisonnements associés aux différentes étapes de la détermination des probabilités d'atteinte seront tracés.**

## 7.5. Les spécificités des potentiels de danger des digues torrentielles par rapport aux digues fluviales

Le terme « digues torrentielles » s'applique aussi bien aux digues situées en bordure de torrents que de rivières torrentielles. Il sera néanmoins souvent nécessaire de distinguer une « digue de torrent » d'une « digue de rivière torrentielle » en raison des contraintes et sollicitations appliquées à l'ouvrage et au « sur-aléa » potentiel en cas de rupture qui ne sont pas les mêmes selon l'importance du transport solide. Dans tous les cas, il s'agit de digue autorisée au titre de la rubrique 3.2.6.0 et intégrée à un système d'endiguement.

On s'intéresse en premier lieu aux digues en bordure de torrents.

Du fait de la taille réduite des bassins, des fortes pentes, du transport solide induit, voire des facteurs aggravants, il existe des différences fondamentales, synthétisées dans le tableau ci-après, entre les potentiels de danger induits par la présence d'un endiguement implanté en bordure d'un torrent ou en contexte fluvial.

À l'exception des zones proches des pieds de talus, les ruptures des digues le long des torrents créent généralement peu de « sur-aléa », c'est-à-dire qu'il y a peu d'augmentation des aléas par rapport à des débordements qui se produiraient en l'absence de digues, à la suite notamment d'un changement naturel de lit.

Les risques induits par une telle rupture ne doivent toutefois pas être sous-estimés, car les vitesses des écoulements torrentiels restent toujours très élevées du fait des fortes pentes, même sans rupture de digue.

Lorsqu'elles se produisent, les brèches provoquent une arrivée brutale des écoulements sur la zone à l'arrière de l'ouvrage (si du moins le niveau d'eau dépasse à cet instant le niveau du terrain naturel derrière la digue). Les délais de propagation sont très brefs (au plus quelques minutes).

Si la présence de la digue réduit la probabilité de débordement, qui serait inéluctable en cas d'apport de matériaux sur le cône, elle n'augmente que de façon marginale les contraintes hydrauliques. Ceci se vérifie d'autant plus en présence d'un système d'endiguement peu contraignant (rapport L/H > 30-40 en crues rares) où les écoulements ne s'étalent pas forcément sur l'ensemble de cet espace de mobilité.

### Cas particuliers des lits fortement perchés sur leur cône

Les conclusions ci-dessus ne sont pas transposables dans le cas de lits fortement et « artificiellement » perchés ou en présence de digues de grande hauteur, où il peut s'avérer nécessaire de tenir compte d'un sur-aléa sur une bande plus large à proximité de l'ouvrage.



**Illustration 64 :** maison engravée à la suite d'une brèche dans la digue Torrent du Doménon - Domène (38) - 2005 (©ONF-RTM).

Par exemple, lors de la crue du Doménon (38) en août 2005 (figure ci-dessus), la rupture de la digue en rive gauche a engendré un engravement de la zone située en contrebas de la brèche. En l'absence de digue, les débordements avec des intensités équivalentes se seraient sans doute produits plus en amont du cône. La création de l'endiguement a ainsi décalé le risque d'engravement vers l'aval.

**Tableau 12 :** comparaison des potentiels de dangers des digues fluviales versus digues de torrent.

	Digue fluviale	Digue de torrent
Dans le bief endigué	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Transit d'un débit fort à très fort (grand bassin versant).</li> <li>● Faibles vitesses d'écoulement du fait des faibles pentes du lit (&lt;&lt; 1 %).</li> <li>● Hauteur d'eau résultante importante.</li> <li>● Hauteur de digue côté zone protégée généralement importante.</li> <li>● Grand volume d'eau stocké derrière les digues.</li> <li>● Écoulement en régime fluvial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Transit d'un débit faible à moyen (bassin versant plus réduit).</li> <li>● Fortes vitesses d'écoulement du fait des fortes pentes du lit (&gt; 6 %, voire sur le cône 2-3 %).</li> <li>● Hauteur d'eau résultante réduite qui s'accompagne en général d'un engravement du fond du lit.</li> <li>● Hauteur de digue côté zone protégée généralement faible (≤ 2-3 m, sauf en cas de lit perché).</li> <li>● Faible volume d'eau stocké derrière les digues.</li> <li>● Écoulement proche du régime critique.</li> </ul>
Au droit de la brèche	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Grande hauteur de brèche en général.</li> <li>● Apparition d'une fosse d'affouillement à l'aval.</li> <li>● Faible abaissement de la ligne d'eau à l'arrière, à la suite de l'ouverture de la brèche.</li> <li>● Augmentation importante des vitesses, beaucoup plus fortes au droit de la brèche avec passage d'un régime fluvial à un régime torrentiel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Faible hauteur de brèche.</li> <li>● Dépôt de matériaux parfois à l'aval immédiat réduisant l'ouverture verticale de la brèche.</li> <li>● Comparativement peu d'augmentation de vitesses : maintien d'un régime d'écoulement proche du régime critique au droit de la brèche.</li> </ul>



	Digue fluviale	Digue de torrent
Côté zone protégée en cas de rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Très grand débit sortant.</li> <li>● Aux abords de la brèche et dans la zone proche : grandes vitesses et hauteurs d'écoulement.</li> <li>● Plus en retrait de la brèche : étalement de la lame d'eau et vitesses se réduisant rapidement.</li> <li>● Hauteurs d'eau potentiellement moyennes à fortes en cas d'existence de «casiers» ou de zones en dépression.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Débit sortant pouvant atteindre celui du torrent.</li> <li>● Faible diminution de vitesses, même loin de la brèche tant que les pentes restent fortes.</li> <li>● Écoulements proches du régime critique.</li> <li>● Pas d'étalement systématique sur tout l'espace disponible.</li> <li>● Creusement d'un ou plusieurs nouveaux chenaux.</li> <li>● Lissage de la pente par des matériaux.</li> </ul>
Comparaison par rapport à une configuration sans digue	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Très forte réduction du lit majeur et de la zone d'expansion de crue.</li> <li>● Augmentation très forte des contraintes hydrauliques au droit et proche de la brèche.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Réduction relative du lit avec souvent, une réduction des zones de dépôt et de régulation du transport solide (absence en revanche de zones favorisant l'expansion de crues, qui sont sans effet à cause des fortes pentes).</li> <li>● Pas ou peu d'augmentation des contraintes hydrauliques, qui restent très fortes.</li> <li>● Probabilité forte de dégâts aux biens sur tout le cheminement aléatoire des écoulements.</li> <li>● Délai d'anticipation réduit.</li> </ul>

### Cas des digues de rivières torrentielles

De nombreux éléments présentés précédemment restent valables pour les digues de rivières torrentielles, notamment en cas de fortes divagations et de transport solide intense.



