



éléments

mitigation

Construire en montagne



la prise en compte
du risque **torrentiel**

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE,
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

CONSTRUIRE EN MONTAGNE LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE TORRENTIEL

Cet ouvrage a été élaboré et réalisé par Marc Givry, architecte, et Christophe Peteuil, ingénieur hydraulicien au service ONF-RTM 38.

Ils ont réalisé ce travail avec l'assistance d'un groupe de pilotage qui comprenait :

- Jean Marc Bernard, MEDDTL/DGPR/SRNH
- Christophe Hugot, Bureau Véritas
- Olivier Marco, ONF-RTM national
- Marie Renne, MEDDTL/DGPR/SRNH
- Jean Pierre Requillart, ONF-RTM national
- Didier Richard, Cemagref

Ils ont bénéficié de la collaboration et des conseils des personnalités suivantes :

- Christophe Ancey, EPFL, Suisse
- ANEM : Vincent Descoeur, Henri Nayrou
- Gian Reto Bezzola, OFEV, Suisse
- CETE Méditerranée : Rémy Chaille, Anne Chanal, Lucie Chever, José Luis Delgado, Geneviève Faure Vassal
- CSTB : Charles Baloche, Ménad Chenaf, Jean Luc Salagnac
- Alain Delalune
- Sébastien Gominet, IRMa
- Vincent Koulinsky, ETRM
- Dominique Laigle, Cemagref
- Raymond Lestournelle, SGMB
- François Xavier Marquis, Ingénieur Conseil, Suisse
- MEDDTL/DGPR/SRNH : Thierry Hubert, Anne-Marie Levraut, Murièle Millot
- MEDDTL/DGALN/DHUP : Mathieu Fournier, Gérald Garry
- Maurice Meunier
- ONF-RTM : Bruno Lailly, Pierre Macabiès, Carine Massé, Yann Quefféléan
- Région Autonome Vallée d'Aoste : Sara Ratto, Valério Segor
- Dieter Rickenmann, WSL, Suisse
- Jacques Salager, CERTU
- Takao Yamakoshi, PWRI, Japon

Ils ont aussi profité des Recommandations pour la protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels, éditées par l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, Berne 2005, qu'ils remercient tout particulièrement.

Photo de couverture :

Crue du Torrent du Bez – La Salle les Alpes – 24 juillet 1995 – Source Gendarmerie nationale

PRÉFACE

Traditionnellement, en montagne les populations se sont installées sur les versants peu abrupts et les cônes de déjection fertiles des torrents. Malgré le risque de débordement et d'importants dégâts épisodiques, les nombreux intérêts de cette situation ont favorisé l'implantation et le maintien des activités humaines à proximité immédiate de ces cours d'eau.

Là comme ailleurs, il a été nécessaire d'apprendre à vivre avec le risque. Au-delà des pratiques développées par les populations locales, la croissance de l'urbanisation en montagne s'est accompagnée d'une démarche de prévention qui s'est formalisée au fil des ans.

Cette démarche de prévention s'appuie en particulier sur deux actions complémentaires :

- la maîtrise de l'aménagement et de l'occupation du sol en ne construisant pas où l'aléa est le plus fort,
- la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens en construisant de façon solide et adaptée.

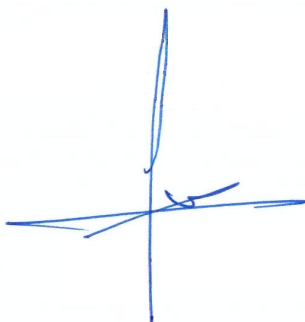
Les documents d'urbanisme, lorsqu'ils existent (SCOT, PLU et cartes communales), doivent prendre en compte les risques dans l'aménagement de l'espace et l'occupation du sol (art. L.121-1 du code de l'urbanisme). Mais, dans les communes les plus exposées, les plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) s'imposent, notamment pour prescrire des mesures de réduction de la vulnérabilité applicables aux constructions existantes ou futures.

Dans les communes de montagne non pourvues d'un PPRN, il est indispensable de mettre en œuvre des mesures de même nature pour les constructions potentiellement exposées à un risque torrentiel dans le but de réduire leur vulnérabilité.

Ce guide a pour objet d'apporter aux différents acteurs concernés une somme d'information de toutes natures sur cette question afin de les sensibiliser à ces phénomènes et à leur prise en compte dans la conception des bâtiments. A cet effet, il fournit des éléments de références pour que chacun, en ayant conscience de la complexité des phénomènes et de l'incertitude des connaissances actuelles, puisse se poser les bonnes questions et envisager des réponses pertinentes.

Nous souhaitons qu'il contribue à aider les maîtres d'ouvrage comme les professionnels du bâtiment à porter une attention particulière à la conception et à la construction dans les zones de montagne soumises aux risques des torrents.

Le directeur général
de l'aménagement,
du logement et de la nature

A stylized blue ink signature consisting of several intersecting lines forming a cross-like shape with additional horizontal and vertical strokes.

Jean-Marc Michel

Le directeur général
de la prévention des risques,
délégué aux risques majeurs

A fluid, cursive blue ink signature that starts with a large loop and ends with a long, sweeping horizontal stroke.

Laurent Michel

SOMMAIRE

0	INTRODUCTION	7
1	APERÇU HISTORIQUE	13
2	LE RISQUE TORRENTIEL	35
3	CONNAISSANCE ET AFFICHAGE DU RISQUE	47
4	IMPACT CONSTATÉ SUR LES CONSTRUCTIONS	61
5	CALCUL DES EFFORTS SUR LES CONSTRUCTIONS	67
6	RÉPONSES CONSTRUCTIVES	89
7	RÉFLEXIONS D'URBANISME	105
8	CONCLUSION	115
	ADRESSES UTILES	116
	GLOSSAIRE	118
	SIGLES	118
	BIBLIOGRAPHIE	118
	INDEX DES ILLUSTRATIONS	119
	TABLE DES MATIERES	122

0 INTRODUCTION

Si sur Internet, vous procédez à une recherche d'images en tapant le mot "torrent", vous obtiendrez quelques millions d'illustrations, bucoliques pour la plupart, et cette collection d'image vous donnera sans doute une image idyllique et très attractive des torrents.

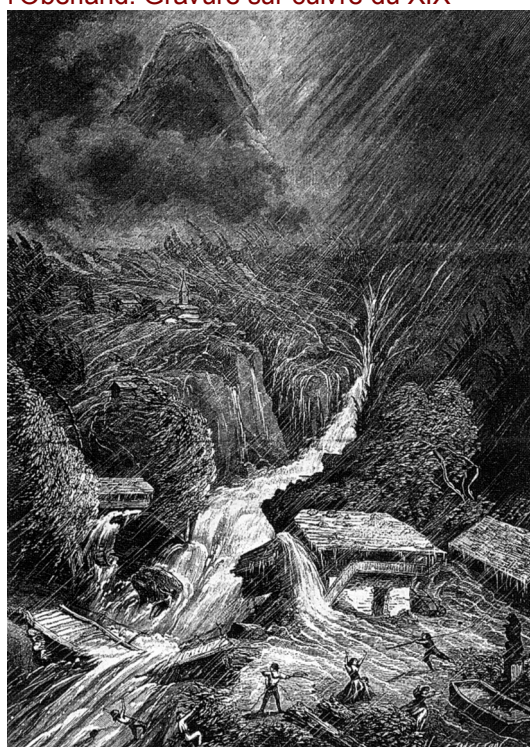
Mais si dans une bibliothèque vous effectuez la même recherche, les ouvrages du XIX^e siècle seront souvent plus dramatiques, les images souvent plus noires et le tableau ainsi dressé plutôt terrifiant.

Photo 0.1 : Torrent "délicieux", début du XXI^e



Source : Marc Givry

Photo 0.2 : Orage et crue torrentielle dans l'Oberland. Gravure sur cuivre du XIX^e



Source : Bibliothèque Municipale de Grenoble

Pour comprendre ce double aspect des torrents, il importe sans doute de se référer à l'étymologie.

Comme on pourrait s'en douter, le mot français "torrent" provient du latin *torrens*.

Mais ce qu'on sait moins, c'est que le mot latin *torrens* est issu lui-même du verbe *torrere* qui veut dire brûler (brûler au sens de "dévorant, impétueux", à ce titre on retrouve cette racine dans des mots tels que "torride" ou "torréfier").

Si donc le mot torrent nous vient des Romains, il faut sans doute remonter beaucoup plus loin pour comprendre les rapports tumultueux que les hommes et les torrents ont toujours entretenus.

La toponymie, l'atteste. En effet, si on consulte *Les noms du paysage alpin*, l'atlas toponymique d'Hubert Bessat et Claudette Germi, on apprend que *"les nombreux hydronymes alpins appartiennent à des strates linguistiques réellement anciennes, souvent antérieures à la langue gauloise"*.

Par exemple, si l'appellation "nant", qui dans beaucoup de communes de Savoie exprime le torrent, provient de la base étymologique *nantu* qui en gaulois signifiait "vallée", des hydronymes tels que Dore, Doran, Doron, Doire, Doria, Dure, Duire, Durance, Dranse, Dronne, qui reviennent avec une certaine régularité sur tous les versants des Alpes, remontent sans doute à une époque préhistorique et marquent l'homogénéité du premier peuplement des Alpes internes il y a 6000 ans.

Depuis bien longtemps donc, dans les montagnes les hommes et les torrents vivent de concert. En effet, la proximité de l'eau fut de tout temps une des raisons majeures des implantations humaines.

Et depuis bien longtemps, les hommes ont subi les débordements des torrents.

Photos 0.3, 0.4 : Saint Marc et Saint Claude à Sollières-Sardières



Source : Marc Givry



Pour s'en défendre, ils ont bien sûr d'abord invoqué les Dieux, puis les Saints.

Par exemple à Sollières-Sardières, un peu au dessus du village au débouché du Torrent de l'Envers¹ on trouve un petit oratoire avec cette inscription sans ambiguïté :

"St MARC PRESERVEZ NOUS DU TORRENT".

Mais si St Marc protège ainsi le village par le haut, on trouve aussi sur le côté une chapelle vouée à St Claude² dont l'influence sur les torrents est aussi réputée.

¹ Les méfaits du Torrent de l'Envers sont signalés depuis des époques très lointaines. En 1680, une chronique indique :

"les dégâts sur le territoire de Sollières furent tels que le châtelain dut se rendre sur les lieux".

² Claude de Besançon, Archevêque de Besançon, mort en 696. Sa légende lui attribue la résurrection de trois enfants noyés. Après sa mort, il coupe la corde d'un pendu, et un voyageur est sauvé de la noyade par sa protection : deux anges le ramènent chez lui en éclairant sa route.

Une influence bénéfique était aussi accordée aux cloches. A ce sujet, l'ouvrage de Jean-Marie Jeudy, *Montagne maudite, montagne apprivoisée*, rapporte avec verve quelques belles histoires de cloche³.

Document 0.1 : extrait de *Montagne maudite, montagne apprivoisée* de Jean-Marie Jeudy

Face à ces sournoiseries malsaines expédiées par la nature vengeresse, la protection était assurée par ce que l'on pourrait appeler les pouvoirs « antitempestaires ». Ces pouvoirs étaient détenus par les cloches des églises et des chapelles.

Certaines campanes avaient acquis une solide réputation. Telle la bien baptisée Marie-Sauveterre à Modane. Ou ses voisines Marie-Marthe à Bramans et Marie-la-Grosse à Lanslebourg. L'inégalable dans la confrérie demeurait la Grande Marguerite de l'église de Grésy-sur-Isère. Elle possédait un son cristallin qui avait la faculté de s'interposer devant les orages.

On a dit qu'elle sauva la vie à deux bûcherons qui n'avaient pas craint d'aller couper du bois de fayard (hêtre) le jour de la Toussaint. Les mécréants glissaient les troncs dans le lit à sec du Grand Nant. Trop occupés dans leur besogne, ils ne virent pas approcher l'orage. Il fit fondre des pierres et des souches d'arbres en quantité. Se sentant perdus, les deux hommes s'abritèrent sous un rocher.

Ils entendirent les diables qui disaient :

- Mais, pousse, pousse donc !
- Je ne peux pas, répondaient leurs comparses, la Grande Marguerite m'arrête !

Ce type de dialogue entre les forces du mal était fréquent dans la mythologie montagnarde. À Modane, le ruisseau de Saint-Antoine avait grossi à la suite d'un orage. Les diables faisaient rouler des blocs rocheux dans l'espoir sadique de faire déborder le torrent. Les Modanais massés sur les rives avaient nettement entendu ces propos :

- Mets en bas ! Mets en bas !
- Je ne peux pas, Marie-Sauveterre sonne !

S'en prenant volontiers aux torrents portant le nom d'un saint, les diables devant leur impuissance, fulminaient, blasphémaient et désignaient la cloche par des surnoms méprisants. Mais le dialogue entre les forces du mal semblait déjà annoncer l'insuccès de leur entreprise. Preuve si l'en était que la puissance religieuse était la plus forte.

Au XIX^e siècle, petit à petit, les croyances et les légendes firent place à la volonté des hommes de maîtriser la nature et au triomphe de la raison.

En 1876, Viollet le Duc, dans son ouvrage *Le massif du Mont Blanc* rejettera la Providence. Se faisant le chantre d'une nature, "rigoureusement fidèle à ses lois", il s'efforcera de provoquer "une étude attentive et pratique de l'aménagement des cours d'eau dans les montagnes".

Ce message sera sans doute bien entendu et en 1894, Prosper Demontzey, Ingénieur des Eaux et Forêts, présenté parfois comme le "dompteur des torrents" pourra publier *L'extinction des torrents en France par le reboisement*.

Par analogie avec les volcans et en reprenant la formulation développée dès 1841 par Alexandre Surell qui, quant à lui, était Ingénieur des Ponts et Chaussées, Prosper Demontzey parlera de torrent *en activité* et de torrent *éteint*. Et pour *éteindre* les torrents, il proposera de les *corriger*.

³ Très souvent, à la fin d'une crue torrentielle, le bronze à force d'être "battu" se fendait, et la nécessité d'acheter une nouvelle cloche figurait souvent au premier rang des dommages...

Cette approche très volontariste, donnera lieu à d'importants travaux de restauration des terrains en montagne : de 1882 à 1914, pendant l'âge d'or de la "RTM" (la Restauration des Terrains en Montagne), 1 100 torrents seront traités et 300 000 hectares reboisés.

Photo 0.5 : Restaurer la montagne - Photographies des Eaux et Forêts du XIX^e



Source : Conseil Général des Bouches du Rhône – Direction de la Culture

Mais après la première guerre mondiale, en parallèle avec la baisse de la population montagnarde traditionnelle, le mouvement s'essoufflera.

Après la deuxième guerre mondiale, la réduction des crédits ne permettra même plus de faire face aux besoins d'entretien les plus pressants. De la sorte "*l'extinction des torrents*" ne sera plus à l'ordre du jour et "*l'invasion de la montagne par le tourisme*" prendra le relais.

Mais à la fin du XX^e siècle, le "Plan Neige" (1960), puis les catastrophes de Val d'Isère et de Passy (1970) seront suivis dans les années 1980 d'une forte politique publique de prévention des risques naturels.

Dans ce cadre, les missions traditionnelles de la Restauration des Terrains en Montagne, aujourd'hui service spécialisé de l'Office National des Forêts, seront réactivées mais surtout des préoccupations nouvelles verront le jour : la cartographie et le zonage des risques, mais aussi la réduction de la vulnérabilité des constructions, cette évolution étant à mettre en rapport avec le souci d'un développement qui se voudrait dorénavant plus durable.

Document 0.2 : extrait de *Restaurer la montagne*, Museon Arlaten, 2004

("De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels", Gérard Brugnot, Yves Cassayre)

Les évolutions récentes

La période contemporaine va effectivement voir la RTM passer par une période très difficile pour se redresser, mais sur des bases sensiblement différentes et susceptibles d'évoluer dans un futur proche.

La décadence (1940-1980)

Face à des besoins d'entretien de plus en plus pressants, on assiste à une réduction tendancielle des crédits, aggravée par un renchérissement de la main-d'œuvre qui, de toute façon, n'accepte plus de travailler dans les conditions du début du siècle.

Parallèlement à cette évolution, on assiste à une mutation profonde des modes d'occupation de la montagne.

Lancé en 1960, le Plan Neige n'est qu'une mesure d'accompagnement du dernier acte de l'invasion de la montagne par le tourisme, commencée un siècle plus tôt dans les Alpes.

Un autre élément est celui du développement des moyens de l'industrie et des transports, y compris internationaux, qui créent de nouvelles vulnérabilités et attirent dans les régions de montagne des populations totalement dépourvues de la moindre connaissance des milieux.

Les accidents de Val d'Isère et de Passy (1970)

Survenus à une époque où les médias et la justice n'occupaient pas encore la place qu'ils occupent aujourd'hui mais jouaient déjà un certain rôle dans la « mise sur agenda » d'un certain nombre de questions, ces deux accidents ont provoqué une réaction très vive de l'opinion et obligé les pouvoirs publics à se saisir de la question de la sécurité de ces nouvelles populations montagnardes, qu'elles soient en situation de loisir, de travail ou de soins médicaux.

C'est dans le domaine des avalanches que les premières mesures concrètes ont été prises. Ce risque n'était pas traditionnellement un risque important pour la RTM ni, d'une certaine façon, pour les populations montagnardes traditionnelles.

Le présent Guide *Construire en montagne, la prise en compte du risque torrentiel* s'inscrit dans cette logique. Il s'insère dans une démarche de réduction des dommages que l'on qualifie maintenant de mitigation⁴ et qui se concentre beaucoup sur les constructions.

Il vient après un précédent Guide abordant le risque d'avalanche et il est construit suivant la même trame.

Dans ce qui suit, on trouvera donc après un bref aperçu historique, des éléments sur le risque torrentiel et sur l'information disponible, puis une approche de l'impact des torrents sur les constructions, des efforts qui en découlent et des réponses constructives qui peuvent être apportées. Enfin, une dernière partie présentera quelques réflexions d'urbanisme sur la question.

A noter que le chapitre sur le calcul des efforts sur les constructions s'appuie largement sur l'expérience suisse à travers des extraits des Recommandations pour la protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels, éditées par l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, Berne 2005.

⁴ Le terme de mitigation est un mot français qui signifie atténuation. Il vient du latin mitigare traduit par atténuer, adoucir. Comme le précisent les dictionnaires les plus communs (Larousse, Petit Robert...), ce mot est particulièrement utilisé en droit. La mitigation des peines équivaut à leur adoucissement, selon l'état de santé ou l'âge du condamné, mais non à leur suppression.

L'ensemble de la communauté internationale utilise ce terme dans la politique de prévention des risques naturels. Il spécifie l'action qui consiste à réduire les dommages afin de les rendre supportables - économiquement du moins - par la société.

Tous les éléments présentés dans le présent guide ne sont pas à prendre comme un corps de connaissances définitif, comme une collection de recettes non plus, et encore moins comme un dogme intangible.

Les éléments du présent guide ne sont en fait que le reflet d'une expérience accumulée. Ils sont donc à considérer plus comme un état de pratiques constatées, que comme un ensemble de prescriptions à respecter impérativement.

1 APERÇU HISTORIQUE

163 après Jésus Christ, Bergintrum, "La violence des torrents"

Dans les Alpes, une des premières indications écrites concernant les risques torrentiels que l'on connaisse se trouve au Musée lapidaire d'Aime. Il s'agit d'une pierre gravée trouvée à Bourg-Saint-Maurice qui démontre que chez les Romains on se préoccupait déjà de faire face à la violence des torrents.

Photo 1.1 : Pierre gravée, Musée d'Aime



Source : Musée Lapidaire d'Aime

Document 1.1 : extrait de *Recueil raisonné des inscriptions latines des Musées d'Aime et des Alpes Grées*

Docteur Pierre Debeauvais, Société d'Histoire et d'Archéologie d'Aime, 1995

Restitution ALLMER :

IMPERATOR CAESAR LUCIUS
AURELIUS VERUS AUGUSTUS
TRIBUNICIA POTESTAT III° CONSUL II°
VIAS PERFINES CEUTRO
NUM VI TORRENTIUM
EVERSAS EXCLUSIS
FLU MINIBUS ET IN NA TU
RALEM ALVEUM REDUCTIS
MOLIBUS PLURIMIS LOCIS
OPPOSITIS ITEM PONTES
TEMPLA ET BALINEAS
PECUNIA SUA RESTITUIT

Traduction ALLMER :

L'empereur César Lucius Aurélius Vérus
Auguste, revêtu de la puissance tribunicienne
pour la 3^e fois. Consul pour la seconde,
a rétabli à ses frais, dans le pays des Ceutrons,
les parties de la route emportées par la violence des torrents,
en a détourné, en les rejetant dans leur lit naturel
et en leur opposant des digues en beaucoup d'endroits,
les cours d'eau dont les débordements l'envahissaient;
a aussi relevé, à ses frais,
les ponts, les temples et les bains.