En revanche, les débits, les durées, le volume de crue, mais aussi les hauteurs de digues, peuvent être bien plus élevés en bordure de rivières torrentielles que de torrents. Dans ces conditions, on ne peut exclure le fait qu'une rupture de digues engendre un sur-aléa qu'il convient d'apprécier avec grand soin selon le contexte et la configuration du site, à l'instar des endiguements fluviaux.

Le chargé d'études du PPRi devra par conséquent analyser la nécessité de conserver une bande de précaution suffisante pour prendre en compte ce sur-aléa.

## 7.6 L'effet des ouvrages de protection active (tableau de synthèse)

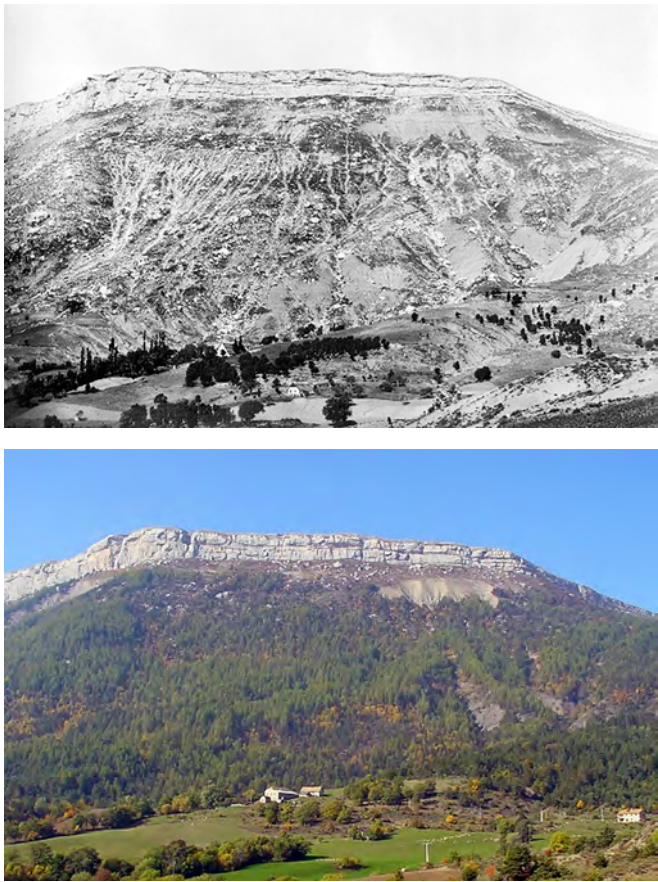
Un tableau équivalent est fourni en partie 3.2.3.5 pour les ouvrages de défense passive et d'autres anthropiques.

**Tableau 13** : synthèse sur la fonction, les modes de défaillances et la prise en compte des ouvrages de protection active dans l'élaboration des PPRI.

Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection active	Barrages et seuils de correction torrentielle		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● stabilisation du profil en long et/ou en travers du lit du torrent ;</li> <li>● rétention de matériaux ;</li> <li>● régulation du transport solide ;</li> <li>● consolidation des versants instables ;</li> <li>● réduction des pentes du torrent.</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur le transport solide :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● piégeage durable des sédiments jusqu'à remplissage ;</li> <li>● diminution des intensités de transport solide ;</li> <li>● diminution de la production de sédiment sur le long terme, facilitation de la reprise de la végétation ;</li> <li>● prévention de la fourniture d'un volume sédimentaire localisé trop massif ;</li> <li>● diminution des capacités de transport de gros blocs.</li> </ul>
	Petites corrections de versants et dispositifs de drainage		<p><b>Fonctions :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● limiter les phénomènes de ruissellements et de ravinement ;</li> <li>● limiter l'ablation des sols dans les zones de départ ;</li> <li>● ralentir les glissements de terrain.</li> </ul> <p><b>Effets positifs sur le transport solide :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● réduction des apports solides.</li> </ul>

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRi	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRi	« Sur-aléa »
<p><b><u>Par rupture :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● de nombreux événements passés ont conduit à la destruction partielle ou totale d'ouvrages, surtout en cas de laves torrentielles ;</li> <li>● dans la majeure partie des cas (et en dehors des destructions suite à des glissements de terrain de grande ampleur), seuls quelques ouvrages d'un dispositif global ont été détruits lors de crues.</li> </ul> <p><b><u>Dépassement/débordement du fait :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● débordement possible sur les ailes des barrages en cas de sous-dimensionnement de la cuvette déversoir.</li> </ul> <p><b><u>Probabilité de défaillance :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● ouvrages isolés : courante ;</li> <li>● série d'ouvrages : Peu d'exemples de rupture en cascade d'une série complète de barrages ou seuils de correction torrentielle.</li> </ul>	<p>Prise en compte des ouvrages de correction torrentielle qui peuvent réduire drastiquement les apports en matériaux (à l'exception des torrents à clappes), même s'ils sont parfois loin des enjeux.</p>	<p><b><u>Un scénario en tenant compte des ouvrages de correction torrentielle sans défaillance</u></b>  + <b><u>un (ou plusieurs) sous-scénarios de défaillance de certains ouvrages.</u></b></p> <p>L'effet des barrages et seuils de correction torrentielle reste encore difficile à quantifier précisément.</p> <p>+ si besoin, un <b><u>sous-scénario avec effacement des ouvrages</u></b> (sur certains sites eu fréquents où la rupture en cascade ne pourrait être écartée).</p>	<p>Pas ou peu de sur-aléa en cas de rupture/défaillance d'ouvrage(s) isolé(s) pour des ouvrages de hauteur faible à moyenne.</p> <p>Difficile de quantifier le « sur-aléa » lié à la rupture en cascade de barrages de correction torrentielle active en prédisant ce qui se serait passé sans les ouvrages.</p> <p>La rupture d'ouvrages de correction active peut entraîner sur le moyen/long terme :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● le relargage des matériaux accumulés en amont ;</li> <li>● une ré-incision du lit jusqu'à son niveau avant correction ;</li> <li>● une incision supplémentaire du lit en dessous de son niveau avant correction.</li> </ul>
<p>Une défaillance ou un dépassement sont possibles, mais l'estimation de leur impact est difficile à appréhender et leurs conséquences restent de toute façon limitées.</p>	<p>Pas de prise en compte dans les PPRi.</p>	<p>Dans le cas général, pas de sous-scénario dédié à ce sujet.</p>	<p>Pas de sur-aléa.</p>



Type de protection	Ouvrages	Illustrations	Fonction(s) et effets sur les crues
Protection active	Forêts de protection		<p><b><u>Fonctions :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● limiter les phénomènes de ruissellements et de ravinement ;</li> <li>● limiter le transport et les apports de matériaux solides.</li> </ul> <p><b><u>Effets :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● défense contre l'érosion ;</li> <li>● restauration des sols ;</li> <li>● régularisation du régime des eaux ;</li> <li>● réduction des apports liquides des crues les plus courantes.</li> </ul>

Modes de défaillance et de dépassement	Principe général de prise en compte dans les cartes d'aléas des PPRI	Sous-scénarios à étudier dans le cadre du PPRI	« Sur-aléa »
<p>« Défaillance » possible (au sens disparition du couvert végétal) par destruction de la forêt (tempête, attaque sanitaire, incendie, etc.).</p>	<p>Malgré son impact sur le transport solide, la forêt n'est pas considérée comme un ouvrage de protection au sens où il n'est pas recommandé d'intégrer des sous-scénarios de défaillance associée à cette dernière.</p>	<p>Dans le cas général, pas de sous-scénario dédié</p> <p>Prise en compte de l'effet négatif des flottants qui pourraient provenir des zones boisées ou de la ripisylve (en cas de glissements de versants boisés ou de mauvaise gestion, apports de flottants au cours d'eau torrentiels).</p>	<p>Pas de sur-aléa.</p> <p>La forêt permet de réduire les apports en matériaux et sa disparition conduirait à revenir au pire à l'état initial, mais sans doute à un état moins dégradé malgré tout que l'état initial.</p>

## 7.7. Les principes de traduction réglementaire (tableau de synthèse)

Niveaux d'aléa de référence	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort aggravé
Niveaux d'urbanisation			<p><b>Toute construction nouvelle est interdite,</b></p> <p>sauf, sous réserve du respect de prescriptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les constructions nouvelles en <b>dents creuses</b> ;</li> <li>les constructions nouvelles dans le cadre d'<b>opérations de renouvellement urbain</b> avec réduction de la vulnérabilité ;</li> <li>les <b>projets précisés en partie 5.2.1.</b></li> </ul> <p>Des <b>exceptions</b> sont possibles sur demande de la collectivité et sous conditions (N. B. : ces conditions ne portent pas sur les systèmes d'endiguement / aménagements hydrauliques).</p>	<p><b>Toute construction nouvelle est interdite,</b></p> <p>sauf, sous réserve du respect de prescriptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les constructions nouvelles dans le cadre d'<b>opérations de renouvellement urbain</b> avec réduction de la vulnérabilité ;</li> <li>les <b>projets précisés en partie 5.2.1.</b></li> </ul> <p>Des <b>exceptions</b> sont possibles sur demande de la collectivité et sous conditions (N. B. : ces conditions ne portent pas sur les systèmes d'endiguement / aménagements hydrauliques).</p>	
Centres urbains					
Espaces urbanisés hors centres urbains		<p><b>Les constructions nouvelles sont soumises à prescriptions.</b></p>	<p><b>Toute construction nouvelle est interdite,</b></p> <p>sauf, sous réserve du respect de prescriptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les constructions nouvelles dans le cadre d'<b>opérations de renouvellement urbain</b> avec réduction de la vulnérabilité ;</li> <li>les <b>projets précisés en partie 5.2.1.</b></li> </ul> <p>Des <b>exceptions</b> sont possibles sur demande de la collectivité et sous conditions, portant notamment sur la nécessité d'être protégé par des systèmes d'endiguement ou des aménagements hydrauliques résistant à l'évènement de référence du PPRI.</p>	<p><b>Toute construction nouvelle est interdite,</b></p> <p>sauf, sous réserve du respect de prescriptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les constructions nouvelles dans le cadre d'<b>opérations de renouvellement urbain</b> avec réduction de la vulnérabilité ;</li> <li>les <b>projets précisés en partie 5.2.1.</b></li> </ul> <p>(Pas d'exceptions possible sur demande de la collectivité).</p>	
Espaces non urbanisés	<p><b>Toute construction nouvelle est interdite,</b></p> <p>sauf, sous réserve du respect de prescriptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les constructions nouvelles dans le cadre de <b>projets de relocalisation</b> réduisant la vulnérabilité (démolition d'un bien en zone plus exposée que la zone de construction) ;</li> <li>les constructions, ouvrages, aménagements et exploitations affectés à un <b>service public et indispensables à l'exécution de ses missions</b> ;</li> <li>les constructions nécessaires aux activités <b>agricoles, pastorales et forestières</b> ;</li> <li>les <b>équipements sportifs</b>, liés notamment à la pratique du ski et de randonnée si aucune solution alternative moins à risque n'est possible ;</li> <li>La restauration ou reconstruction d'anciens <b>chalets d'alpage ou de bâtiments d'estive</b>, sous réserve que le bâtiment existant n'ait pas été sinistré par une crue torrentielle, ainsi que les extensions limitées de chalets d'alpages ou de bâtiments d'estive existants ;</li> <li>les <b>projets précisés en partie 5.2.1.</b></li> </ul> <p>Des <b>exceptions</b> sont possibles sur demande de la collectivité et sous conditions (N. B. : ces conditions ne portent pas sur les systèmes d'endiguement / aménagements hydrauliques).</p>			<p><b>Toute construction nouvelle est interdite.</b></p> <p><b>Sauf, sous réserve du respect de prescriptions, les projets précisés en partie 5.2.1.</b></p> <p><b>(Pas d'exception possible sur demande de la collectivité).</b></p>	



## 7.8. Glossaire

**Affouillement** : action de surcreusement des eaux. Ce surcreusement peut être local, à la suite de la concentration et de l'accélération des écoulements, en général au voisinage d'un obstacle (rive, pile de pont, bâtiment...), ou généralisé en conséquence d'un dépavage du lit ou d'un déficit relatif de la charge sédimentaire par rapport au débit liquide, entraînant une reprise d'érosion.