L'inscription a été gravée entre le 10 décembre 162 et le 10 décembre 163, durée de la troisième puissance tribunicienne de Lucius Verus. Ces travaux ont dû être très importants car moindres, ils n'eussent pas nécessité l'intervention personnelle de l'empereur. La Province des Alpes Grées était Province Procuratorienne et considérée un peu comme le domaine de l'empereur, et celui-ci a pu décider de contribuer à la dépense car les responsables locaux n'auraient pu y subvenir seuls.

Le mot VIAS ne correspond pas à plusieurs routes. Il s'agit là des parties de voies construites avec des chaussées en remblais et des murs de soutènement, ou des contreforts. On a alors souvent accouplé VIAS et PONTES, les "Ponts et Chaussées", en somme. La construction des digues était un ouvrage très important et coûteux. Les temples et les bains ont également été réparés.

Bien que cette stèle ait probablement été érigée à Bergintrum (Bourg-Saint-Maurice), lieu de sa découverte, les réparations n'ont pas dû avoir lieu seulement là, mais PER FINES CENTRONVM, dans tout le pays des Ceutrons.

Pour attester de la violence des eaux à l'époque romaine, on peut aussi citer Lucrèce (98 av JC – 55 ap JC) qui dans son "De la Nature" écrivait :

" Le cours des vents, "qui sème au loin la ruine, est pareil à celui de ces eaux d'abord paisibles qui tout à coup se précipitent en flots abondants, grossies par les torrents que les pluies diluviennes précipitent des montagnes, et entraînent avec elles les débris des forêts, des arbres tout entier. Point de ponts si solides, qu'ils puissent tenir contre cette brusque violence ; le fleuve troublé par les grandes pluies vient heurter avec trop de force leurs assises de pierre, il les fait crouler à grand bruit, il en roule les immenses blocs dans ses eaux ; il renverse tout ce qui lui fait obstacle."

1219, Grenoble, "Diluvium et destructio civitatis Gratianopolis"

L'existence d'un lac dans la plaine d'Oisans, attestée par les archives à partir du XI^e siècle, a suscité de nombreux écrits, plus ou moins documentés, dont certains fort sérieux.

A l'époque, Bourg-d'Oisans s'appelait alors Sanctus Laurentius de secum lacum, c'est à dire Saint-Laurent sur le bord du lac.

En 1191 survient un événement. En raison de pluies et d'orages importants les deux cônes de déjection des torrents de l'Infernet et de la Vaudaine se joignent sur le lit de la Romanche et forment un barrage de matériaux hétérogènes. Saint-Laurent est inondé et les constructions se massent sur un cône au-dessus du bourg actuel. Le barrage dure jusqu'en 1219.

Le 14 septembre 1219, vers 22 heures, la rupture brutale de ce barrage naturel libère un véritable torrent de boue qui dévaste toute la vallée jusqu'à Grenoble, faisant disparaître la moitié de la population de la ville, alors rassemblée pour la foire de la Sainte Croix.

Plusieurs textes font allusion à ce drame mais le récit le plus complet est l'oeuvre de l'évêque de Grenoble, Jean de Sassenage : *"diluvium et destructio civitatis Gratianopolis et diversio pontis supra Isaram 1219, mensis septembris..."*.

Le malheur des uns faisant parfois le bonheur des autres, à la suite de ce désastre la foire aux bestiaux fut alors déplacée de Grenoble à Beaucroissant : cette foire existe encore et elle dispose toujours d'une très grande renommée.

Il n'est donc pas étonnant qu'à Beaucroissant existe une rue qui s'appelle la "Rue du 14 septembre 1219".

Photo 1.2 : Plaque de rue à Beaucroissant



Source : DR

1475, Lucerne, "Ce ruisseau occasionne de grands soucis"

"Ce ruisseau occasionne chaque année de grands soucis à ces Messieurs de Lucerne, afin de le remettre à sa place de telle façon qu'il ne porte plus atteinte aux vies et aux biens"

C'est en ces termes que le chroniqueur lucernois Diepold Schilling rendait compte d'un débordement du Renggbach ayant frappé la ville de Lucerne en 1475. Ce témoignage atteste qu'à la fin du Moyen Age on se préoccupait déjà de protection contre les crues en Suisse.

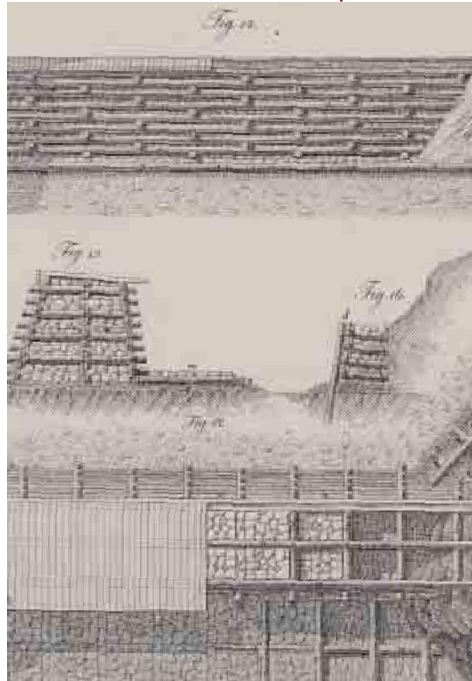
Dans l'ouvrage de l'OFEG, l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, *Histoire de la protection contre les crues en Suisse*, on signale qu'en 1310 des ouvrages ont été construits pour protéger Martigny et qu'en 1331 un décret de l'évêque de Châtillon exigeait des bénéficiaires des terrains voisins qu'ils construisent un ouvrage de défense durable contre la Saltina.

Par ailleurs, l'hydraulique "scientifique" va débiter à la même période. Par exemple, "L'équation de continuité" est attribuée à Léonard de Vinci (1452-1519) ou à Antonio (alias Benedetto) Castelli (1578-1643). A l'époque, elle énonçait que *"lorsque deux sections différentes sont traversées par la même quantité de liquide au cours du même intervalle de temps, les sections sont inversement proportionnelles à la vitesse du liquide"*⁵.

Depuis, l'hydraulique en tant que discipline scientifique et pratique ne va pas cesser de se développer. A l'époque, l'enjeu était d'ailleurs considérable, l'écoulement de l'eau étant une des principales "forces motrices" utilisables. Ce développement sera d'ailleurs généralisé dans toutes les Alpes. Par exemple, dans le Val-Montjoie, le long du bien nommé "Bon Nant", en 1771 on recensait 15 moulins, 9 scieries et 5 battoirs. Avec une longueur de 23 km, cela fait plus d'un ouvrage au kilomètre.

Bien sûr, avec ce développement de l'usage des torrents, les dommages relatés par la chronique se sont élevés en proportion (de nos jours, on dirait sans doute que la vulnérabilité a été notablement augmentée). Mais en corollaire, les dispositifs de protection se sont perfectionnés. Dès la fin du XVIII^e on disposait de véritables manuels pour l'aménagement des rivières et le premier manuel d'aménagement des torrents, *Über die Verbauung von Wildbächen im Gebirge* (De l'aménagement des torrents en région de montagne), a été publié à Innsbruck en 1826 sous la signature de Joseph Dulle.

Photo 1.3 : Utilisation de caissons en bois pour un barrage en torrent



Source : Figure du livre *"De l'aménagement des torrents en région de montagne"* de J. Dulle, Innsbruck, 1826
(extrait de la publication OFEG *"Histoire de la protection contre les crues en Suisse"*)

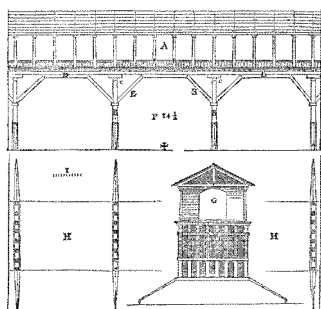
⁵ de nos jours, on dirait plus simplement que le débit est égal au produit de la surface de la section par la vitesse du fluide

1570, Andrea Palladio, "Quattro Libri dell'architettura"

Dans les *Quatre Livres de l'Architecture*, d'Andrea Palladio, comme dans beaucoup de traités d'architecture publiés à partir de la Renaissance, la problématique de l'eau est toujours présente.

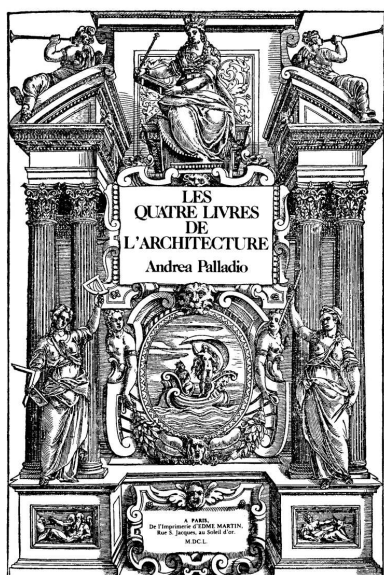
D'une part, pour l'implantation des maisons où Palladio recommande *"Si l'on peut bâtir auprès de quelques rivières ce sera une belle et avantageuse commodité ... mais faute de rivières navigables, on cherchera à bâtir auprès de quelque ruisseau."* Par ailleurs, il rappelle que l'architecte romain Vitruve, auteur du premier traité connu d'architecture, *"a enseigné divers moyens de connaître la bonté des eaux"*.

D'autre part pour l'édification des ponts, il donne des recommandations très précises sur les fondations et le risque d'affouillement. A ce sujet, on peut signaler qu'en 1569, Palladio construisit un pont en bois sur la Brenta à Bassano : plusieurs fois détruit, la dernière fois durant la seconde guerre mondiale, il fut toujours reconstruit et il existe encore.



Le Pont de Bassano sur la Brenta : dessin de Palladio en 1570, photo état actuel DR

Document 1.2 : extrait de *Les Quatre Livres De l'Architecture*, Andrea Palladio
publié à Venise en 1570, traduction de Freart de Chambray 1650



Des observations qu'il faut faire lors de l'édification d'un pont et du lieu qu'on doit choisir pour l'implanter

Le cours des chemins étant quelquefois interrompu par des rivières et des torrents, qui ne peuvent se traverser à gué, la nécessité fit trouver l'usage des ponts qui sont une des principales parties d'un chemin, n'étant en effet autre chose qu'un chemin artificiel pour passer l'eau. Cette espèce de construction demande toutes les qualités que nous avons attribuées à chacune des précédentes, c'est à dire la commodité, la beauté et la durée.

... Mais en faisant choix du lieu où l'on veut bâtir, il faut s'assurer que le fond est tel qu'il y ait l'apparence d'y faire une œuvre de longue durée, et à peu de frais s'il est possible, de sorte que l'eau n'y doit pas être très profonde et a besoin d'être sur un lit égal et stable, de pierre ou de tuf, parce que ces deux espèces de fondations réussissent bien dans l'eau, ainsi que je l'ai fait remarquer dans mon premier livre à propos des fondations.

Il faut aussi se tenir éloigné des fosses où l'eau s'engorge et va tournoyant, aussi bien que des endroits où le canal se trouvera

sablonneux et de terre glaise, parce que ces deux espèces de terrain, ne pouvant pas tenir ferme contre le courant des grandes eaux, changent continuellement le lit du fleuve, de sorte que les fondations venant à être ébranlées, la ruine de la construction s'ensuivrait nécessairement.

On doit aussi prendre garde que le lieu où l'on veut bâtir ait son courant droit, parce que les sinuosités et recoudements des bords sont sujets à être minés et emportés par le battement continuel du cours de l'eau, si bien qu'il pourrait arriver avec le temps qu'il soit isolé et coupé des rives. De plus, pendant les grandes crues, le courant entraîne beaucoup de vidanges et de matières qui se trouvent sur ses berges et dans les champs, et si cette matière vient à rencontrer cet obstacle qui l'empêche de suivre le fil de l'eau, elle s'y arrête et fait successivement un amas d'ordures qui s'attache et enveloppe les piles des arches du pont et en bouche le passage. Il s'ensuit que l'impulsion continuelle du courant entraîne la ruine de la construction.

1781, Horace-Bénédict de Saussure, "Ce n'est pas de l'eau pure"

"Ce n'est pas de l'eau pure, mais une espèce de boue liquide, mêlée d'ardoise décomposée et de fragments de rochers; la force impulsive de cette bouillie dense et visqueuse est incompréhensible; elle entraîne des rochers, renverse les édifices qui se trouvent sur son passage, déracine les plus grands arbres et désole les campagnes, en creusant de profondes ravines, et couvrant les terres d'une épaisseur considérable de limon, de gravier et de fragments de rochers..."

C'est en ces termes qu'en 1781 dans "Voyages dans les Alpes" Horace-Bénédict de Saussure, qui n'avait pas encore gravité le Mont-Blanc (il ne le fera qu'en 1787), décrivait ce qu'on appellerait de nos jours une lave torrentielle. Ce terme de "lave torrentielle" provient en fait des Alpes du Sud. Dans ces contrées, ce vocable était utilisé par analogie avec les coulées de laves volcaniques pour qualifier les coulées de boue et de blocs.

Au XIX^e siècle, cette désignation deviendra courante dans la description des crues torrentielles. A ce sujet, on peut donner comme très bel exemple la description de la "lave du 13 août 1876 dans le torrent de Faucon" faite par M. Schlumberger, garde général des Forêts.

Document 1.3 : extrait de *Lave du 13 août 1876 dans le torrent de Faucon*

Note de M. Schlumberger, cité par Prosper Demontzey dans le "Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes", 1882

J'avais quitté Barcelonnette à 2 heures et demie, au moment où l'orage arrivait sur le bassin de réception du torrent de Faucon. Il tombait quelques gouttes d'eau seulement dans la vallée ; mais tout faisait présumer que la pluie était d'une violence extrême dans la montagne. Arrivé à Faucon, je monte sur le cône de déjection. L'orage avait cessé dans le bassin de réception et déjà l'on apercevait la cime des montagnes légèrement blanchie par la grêle. Cependant j'avance toujours et, arrivé au sommet du cône, au goulot du torrent, j'aperçois une lave formidable qui descend majestueusement la montagne.

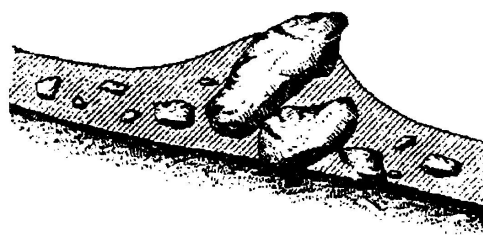
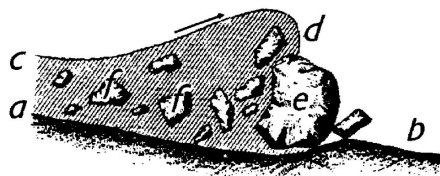
À mes pieds, le lit du torrent, profond de 8 mètres environ et large de 23 mètres, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent en cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant le lit du torrent. C'était la lave qui venait de la montagne, et qu'il m'était donné d'observer dans toute son intensité.

Cette lave, qui coulait rapidement quand la pente du torrent était forte, arrive bientôt à mes pieds, descendant sur une pente de 12 pour 100 tout au plus. Sa vitesse est aussitôt ralentie, et bientôt elle n'est plus que de 1,50 m par seconde.

C'est un amalgame de terre et de blocs de toutes grosseurs, ayant à peine la fluidité du béton. En avant, à moitié prise dans cette boue très épaisse, une avant-garde de gros blocs cubant parfois jusqu'à 5 et 6 mètres semble poussée par la lave. Ces rochers, qui sont entraînés pendant quelques minutes sont engloutis dans le chaos qui les suit dès qu'ils trouvent un obstacle qui les arrête. Ils sont alors remplacés par d'autres qui sont poussés et bientôt engloutis à leur tour.

Toute cette masse n'est point animée d'une vitesse uniforme. Tantôt ce mouvement est assez rapide, tantôt il est au contraire extrêmement lent, et à certains moments même tout semble immobile. Au moindre obstacle, les blocs qui sont en avant, trouvant une résistance à vaincre, par suite de l'inégalité du lit ou d'une diminution de la pente, s'arrêtent brusquement. S'ils forment une masse suffisante, tous les matériaux qui suivent immédiatement sont arrêtés par ces barrages momentanés. Cependant le courant pousse toujours et le niveau de la lave peut alors s'élever à une grande hauteur (jusqu'à 7 mètres au-dessus du fond du lit).

Mais bientôt les matériaux franchissent l'obstacle qui les arrêtait, soit qu'ils aient passé par-dessus, soit qu'ils l'aient fait céder à la pression "formidable" qu'il supportait. Alors la vitesse s'accélère de nouveau et toute la masse se remet en mouvement pour s'arrêter encore.



1814, Vallée de Chamonix, "Les mugissements du torrent"

En juillet 1814, le Baron de Méneval accompagne l'Impératrice Marie-Louise pour une excursion aux glaciers de Savoie, dans la vallée de "Chamouni". Il en donnera par la suite un récit qui sera publié en 1847. Dans ce récit, le passage du torrent de la Griaz fait l'objet d'une description pathétique qui se conclut par : *"Les torrents de Nayin et de la Griaz, s'ils pouvaient parler, auraient à raconter plus d'un naufrage"*⁶.

Document 1.4 : extrait de *Récit d'une excursion de l'Impératrice Marie-Louise aux glaciers de Savoie*

Claude-François de Méneval, publié chez Amyot à Paris en 1847

Le Nant-de-Nayin était déjà enflé par l'affluence des eaux, quand nous le traversâmes. À neuf heures nous entrions dans la vallée du Prieuré, pour suivis par l'orage, dont la voix menaçante se rapprochait de nous, et hurlait, comme si un chœur de démons s'y fût mêlé. Le désir de lui échapper nous aurait donné des ailes; mais l'obscurité nous forçait à marcher avec précaution. Nous n'apercevions ni le ciel ni la terre. La nuit nous avait surpris dans les pas les plus dangereux, où nous aurions eu besoin de toute la clarté du jour.

À nos sujets d'inquiétude réels ou imaginaires se joignait l'alarme que nous causait chaque passage des torrents que la pluie grossissait de moments en moments, quand subitement illuminés par les éclairs, ils nous montraient des abîmes effrayants, dans lesquels la moindre hésitation de nos mulets aurait pu nous précipiter nous et nos montures.

La proximité du danger nous avait rendus insensibles à la majesté du spectacle, et nous restâmes consternés, les pieds attachés à la place où nous nous étions arrêtés, il nous restait encore deux lieues à faire. Le désordre se mit dans notre petite troupe. L'abondance de la pluie, le fracas des torrents, les éclats du tonnerre répétés par les rochers, nous causaient une terreur muette.

Un sentiment confus de confiance et d'inquiétude m'attachait aux pas de mon auguste compagne de voyage. Si la crainte vague d'un danger venait me troubler quelquefois, son courage me rassurait. Deux guides dirigeaient sa marche au milieu des ténèbres. Nous parvînmes dans cet état sur les bords du torrent de la Griaz, dont les mugissements entendus de loin, augmentaient notre anxiété ...

Par la suite, le torrent de la Griaz, dorénavant célèbre par ses mugissements, continuera à faire parler de lui. Paul Mougin, dans *Les Torrents de la Savoie*, publié en 1914, en parle ainsi : *"Survient-il une chute de grêle, il en est de puissantes qui couvrent le sol d'une couche de glace qui peut dépasser 1 demi-mètre, c'est pis encore ! Les blocs les plus lourds, déchaussés par le choc mécanique des grelons sur le sol, se mettent en mouvement et une coulée chaotique roule par flots successifs jusqu'à l'Arve. Les villages des Houches et la Griaz, la route départementale n°4 de Genève à Chamonix, le chemin d'intérêt commun n°36, et le chemin de fer électrique du Fayet à Martigny même, sont exposés aux incursions du terrible torrent."*

Photo 1.4 : Vallée de Chamonix, le torrent de la Griaz en 2007



Source : Marc Givry

Dans les années 1980, lors de la construction de l'autoroute du Mont Blanc, une "goutière de béton" sera réalisée et, depuis, le terrible torrent passe au dessus de l'autoroute. Et parmi tous les voyageurs qui passent ici, combien se souviennent de la terreur muette d'une Impératrice en excursion ?