**Aggradation** : phénomène de dépôt sédimentaire entraînant une élévation du fond du lit.

**Apex** : sommet du cône de déjection.

**Aléa** : phénomène potentiellement destructeur caractérisé par sa probabilité d'occurrence et son intensité.

**Avulsion** : bifurcation des écoulements quittant un chenal, phénomène caractéristique des cônes de déjection.

**Alluvionnements, dépôts alluviaux** : dépôts de sédiments transportés par le cours d'eau.

**Bassin versant** : espace drainé par un cours d'eau et ses affluents. Toutes les eaux dans cet espace s'écoulent et convergent vers un même point de sortie appelé exutoire.

**Bâti adapté** : bâti construit selon des dispositions renforcées par rapport aux règles de l'art habituelles afin de s'adapter au contexte du risque torrentiel (surélévation du plancher, renforcement de la structure, renforcement des façades exposées, protection des fondations contre l'affouillement, dispositifs permettant de lutter contre la pénétration de l'eau, etc.).

**Bâti standard** : bâti réalisé selon les règles de l'art habituelles en zone non exposée, sans protection particulière.

**Bouffée** : dans le cadre d'une lave torrentielle, une bouffée se manifeste sous forme de vague constituée d'un mélange grossier et visqueux de matériaux, de densité élevée, déplaçant des blocs de toutes tailles et pouvant atteindre plusieurs tonnes.

**Capacité hydraulique** : caractéristique d'une section d'écoulement donnée d'un cours d'eau, exprimant le débit liquide maximum qui peut s'écouler dans cette section avant débordement.

**Capacité maximale de transport** : en un point donné, quantité maximale de sédiments (débit solide en général) que peut potentiellement transporter un écoulement (caractérisé en général par son débit liquide) sur un tronçon de cours d'eau caractérisé par une pente, une géométrie, une granulométrie, etc, en l'absence de limitation sur les apports solides (apports amont ou quantités de matériau affouillable suffisantes).

**Charriage** : type de transport solide où des matériaux grossiers sont déplacés par des mouvements de roulement ou glissement sur le fond du lit ou de saltation (succession de petits sauts au cours desquels les particules se séparent du fond du lit durant de très courtes périodes).

**Cône de déjection** : structure géomorphologique résultant de l'accumulation des sédiments déposés par le torrent du fait de la réduction de pente au débouché dans la vallée. Sa forme en plan est approximativement celle d'un secteur de cercle, celle-ci résultant d'un apport de sédiments concentré en un point (apex du cône de déjection, au débouché du chenal torrentiel). Son extension est le résultat des divagations du torrent au cours des derniers millénaires (typiquement depuis la fin de la dernière glaciation).

**Contrainte de cisaillement** : composante dans le sens de l'écoulement de la force unitaire par unité de surface s'exerçant sur une surface parallèle au fond du lit.

**Dalot** : ouvrage hydraulique semi-enterré, de forme rectangulaire, généralement placé sous les remblais des routes ou des voies ferrées pour y permettre l'écoulement des eaux.

**Débit liquide/débit solide** : flux liquide/solide traversant une section d'écoulement donnée par unité de temps (exprimé généralement en volume - m<sup>3</sup>/s, quelquefois en masse).

**Divagation :** déplacements latéraux de la position du lit (ou de lits multiples) d'un cours d'eau.

**Écrêtage :** cf. laminage.

**Évolution systématique du fond :** elle résulte de la variation de la capacité moyenne de transport. Ces variations du fond sont d'abord liées aux irrégularités du profil en long, mais peuvent aussi être provoquées par les apports des affluents et une obstruction éventuelle du lit (embâcles, etc.).

**Froude (nombre de) :** nombre sans dimension qui caractérise dans un fluide l'importance relative de son énergie cinétique par rapport à son énergie potentielle gravitationnelle ( $Fr = v\sqrt{g/L}$ , avec  $v$  = vitesse du fluide, en m/s,  $g$  est l'accélération de la pesanteur, en  $m/s^2$ , et  $L$  est une taille caractéristique du système, en général la hauteur d'écoulement, en m). Lorsque  $Fr < 1$ , l'écoulement est en régime fluvial : il est influencé par les conditions d'écoulement en aval (phénomène de remous). Lorsque  $Fr > 1$ , l'écoulement est en régime torrentiel : il n'est pas influencé par les conditions en aval.

**Forçage orographique :** augmentation de l'intensité des pluies liée au relief.

**Granulométrie :** expression de la répartition en différentes classes de dimension des granulats (argiles, silts, sables, graviers, blocs) des matériaux sédimentaires constituant un lit torrentiel ou transportés par un écoulement.

**Hauteur de référence :** hauteur retenue pour régler une surélévation de plancher ou un renforcement de structure. Elle peut être différente de la hauteur estimée de l'écoulement.

**Hauteur de berge :** différence entre l'altitude de la crête de berge et l'altitude du fond du lit mineur.

**Hauteur de mise en charge :** différence d'altitude entre la cote d'eau maximale dans le lit mineur et l'altitude du terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage. Dans le cas où cette information n'est pas disponible, prendre par défaut la hauteur de l'ouvrage (différence entre l'altitude de la crête de digue et l'altitude du terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage), en gérant les incertitudes de mesure dans le sens de la sécurité.

**Hydrogramme :** courbe d'évolution du débit en fonction du temps en un point donné d'un cours d'eau. On s'intéresse le plus souvent aux hydrogrammes de crue.

**Hyétogramme :** courbe d'évolution de la pluie en fonction du temps. En un point donné ou moyenné sur un bassin versant.

**Intensité :** manifestation locale d'un événement. L'intensité est évaluée au moyen de plusieurs paramètres physiques mesurables décrivant localement l'évènement. Dans le cas torrentiel, ces paramètres peuvent être les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, les hauteurs d'engravement, les hauteurs d'affouillement, etc. L'intensité est décrite par des cartographies couvrant l'ensemble du territoire exposé et identifiant en tout point soit les valeurs associées à ces paramètres physiques, soit une « classe » (intensité faible, moyenne, forte, etc.) synthétisant les informations portées par ces paramètres. La valeur maximale locale est généralement considérée puisque l'intensité varie également au cours du temps durant l'évènement. Cette notion intervient dans la caractérisation des niveaux d'aléas dans la mesure où elle permet d'appréhender les effets prévisibles sur les enjeux en cas d'atteinte. L'intensité ne doit pas être confondue avec la magnitude, qui décrit globalement un évènement.

**Laminage :** le laminage (ou écrêtage) d'une crue est la transformation de l'onde de crue ayant pour effet de diminuer le débit maximal (débit de pointe) en répartissant dans le temps le volume d'eau transporté lors de la crue. Le laminage est la conséquence d'un stockage temporaire du volume de la crue, par exemple dans le lit majeur du cours d'eau (laminage naturel) ou dans la retenue d'un barrage (laminage artificiel).

**Lave torrentielle :** type de transport solide se faisant sous forme de coulées d'apparence monophasique dont le comportement est intermédiaire entre un fluide et un solide (et qui, sur beaucoup d'aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler). Les concentrations en matériaux solides sont très élevées (plus de 50 % et jusqu'à 80 %) et l'étendue granulométrique des matériaux est souvent très large. L'écoulement se fait en bouffées successives indépendantes (sous la forme de vagues qui peuvent atteindre quelques mètres de hauteur, se propageant à une vitesse de quelques m/s) et le tri granulométrique est faible tout au long de l'écoulement ou lors de la phase de dépôt. Leur arrêt se fait « en masse » dans les zones moins pentues, avec une épaisseur de dépôt importante et la présence d'un bourrelet frontal. Une certaine quantité de matériaux peut aussi se déposer en bordure des écoulements, sous forme de bourrelets latéraux linéaires.

**Lit majeur :** lit occupé par les crues rares à exceptionnelles (périodes de retour variant de 10 à plus de 100 ans). Dans des vallées escarpées, il peut correspondre à tout le fond de vallée jusqu'aux pieds de versants.

**Lit mineur :** chenal principal du cours d'eau. Il est généralement emprunté par la crue annuelle, dite crue de plein-bord, n'inondant que les secteurs les plus bas et les plus proches du lit.

**Magnitude :** ampleur / puissance globale d'un évènement. La magnitude est évaluée au moyen d'un paramètre physique mesurable ayant une importance prépondérante sur les conséquences de la crue. Elle est décrite par une valeur numérique unique à l'échelle de l'évènement. Dans ce cas torrentiel, la magnitude peut correspondre par exemple au débit liquide de pointe ou au volume total d'apport solide. Cette notion est notamment utilisée pour décrire la période de retour de l'évènement. La magnitude ne doit pas être confondue avec l'intensité, qui est une notion locale et plus fine.

**Période de retour :** intervalle de temps (généralement exprimé en années) séparant en moyenne sur une très longue période deux événements dépassant une valeur seuil d'une variable caractéristique (classiquement le débit de pointe pour les crues).

**Profil en long :** évolution de l'altitude du fond d'un chenal torrentiel en fonction de l'abscisse longitudinale de ce dernier.

**Profil en travers :** forme géométrique de la section du chenal dans un plan perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement.

**Pression de référence :** pression retenue pour dimensionner le renforcement des structures ou des murs.

**Remous :** zone d'influence des conditions d'écoulement liée à une singularité, un obstacle ou un ouvrage, en général caractérisée par une rehausse des niveaux par comparaison avec les conditions d'écoulement sans obstacle.

**Respiration :** la respiration du lit durant la crue regroupe toutes les variations temporaires et souvent chaotiques du niveau du lit dues aux irrégularités de la fourniture en matériaux et au caractère intrinsèquement instable du charriage torrentiel (divagations, antidunes, effet des contractions marquées, etc.). Son estimation reste délicate et repose essentiellement sur l'expérience et l'observation détaillée du lit.

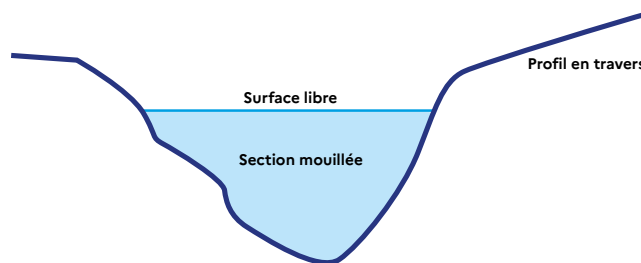
**Rhéologie / comportement rhéologique / loi de comportement :** dans le cadre de la mécanique des fluides, étude du comportement des matériaux lié aux contraintes et aux déformations. Le comportement rhéologique est exprimé par une loi de comportement : expression mathématique reliant les contraintes locales aux vitesses de déformation (notamment vitesse de cisaillement) dans le fluide.

**Rivière torrentielle :** type de cours d'eau torrentiel fréquent en fond de vallées environnées de reliefs importants. Ses caractéristiques morphologiques usuelles sont un bassin versant de quelques dizaines à centaines de km<sup>2</sup>, des pentes de quelques % (souvent entre 1 et 5 – 6 %). Lors des crues, les transports solides sont importants et se font sous forme de charriage.

**Section mouillée :** section plane perpendiculaire à l'écoulement délimitée par la partie du chenal en contact avec l'eau et par la surface libre de l'écoulement.

**Suspension :** type de transport solide où la turbulence des écoulements maintient des éléments fins en suspension et les déplace dans la masse du flot. La suspension, n'a d'influence sur les rivières à forte pente que lorsque la concentration est considérable comme dans les terres noires des Alpes du Sud par exemple. Elle peut toutefois jouer un rôle essentiel dans la formation des lits majeurs et des terrasses alluvionnaires élevées des rivières torrentielles.

**Test de sensibilité :** test dont l'objectif est d'évaluer comment des incertitudes relatives aux hypothèses de construction d'un scénario se répercutent sur les résultats de ce scénario. Exemples : sensibilité au regard des estimations de débits, des choix de coefficients de rugosité ou des hypothèses sur la prise en compte d'embâcles.





**Torrent** : type de cours d'eau torrentiel fréquent dans les zones de reliefs importants. Ses caractéristiques morphologiques usuelles sont un bassin versant ne dépassant pas quelques dizaines de km<sup>2</sup>, des pentes souvent très fortes en partie supérieure (plusieurs dizaines de %) à fortes vers l'exutoire (au moins 2 % et souvent plus de 5 à 6 %) et des entités morphologiques typiques (le bassin de réception supérieur, le chenal d'écoulement en partie médiane et le cône de déjection à l'exutoire). Lors des crues, les transports solides sont très importants et se font sous forme de charriage (sur tous les torrents) et/ou sous forme de laves torrentielles (sur certains d'entre eux).