En effet, avec une vingtaine d'années de recul, le fonctionnement de l'ouvrage est considéré comme satisfaisant, avec il est vrai, un dimensionnement et des charges plus que conséquentes : les réactions d'appui de l'ouvrage s'élèvent à plus de 5000 tonnes, un ordre de grandeur qui est très loin des ordres de grandeur que l'on manipule usuellement dans des bâtiments courants.

⁶ Pour rassurer le lecteur sur le sort de l'impératrice à l'issue de cette épopée, on ne peut que citer l'épilogue du récit : *"Le 16 juillet 1814, l'impératrice Marie-Louise était de retour aux Secherons. Elle en partit le lendemain pour Aix, où elle devait prendre les eaux."*

1841, Alexandre Surell, "Le plus funeste des fléaux"

L'Étude sur les torrents des Hautes-Alpes, rédigée en 1841 par Alexandre Surell, est considérée comme la première somme technique sur les phénomènes érosifs. Cette étude fera date et cinquante ans après en 1893, Prosper Demontzey dans son ouvrage sur *L'extinction des torrents en France par le reboisement* la citera encore avec cette appréciation : une étude "où le plus chaud patriotisme, les idées économiques les plus élevées et l'indépendance de caractère la plus noble s'allient à l'analyse la plus rigoureuse, à l'observation la plus nette et aux solutions les plus vraies".

Cette appréciation louangeuse n'est pas étonnante car Alexandre Surell, pourtant Ingénieur des Ponts et Chaussées, fut un des premiers à proposer l'extinction des torrents par le secours de la végétation. Dans la dernière partie de son étude, il indiquait en effet : "J'aborde le second problème, celui de l'extinction des torrents. Je suppose le cas le plus général, celui d'un torrent parvenu à son complet développement. – Il s'agit de l'éteindre par le secours de la végétation."

Mais en plus de cette proposition l'étude de Surell est une mine d'informations pour qui s'intéresse aux torrents et on pourrait la citer en entier. Nous nous contenterons toutefois d'en donner deux passages en rapport avec notre propos soucieux de construction, sans oublier non plus quelques extraits de l'introduction pour nous rappeler que face au "plus funeste des fléaux", le XIX^e siècle ne faisait pas dans la litote...

Document 1.5 : extrait de *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, Alexandre Surell, 1841

Introduction (extraits)

Une telle multitude de torrents est pour ce département le plus funeste des fléaux. Attachés comme une lèpre au sol de ses montagnes, ils en rongent les flancs, et les dégorgent dans les plaines sous forme de débris. C'est ainsi qu'ils ont créé, par une longue suite d'entassements ces lits monstrueux, qui s'accroissent toujours et menacent de tout envahir.

La terreur qu'inspirent ici les torrents paraît jusque dans les noms qui leur ont été donnés. C'est ainsi qu'on a le torrent de l'Epervier, puis les torrents de Malaise, de Malfosse, de Malcombe, de Malpas, de Malatret, etc Quelques-uns portent le nom de Rabioux (enragé), plusieurs autres celui de Bramafam (hurle-faim). Il y en a qui sont à la veille d'engloutir des villages entiers, et même des bourgs.

Défenses employées contre les torrents (extraits)

Endiguement : d'ailleurs, en y réfléchissant, on découvre une raison générale qui fait qu'une ligne de défense, établie sur une seule rive, sera toujours, quoi qu'on fasse, plus ou moins nuisible à la rive opposée.

C'est que les eaux, qui divaguaient naguère sur la surface du lit tout entière, ne peuvent plus divaguer que sur une portion limitée de la même surface, cette portion sera dès lors plus souvent atteinte par les eaux.

Il y a donc un caractère d'hostilité qui s'attache inévitablement à toutes espèces de défenses.

Ponts : les ponts établis sur les torrents périssent de trois manières :

1° Ils peuvent être attaqués par les eaux avec une telle violence qu'ils soient emportés tout d'une pièce, et totalement anéantis. Ce cas, le plus effrayant en apparence, est au fond le plus aisé à prévenir. On a ici une multitude de faits qui prouvent que les culées n'ont jamais été emportées que parce que leur pied était mal défendu. On a d'autres exemples où des ponts, frères en apparence, ont soutenu l'effort de crues, qui paraissaient capables de renverser les plus forts ouvrages. Ils ont dû cette résistance à la conservation de leur radier. C'est là qu'est tout le secret de leur solidité. C'est par l'entraînement du radier que commence toujours la chute des ponts, et tant qu'il dure, les culées ne courent pas de risque.

2° Il peut arriver que les eaux aillent percer la route en un autre point très éloigné du pont. Celui-ci se trouve alors abandonné ; la route, une fois ouverte, est livrée sans défense aux eaux qui élargissent la brèche, la mènent jusque près du pont, et finissent par mettre à nu le derrière des culées : celles-ci se renversent en arrière, et le pont s'abîme.

3° Enfin, les ponts peuvent périr par une troisième manière, qui est sans contredit la plus redoutable de toutes, quoiqu'elle ne se manifeste que par des effets lents, et souvent imperceptibles : je veux parler de l'exhaussement du lit, qui obstrue graduellement le débouché et finit par enterrer le pont au milieu des déjections. Alors on peut regarder l'établissement du pont comme impossible dans la partie où il a d'abord été construit, et il faut de toute nécessité modifier le tracé de la traversée et chercher un emplacement ailleurs.

1856, Briançon, "Une crue millénale "

En mai-juin 1856, une crue que l'on a parfois qualifiée de "millénale" a lourdement frappé le Briançonnais et une large partie de la France. Elle a été méticuleusement décrite par le Commandant ITIER qui commandait la garnison de Briançon⁷.

Document 1.6 : extrait de *Rapport du commandant Itier, de la Place d'Armes de Briançon sur la crue millénale de 1856*, archives départementales des Hautes-Alpes

Pendant plusieurs jours des pluies chaudes alternant avec des coups de soleil brûlants avaient pénétré les neiges et décidé leur fonte. Pendant les journées des 25, 26, 27, 28, et 29 mai, une pluie forte et presque continue et une grande accumulation d'électricité qui se traduisit par une volée de grêlons gros comme des noisettes et durs à ne pouvoir être rayés avec l'ongle, activèrent cette fonte qui s'opérait à vue d'œil.(...)

Dans la nuit du 29 au 30 mai, les eaux grossirent encore beaucoup. La Durance, la Guisane et la Cerveyrete franchirent et renversèrent leurs digues et toutes les défenses sur leurs bords et débordèrent de toutes parts, tous leurs affluents en firent autant.

Le 30, au point du jour, on arriva de tous côtés demander du secours, et nulle part ils ne firent défaut. Cette journée fut terrible, il pleuvait à flots, les terres, les arbres, les rochers se détachaient de toutes parts et s'écroulaient avec fracas dans ces torrents furieux dont ils augmentaient beaucoup la force destructive. Ce n'était plus de l'eau qui coulait, c'était une boue liquide roulant des arbres et des rochers énormes, et les débris des maisons renversées par elle.

Le 30, St Chaffrey envoya demander du secours. Il était assailli par les deux torrents dont l'un le traverse et l'autre le longe. Les travailleurs du 52ème enlevèrent le pont de bois de la route impériale qui étranglait les eaux et les faisait refluer dans le village qui fut ainsi sauvé, mais détruisit des terres sur une grande surface et comme toujours, les meilleures.

Les eaux de tous ces torrents sont restées fort hautes du 29 mai au 3 juin. Depuis lors, elles ont décu, cependant la Durance a encore au moins quatre fois plus d'eau que de coutume. La baisse de la Guisane est moins sensible. Ce torrent toujours furieux a encore au moins 20 fois son volume habituel, et à chaque heure, fait de nouveaux ravages. Par sa jonction avec la Durance, la vallée sous Briançon est encore en partie inondée et, partout, les habitants sont encore occupés à lutter contre les eaux.

Sur tous les cours d'eau, tous les ponts ont été emportés, à l'exception de deux sur la Durance : celui de la Vachette, au pied du Mont Genève, et le pont roux à 7 km en aval de Briançon, pont en pierre centenaire, dont une des culées a été si fortement entamée, qu'un instant, on l'a cru perdu. On a été forcé de détruire tous les ponts qui n'étaient pas emportés parce que tous ces ponts modernes pèchent par le même défaut : disproportion avec les grandes eaux qu'ils arrêtent et font déborder.

Au village de Fontenil en amont de Briançon, malgré les efforts des habitants et de la troupe, dès ce jour, la moitié des maisons et toutes les terres furent emportées. Le lendemain 31, d'autres maisons furent encore détruites. Il ne reste au plus qu'un tiers du village et plus d'une de ces maisons probablement tombera.



Dés les premiers dangers, toutes ces maisons avaient été évacuées et tout leur mobilier avait été enlevé par nos braves soldats.

J'allais examiner la Durance au pont de communication de la ville avec les forts. A cet endroit, où elle est étranglée entre deux murs de rochers distants d'environ 10 mètres, elle avait au moins 20 mètres de hauteur c'est à dire 20 fois sa hauteur

ordinaire.

Ste Catherine, toute la belle propriété de MM Chancel, dans la gorge de la Durance fut emportée dans la nuit du 29 au 30, ainsi qu'une scierie à eux. Dans la journée, la Durance étendant ces ravages, enleva la majeure partie du terrain restant, ainsi que les murs de clôture de la grande fabrique des frères Chancel. La journée du 31 fut aussi terrible. La Durance continuant ses ravages, bouleversa toute la vallée en dessous de Ste Catherine qui semblait un lac coupé par plusieurs courants furieux..

⁷ Ce témoignage a été repris récemment par Société Géologique et Minière du Briançonnais qui fait un travail pédagogique remarquable sur le risque torrentiel en Briançonnais. Il doit illustrer le thème "les sociétés face aux risques" et la problématique "catastrophes prévisibles ou pas".

1875, Pyrénées, "La catastrophe de Verdun"

Pour ce qui concerne les crues "mémorables" les Pyrénées n'ont rien à envier aux Alpes et 1875 restera comme l'année de la plus grosse crue connue de la Garonne. C'est à cette occasion qu'aura lieu la catastrophe de Verdun, ainsi décrite dans les inventaires : *Une masse de 100 000 m³ détachée du flanc de la montagne est arrivée dans le torrent des Moulines et y a créé une embâcle, laquelle a cédé sous la pression du torrent en crue. L'ensemble s'est transformé en une lave torrentielle qui emporta tout sur son passage : 30 maisons, 16 granges, 2 moulins détruits et 15 maisons endommagées au Barry d'en Haut. Le cimetière et une scierie emportés. 81 morts dont 14 jamais retrouvés (pour une population de 492 habitants en 1871), 600 animaux tués.*



Cette catastrophe n'est pas sans rappeler la crue encore plus ancienne du 8 mai 1613, durant laquelle un torrent de boue et de rochers avait emporté 25 maisons ainsi que le cimetière, provoquant déjà la mort de 71 personnes au Barry d'en Haut.

Document 1.7 : extrait de *Procès verbal de Gendarmerie du 29 juin 1875* *Brigade des Cabannes, archives départementales de l'Ariège*

Rapportons que le 23 juin 1875 vers les 5 heures du matin avons été informés qu'une inondation était survenue dans la commune de Verdun, en toute hâte et suivis de la brigade des douanes, nous nous sommes rendus sur les lieux du sinistre, une foule de la population des Cabannes nous précédait également ; notre premier devoir a été de sauver les personnes en danger et les blessés, après avoir contourné le village, avons non sans mal et danger parvenu au quartier de l'Eglise là où il y avait le plus de danger et où douze personnes en détresse appelaient de 3 maisons à leur secours, l'une de ces maisons était déjà isolée et un angle était emporté par les eaux, ensuite le presbytère et une maison y attenait où se trouvaient huit personnes y compris Mr le Curé, nous faisant des signes et appelant à leur secours, n'écoulant que notre courage il fallait à tout prix sauver ces personnes dans le désespoir, nous avons de la vase à la ceinture, et le torrent qui commençait à déborder nous menaçait, quoique le danger fut grand, au moyen de planches et poutres, avons pu nous tracer un passage pour nous guider, la distance pour aller au presbytère était de 70 mètres.

Le brigadier Soler en tête est arrivé à la maison Arabeyre, a chargé la femme glissée par une fenêtre sur ses épaules et l'a transportée en lieu sûr, alors chacun suivant son exemple, parvenus également au presbytère, chacun chargea une personne sur son dos, et les transporta hors de danger ; douze personnes dans les angoisses les plus terribles ont été sauvées ainsi. Trois personnes ont été transportées par le brigadier Soler. Sur divers points de la commune il a été sauvé dix personnes plus ou moins blessées et plusieurs cadavres restés. La pluie tombait toujours en abondance, nous sommes rentrés à notre caserne à onze heures du matin, entièrement trempés et exténués de fatigue. Après quelques moments de repos, nous nous sommes rendus de nouveau à Verdun à ce moment tout danger était écarté, nous bornant alors à ramasser les cadavres et prendre des mesures pour éviter les accidents, avons pu nous rendre compte de tout.

Dans la nuit du 22 au 23 juin la pluie tombait abondamment, les ruisseaux de Sourzeyre et de St Conac en faisant jonction sur la montagne avaient par un tas d'arbres immobiles formés une grande barrière quand le 23 vers les quatre heures du matin, cette barrière se détacha en amenant tout ce qui se trouvait sur son passage, le ruisseau qui se trouvait en face du village de Verdun quitta son lit et prit deux quartiers de maison, et fit les ravages les plus terribles et causa des désastres irréparables, les dégâts et pertes sont décomptés ainsi qu'il suit : 72 personnes disparues, 30 maisons habitées disparues, 26 maisons et granges inhabitées, 5 familles entièrement disparues, 10 blessés plus ou moins gravement, 120 bêtes à cornes, 180 bêtes à laine, 24 ânesses, 8 chèvres, 35 porcs et une grande quantité de volaille ; 8 maisons menaçant ruines, l'Eglise a résisté et a préservé le presbytère, quoique cela, elle a subi quelques dégradations, une porte se trouvant du côté du ruisseau a été enfoncée, et l'Eglise a été remplie d'une couche de vase de 1 m de hauteur, chaises, bancs et autres objets sont complètement hors de service, le cimetière a été entièrement détruit, deux moulins à farine et une scierie entièrement emportés, ainsi que les salles d'école et la mairie.

Les différentes communes du canton requises par l'autorité se sont rendues sur les lieux pour y procéder au déblaiement et rechercher les cadavres humains, également un détachement de troupe de Foix est arrivé. Il a été retrouvé jusqu'à ce jour 52 cadavres humains et qui ont été inhumés par les soins de l'autorité avec cérémonie simple, les cadavres des animaux ont été retrouvés en grand nombre et ont été enfouis ou brûlés. Aujourd'hui encore les travaux se continuent par la troupe seule. Pendant le déblaiement il a été retrouvé beaucoup de valeurs et linge. Le pont de Verdun bâti sur l'Ariège menaçait de tomber, un angle de la voûte et du terre-plein ont été amenés par l'eau, des précautions ont été prises pour éviter les accidents, aujourd'hui on travaille à le consolider. Le terrible accident est arrivé pendant le sommeil des habitants, ce qui n'a pas permis à personne des quartiers emportés par le fléau de se sauver.

1883, Saint Foy Tarentaise, "Un hameau disparaît"

Le 20 août 1882, sur la commune de Sainte Foy Tarentaise, à la suite de pluies abondantes le Nant de Saint Claude, alimenté par les matériaux issus de l'écroulement du Bec Rouge, vomit une lave torrentielle abondante sur le hameau du Champet et coupe le chemin menant de Bourg-Saint-Maurice à Val d'Isère. En juin 1883, où se combinent pluies et fonte des neiges, une nouvelle lave torrentielle envahit trois maisons du Champet et menace les autres. Le 16 septembre, c'est le coup de grâce. La lave torrentielle vient totalement engloutir le hameau. Seuls les pignons et les toits des maisons émergent de cette désolation. Paradoxalement, pendant tout le "naufnage", les bâtiments resteront intacts.

Photos 1.5, 1.6 : La disparition du hameau de Champet



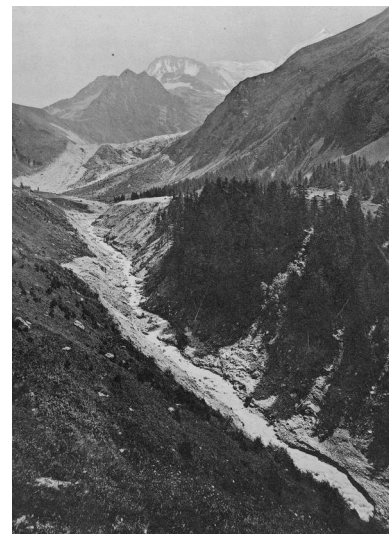
Source : ONF-RTM 73

1892, Saint-Gervais, "Le désastre de l'établissement thermal"

Dans la nuit du 11 au 12 juillet 1892, une poche d'eau non gelée, contenue à l'intérieur du Glacier de Tête Rousse, crève et dévale la pente en formant une lave torrentielle qui ira percuter l'établissement thermal de Saint-Gervais. Une partie des bâtiments sera détruit et on comptera 175 victimes.

Cette catastrophe donnera lieu à une communication de Prosper Demontzey à la séance du 8 août 1893 de l'Académie des Sciences. Dans cette communication, il donne une indication de vitesse provenant d'ouvriers employés aux travaux de correction du torrent de Reninges : *"éveillés en sursaut par le bruit de la débâcle, ils sont sortis en toute hâte de leurs chalets et ont pu suivre, grâce à un super clair de lune, la marche de la lave dans le Bon-Nant. D'après eux, elle aurait mis cinq minutes à peine de la Gorge des Bains au Fayet. Le parcours étant d'environ 1 800 mètres, la vitesse moyenne dans ce trajet aurait été de 6 mètres à la seconde."*

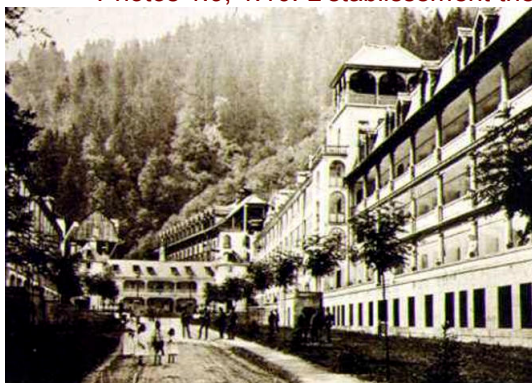
Photos 1.7, 1.8: Glacier de Tête Rousse et vallée du torrent de Bionnassay après la catastrophe de 1892



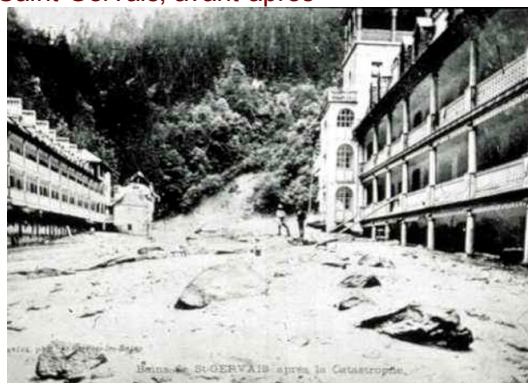
Source : Document RTM d'époque

En examinant les documents de l'époque, on peut constater que si les bâtiments "amont" ont été presque entièrement détruits par l'impact, la partie "aval" de l'établissement, pourtant envahie sur presque deux niveaux, n'est pas effondrée. A l'origine, le plan du complexe formait un H majuscule avec 2 cours et 5 bâtiments. La première cour, à l'aval, s'appelait *la cour d'honneur*. Elle était bordée sur le côté par 2 bâtiments, *le bâtiment montagne* et *le bâtiment neuf* qui resteront intacts. Elle était séparée de l'autre cour, *la cour des sources*, par *le bâtiment central*, le bâtiment le plus ancien du site qui sera totalement détruit. Dans la cour des sources, *le bâtiment du torrent* sera lui aussi totalement détruit, mais en face *les salles du bain*, *la chapelle* et *la chambre des machines* ne seront qu'endommagés. Suivant un rapport de Charles Durier, vice-président du Club Alpin Français, qui s'était rendu sur les lieux : *"le bâtiment neuf, par sa construction plus récente et plus soignée, présentait une sécurité relative"*.

Photos 1.9, 1.10: L'établissement thermal de Saint-Gervais, avant-après



Source : Cartes postales d'époque



1897, "La catastrophe de Voiron"

Le samedi 5 juin 1897, vers 20 heures, un violent orage éclate sur Voiron. Des pluies torrentielles s'abattent sur la ville et gonflent dangereusement les eaux de la Morge. Sur son passage, la rivière entraîne des cailloux, des branches et de la boue qui forment un barrage à l'entrée de la ville. Dès lors, l'eau s'accumule et atteint rapidement sept à huit mètres. Sous la pression, le barrage cède et l'énorme masse d'eau se précipite sur Voiron. La Morge emporte la plupart des ponts, coupant Voiron en deux. Des habitations sont détruites ainsi que des magasins. Le parvis de l'église est gravement endommagé. Cinquante-neuf usines qui bordent la rivière sont dévastées.

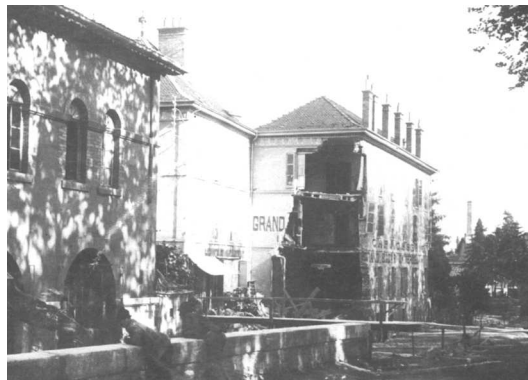
Du point de vue des dégâts aux bâtiments, il a été constaté que très souvent les angles étaient touchés en premier. Concernant le parvis de l'église, les désordres se sont révélés à l'expertise beaucoup plus graves qu'en apparence : en effet, la Morge avait affouillé les fondations du clocher, on voyait les eaux passer en dessous et la tour était suspendue en l'air. On reprendra les fondations "au pic et à la broche, sans emploi de poudre et dans l'embarras des étais" avec des pieux battus "à la sonnette à vapeur".

Un siècle plus tard, en 1997, on se souviendra encore de l'évènement et un livre commémoratif sera édité à cette occasion.

Photos 1.11, 1.12 : La catastrophe de Voiron



Source : photos d'époque DR



1914, Paul Mougin, "Les torrents de la Savoie"

Avec Prosper Demontzey, Paul Mougin fait partie des grands noms de la Restauration des Terrains en Montagne. Forestier d'une ténacité peu commune, il sera un apôtre inconditionnel du reboisement. En 1914, il publie une véritable encyclopédie : *Les Torrents de la Savoie*.



Paul Mougin

Dans la première partie de l'ouvrage, en 200 pages il pourfend comme il se doit les méfaits du déboisement. Dans la seconde partie, qui comprend plus de 1000 pages, il fournit d'excellentes monographies des principaux torrents de Savoie, des monographies auxquelles on fait encore souvent référence.

A titre d'illustration, on peut citer quelques éléments de la monographie concernant le Torrent de Saint-Antoine⁸ à Modane.

Après une description minutieuse du torrent, Paul Mougin signale *"l'importance de la place forte de Modane qui commande le débouché du tunnel de Fréjus, l'une des deux grandes voies internationales de communication qui relie la France à l'Italie"* puis il donne l'historique des laves torrentielles et des inondations qui commence par *"le déluge de Modane"* en 1469 pour ne plus guère s'arrêter après, les dates se succédant sans fin : 1740, 1773, 1808, 1811, 1812, 1822, 1828, 1834, 1877, 1905, 1906 ...

Il rappelle que le Saint-Antoine fait partie des torrents dont l'extinction a été déclarée d'utilité publique par la loi du 26 juillet 1892. Et il termine sur les travaux de défense et de correction réalisés, d'une très grande ampleur, en précisant toutefois : *"mais après la restauration, la forêt ne couvrira pas plus des 18% de la surface du bassin, en raison de la grande étendue des terrains dont l'altitude, supérieure à 2 400 mètres, s'oppose au reboisement"*.

Photos 1.13, 1.14 : Modane, crue du Saint Antoine de 1987



Source : ONF-RTM 73

Mais malgré tous les travaux réalisés, l'histoire continuera. En effet, le lundi 24 août 1987 à 11 h 45, la sirène retentit longuement, le Saint-Antoine qui s'est transformé en torrent de boue déborde. Il emporte le pont en bois des Tufts à l'amont, puis à cause d'un rocher qui bouche son cours au niveau du pont sur lequel passe la route nationale 6, il sort de son lit, dévale la rue Gambetta et menace le quartier de "La boucle".

A l'aval, le pont reliant les 2 zones industrielles fait office de barrage et provoque une nouvelle fois le débordement du Saint-Antoine qui envahit toute la zone située sur sa rive gauche et un bâtiment d'entreprise sur la rive droite. Un camion Jacquemmoz a été sorti du garage et a été emporté par la boue 200 m plus bas. Un autre a été aplati contre un mur. La coulée est longue d'un kilomètre, large de 30 m et fait 70 cm d'épaisseur. Elle envahit tout le centre ville ainsi que la zone industrielle. Les dégâts sont considérables mais il n'y a aucune victime. La coulée a été évaluée à 60 000 m³ et il faudra 6 jours pour rendre les routes à la circulation. Les dégâts ont été estimés à 50 millions de francs.

Sur le site de l'école Jules Ferry de Modane qui relate aujourd'hui cet événement, la présentation se termine ainsi :

"Méfiez vous des torrents qui portent un nom de saint. C'est toujours suspect !"

⁸ Un torrent sans doute bien nommé : en effet, Saint-Antoine est le saint patron des marins et des naufragés. C'est un saint des plus populaires et c'était un prêcheur réputé : sa légende raconte même qu'un jour il prêcha aux poissons, qui se pressèrent pour l'entendre.

1915, Ernest Bénévent, "Le cône du Manival"

Dans la Revue de Géographie Alpine de l'année 1915, volume 3, numéro 1, on trouve un article très intéressant d'Ernest Bénévent sur "Le Manival, étude de cône de déjection". En effet, dans cet article on trouve des réponses pertinentes à la question qui arrive systématiquement lorsqu'on parle de risques torrentiels : mais pourquoi donc les hommes ont-ils occupés, et occupent-ils encore des zones aussi exposées que les cônes de déjection des torrents ?

La réponse en est fort simple : si *"le choix d'un pareil site paraît maintenant un contre-sens"*, c'est que *"les cônes de déjection étaient d'autant plus précieux, que la plaine d'inondation de l'Isère était plus inutilisable"*. Et cette réponse, valable pour le Manival et la plaine de l'Isère, pourrait être généralisée à tous les cônes de déjection des torrents de montagne qui ont donné lieu, presque systématiquement, à une occupation humaine : ils sont d'autant plus précieux que le reste du territoire est plus inutilisable.

De la sorte, penser que pour s'affranchir de tous les risques liés aux torrents de montagne, il "faudrait" ou il "suffirait" de construire en dehors des cônes de déjection, est sans doute une excellente idée⁹ mais dans les faits, elle n'a jamais été mise en application. Et si on regarde le cône de déjection du Manival à la fin du XX^e, on ne peut que constater que son occupation n'a guère baissé.

Document 1.8 : extrait de *Le Manival – Etude de cône de déjection*, Ernest Bénévent, 1915

Adaptation de l'activité humaine à la morphologie du cône

Le cône du Manival, comme d'ailleurs tous les appareils alluviaux qui s'égrènent au long du Grésivaudan, dut tenter de bonne heure l'occupation humaine, pour des raisons négatives et positives. Outre la valeur qu'ils tiraient de leurs qualités individuelles, les cônes de déjection étaient d'autant plus précieux que la plaine d'inondation de l'Isère était plus inutilisable.

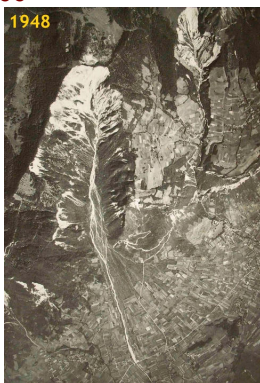
Jusqu'au XVIII^e siècle, la rivière, livrée à elle-même promenait à travers les grèves de sa vallée ses méandres divagants, s'y multipliait en "brassières" qui enserraient entre leurs eaux, souvent mortes, des îles de vase plantées d'aulnes et de saules ou des bancs de graviers broussailleux ou nus. Les parties les plus basses formaient des marais, grisâtres comme les eaux boueuses de la rivière, et d'une utilisation particulièrement délicate. Les inondations recouvraient fréquemment le tout. Ainsi écarté de la vallée proprement dite par l'Isère elle-même, qui prétendait en occuper toute la superficie, l'homme était bien obligé de se rabattre sur les versants. Il y trouvait en particulier les talus d'éboulis et les cônes de déjection.

Les cônes de déjection ne présentaient pas les inconvénients de la vallée qu'ils dominaient. Par leur élévation au-dessus de l'Isère, ils garantissaient à l'homme la sécurité de sa demeure et de ses cultures contre les inondations et les déplacements de la rivière. Leur inclinaison permettait aux eaux d'infiltration, descendues des hauteurs, un écoulement régulier vers la plaine : heureusement privés d'un excès d'humidité, ils paraissaient fournir naturellement des possibilités d'exploitation plus avantageuses et surtout moins précaires que celles de la vallée elle-même.

Toutefois, l'homme n'allait-il pas rencontrer dans son installation sur le cône d'autres difficultés inhérentes à la nature même de cet appareil ? De même que l'Isère entendait garder pour elle seule la possession de son vaste talweg, le torrent n'allait-il pas à son tour, émettre dans son domaine des prétentions. Comment l'homme a-t-il réussi à adapter son activité à des formes si ondoyantes et si avides de changement, à étendre son emprise sur un sol construit de toutes pièces par un organisme violent, qui vit avec toute la force de la jeunesse, toujours prêt à faire valoir ses droits et à se rappeler au souvenir de l'envahisseur : c'est ce qu'il nous reste à chercher.

Photo 1.15 : Le Manival

Carte de Cassini 1800, Photos 1900-2000



Sources : DR

⁹ tout comme celle de "construire les villes à la campagne car l'air y est plus pur !" proposée par Alphonse Allais

1937, Salau dans l'Ariège, "Deux nuits de cauchemar"

A Salau dans l'Ariège, les inondations de 1937 ont laissé des traces profondes dans la mémoire du village : il y eut en effet deux nuits de cauchemar à trois semaines d'intervalle. La première, dans la nuit du 4 au 5 octobre, fit un mort, un habitant revenu chercher quelque chose dans sa maison. Deux autres cadavres furent retrouvés dans le Salat mais le torrent les avait arrachés au cimetière. Par la suite, la nuit du 26 au 27 octobre acheva de démoraliser la population. Au total, le bilan s'est élevé à 7 maisons totalement détruites, 18 partiellement, 80 sans abris, le cimetière détruit, la sacristie effondrée.

Mais l'histoire des inondations à Salau ne s'est pas arrêté en 1937. En effet, en 1982 une nouvelle nuit d'inondation se traduisit par de nombreux dégâts et l'effondrement du chevet et de la nef de l'église qui avait pourtant résisté à la crue de 1937.

Photo 1.16 : L'église de Salau, avant et après la crue de 1982



Source : ONF-RTM 09, DR

Document 1.9 : extrait de *Huit siècles d'histoire à Salau*, Geneviève Durand-Sendrail, 1992

7-8 novembre 1982

La pluie avait commencé dans l'après-midi du samedi 6 novembre. Le dimanche vers 16 heures, la montée des eaux était inquiétante, une cascade passait sur la route, le Cougnets était noir du stérile qu'il charriait.

Vers 20 heures, chalets et immeubles furent évacués et les 150 locataires rassemblés à la Maison des Jeunes. Deux chalets s'effondrèrent en bordure du torrent. Au village d'en haut, déjà privé d'électricité, une quarantaine de personnes s'étaient rassemblées dans deux maisons. De part et d'autre du Cougnets, on communiquait à l'aide de signaux lumineux. Troisième secteur isolé, sur la rive gauche du Salat, l'école dont les habitants s'étaient réfugiés dans une cabane. Le chevet de l'église s'effondra vers 21 heures, la nef vers 3 heures du matin ainsi que le préau de l'école.

La décrue commença vers 4 heures 30. Au matin, le radiotéléphone de la Société minière informa les autorités de l'état du village. Les hommes commencèrent à déblayer à l'aide des engins de la mine. A pied, depuis le Pont de la Taule, arrivèrent des responsables de la Société minière, puis la brigade de gendarmerie d'Oust. Vers 17 heures, l'hélicoptère de la Protection civile établit une liaison destinée à durer jusqu'à la remise en état de la chaussée qui prit une semaine.

La gravité de la catastrophe a conduit à chercher des causes. Les météorologues répondent qu'elle provient de la rencontre entre des masses d'air chaud venues du Sud et la barre glacée des sommets pyrénéens. Mais l'importance des précipitations n'avait pas été prévue et les mesures de la pluviométrie se sont révélées tout à fait insuffisantes. Le record semble avoir été atteint en Andorre avec 400 mm.

Photo 1.17 : Salau, crue de 1982



Source : ONF-RTM 09

1940, Pyrénées Orientales, "L'Aiguat record"

Dans les Pyrénées, le mot catalan "*aiguat*" désigne un abat d'eau et la crue qui l'accompagne quasi instantanément.

A ce titre, l'aiguat de 1940 est considéré comme un aiguat record. En effet, le 17 octobre 1940, il a été mesuré 840 mm de pluie au pluviomètre de l'usine électrique de Llau et cette valeur a été officialisée comme le record d'Europe pour la pluie en 24 heures. Certains même pensent que cette mesure est une mesure par défaut, le pluviomètre ayant débordé ce jour là à 4 reprises entre 12h et 19h30.

Dans la quinzaine qui suivit l'aiguat, Maurice Pardé, professeur à l'Institut de Géographie à Grenoble, fut nommé expert officiel de l'Etat et il lança une large enquête auprès des instituteurs du département.

L'instituteur de Saint-Laurent-de-Cerdans lui transmet les chiffres suivants :

chute Relevée dans ce tableau pour référence	le 16 8 ^h	15 cm	Dans ce tableau on a relevé surtout le total et la jour de du 17. des notes 100 et 205 d'aut à peu près indiscutables
	le 17 8 ^h	100 cm	
	le 18 "	30 cm	
	le 19 "	40 cm	
	le 20 "	8 cm	
	le 21 "	12 cm	
	Total	205 cm = 2050 mm	

Avec 1 mètre d'eau pour une journée et plus de 2 mètres en 6 jours, les dommages furent considérables :

- 48 victimes en France (300 morts en Catalogne)
- des dégâts énormes à tout le réseau de voies de communication
- la destruction complète de plus de 200 immeubles, d'usines hydroélectriques, de fabriques, d'une gare, d'un casino et des endommagements importants à plusieurs milliers de maisons
- la destruction de 2 000 ha des meilleurs terres agricoles, l'engravement ou le ravinement de 15 000 ha de terres cultivables

Photo 1.18, 1.19 : L'aiguat de 1940, dégâts à Nefiach



Source : photos d'époque DR

Le Ministre de l'Agriculture, en visite dans le département sinistré, félicitera les auteurs d'actes héroïques, telle Madame Ida Biarnes, "*qui porta le courrier à la gare de Millas en ayant de l'eau jusqu'à la poitrine*".

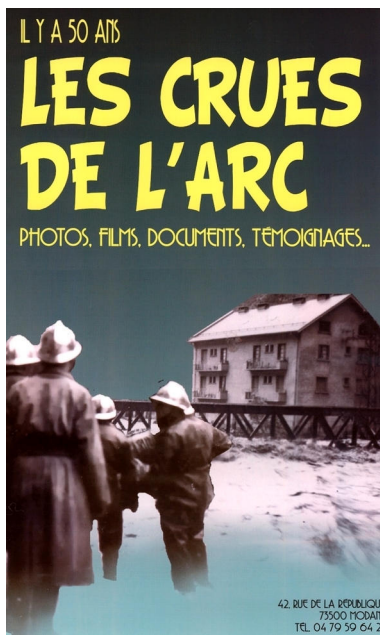
Et dans son rapport, le Professeur Pardé tirera la conclusion suivante : "*On sera plus craintif, désormais, jusqu'à ce que le souvenir de l'événement s'estompe. Il sera d'ailleurs bon de rafraîchir les mémoires et de protéger les hommes contre leur imprudence en leur interdisant de bâtir en des lieux que peuvent atteindre les crues comparables à celle de 1940.*"

1957, Maurienne, Queyras, "L'année du déluge"

En Maurienne, au printemps, l'Arc qui en hiver ne débite pas plus de 15 à 20 m³/s, commence à grossir par suite de la fonte des neiges pour atteindre son débit d'été qui est de l'ordre de 200 m³/s. Si à ce moment, de fortes précipitations se produisent sur le bassin versant et si un réchauffement important de la température les accompagne, la crue a lieu.

En juin 1957, le mécanisme de la crue de printemps a joué à plein. Dans les journées du 12 au 16 juin, les orages violents se succèdent sans arrêt et déversent d'énormes quantités d'eau. On relève sur la Haute-Maurienne des précipitations allant jusqu'à 330 mm. De surcroît, le vent du sud extrêmement chaud, le Foehn qu'on appelle aussi la Lombarde, accélère encore la fusion. Dans la nuit du 13 au 14 juin, c'est une crue énorme et le débit de l'Arc atteindra 900 m³/s.

A 2 heures du matin, les sirènes alertent les habitants de Modane et de Fourneaux, mais il est trop tard, la ville est rapidement envahie par les eaux. En Haute-Maurienne, la vallée ainsi que les villages de Bessans, Lanslevillard et Lanslebourg, sont déjà dévastés.



En 2007, cinquante ans après, une exposition rappelle les événements. Dans la presse elle est ainsi présentée :

"L'homme ancien s'est d'abord senti fort dépourvu face aux manifestations des forces de la nature. Alors, il a cherché à engager un "dialogue" avec elle, en la vénérant et en la déifiant. Puis, il en a fait un instrument entre les mains de dieux supérieurs ; et dans les textes fondateurs des religions monothéistes les déluges annoncés ou passés sont devenus l'expression du pouvoir de dieu, et de son courroux..."

C'est bien plus tard que l'homme, abordant le champ des sciences et des technologies, a laissé s'exprimer un sentiment de revanche et de puissance face à la nature. Un siècle des Lumières (le 18e) et deux siècles de révolution industrielle et technologique (le 19e et le 20e) plus tard, il en avait presque oublié que la nature reste un ensemble de forces indomptables. Les tsunamis, les tempêtes, les inondations le lui rappellent parfois, un peu plus souvent depuis quelques temps. D'ailleurs, la science des climats se vulgarise et, bientôt, nos enfants en pénétreront toutes les arcanes, réchauffement planétaire oblige..."

Photos 1.20, 1.21 : 1957, crue de l'Arc
rupture de la digue de protection des Reisses



Source : photos d'époque DR

inondation dans les rues de Modane



A l'occasion de l'exposition de 2007, seront présentées des photos de 1957 prises par des habitants de Lanslevillard qui illustrent particulièrement bien le mécanisme de ruine d'une construction par affouillement, les angles étant bien souvent le point d'amorce de la destruction.

En 2007 aussi, il n'est pas inintéressant de noter que l'Office du Tourisme a été construit pas très loin de l'endroit où ont été prises ces photos de bâtiments détruits. Construit par les architectes Chambre et Vibert en 1994, il campe fièrement en bordure de l'Arc. Sa construction a été précédée d'une étude hydraulique conséquente réalisée par Sogreah Ingénierie qui note que *"la forme arrondie du bâtiment ne constitue pas une saillie à angle vif sur la paroi verticale qui limite l'écoulement"* et que *"les dispositions proposées pourraient valoriser la vue sur les écoulements de l'Arc, particulièrement attractifs dans cette zone rocheuse accidentée du lit"*.

Par ailleurs, on peut signaler que ce bâtiment a dû aussi prendre en compte un souffle d'avalanche de 10 kPa (1 t/m²) venant d'une direction opposée à celle du torrent. En faisant "d'une pierre deux coups", il illustre de la sorte une démarche offensive qu'en Suisse on s'efforce de développer : plutôt que de chercher à s'abriter face à des risques de toute façon inévitables, peut-être vaut-il mieux *"habiter la menace"*¹⁰.