**Transport solide** : mise en mouvement et transport de matériaux solides par les écoulements d'un cours d'eau. Les matériaux solides transportés peuvent être de tailles très variables (de la particule sédimentaire au bloc rocheux de plusieurs centaines de tonnes). Le transport solide peut se faire sous forme de suspension, de charriage ou de laves torrentielles.

## 7.9. Liste des signes et abréviations

**ADS** : application du droit des sols.

**CNPF** : Centre national de la propriété forestière.

**DDT(M)** : direction départementale des territoires (et de la mer).

**DGALN** : direction générale, de l'aménagement, du logement et de la nature.

**DGPR** : direction générale de la prévention des risques.

**DREAL** : direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

**EDD** : étude de dangers.

**EPCI** : établissement public de coopération intercommunale.

**FPRNM** : fonds de prévention des risques naturels majeurs (fonds « Barnier »).

**GEMAPI** : compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations.

**GIEC** : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière.

**INRAE** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

**ONF** : Office national des forêts.

**POA** : personnes et organismes associés à l'élaboration du projet de PPRN.

**MEDDTL** : Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (ancien nom du MTECT).

**MNT** : modèle numérique de terrain.

**MTECT** : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

**PCS** : plan communal de sauvegarde.

**PNR** : parc naturel régional.

**PPRi** : plan de prévention des risques d'inondation.

**PPRiCET** : plan de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels.

**PPRN** : plan de prévention des risques naturels.

**RTM** : restauration de terrains en montagne.

**SCoT** : schéma de cohérence territoriale.

**SDIS** : service départemental d'incendie et de secours.

**WSL** : institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (Suisse).

## 7.10. Index des illustrations, figures et photographies

<b>Illustration 1</b> : la crue du Trapel (affluent de l'Aude) a emporté un pont à Villegailhenc (©AFP, 2018)	8
<b>Illustration 2</b> : 1957, Ristolas – Hautes Alpes (©Henri Vincent)	9
<b>Illustration 3</b> : 1987, Grand-Bornand – Haute Savoie (©ONF-RTM)	9
<b>Illustration 4</b> : 2013, Barèges – Hautes Pyrénées (©ONF-RTM)	9
<b>Illustration 5</b> : 2020, vallée de la Vésubie – Alpes Maritimes (©Cerema)	9
<b>Illustration 6</b> : 1875, Verdun sur Ariège (©M. D'Ussel)	10
<b>Illustration 7</b> : 1892, Hameau de Bionnay (©C. Kuss)	10
<b>Illustration 8</b> : démarche générale d'élaboration d'un PPRN (hors procédure d'application anticipée)	12
<b>Illustration 9</b> : articulation des grandes étapes techniques de l'élaboration d'un dossier de PPRN	14
<b>Illustration 10</b> : décomposition schématique d'un bassin versant torrentiel (©Naaim Bouvet et Richard 2015)	18
<b>Illustration 11</b> : les torrents du Grésivaudan en Isère	19
<b>Illustration 12</b> : écoulement sur forte pente, très irrégulier, avec dissipation de l'énergie dans les ressauts ; la submersion relative est faible (Torrent de l'Yse – Luz-Saint-Sauveur - ©un riverain)	21
<b>Illustration 13</b> : le torrent de la Malsanne (Isère), après une forte crue	23
<b>Illustration 14</b> : bras de Mahavel (Réunion)	24
<b>Illustration 15</b> : Haut Tavignano, Corte (Haute-Corse)	24
<b>Illustration 16</b> : correspondance et continuité entre pente, type de cours d'eau, type de transports solides et concentration volumique des écoulements	25
<b>Illustration 17</b> : schéma des modes de transport solide (©Graf et Altinakar, 2000)	25
<b>Illustration 18</b> : profil schématique d'une bouffée de lave torrentielle (©Naim-Bouvet et Richard, 2015)	27
<b>Illustration 19</b> : lave torrentielle - torrent de l'Illgraben - La Souste Valais CH – (©WSL)	27
<b>Illustration 20</b> : incision généralisée du lit du torrent de la Ravoire, Bourg Saint Maurice - 1981 (©ONF-RTM)	28
<b>Illustration 21</b> : affouillements de berges – Le Bastan en amont de Barèges – juin 2013 (©sécurité civile)	28
<b>Illustration 22</b> : affouillements par le Bastan à Barèges, Hautes-Pyrénées – juin 2013 (©ONF-RTM)	28
<b>Illustration 23</b> : dégâts causés à l'angle d'un bâtiment du fait de la concentration des écoulements - Saint Martin d'Uriage, 2005 (©IRMA)	29
<b>Illustration 24</b> : engravements	29
<b>Illustration 25</b> : dommages provoqués par une lave torrentielle à Modane en juillet 2014 (©INRAE, G.PITON)	30
<b>Illustration 26</b> : lissage de la topographie selon la pente. Le Nant St-Claude au Champet, Savoie - 1883 (©ONF-RTM)	30
<b>Illustration 27</b> : divagations du torrent du Cristillan, juin 1957 - Ceillac - Hautes-Alpes (©Henri Vincent)	31
<b>Illustration 28</b> : dépôt massif de flottants	32
<b>Illustration 29</b> : exemple de dispositifs de protection parafouille	38