Photos 1.22, 1.23 : crue de l'Arc, destruction de maisons à Lanslevillard



Source : photos d'époque DR

Photos 1.24, 1.25 : 1957-2007, Lanslevillard presque au même endroit l'Office du Tourisme



Source : photo d'époque DR



Architectes Chambre et Vibert, photo Marc Givry

¹⁰ "Habiter la menace" livre de Inès Lamunière, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2006

Les crues de 1957 n'ont pas touché que la Maurienne, elles ont affecté pratiquement toutes les rivières des Alpes Françaises qui descendent de la crête frontalière : Le Var, la Tinée, l'Ubaye, le Guil, les branches supérieures de la Durance (Durance, Clarée), l'Arc, et l'Isère. Au delà vers l'est, elles ont également intéressé le Tessin, le Tyrol et la Carinthie. Cependant sur le territoire français, c'est dans le Queyras que la situation a été la plus grave, toute la vallée étant isolée et de nombreux villages ayant été partiellement détruits.

Photos 1.26, 1.27, 1.28 : 1957, mission aérienne, Ceillac, Ville-Vieille, Mont-Dauphin



Source : archives départementales 05 (fond Henri Vincent)

Les photos aériennes faites à cette occasion sont édifiantes : tous les torrents ont débordé et tous les villages ont été atteints. A Ceillac, le torrent s'appelait le Cristillan, à Ville-Vieille l'Aigue Blanche, à Mont-Dauphin il s'agissait de la Durance et du Guil.

A la vue de ces images, on pourrait se dire qu'il ne faut pas habiter à proximité d'un torrent. Mais depuis les temps immémoriaux, en montagne toutes les implantations humaines se sont faites à proximité de l'eau, la plupart sur les cônes de déjection des torrents, et c'est sans doute un vœu pieux, ou une vue de l'esprit de penser qu'il pourrait en être autrement. A Ceillac, suite à la crue de 1957, le village, totalement engravé, fut classé par le Service géologique comme "zone dangereuse". Ceillac devait se rebâtir à l'abri du torrent, dans le lotissement d'Ochette, mais finalement tout le monde revint au vieux village et les nouvelles constructions, bien qu'à l'abri du torrent, devinrent des maisons pour touristes.

Document 1.10 : extrait de ceillac.com, rubrique "Articles de presse"

" J'étais alors adjoint au maire, raconte Jean Favier. Nous étions arrivés à nous demander s'il ne faudrait pas abandonner complètement le village. Les sous-sols, les étables, les rez-de-chaussée et parfois même les étages étaient envahis par la boue.

Ensuite, le Service Civique international est venu : 140 personnes travaillaient chaque semaine pour nous aider à dégager les rues et les maisons.

Le village a été débarrassé de la boue et des graviers plus vite que l'on aurait cru. Et il a été si bien débarrassé que l'on n'a pas hésité à y remettre les bêtes et à nous y installer de nouveau

De toute façon, nous n'avions rien d'autre. Seulement le danger demeurerait. Le Service géologique classa le village comme " zone dangereuse ". Les Ceillaquins étaient avertis. Il ne fallait pas compter rester là. Ceillac devait se rebâtir à l'abri du torrent.

Avant, explique un des adjoints au maire, la question du remembrement dormait. Ça ne plaisait pas beaucoup. Par la force des choses, dans l'année qui a suivi les inondations le remembrement était fait.

La superficie moyenne de l'îlot de propriété est passée de 247 m² à 2 740 m². De plus une zone plus élevée bien exposée au midi et comportant des terrains pierreux de faible valeur agricole fut choisie pour l'implantation du nouveau village.

Ainsi le remembrement dépassait le cadre agricole pour se consacrer également à l'aménagement. Des parcelles à destination non agricole étaient distribuées à chaque famille de Ceillac afin qu'elle pût y reconstruire son habitation. Finalement 18 familles se sont décidées et ont construit leur maison à Ochette. Bâties dans le style traditionnel, les constructions étaient au départ des maisons fermières : au rez-de-chaussée l'étable, au premier les habitations et au-dessus la grange.

Mais le village, débarrassé de la boue, était de nouveau habitable. Les Ceillaquins, outre un profond attachement à leurs vieux chalets, hésitaient à mettre des bêtes dans des maisons neuves. C'est ainsi qu'est venu se poser le problème du tourisme et il fut décidé de faire de ces chalets nouvellement construits des maisons pour touristes."

1965, Savoie, "Les méfaits du Pontamafrey"

A partir du 19 mai 1965, la Ravoir de Pontamafrey en Maurienne va déverser pendant 2 mois des coulées de boue successives qui couperont la Nationale 6 et la voie ferrée France-Italie. Il faudra attendre le 23 juillet pour voir les communications rétablies. Au total, on estime à 300 000 m³ le volume de matériaux transportés.

L'évènement de 1965 qui coupa la vallée pendant deux mois frappa les esprits. A Pontamafrey, on envisagea d'aller reconstruire ailleurs le village, mais cela ne se fit pas, et petit à petit la vie habituelle reprit ses droits.

La Ravoir de Pontamafrey a toujours été bien connue des services, presque un multirécidiviste "corrigé" moult fois depuis 1855. Mais à l'heure actuelle, tout le monde pense que ce torrent n'aura jamais aucun repentir : il continuera sans doute un jour où l'autre à déverser quelques centaines de milliers de mètres cubes de matériaux.

Ayant constaté que l'embâcle du pont avait été une des causes de l'envahissement du village par les coulées de boue, on a depuis construit un pont levant en deux parties qui en se relevant dégagent le canal et complètent les digues de protection latérale.

Photos 1.29, 1.30 : Pontamafrey, le dégagement de la voie ferrée en 1965, le pont levant en 2007



Source : ONF-RTM 73



Source : ONF-RTM 38

A ce sujet, on peut noter qu'il existe en Suisse, un dispositif un peu similaire. Le 24 septembre 1993, à Brigue-Glis après des chutes de pluie abondantes, alluvions et bois charriés s'étaient accumulés contre un pont et la Saltina¹¹ débordait déversant plusieurs milliers de m³ de boues et de pierres dans le centre ville. Depuis, un pont soulevant automatique a été installé et en 2000, avec une crue pourtant supérieure de 30% à celle de 1993, on estime que le dispositif a bien fonctionné.

Photos 1.31, 1.32 : Brigue-Glis, inondation de 1993 et nouveau pont soulevant



Source : Jean-Pierre Jordan, OFEG



Mais ce type de dispositif est sans doute beaucoup plus ancien : à Saint-Chaffrey, suite à la destruction d'un pont en bois par une crue en 1719, un pont-levis, susceptible d'être relevé lors des crues, avait été construit. Lui-même détruit par les inondations de 1907, un pont-levis "d'un autre genre, pouvant se lever plus facilement" sera reconstruit après.

¹¹ la Saltina dont nous avons déjà parlé pour un décret de 1331

1996, Bourg-Saint-Maurice, "La crue de l'Arbonne"

Le Torrent de l'Arbonne, à Bourg-Saint-Maurice, est lui aussi un multirécidiviste. Bien fiché dans le "Mougin", en particulier pour une débâcle en 1370 qui s'était traduite par la destruction de Bourg-Saint-Maurice dans sa quasi totalité, il était relativement calme depuis 1948.

Mais le 24 juillet 1996, avec des précipitations dont on a estimé qu'elles n'étaient pas particulièrement exceptionnelles, il a pourtant charrié 300 000 m³ de matériaux et fait des dégâts estimés à 23 millions de francs.

A cette occasion, certains ont proposé d'appeler dorénavant Bourg-Saint-Maurice "Boue-Saint-Maurice". En tout cas, les photos faites à cette occasion donnent une bonne indication de l'impact d'une crue de ce type à l'intérieur de constructions envahies.

Photos 1.33, 1.34 : 1996, Bourg-Saint-Maurice, la crue de l'Arbonne



Source : ONF-RTM 73

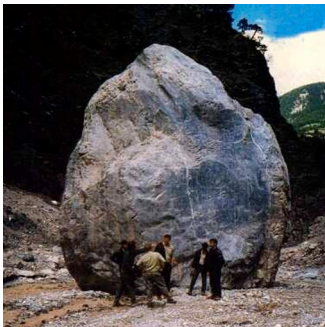
1998, Hautes-Alpes, "Le bloc du Boscodon"

Le torrent du Boscodon est l'un des plus gros torrents d'Europe. Il se jette dans le lac de retenue de Serre Ponçon, près d'Embrun, dans les Hautes-Alpes. En juin 1998, une lave torrentielle a "porté" un bloc dont le volume a été estimé à 250 m³.

Certes ce "transport" est très exceptionnel, mais il donne une bonne échelle de ce que peut être "la puissance d'un torrent". Dans sa communication sur la catastrophe de Saint-Gervais de 1892, Prosper Demontzey parlait du dépôt "de trois immenses blocs, dont l'un cube plus de 200 mètres" et des gravures de l'époque, faites d'après des photographies de Tairraz, en donnent la mesure.

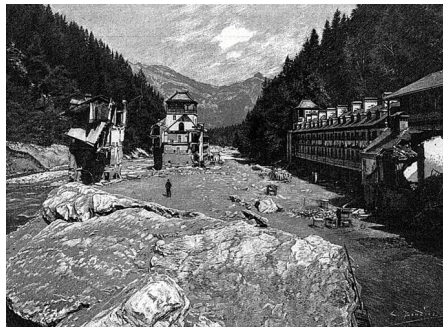
Des blocs de cette échelle sont bien sûr très destructeurs en cas d'impact avec un bâtiment, mais aussi ils peuvent obstruer dans une zone étroite le cours normal d'un torrent et entraîner des débordements sur un très large secteur.

Photo 1.35 : 1998, le bloc du Boscodon



Source : ONF-RTM 05

Photos 1.36, 1.37 : 1892, la catastrophe de Saint-Gervais



Gravures d'époque d'après des photographies de Tairraz, DR

2005, les Contamines-Montjoie, "Armancette ... toujours et encore ?"

Le 22 août 2005, en fin d'après midi, de fortes précipitations entraînent la formation d'une lave torrentielle dans le lit du Nant d'Armancette qui va s'épandre par vagues successives sur le cône de déjection du lit aval. Au total, ces vagues successives déposeront 170 000 m³ de matériaux dont des blocs de 100 m³. Elles entraîneront la coupure des voies de communication et des mesures d'évacuation.

Mais ce débordement n'est pas une totale surprise. En effet, la réputation du Nant d'Armancette a toujours laissé à désirer. Dans le "Mougin", on indiquait déjà qu'il avait coupé le chemin de grande communication n°8, le 21 août 1900 et plus près de nous on signale des événements catastrophiques en 1944 et 1964, ce dernier événement étant double : 23 juillet et 17 septembre 1964, avec au total 200 000 m³ de matériaux solides.

Photos 1.38, 1.39 : les Contamines-Montjoie, Armancette 2005 et 1964



Source : Mairie des Contamines-Montjoie

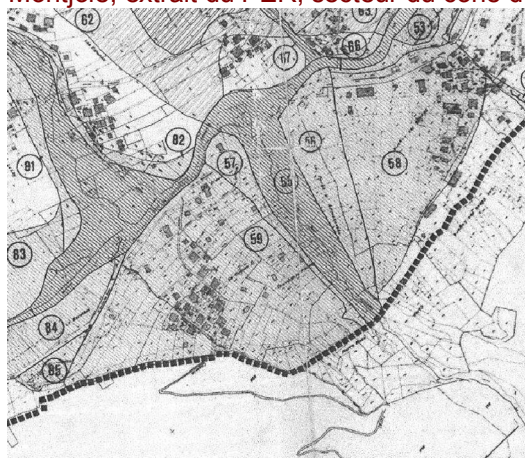


Source : ONF-RTM 74

Dans les années 1980, un Plan d'Exposition aux Risques¹² avait été établi et il donnait des indications de zonage avec des mesures de prévention applicables aux bâtiments. Rétrospectivement, ces mesures semblent en bonne adéquation avec le risque encouru : pour le secteur, on demandait une résistance de 3 t/m² sur 2 m de haut dans une bande assez proche du torrent, et une résistance de 1 t/m² sur 1 m de haut pour tout le cône de déjection.

Depuis ce qu'on appelle la "catastrophe de 2005", de nouvelles études ont été engagées, mais manifestement l'impact et le coût des ouvrages envisagés sont loin d'être négligeables et on n'a sans doute pas encore fini de parler du nant d'Armancette.

Carte 1.1 : les Contamines-Montjoie, extrait du PER, secteur du cône d'Armancette



Source : Mairie des Contamines-Montjoie

¹² les Plans d'Exposition aux Risques, PER, créés par la loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, deviendront des PPR, Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles en 1995

Document 1.11 : extrait du *Bulletin municipal des Contamines-Montjoie*, août 2007

Armancette ... toujours et encore ?

Ce début d'été pluvieux nous rappelle le triste souvenir du 22 août 2005 et les caprices du Nant d'Armancette qui ont marqué notre paysage communal pour de longs, de très longs mois. Nous avons donc réactivé la cellule de veille susceptible de se transformer en cellule de crise à la moindre alerte.

Dans le Bulletin Municipal de juillet 2006, nous vous donnions les premiers éléments d'information sur l'étude menée par les services de l'État (RTM) pour la protection des villages du Cugnon et des Loyers et la maîtrise des débordements foudroyants de ce torrent. Malheureusement le scénario retenu par cette étude est lourd de conséquence pour notre paysage et nos finances puisqu'il consiste à aménager entre la confluence avec le Bonnant et le débouché des gorges de l'Armancette des plages de dépôts capables de stocker les quelque 200.000 m³ de matériaux susceptibles de descendre du bassin versant.

Ces travaux nécessitent la mise en œuvre d'ouvrages techniques très imposants entre les sommets du Cugnon et des Loyers, remettent en cause le fonctionnement de notre garderie et du jardin d'enfant (ESF) et ne bénéficieraient probablement pas des mêmes conditions de participation financière de nos partenaires (État et Conseil Général principalement).

Aussi, c'est en accord avec la DDE et le RTM que nous venons de lancer une étude complémentaire sur cette problématique en demandant au bureau d'étude retenu - après la consultation de 8 cabinets internationalement reconnus - d'avoir une approche préventive plutôt qu'exclusivement protectrice. Dès que nous serons en possession de ces résultats (au printemps prochain si les conditions météo le permettent), nous organiserons une confrontation constructive de ces 2 études pour retenir et mettre en œuvre le scénario le plus pertinent.

2010, début du XXI^e siècle, "La prise en compte du risque torrentiel"

De ce bref aperçu historique, qui ne se voulait ni exhaustif ni systématique, juste une évocation à travers les âges, on pourrait retenir que l'histoire des torrents et des hommes, dont les premières traces écrites remontent aux Romains, n'est sans doute pas encore achevée. En effet, et malgré des travaux de très grande ampleur, "l'extinction des torrents" n'est pas acquise : ces travaux, dont il ne faut pas non plus sous-estimer l'intérêt, ont permis de réguler, de canaliser, et bien souvent de limiter la fréquence des événements "courants".

Mais ils n'ont pas permis et ils ne permettront sans doute pas de faire face aux événements exceptionnels et quelles que soient les protections mises en place, il y aura toujours un niveau où les ouvrages seront dépassés. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer l'ampleur des chiffres manipulés : quand les volumes de matériaux se comptent en centaines de milliers de m³, les débits en centaines de m³ par seconde, les masses en milliers de tonnes et la taille des blocs charriés en centaines de m³, il est évident qu'on ne se situe pas à des échelles raisonnablement maniables dans le domaine des constructions courantes.

Bien sûr, après chaque crise et sous le coup de l'émotion, on réclame des ouvrages devant offrir une protection absolue. Mais bien souvent, après quelque temps et devant l'ampleur des coûts, des solutions plus modestes voient le jour. Après chaque crise aussi, on envisage de ne plus habiter là et de déplacer les hameaux et les villages. Mais dans les faits, cela ne s'est jamais fait nulle part. Et force est de constater qu'il ne peut être question de vivre en montagne autrement que selon le principe du risque accepté.

Il faut donc considérer le débordement des torrents comme un phénomène récurrent auquel il faudra continuer à faire face. Mais des histoires qui précèdent, il faut aussi retenir deux leçons.

Tout d'abord, il faut noter que la cartographie du risque est une démarche maintenant maîtrisée. L'exemple du Nant d'Armancette démontre qu'il est possible de donner des indications raisonnables sur le risque auquel un bâtiment peut être exposé.

D'autre part, nous avons vu aussi que des bâtiments pouvaient parfois fort bien se comporter. L'exemple du *bâtiment neuf* de Saint-Gervais, qui résiste à la catastrophe de 1892, nous incite à penser que des bâtiments situés dans des zones où le risque n'est pas excessif, correctement conçus et judicieusement implantés, ont sans doute la possibilité de faire correctement face à ce type de situation.

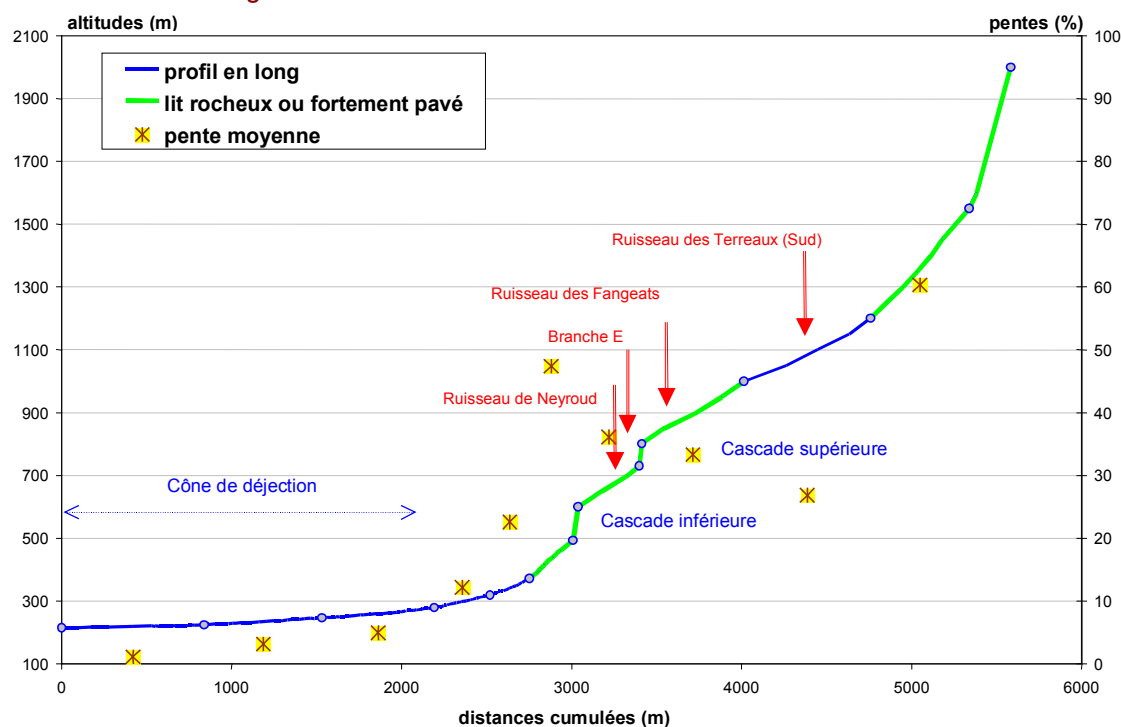
En 2010 "prendre en compte le risque torrentiel", tel est donc notre propos.

2 LE RISQUE TORRENTIEL

2.1 Portrait des bassins versants torrentiels

Les principaux traits qui distinguent les bassins versants torrentiels des bassins versants des autres cours d'eau sont leur taille généralement réduite (de quelques hectares à quelques centaines de km² au plus) et la morphologie abrupte de leurs reliefs. Ainsi, entre la source et l'exutoire de ces bassins, il n'est pas rare de mesurer des dénivellations de plusieurs centaines à quelques milliers de mètres, sur des distances horizontales souvent très inférieures à une dizaine de kilomètres.