<b>Illustration 30</b> : large brèche due à une érosion externe sans débordement - Var - Guil- laumes (06) - 1994 (©ONF)	39
<b>Illustration 31</b> : emprises des débordements historiques d'un « ruisseau » du Lagal à Perles-et-Castelet – Ariège (09)	62
<b>Illustration 32</b> : exemple de configuration de site	66
<b>Illustration 33</b> : exemple de carte d'intensité pour chaque sous-scénario du scénario de référence S1	67
<b>Illustration 34</b> : exemple de carte d'intensité pour un scénario de référence	67
<b>Illustration 35</b> : exemples de cartes d'exposition (enveloppe des zones touchées par les écoulements) des sous-scénarios du scénario 1	68
<b>Illustration 36</b> : exemple de première estimation de carte de probabilité d'atteinte pour un scénario de référence	69
<b>Illustration 37</b> : exemple de carte de probabilité d'atteinte affinée pour un scénario de référence	69
<b>Illustration 38</b> : exemple de carte d'aléa pour un scénario de référence	70
<b>Illustration 39</b> : schéma de définition des façades exposées, latérales ou abritées selon l'angle $\alpha$ (entre la direction de propagation et l'orientation des façades)	82
<b>Illustration 40</b> : schéma de définition des zones abritées	82
<b>Illustration 41</b> : schéma permettant de déterminer la limite supérieure des renforcements et/ou des surélévations de plancher, en cas de petits talwegs ou petites cuvettes	82
<b>Illustration 42</b> : schémas permettant de déterminer la limite supérieure des renforce- ments, en cas de terrassements en déblais ou remblais	83
<b>Illustration 43</b> : profil en long schématique représentant la manière de déterminer la pro- fondeur minimale de fondation (P)	83
<b>Illustration 44</b> : exemples d'affouillement des fondations (en particulier au niveau des angles)	88
<b>Illustration 45</b> : exemples de renforcements ou de protection des fondations	89
<b>Illustration 46</b> : destruction des habitations de Ville Vieille (©fonds Paul Graber)	89
<b>Illustration 47</b> : bâtiment avec laissons et chaînages, ayant subi un affouillement impor- tant sans dislocation de la structure (©CEMAGREF DR)	89
<b>Illustration 48</b> : maison sans liaison ou chaînage, disloquée par des affouillements sous les fondations (©ONF-RTM)	89
<b>Illustration 49</b> : réalisation de liaisons lors de la réhabilitation d'un bâtiment ancien (©SEPIA Conseils)	90
<b>Illustration 50</b> : maison renforcée par contreforts et chaînages externes , dans ce cas par- ticulier, pour la prévention des aléas sismiques, mais solution valable aussi pour d'autres aléas - (©ONF-RTM)	90
<b>Illustration 51</b> : façade endommagée par des impacts d'une crue torrentielle (©région autonome Vallée d'Aoste)	90
<b>Illustration 52</b> : reprise des maçonneries d'un bâtiment ancien (©SEPIA Conseils)	90
<b>Illustration 53</b> : pénétration de la crue par les vitrines du bâtiment (©Roberto Loat OFEG)	91
<b>Illustration 54</b> : mur de protection pour une entrée en façade latérale (©Marc GIVRY)	91
<b>Illustration 55</b> : exemple de carte des phénomènes, pour un PPRN multirisques sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques)	96
<b>Illustration 56</b> : exemple de carte informative des phénomènes historiques, pour un PPRN multirisques sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques)	97
<b>Illustration 57</b> : exemple de carte des enjeux sur fond IGN au 1 : 25 000 (©ONF RTM)	97



<b>Illustration 58</b> : exemple de carte des ouvrages de protection sur fond IGN au 1 : 25 000 (©Alp'Géorisques)	98
<b>Illustration 59</b> : exemple de carte synthétique, indiquant seulement les niveaux d'aléas sur fond IGN, zoomé au 1 : 10 000 (©ONF-RTM)	99
<b>Illustration 60</b> : exemple de représentation synthétique, avec niveaux d'aléas et localisation des zones protégées par des ouvrages (hachures) sur fond orthophotographique IGN, zoomé au 1 : 10 000 (©ONF-RTM)	99
<b>Illustration 61</b> : exemple de représentation graphique d'aléas multiphénomènes - superposition d'aléas torrentiels et d'aléas avalanches sur fond orthophotographique IGN, zoomé au 1 : 10 000 (©ONF-RTM)	100
<b>Illustration 62</b> : exemple illustrant les décalages entre limites cadastrales et orthophotos (©Géoportail)	101
<b>Illustration 63</b> : exemple de zonage réglementaire sur fond de plan cadastral au 1 : 5 000 (©Alp'Géorisques)	101
<b>Illustration 64</b> : maison engravée à la suite d'une brèche dans la digue (©ONF-RTM)	110

## 7.11. Index des tableaux

<b>Tableau 1</b> : périmètre du guide PPR Inondation de cours d'eau torrentiels	11
<b>Tableau 2</b> : approches retenues usuellement pour la caractérisation de l'évènement de référence	34
<b>Tableau 3</b> : exemple de description synthétique des scénarios de référence d'un torrent, les détails des analyses aboutissant à ces valeurs sont à fournir dans l'étude hydraulique associée	35
<b>Tableau 4</b> : synthèse sur la prise en compte des ouvrages dans l'élaboration des PPRI de cours d'eau torrentiels	42
<b>Tableau 5</b> : niveaux d'intensité en fonction des différents paramètres	58
<b>Tableau 6</b> : correspondance entre niveau d'intensité et dommages prévisibles sur les enjeux	60
<b>Tableau 7</b> : probabilité d'atteinte – description sous forme littérale des différentes classes de probabilité qualitative et valeurs semi-quantitatives indicatives associées	63
<b>Tableau 8</b> : niveau d'aléa en fonction de l'intensité et de la probabilité d'atteinte	64
<b>Tableau 9</b> : niveau d'aléa selon l'intensité et la probabilité d'atteinte, avec traçabilité des critères	64
<b>Tableau 10</b> : exemples illustratifs de scénarios de référence	65
<b>Tableau 11</b> : exemple illustratif d'analyse de la vulnérabilité du territoire au regard des aléas	73
<b>Tableau 12</b> : principes généraux de caractérisation des niveaux de constructibilité en fonction du niveau d'aléa et du type d'enjeux	76
<b>Tableau 13</b> : exemples de scénarios en zone de confluence	105
<b>Tableau 14</b> : exemples indicatifs de première estimation de la probabilité d'atteinte d'une zone en fonction des sous-scénarios susceptibles de l'affecter	108
<b>Tableau 15</b> : comparaison des potentiels de dangers des digues fluviales versus digues de torrent	110
<b>Tableau 16</b> : synthèse sur la fonction, les modes de défaillances et la prise en compte des ouvrages de protection active dans l'élaboration des PPRI	112

## 7.12. Bibliographie

- ✍ Arnaud-Fassetta G, Fort M. (2004). La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud. Méditerranée **102** : 143–156. <https://doi.org/10.3406/medit.2004.3350>
- ✍ Antoine, J-M. ; Desailly, B. (2001) *Habitat, terroirs et cônes de déjection torrentiels dans les Pyrénées commingeoises*. BERTHE M., CURSENTE B.(éd.) : *Villages pyrénéens : Morphogénèse d'un habitat de montagne*. Toulouse : Presses universitaires du Midi, 27-44 : [http://w3.geode.univ-tlse2.fr/permanents/antoine/villages\\_pyr\\_cones.PDF](http://w3.geode.univ-tlse2.fr/permanents/antoine/villages_pyr_cones.PDF)
- ✍ Antoine J-M. 2011. Vulnérabilité et adaptation des sociétés montagnardes à la torrencialité au cours du Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées. Sud-Ouest européen **32** : 53–66. <https://journals.openedition.org/soe/685>
- ✍ Arrighi C, Oumeraci H, Castelli F. (2017). *Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters*. *Hydrology and Earth System Sciences* **21** : 515–531. <https://doi.org/10.5194/hess-21-515-2017>
- ✍ Besson, L. – (2005) - Les risques naturels : de la connaissance pratique à la gestion administrative, Editions Techni.Cités.
- ✍ Brunner MI, Seibert J, Favre A-C. 2016. *Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation: Bivariate return periods*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **3** : 819–833. <https://doi.org/10.1002/wat2.1173>
- ✍ Carladous S. (2013) Analyse critique des méthodes d'évaluation de l'efficacité économique des mesures de protection contre les risques naturels en montagne. Univ. Paul Valéry Montpellier III. Mémoire de Master. 130 pages.
- ✍ Chambon G, Laigle D. 2013. Chap. 4 - Les laves torrentielles. In *Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement*, Recking A, Richard D, and Degoutte G (eds). Quae; 200–266.
- ✍ Comiti F, Lucía A, Rickenmann D. (2016). *Large wood recruitment and transport during large floods: A review*. *Geomorphology* **269** : 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.016>
- ✍ Cosandey C, Andréassian V, Martin C, Didon-Lescot JF, Lavabre J, Folton N, Mathys N, Richard D. 2005. The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology* **301** : 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.040>
- ✍ Evin G, Piton G. 2020. Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne . INRAE; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) [en ligne]: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509705/>
- ✍ Favier P, Piton G., Ousset I., Tacnet JM. (2019) Analyse comparative des méthodes dites « multicritère » dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 2 : méthodologie d'évaluation des dommages-CGDD ; IRSTEA - 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132546v1>
- ✍ Givry, M. et Peteuil C. (2011) *Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/210183/construire-en-montagne-la-prise-en-compte-du-risque-torrentiel>
- ✍ Gominet S. 2010. Tout le monde le prenait pour un fou - événements et catastrophes naturelles en Isère - mars 2001 - décembre 2008. IRMA : Institut des Risques MAjeurs. 43 pages. En ligne: [http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/ouvrages/livre\\_photo\\_site.pdf](http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/ouvrages/livre_photo_site.pdf)

- ✍ Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2000). *Hydraulique fluviale: écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple* (Vol. 16). PPUR presses polytechniques.
- ✍ Hartford DND, Baecher GB. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. Thomas Telford.
- ✍ Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Edenhofer O, Stocker TF, Field CB, Ebi KL, Matschoss PR. 2011. The IPCC AR5 *guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups*. *Climatic Change* **108** : 675–691. DOI: [10.1007/s10584-011-0178-6](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0178-6)
- ✍ Météo-France, (2018), tout savoir : un épisode méditerranéen. Vidéo éducative. En ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=PZa3yL2D2EI>
- ✍ Météo-France, (2022), Retours d'est sur le Queyras, page web. En ligne : <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Retours-d-est-sur-le-Queyras.html>
- ✍ Meunier M. (1989). Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche* 5 : 361–376. <https://doi.org/10.1051/lhb/1989040>
- ✍ Meunier M. 1994. Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *La Houille Blanche* 3 : 25–31. <https://doi.org/10.1051/lhb/1994039>
- ✍ Morel, M., Piton, G., Evin, G., Le Bouteiller, C. 2022. *Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord - Action 3 : Caractériser la production sédimentaire*. [Rapport de Recherche] INRAE - Version 2, 95 p. + annexes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03549827>
- ✍ MTES (2019) Modalités d'application du décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les « aléas débordement de cours d'eau et submersion marine » - Décret PPRi. Note du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Novembre 2019. 16 p.
- ✍ Musolino G, Ahmadian R, Falconer RA. (2020). Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method. *Journal of Hydrology X* **9** : 100067. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100067>
- ✍ Naaim-Bouvet F., Richard D. (2015) *Les Risques naturels en montagne* - Editions Quae.
- ✍ OFEV. (2019). *Bois flottant dans les cours d'eau*. Office fédéral de l'environnement, Berne. En ligne : [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr\\_BAFU\\_UW-1910\\_Schwemmholz\\_2\\_GzD\\_12-12%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20(002).pdf)
- ✍ 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 - CGDD ; IRSTEA. 2018, 46 pages. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132339v1>
- ✍ Piton G, Carlados S, Marco O, Richard D, Liebault F, Recking A, Quefféléan Y, Tacnet JM. (2019). Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives. *La Houille Blanche* : 1:57–67. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019008>
- ✍ Piton G, Carlados S, Tacnet JM. (2022). Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées - Application à la problématique des crues torrentielles : approche et cas d'étude. Commissariat général au développement durable (CGDD).
- ✍ Quefféléan Y. (2015) - Évaluation du temps de montée des crues torrentielles rapides - Rapport pour la DGPR - ONF-RTM. 200 pages. Disponible en ligne.

- ✍ Quefféléan Y. et al. (2019) Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel , Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations, 3<sup>e</sup> colloque Dignes. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2531313>
- ✍ Quiniou M, Piton G. 2022. Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations. MTE-DGPR, PLVG et de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne: Rapport de synthèse ISL – INRAE.
- ✍ Recking A., Richard D., Degoutte G. (2013) Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement - Editions Quae.
- ✍ Rickenmann, D. (1992) Les écoulements hyperconcentrés en matériaux granulaires. In Colloque d'experts crues torrentielles, Société Hydrotechnique de France SHF.
- ✍ Surell A. (1841) Etude sur les torrents des Hautes Alpes (1<sup>ère</sup> édition). Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris. 280 pages.
- ✍ Vick SG. (1997). *Dam safety risk assessment: new directions*. *Water Power and Dam Construction* 49 : 40–42.



Direction générale de la prévention des risques  
Service des risques naturels et hydrauliques  
Sous-direction de la connaissance des aléas et prévention  
Bureau des risques d'inondation et littoraux

Conception graphique : Benoit Cudelou (SG/DAF/SAS/SETI/SETI2.2) -  
Impression : atelier de reprographie de l'Arche (SG/DAF/SAS/SETI/SETI2.3).

Tour Séquoia, 1 place Carpeaux 92800 Puteaux.  
Tél. : 01 40 81 21 22

[www.ecologie.gouv.fr](http://www.ecologie.gouv.fr)



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET DE LA COHÉSION  
DES TERRITOIRES**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

---