Figure 2.1 : Profil en long d'un torrent – Crolles



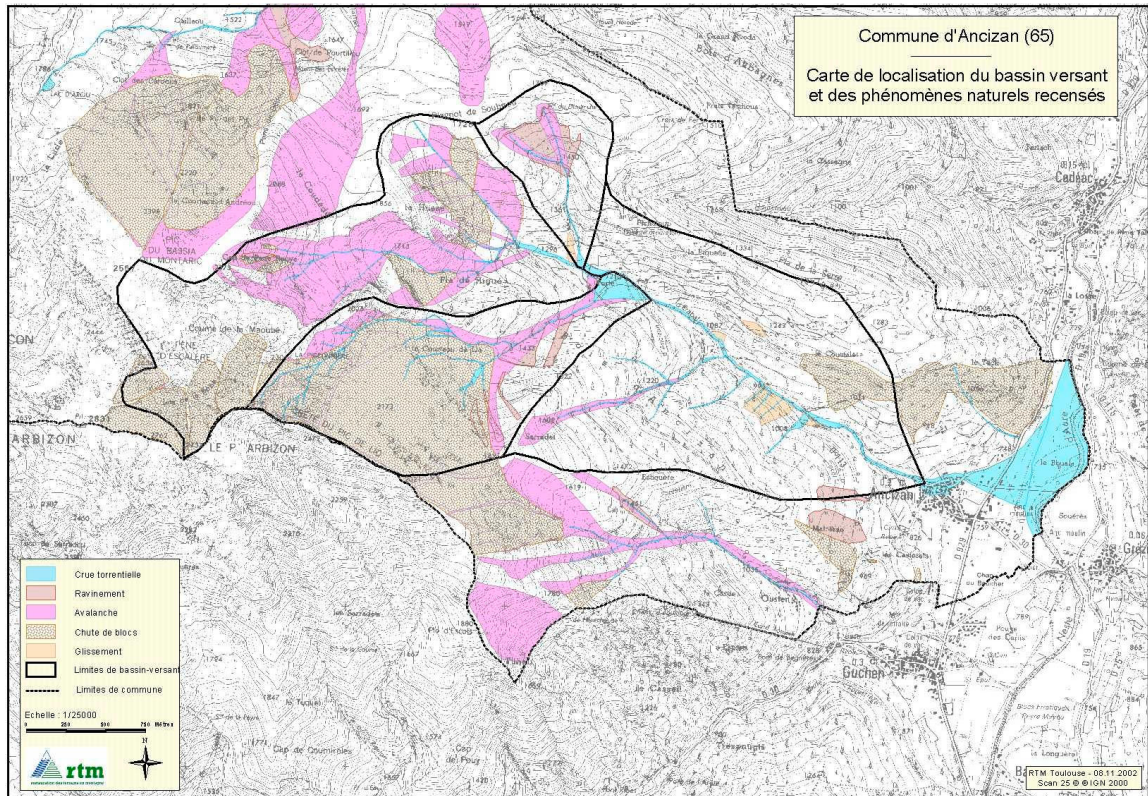
Source : ONF-RTM 38

Ces spécificités morphologiques ont au moins deux répercussions.

D'une part, elles conduisent à des pentes longitudinales raides au niveau des versants, comme des thalwegs. Ces pentes élevées donnent aux écoulements une puissance érosive et une capacité de transport considérables, ainsi que des vitesses de transit pouvant être très rapides (quelques minutes à quelques heures). Elles sont également à l'origine de nombreux autres phénomènes naturels gravitaires qui contribuent aussi à l'érosion des terrains et à l'alimentation des crues en matériaux (avalanches, chutes de blocs, glissements de terrain, ravinements...). Sur la base de ce critère de pente, une typologie simplifiée a été établie par Bernard (1925) pour distinguer les cours d'eau à caractère « torrentiel » des cours d'eau à plus faible énergie :

- pente inférieure à 1 % pour les rivières,
- pente comprise entre 1 et 6 % pour les rivières torrentielles,
- pente supérieure à 6 % pour les torrents.

Carte 2.1 : Phénomènes naturels affectant un bassin versant torrentiel - Ancizan

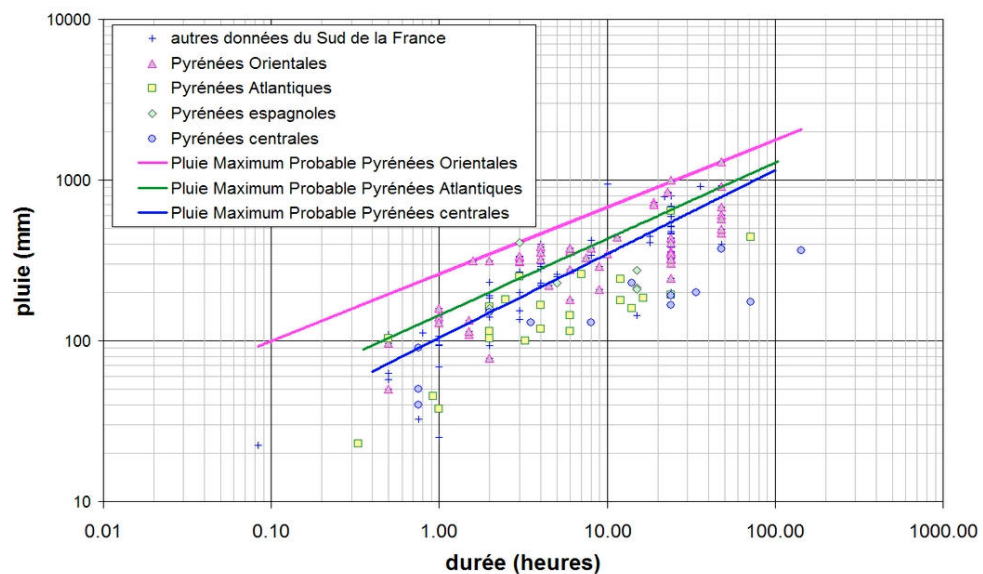


Source : ONF-RTM national

D'autre part, en cas de situation météorologique perturbée, l'existence de reliefs marqués conditionne le déclenchement de précipitations qui peuvent avoir un caractère soudain, violent et parfois très localisé. Ces reliefs peuvent également être à l'origine de situation de blocages qui provoquent des pluies durablement intenses, notamment lorsqu'il s'agit de perturbations généralisées.

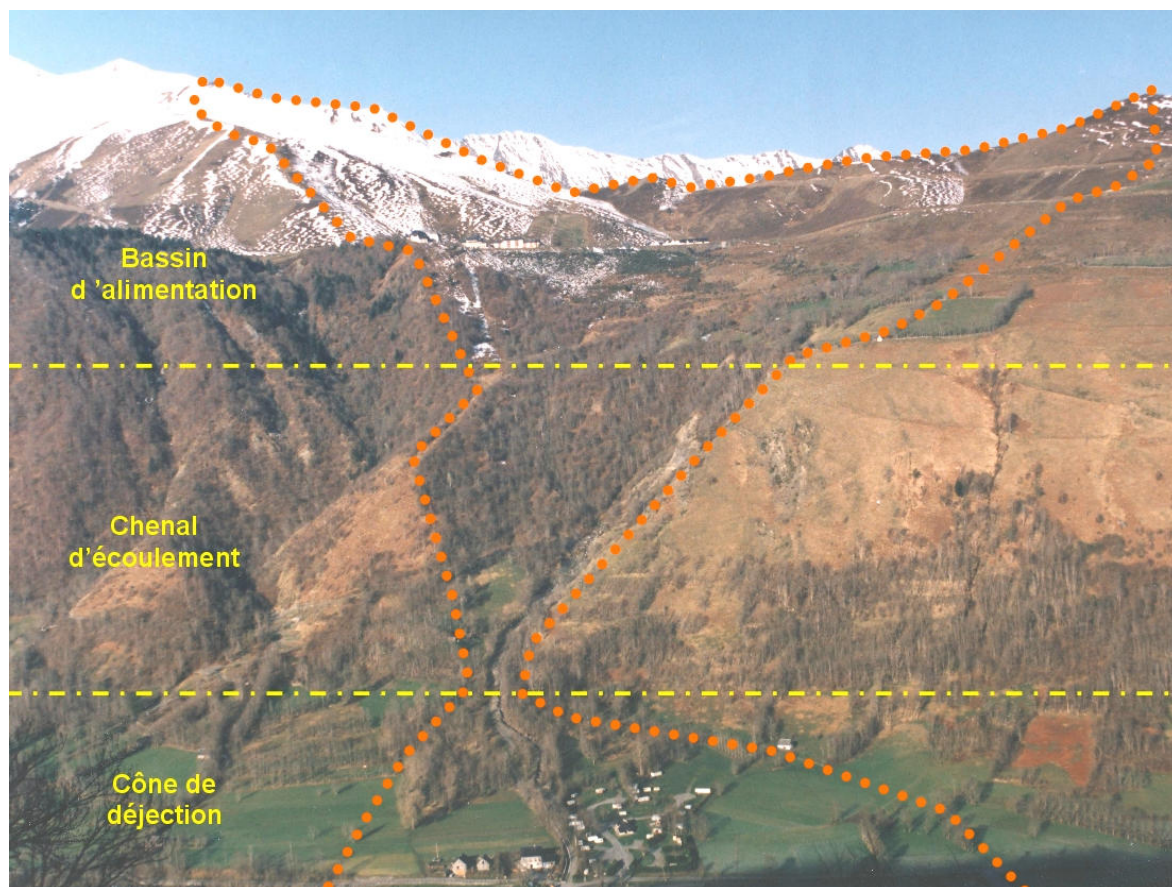
Il n'est pas rare dans ces conditions d'observer des cumuls pluviométriques de plusieurs centaines de mm en seulement quelques heures à quelques jours.

Figure 2.2 : Collection de quelques records de pluies intenses sur le massif des Pyrénées



Source : ONF-RTM national

Photo 2.1 : Bassin versant d'un torrent - Loudenvielle



Source : ONF-RTM national

Sur le plan tant morphologique que fonctionnel, la grande majorité des bassins versants torrentiels peut schématiquement être décrite en distinguant 3 entités principales, plus ou moins développées selon les cas :

- **le bassin d'alimentation** (ou de réception), qui est la zone où l'essentiel du ruissellement et de l'érosion de versants se développe ;
- **le chenal d'écoulement** (ou de régulation), où les écoulements chargés des sédiments prélevés plus en amont ont tendance à se déposer temporairement, voire seulement à transiter. Dans certains contextes géologiques particuliers, il n'est toutefois pas improbable que d'importants phénomènes d'érosion puissent aussi s'y développer.
- **le cône de déjection** (ou de divagation), qui matérialise la zone de confluence avec la rivière principale. Il correspond généralement à une brusque réduction de la pente et constitue, de ce fait, une zone privilégiée d'alluvionnement et de divagation incontrôlée des écoulements en période de forte crue.

2.2 Crues des torrents et des rivières torrentielles

Compte tenu de ces caractéristiques morphologiques, la dynamique des crues qui affectent les bassins versants torrentiels est souvent assez rapide : les pluies et la montée des eaux qui en découle ne sont séparées que de quelques heures au plus, et de beaucoup moins pour les plus petits bassins.

Mais ce qui distingue le plus les crues torrentielles des crues des rivières de plaine - qualifiées habituellement de crues « liquides » -, c'est la charge solide grossière et souvent assez considérable qui accompagne les écoulements et aggrave significativement leur impact sur les personnes et les biens exposés.

En général, le transport des sédiments intervient principalement **par charriage ou à la suite de coulées de laves torrentielles**. D'autres modalités de transport solide existent, comme la suspension, mais ces phénomènes s'avèrent en général nettement moins dommageables.

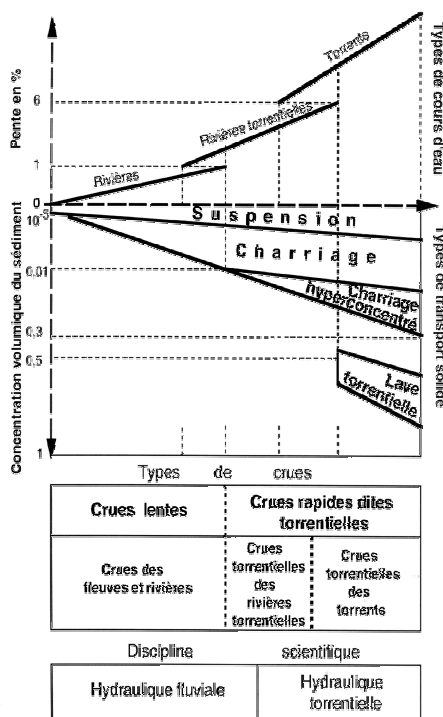
Le transport de bois et de débris divers **par flottaison** constitue aussi une classe de phénomènes susceptible d'aggraver significativement les conséquences des crues des torrents.

Dès lors qu'il y a transport de sédiments ou de débris, il existe des interactions entre la phase liquide, la phase solide et la géométrie du lit. En outre, plus la concentration solide sera importante, moins il sera admissible de la négliger, notamment dans les calculs hydrauliques.

En France les concepts de base de l'hydraulique torrentielle ont été synthétisés en 1991 par Maurice Meunier dans son ouvrage « éléments d'hydraulique torrentielle », qui constitue une sorte de point de départ à toute une génération de travaux scientifiques qui ont dès lors explicitement pris en considération les spécificités de l'hydraulique torrentielle.

Il aura donc fallu attendre le début des années 1990 pour que l'hydraulique torrentielle, hydraulique des torrents et des rivières torrentielles, soit considérée comme une discipline scientifique spécifique et pas comme un simple prolongement de l'hydraulique fluviale « classique », hydraulique des rivières et cours d'eau de plaine.

Document 2.1 : Correspondance entre cours d'eau, transports solides et types de crues
Extrait de *Les risques naturels*, Liliane Besson, 2005



* Concentration = volume solide / volume total
(les valeurs du graphique ne sont données qu'à titre indicatif).

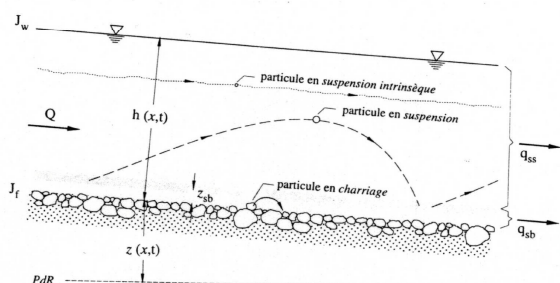
Charriage

Le charriage désigne le mode de transport de sédiments où les particules sédimentaires se déplacent par un mouvement de roulement, de glissement sur le fond ou encore par une succession de petits sauts (saltation). Il concerne les particules de taille grossière (diamètres de quelques mm à quelques dizaines de centimètres au plus), les matériaux fins étant surtout transportés en suspension.

Le comportement des grains reste essentiellement individuel. Au sein du fluide, cette particularité permet clairement de différencier une phase liquide et une phase solide se propageant à des vitesses distinctes. Un rapport de l'ordre de 60% est ainsi généralement admis entre la vitesse des particules charriées et la vitesse moyenne de l'eau. Dans un lit naturel, cette dernière atteint fréquemment des valeurs allant de 2 à 5 m/s en période de crue.

Dans certaines conditions particulières (écoulements hyperconcentrés), il arrive toutefois que l'on observe des amorces de mouvement en masse, par paquets de sédiments, qui donnent lieu à des « bouffées » de débit solide.

Figure 2.3 : Schéma de synthèse des différentes modalités de transport



Source : d'après Graf et Altinakar

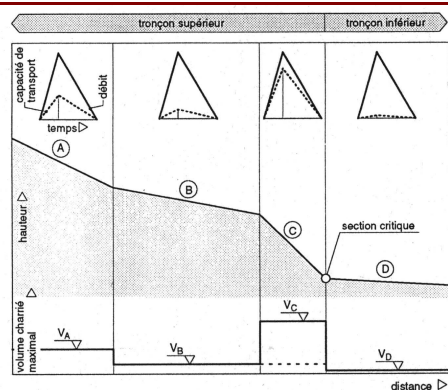
Photo 2.2 : Dépôts de charriage faisant suite au débordement et à la divagation d'un torrent - Saint Agnès



Source : ONF-RTM 38

Document 2.2 : « Influence du profil en long d'après Bezzola (1996) »

Extrait du guide PPR relatif aux crues des torrents de montagne (à paraître)



Les volumes V_A , V_B , V_C et V_D représentent le volume solide charrié au maximum dans chaque tronçon (d'autant plus forts que la pente est élevée).

Sur le tronçon B, moins raide que le tronçon A, se déposera la différence de volume $V_A - V_B$.

Le tronçon C, plus raide que le tronçon B, pourrait s'éroder du volume $V_B - V_C$.

Cependant si sa pente plus forte s'explique par des affleurements rocheux ou un pavage empêchant son érosion, il se contentera de laisser transiter le volume V_B .

Sur le tronçon D, à pente plus faible, ne se déposerait alors que la différence $V_B - V_D$.

Pour un débit liquide donné, la capacité de transport solide par charriage dépend des caractéristiques du sédiment transporté et de la pente longitudinale du cours d'eau. Usuellement, la gamme de concentration solide s'étend de quelques pour cents à quelques dizaines de pour cents.

La pente intervenant de façon tout à fait prépondérante, certains auteurs ont établi des formules simplifiées d'un degré de validité acceptable (au moins pour des débits correspondant au maximum de la crue) ne retenant que la pente comme variable explicative du rapport « débit solide sur débit liquide ».

En admettant que le débit solide est approximativement proportionnel au carré de la pente, il est alors aisé d'imaginer que toute variation de pente puisse avoir des répercussions significatives, à la fois en terme de capacité de transport et de modification de la morphologie torrentielle.

Laves torrentielles

Les laves torrentielles sont un phénomène tout à fait spécifique aux torrents. Schématiquement, elles ont généralement tendance à se former :

- à la faveur d’un événement pluvieux suffisamment intense,
- sur des pentes très importantes (généralement supérieures à 30%),
- au droit de sites dégradés de manière plus ou moins étendue, où une quantité importante de matériau solide altéré et déstructuré permet la formation d’un mélange concentré d’eau et de matériaux solides.

Le tableau ci-dessous présente succinctement les principaux facteurs favorisant ou limitant le déclenchement ainsi que la propagation de ces phénomènes :

Principaux facteurs favorisant le risque de lave torrentielle	⇒ Pente du chenal principal toujours > 15% ⇒ Grande quantité de matériaux meubles disponible dans ou à proximité du chenal principal ⇒ Formation d’embâcles possible
Principaux facteurs limitant le risque de lave torrentielle	⇒ Pente du chenal principal < 15% sur une portion significative ⇒ Chenal essentiellement rocheux ⇒ Pas de formation d’embâcles possible

Photo 2.3 : Bouffée d'une lave torrentielle permettant de distinguer le front, le corps et la queue de la coulée - Saint Paul de Varcès



Source : ONF-RTM 38

Photo 2.4 : Bourrelet latéral typique témoignant du passage d'une lave torrentielle - Livet et Gavet

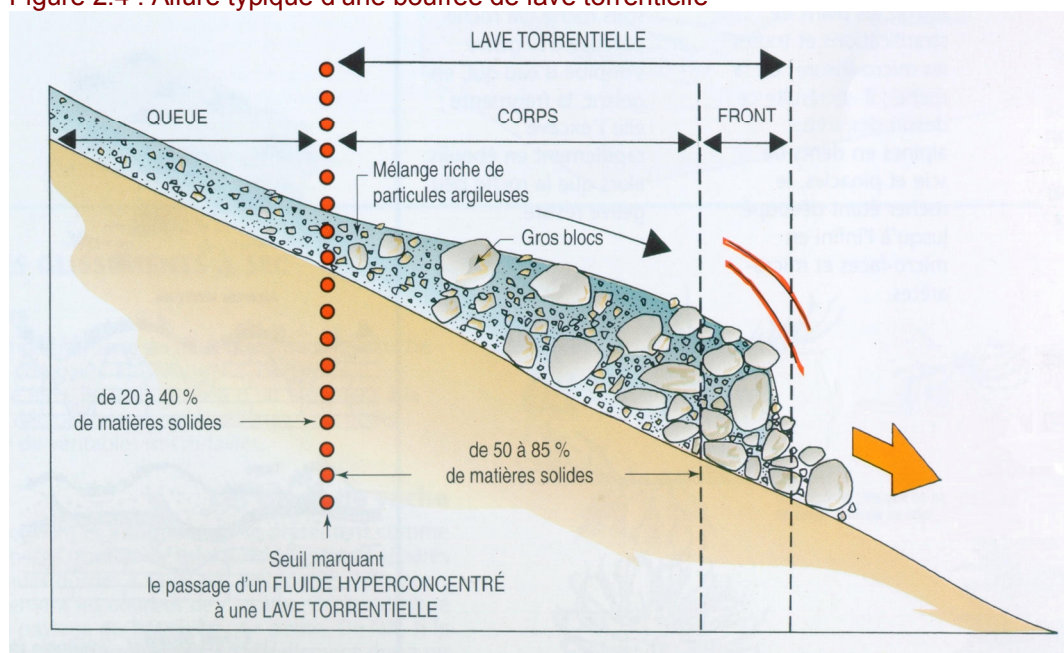


Source : ONF-RTM 38

Les laves torrentielles typiquement observées en France présentent généralement les caractéristiques suivantes :

- écoulement assez souvent transitoire, constitué de bouffées successives indépendantes prenant la forme de vagues de l’ordre de quelques mètres de hauteur (gamme probable variant entre 0,5 et 5,0 m) ;
- vitesses de propagation plutôt rapides et couramment comprises entre 1 et 7 m/s ;
- masse volumique variant couramment entre 2200 et 2300 kg/m³ ;
- concentration en matériau solide très élevée, généralement supérieure à 50% en volume et pouvant atteindre 90% (contre 20 à 40% au plus pour les écoulements hyperconcentrés) ;
- matériaux constituant les coulées présentant une large étendue granulométrique, allant des argiles à des blocs de dimensions métriques ;
- comportement d’ensemble de la coulée révélant une apparence monophasique et ressemblant plus à l’écoulement d’une pâte que d’un liquide à proprement parler. Lorsqu’une zone de plus faible pente est atteinte, cette spécificité se traduit par la possibilité d’un arrêt « en masse » de la coulée, avec une épaisseur de dépôt importante et la présence d’un bourrelet frontal.

Figure 2.4 : Allure typique d'une bouffée de lave torrentielle



Extrait de *La vie de la Montagne*, Bernard Fischesser, 1998

La description de l'écoulement d'une lave torrentielle dans un chenal suffisamment confiné permet de distinguer 3 entités fonctionnelles principales :

- un front granulaire généralement raide, constitué de gros blocs et de débris divers (arbres, morceaux d'ouvrages, véhicules, etc.), qui semblent poussés par le corps de la coulée.
- un corps, qui suit le front et revêt généralement un aspect plus boueux. Constitué essentiellement de blocs plus ou moins noyés dans un fluide interstitiel, son comportement dépend largement de la teneur en éléments fins (argiles et silts). Ceci amène à faire une distinction entre différents types de laves torrentielles : boueuses, granulaires ou du type « lahars » (matériaux d'origine volcanique ou sédiments fins non argileux).
- une queue de coulée, qui marque le passage progressif vers un écoulement hyperconcentré et, de ce fait, plus turbulent et biphasique (liquide + solide).

Flottants

En période de crue, le transport de bois par flottaison est un phénomène fréquent. Au passage de sections étroites (rétrécissement naturel ou provoqué par un aménagement) ou de méandres prononcés, ces flottants peuvent s'amonceler et former des embâcles. Ils peuvent aussi provoquer ou aggraver le débordement du cours d'eau et causer de graves dommages aux personnes et aux biens, particulièrement à ceux jouxtant le lit mineur.

Les bois flottants peuvent avoir de multiples origines. Il peut en effet s'agir :

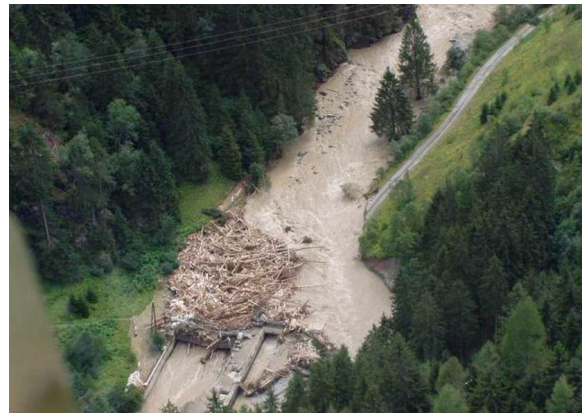
- d'arbres morts ou dépérissants déjà plus ou moins tombés dans le lit et emportés par l'écoulement,
- de ruptures d'embâcles formées lors des crues précédentes,
- d'arbres vivants déracinés des berges ou des bancs d'alluvions, par des processus d'érosion latérale liés à la crue,
- d'apports provenant de glissements de terrain ou d'autres processus d'érosion affectant les versants en contact direct avec le torrent,
- d'apports par des avalanches au débouché de couloirs actifs,
- de dépôts de bois coupés ou rémanents d'exploitation, non ramassés ou stockés temporairement en bordure de lit.

Photo 2.5 : Accumulation de bois dans un lit torrentiel à la suite d'une avalanche – Saint Paul en Ubaye



Source : ONF-RTM 38

Photo 2.6 : Divagation d'une rivière torrentielle provoquée par l'obstruction d'un pont par des flottants lors des crues d'août 2005 (Autriche)



Source : DR

Causes et conséquences des débordements

Lors d'un épisode de forte crue, de nombreux facteurs peuvent conduire au débordement d'un torrent en dehors de son chenal d'écoulement ordinaire :

- capacité hydraulique du chenal d'écoulement insuffisante au regard du débit de la crue ou de la coulée de lave,
- dépôt des sédiments charriés par le torrent, ou arrêt de une ou plusieurs bouffées de lave torrentielle successives, au niveau d'une réduction de pente, entraînant un exhaussement plus ou moins prononcé du lit du fait de son engrèvement,
- obstruction du lit ou d'un ouvrage (ouvrage de franchissement de type pont, notamment) par des blocs ou des corps flottants.

Photos 2.7 : Formation d'embâcles au droit d'un pont
Saint-Geoire-en-Valdaine



Source : ONF-RTM 38

Ces débordements peuvent amener à des divagations du cours d'eau vers des zones inhabituelles, à des coupures de voies de communication, à l'envahissement massif du cône de déjection par des sédiments de toutes tailles... Ces processus sédimentaires sont souvent aggravés et rendus imprévisibles par la présence de débris au sein de ces écoulements chargés, ou même d'obstacles implantés à l'intérieur de la zone de divagation potentielle.

Photo 2.8 : Etalement d'une coulée de lave torrentielle - Bourg-Saint-Maurice



Source : ONF-RTM 73

Photo 2.9 : Divagations et alluvionnements d'un torrent – La Salle les Alpes



Source : Gendarmerie Nationale

Par ailleurs, le débordement des crues avec charriage engendre fréquemment toutes sortes de désordres résultant de la capacité érosive que retrouvent les écoulements, dès lors qu'ils ne sont plus chargés à leur capacité maximale de transport. Les affouillements qui en résultent peuvent rester localisés, ou concerner des tronçons relativement longs. Ils sont alors capables d'entraîner des déstabilisations de berges, voire de versants. Ils peuvent également provoquer des dommages allant jusqu'à la ruine d'ouvrages ou d'habitations, même dans des zones éloignées du lit principal du cours d'eau en cas de divagations.

De même, du fait de leurs caractéristiques (densité de l'ordre de 2 fois celle de l'eau, front granulaire de plusieurs mètres de hauteur, vitesses de propagation rapides,...) les laves torrentielles sont susceptibles de générer des pressions dynamiques extrêmement importantes lors de chocs sur les ouvrages de protection ou les bâtiments.

L'observation des crues des torrents montre donc qu'au-delà de la seule caractérisation des contraintes hydrauliques des écoulements, d'autres particularités doivent aussi être considérées lorsque l'on évalue le niveau d'aléa des parcelles situées en aval de points de débordement. La qualification des aléas nécessite par conséquent de suivre une approche spécifique dont certains éléments d'analyse seront précisés dans la suite du guide.

Photo 2.10 : Ravinement intense sur un versant – Saint Geoire en Valdaine



Source : ONF-RTM 38

Photo 2. 11 : Capacité érosive d'écoulements torrentiels déchargés de leur composante solide - Landry



Source : ONF-RTM 73

2.3 Techniques de protection

En France, les deux techniques de défense collective couramment mises en œuvre pour contrôler l'impact des crues torrentielles sont la correction active et la protection passive.

Correction active

La correction active a pour objectif de réguler ou d'empêcher les phénomènes de ruissellement et d'érosion de se produire dans les bassins versants. Cet objectif est satisfait en « traitant » à la source certains facteurs favorisant leur déclenchement. Cette stratégie s'avère toutefois inopérante dans certains cas de torrents alimentés en continu par des effondrements de falaises (torrents à clappes) ou au-delà de la limite altitudinale de reprise de la végétation.

Il est ainsi courant de distinguer :

- les travaux de revégétalisation, qui nécessitent souvent une fixation préalable des terrains à l'aide d'ouvrages de génie civil, d'ouvrages de génie biologique ou d'ouvrages combinant ces deux techniques.
- les travaux de correction torrentielle réalisés soit sur les versants ou dans des ravins de taille modeste à l'aide de petits ouvrages ; soit dans le lit de torrents à l'aide d'ouvrages de grandes dimensions.

Ces techniques ont constitué, dès la fin du XIX^e siècle, le socle des actions de Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Aujourd'hui, ces actions sont néanmoins employées de manière beaucoup plus modeste et nécessitent, pour le maintien d'un niveau de sécurité satisfaisant, de régulières et coûteuses opérations d'entretien.

Photo 2.12 : Correction de versant à l'aide de banquettes grillagées – La Motte du Caire



Source : ONF-RTM national

Photo 2.13 : Correction de ravins à l'aide de palissades et de boutures - Draix



Photo 2.14 : Correction de ravins à l'aide de seuils en bois – Le Monetier les Bains



Source : ONF-RTM 05

Photo 2.15 : Barrage en maçonnerie – Villeneuve d'Entraunes



Source : ONF-RTM national

Photo 2.16 : Barrages en enrochements - Embrun



Photo 2.17 : Tunnel de dérivation - Guillestre



Source : ONF-RTM 73

Protection passive

La principale finalité des mesures de défense passive consiste à mettre les enjeux socio-économiques à l'abri des effets, parfois dévastateurs, des crues torrentielles. Ces mesures, qu'elles aient recours ou non à la construction d'ouvrages, conduisent notamment à :

- forcer les matériaux solides transportés par les crues torrentielles à se déposer dans des dispositifs situés à l'amont des zones à protéger,
- favoriser le transit des écoulements, déchargés ou non de leur transport solide, au travers des zones exposées,
- réglementer l'occupation des sols en tenant compte des aléas prévisibles,
- réduire la vulnérabilité du bâti existant,
- assurer une surveillance du bassin versant et déclencher si nécessaire une procédure d'alerte auprès des riverains exposés.

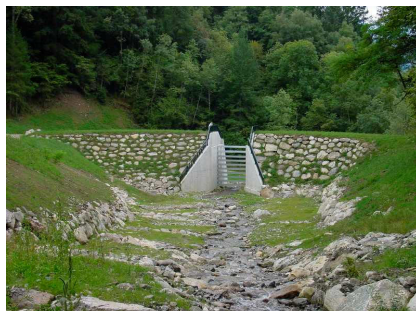
Ces techniques se sont largement développées lors de la période contemporaine, notamment pour s'adapter à l'évolution récente de l'occupation des territoires montagnards et pour répondre à de nouvelles exigences économiques et sécuritaires.

Photo 2.18 : Epis plongeant – Saint Barthélemy de Vals



Source : ONF-RTM 38

Photo 2.19 : Plage de dépôt - Verdun sur Ariège



Source : ONF-RTM national

Photo 2.20 : Plage de dépôt - Saint Martin la Porte



Source : ONF-RTM 38

Photo 2.21 : Opération de curage - Tréminis



Source : ONF-RTM 38

Photo 2.22 : Piège à flottants - Eaux Bonnes



Source : ONF-RTM national

Photo 2.23 : Détecteur de lave torrentielle



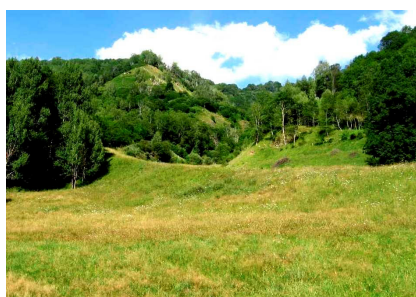
Source : ONF-RTM 05

Photo 2.24 : Endiguement d'une rivière torrentielle - Soulom



Source : ONF-RTM national

Photo 2.25 : Digue de déviation de coulée de lave torrentielle - Loudenvielle



Source : ONF-RTM 64/65

Photo 2.26 : Canalisation d'un torrent - Bielle



Source : ONF-RTM 09/31

3 CONNAISSANCE ET AFFICHAGE DU RISQUE

En France, on répertorie un peu plus de 21 000 communes « à risques », tous phénomènes naturels confondus. En 2010, la situation de ces communes est néanmoins assez hétérogène au regard de la connaissance et de l’affichage des risques naturels prévisibles.

Dans les communes à forts enjeux, le Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) sera à terme le document qui réglemente le développement des zones exposées à des phénomènes naturels. En 2010, au moment de l’élaboration de ce guide, près de 8 000 communes disposent déjà d’un document approuvé par arrêté préfectoral.

Pour les communes à enjeux plus faibles, l’obligation de tenir compte des risques dans l’aménagement de leur territoire ne passe pas nécessairement par l’élaboration d’un PPR. D’autres outils existent en effet pour répondre à cette nécessité. Dans les PLU par exemple (ou anciennement les POS), il est possible de transcrire des cartes d’aléas, lorsqu’elles existent, pour que les informations contenues dans ces cartographies deviennent opposables dès l’approbation du document.

Dans certains cas particuliers ou complexes, la réalisation d’une étude de détail par un spécialiste peut aussi s’avérer indispensable. La qualification des aléas nécessite toutefois de suivre une approche spécifique. Certains éléments d’analyse sont donc précisés dans la suite.

3.1 Information disponible

Plan de Prévention des Risques Naturels

Instauré en 1995 en application des art. L.562-1 à L.562-7 du code de l’environnement, le Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPR) est le document réglementaire de prévention des risques naturels qui remplace les Plans d’Exposition aux Risques (PER) et les cartes de risques naturels établies au titre de l’application de l’article R111-3 du code de l’urbanisme. C’est un document prescrit et approuvé par arrêté préfectoral ayant valeur de servitude d’utilité publique et opposable aux tiers.

L’objectif majeur des PPR est la prise en compte des risques dans les décisions d’aménagement du territoire. Ces documents visent surtout à ne pas accroître de manière inconsidérée la vulnérabilité des personnes et des biens à l’intérieur des zones directement exposées à des phénomènes naturels prévisibles.

Les PPR délimitent, à l’échelle de la commune ou du bassin de risque, les zones directement ou indirectement exposées, en tenant compte de la nature et de l’intensité du ou des phénomènes naturels prévisibles. Ils identifient aussi les enjeux présents à l’intérieur du périmètre mis à l’étude. En montagne, l’espace est limité et les enjeux souvent concentrés dans un même secteur géographique. La démarche doit donc s’attacher à identifier l’existant mais également apprécier les besoins futurs et les secteurs les plus appropriés pour les accueillir. Plus encore qu’ailleurs, elle doit également reconnaître les enjeux indispensables au bon fonctionnement de la collectivité, notamment ceux qui sont liés à la gestion de crise.

Classiquement, le croisement des aléas et des enjeux conduit ensuite au zonage du risque et à la définition du règlement. Un dossier PPR comporte les pièces réglementaires constitutives suivantes :

- une note de présentation, ayant pour fonction d’expliquer et de justifier la démarche PPR et son contenu. Ce document doit notamment indiquer les secteurs géographiques concernés, la nature des phénomènes naturels pris en compte et leurs conséquences possibles compte tenu de l’état des connaissances ;
- un ou plusieurs documents graphiques délimitant le zonage réglementaire. Les cartes représentant les différentes étapes de l’analyse (carte informative des phénomènes naturels, carte d’aléa, carte des enjeux,...) sont quant à elles indispensables à la compréhension de la démarche. Elles doivent être annexées à la note de présentation ;
- un règlement précisant en tant que de besoin : les conditions de réalisation des projets applicables dans chacune des zones délimitées par les documents graphiques ; les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises par les collectivités publiques dans le cadre de leurs compétences, et celles qui peuvent incomber aux particuliers ; les mesures relatives à l’aménagement, l’utilisation ou l’exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l’approbation du plan.

Le règlement mentionne, le cas échéant, celles de ces deux dernières catégories de mesures dont la mise en œuvre est obligatoire et le délai fixé pour leur mise en œuvre.

L'élaboration du PPR est également l'occasion d'anticiper la crise et la post-crise. Ces sujets sont plutôt du ressort du plan communal de sauvegarde (PCS) mais les réflexions engagées dans le cadre du PPR doivent être mises à profit pour s'y préparer. L'expérience montre que l'habitude de travail collectif et le fonctionnement en réseau de connaissances sont prédominants pendant la crise.

Cartes d'aléas

Il arrive assez fréquemment que certaines communes aient fait établir, de leur propre initiative, une cartographie des risques naturels (carte d'aléas) directement jointe à leur carte communale, à leur PLU ou à leur POS.

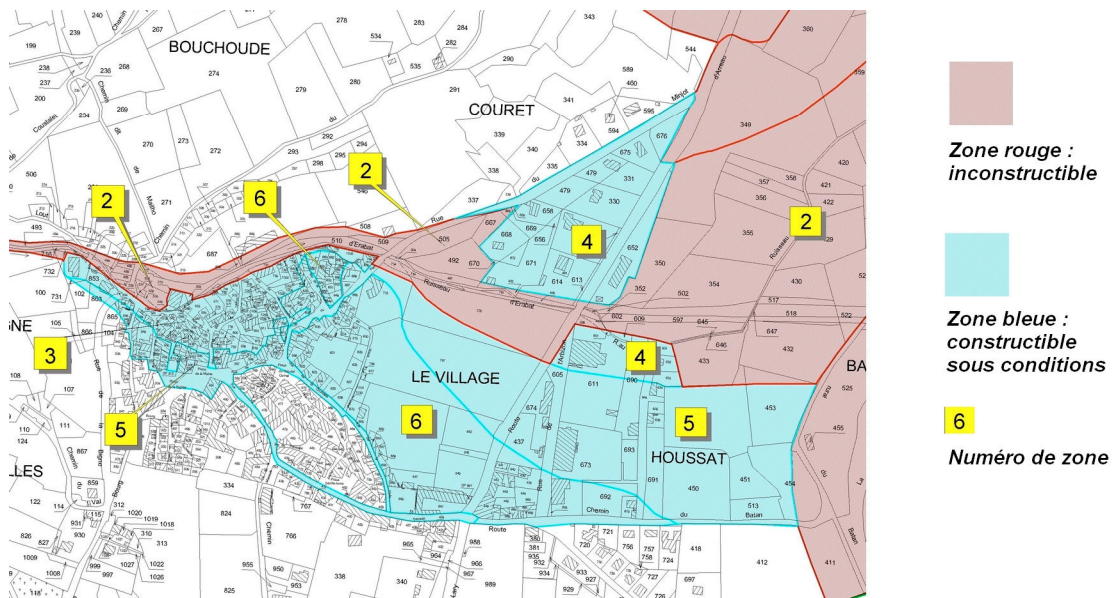
Cette démarche conduit alors à l'édition de une ou plusieurs cartes techniques représentant les phénomènes naturels déclarés et potentiels en fonction de leur fréquence et de leur intensité, parmi lesquelles :

- une carte informative des phénomènes naturels, en général sur fond IGN au 1/25000,
- une carte des aléas de l'ensemble du territoire communal, couramment sur fond IGN au 1/10 000, avec un zoom cadastral sur certaines zones, au minimum pour les zones urbanisées et urbanisables.

La plupart du temps, ces documents cartographiques s'accompagnent aussi d'une note de présentation comprenant :

- la description du secteur géographique concerné,
- la présentation des documents d'expertise (carte des aléas et éventuellement carte informative des phénomènes naturels),
- un rappel des principaux enjeux,
- une description des protections réalisées (localisation et efficacité),
- une conclusion proposant les orientations générales à mettre en œuvre en matière d'urbanisme, de règles de construction et de protection de l'existant.

Document 3.1 : PPR d'Ancizan - Plan de zonage réglementaire



Source : ONF-RTM 64/65

Document 3.2 : PPR d'Ancizan – Description des zones

n° zone	Localisation	Type de phénomène	Description de la zone	Niveau aléa	Niveau vulnérabilité	Zonage PPR
2	Ruisseau d'Erabat Bernadet Le village Bouala Courret	Crue torrentielle	Emissaire né dans les pentes Nord du Petit Arbizon (alt. : 2737 m) et drainant les parois ruiniformes du Pic de Lio par son affluent le ruisseau de Lio. En altitude, les précipitations orageuses très intenses surtout fréquentes en été, génèrent des transports solides sous forme de laves torrentielles ou de charriage, que le vallon à fond plat du torrent d'Erabat laisse transiter vers son cône de déjection sur lequel est établi le village. L'événement du 15 août 1953, avec 6 victimes et plusieurs dizaines de bâtiments détruits, témoigne avec d'autres épisodes analogues, de la torrentialité exacerbée de ce cours d'eau. Les terrains les plus exposés aux débordements d'une lave torrentielle sont plutôt localisés dans la partie supérieure du cône de déjection. Au contraire, les plus gros dépôts et désordres liés au transport solide par charriage torrentiel concernent essentiellement les parcelles situées en aval du pont du CV7. Dans ce secteur, le chenal est comblé par des sédiments déposés par une lave ou par charriage. Le torrent déborde et divague librement, sans toutefois que l'écoulement ne s'étale de façon uniforme sur toute la largeur du cône de déjection. On observe alors une concentration de l'écoulement dans des chenaux et un déplacement selon la topographie et au grés des obstacles. La zone d'aléa moyen correspond aux parcelles où la mise en péril de constructions paraît moins évidente et où la sécurité des personnes peut y être assurée, a priori. L'aménagement hydraulique mis en place postérieurement à la catastrophe de 1953 présente plusieurs points de faiblesse et un niveau de protection non à la hauteur de l'urbanisation installée de part et d'autre. D'anciens chenaux d'écoulements subsistent dans les prairies de Bouala.	Fort	Fort	Construction Interdite
3,4				Fort	Fort	Construction autorisée sous conditions
5				Moyen	Fort	Construction autorisée sous conditions
6				Faible	Fort	Construction autorisée sous conditions

Source : ONF-RTM 64/65

3.2 Éléments pour la qualification des aléas

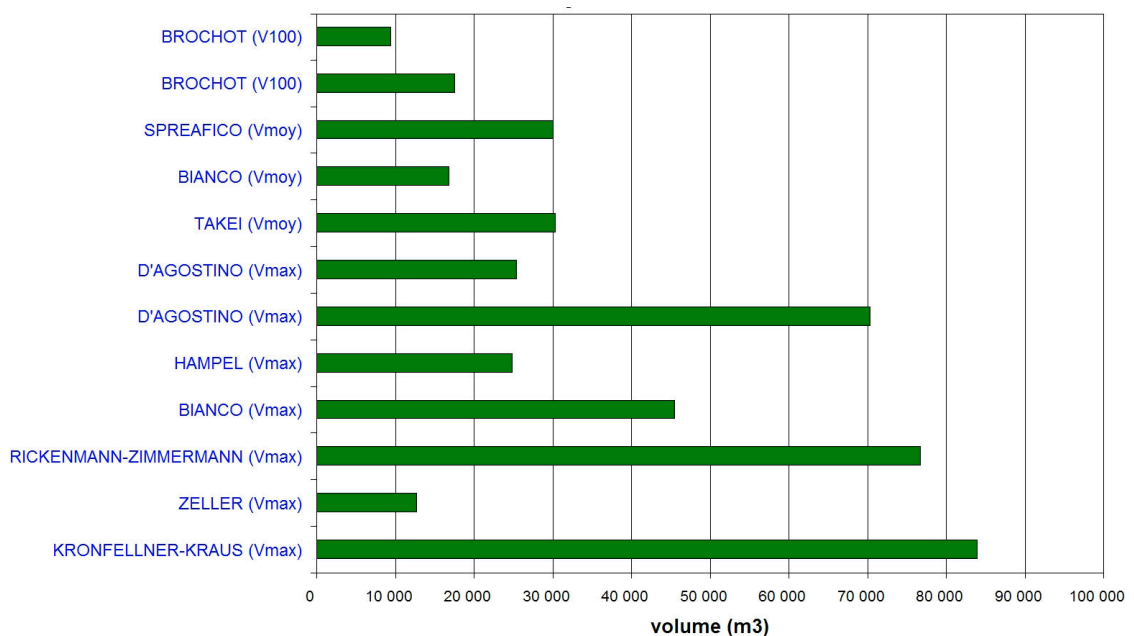
Période de retour de la crue de référence

Quel que soit le type de cours d'eau considéré, la position générale retenue en France est de prendre en compte une crue de référence correspondant à la plus forte crue historique connue, dans la mesure où sa durée de retour est au moins centennale.

Dans le cas contraire, la crue centennale retenue comme référence est définie de manière théorique, par extrapolation des informations historiques disponibles, et en tenant compte du fonctionnement actuel du bassin versant et des aléas pluviométriques susceptibles de l'affecter.

Ce principe sert en général de fil conducteur, mais il convient d'en connaître les limites lorsqu'on l'applique aux bassins versants à caractère torrentiel.

Figure 3.1 : Variabilité des estimations du volume probable des coulées de laves torrentielles d'un torrent issues de l'application de diverses formules empiriques de prédétermination.



Source : ONF-RTM 38

Ainsi, les coulées de laves torrentielles correspondent typiquement à une classe de phénomènes où ces limites sont rapidement atteintes. En effet, la caractérisation de ces phénomènes est déjà un exercice difficile en raison du manque de données de base, de la complexité des processus et de leur grande variabilité. Elle l'est encore plus lorsque l'on tente de leur attribuer une période de retour. Dans la majeure partie des cas, le praticien se contente donc d'une appréciation qualitative et s'appuie surtout sur son expérience pour définir un scénario d'un ordre de grandeur approximativement centennal.

De même, l'estimation de la charge sédimentaire des crues avec charriage torrentiel souffre de nombreuses incertitudes, liées à l'imprécision des formules de transport solide et au manque de données hydrologiques relatives aux débits s'écoulant dans des lits torrentiels.

Principales spécificités à prendre en compte

Sur les cours d'eau de plaine, le niveau de l'aléa « inondation » est en général évalué à partir d'un nombre limité de paramètres hydrauliques comme la hauteur de submersion, la vitesse de l'écoulement ou la durée de l'inondation.

Photo 3.1 : Divagation et alluvionnement incontrôlés d'un torrent - Ceillac



Source : archives départementales des Hautes Alpes (fond Henry Vincent)

Photo 3.2 : Dégâts provoqués par la crue d'une rivière torrentielle en août 2005 (Autriche)



Source : DR

Dans le cas particulier des crues des bassins versants torrentiels, les retours d'expérience montrent qu'il est nécessaire de tenir compte d'autres particularités. En plus de la submersion éventuelle des terrains, il faut en effet s'attendre à des phénomènes d'érosion et de dépôts sédimentaires pouvant prendre des proportions remarquables.

Sans être exhaustif, ils se manifestent notamment par :

- des phénomènes d'affouillement, préférentiellement au niveau de la berge extérieure des méandres, qui conduisent à d'importants reculs de berges ;
- un cheminement instable et relativement aléatoire des débordements, sous l'effet des différents éléments entraînés par le torrent (sédiments, flottants, débris divers,...), de la présence d'obstacles ou de bâtiments résistants ;
- un lissage de la topographie initiale des terrains submergés, par alluvionnement des dépressions existantes ou au contraire érosion des terrains en situation de remblai ;
- la destruction totale ou partielle de bâtiments, d'infrastructures ou d'équipements, notamment à la suite de la divagation du torrent en dehors de son chenal d'écoulement ordinaire ou en raison de survitesses liées à la concentration d'écoulements (typiquement à l'angle de bâtiments) ;
- un impact parfois très dommageable des flottants (de grande taille ou mobilisés en grand nombre), particulièrement pour les enjeux jouxtant le lit mineur des cours d'eau qui subissent dans ce cas des efforts d'impact ponctuels très significatifs ;
- des sollicitations de type dynamique sur toute structure située sur le passage des écoulements torrentiels, du fait de leur propagation à grande vitesse et du transport d'importantes quantités de matériaux solides.
- des phénomènes de laves torrentielles particulièrement destructeurs, résultant de leur forte densité et de la présence en tête de coulée, d'un front raide riche en gros blocs et en troncs d'arbres.

Ces spécificités amènent à ce titre à faire une distinction sémantique nette entre l'aléa « inondation » des rivières de plaine et celui des cours d'eau à caractère torrentiel qualifié aléa « divagation et alluvionnement ».

Critères de qualification

Dans l'état des connaissances scientifiques actuelles, la détermination précise des conditions de transit des crues torrentielles demeure encore délicate et incertaine. La qualification des aléas torrentiels ne peut donc pas se résumer à la seule application de paramètres hydrauliques. Cette démarche, par ailleurs usuelle dans le cas des inondations de plaine, s'avère d'autant moins adaptée ici que certains phénomènes spécifiques aux crues des torrents de montagne ne peuvent être traduits simplement par des variables hydrauliques du type hauteur ou vitesse.

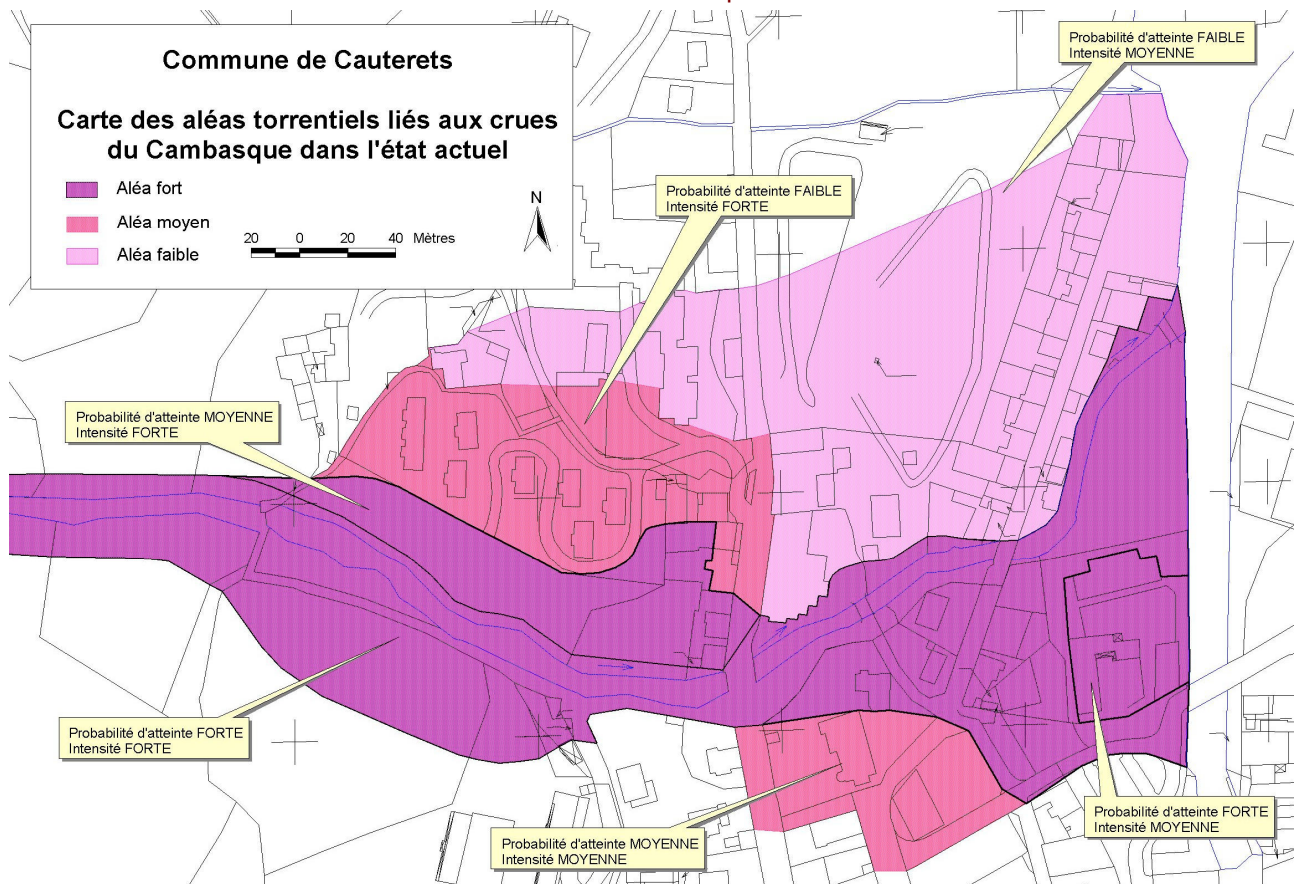
L'alternative retenue pour évaluer le niveau des aléas torrentiels consiste alors à apprécier de manière qualitative les éléments sériés ci-dessous :

- ampleur et conséquences des éventuelles crues historiques connues,
- nature et intensité du ou des phénomènes torrentiels prévisibles dans l'état actuel,
- probabilité d'atteinte de la parcelle par la crue de référence.

Pour chacun des secteurs examinés, les niveaux d'aléas sont déterminés concrètement sur la base de la grille de cotation présentée ci-dessous. Elle combine un critère de **probabilité d'atteinte**, décliné en 4 niveaux, et un critère **d'intensité** qui distingue seulement 2 niveaux. Aucun niveau d'intensité faible n'est en effet considéré compte tenu de la dynamique rapide des écoulements torrentiels.

Aléa		Probabilité d'atteinte		
		Forte	Moyenne	Faible
Intensité	Forte	Fort	Fort	Fort à Moyen
	Moyenne	Fort	Fort à Moyen	Moyen à Faible

Carte 3.1 : Carte des aléas torrentiels du torrent du Cambasque – Commune de Cauterets

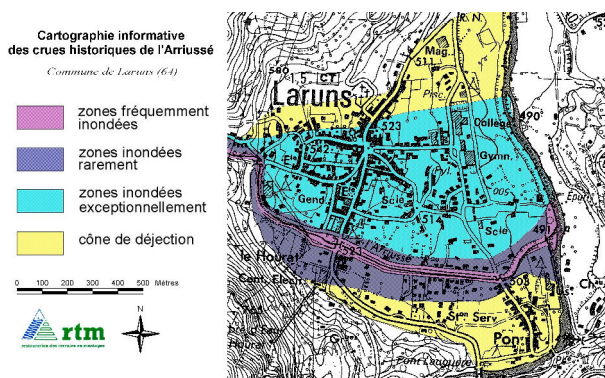


Source : ONF-RTM national

Au sens de cette approche, la **probabilité d'atteinte** n'est pas directement déduite d'une analyse statistique mais résulte de la plus ou moins grande prédisposition d'un site à être affecté par des débordements, pour la crue de référence ayant fait l'objet d'une concertation lors de l'élaboration du PPR. Cette prédisposition est surtout liée à la situation des terrains par rapport aux points de débordement potentiels et aux axes de propagation des écoulements.

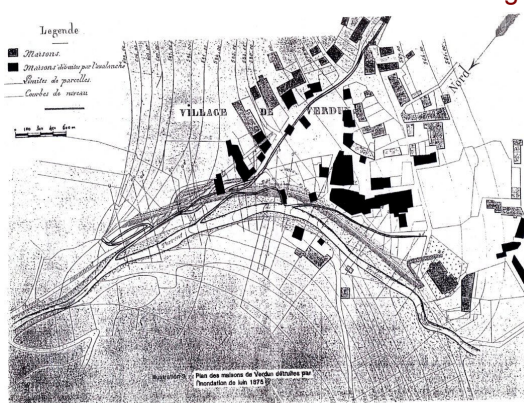
Les principaux éléments d'appréciation sont relatifs aux informations concernant les crues historiques, à la géomorphologie de la zone de divagation et à la topographie du terrain naturel. A cette occasion, il doit également être tenu compte de l'influence positive ou négative d'aménagements et d'infrastructures sur la propagation des débordements.

Carte 3.2 : Carte des crues historiques de l'Arriussé – Laruns



Source : ONF-RTM national

Carte 3.3 : En noir maisons détruites par la lave torrentielle de 1875 – Verdun sur Ariège



Source : ONF-RTM 09/31

Dans le cas particulier d'aménagements ayant une vocation de protection, l'efficacité du dispositif doit être évaluée sous l'angle de la maîtrise du phénomène en vue d'éviter son déclenchement et/ou de son accompagnement contrôlé dans sa phase de propagation.

En particulier, lorsqu'un dispositif de protection s'avère adapté, c'est à dire qu'il atténue fortement l'intensité et la probabilité d'atteinte d'un secteur donné, sans aggraver le danger en cas de dépassement de la crue de projet, il n'y a aucune raison objective de ne pas en tenir compte dans l'appréciation des niveaux d'aléa. Pour cette évaluation, les éléments suivants doivent notamment être vérifiés : existence d'un maître d'ouvrage identifié, conception initiale du dispositif, état des ouvrages au moment de l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPR), niveau de contrôle du dispositif vis à vis du ou des phénomènes prévisibles...

Dans certains cas, l'influence d'un dispositif peut aussi porter sur la limite externe de l'aléa de référence. Elle peut par exemple conduire à retenir une emprise plus restreinte que la limite géomorphologique du cône de déjection ou du fond de vallée alluviale. Ces cas doivent néanmoins rester des exceptions et sont acceptables uniquement s'il peut être établi que les risques résiduels sont négligeables. Les hypothèses qui conduisent un tel choix doivent être dûment justifiées et décrites dans le PPR. Au contraire, si en cas de dépassement, une augmentation de l'aléa est prévisible sur les parcelles situées derrière cet ouvrage, la qualification de l'aléa de référence doit clairement tenir compte de ce facteur aggravant.

Document 3.3 : « Événements dommageables recensés relatifs au torrent des Moulines »
Extrait du PPR de la commune de Verdun sur Ariège ¹³

Dans le tableau ci-après ne sont mentionnés que les événements ayant été à l'origine de dommages sur constructions et ouvrages, il n'y a donc sans doute pas exhaustivité dans la chronique présentée [...].

Dates	Conséquences	Sources
An 1000	Lave torrentielle : « une avalanche » de boue et de pierres emporte le village et dévaste les champs environnants.	AD 31-6 P 3530/11
8 mai 1613	Crue torrentielle du torrent des Moulines. 25 maisons furent emportées par un torrent de boue et de rochers. Même l'église courut le risque d'être renversée. 71 morts. Affouillement du cimetière et tombes désensevelies. Nombreuses pièces de terre entièrement ruinées, dépôt d'une grande quantité de rochers au niveau du Barry d'en Haut.	AD 09-Zf 142
1783	Inondation de la commune de Verdun par les eaux du torrent des Moulines	Thèse J.M. ANTOINE, 1992
23 juin 1875	Lave torrentielle. Une masse de 100 000 m ³ détachée du flanc de la montagne est arrivée dans le torrent des Moulines et y a créé un embâcle, lequel a cédé sous la pression du torrent en crue. L'ensemble s'est transformé en une lave torrentielle qui emporta tout sur son passage : 30 maisons, 16 granges, 2 moulins détruits et 15 maisons endommagées au Barry d'en Haut. Le cimetière et une scierie emportés. 81 morts dont 14 jamais retrouvés (pour une population de 492 habitants en 1871), 600 animaux tués.	Thèse J.M. ANTOINE, 1992 AD 09-110 S 14
2 octobre 1897	Lave torrentielle. Plusieurs éboulements et glissements de terrain, ainsi que les débris d'une grange ont provoqué un embâcle dans le cours du torrent des Moulines juste à l'amont du Barry d'en Haut. Divagation du torrent sur son cône de déjection. Deux chemins ravinés (sur des profondeurs de 3 mètres et de 1, 50 mètres), 25 maisons envahies, parfois jusqu'au premier étage, une scierie et le presbytère détruits en partie, le cimetière affouillé, deux animaux emportés, 7 hectares de terrains de qualité recouverts de graviers sur des hauteurs de 0, 50 à 4 mètres. Déjections totales de laves évaluées à 40 000 m ³ .	Dossier « les crues de 1897 dans le département », service RTM Thèse J.M. ANTOINE, 1992
23 mai 1910	Crue torrentielle, digue emportée.	AD 09-110 S 14
28 octobre 1937	Crue torrentielle du ruisseau des Moulines. 80 mètres du chemin vicinal ordinaire n°1 (chemin de Sinsat) emportés au hameau de Barry d'en Haut.	Dossier événement AD 09-7 M 15

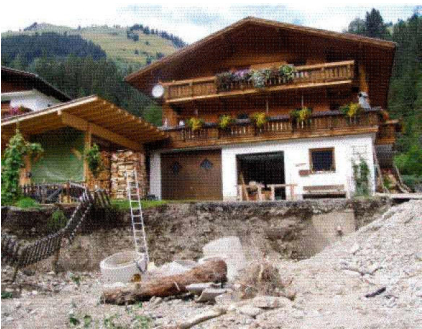
Source : ONF-RTM 09/31

La définition du **niveau d'intensité prévisible** repose sur une analyse multicritères menée « à dire d'expert » en raison des nombreuses indéterminations dont souffre la quantification des paramètres hydrauliques classiquement pris en compte pour les inondations. Dans le but de définir et d'appliquer des prescriptions d'urbanisme ou d'évaluer l'effort d'impact potentiel de l'écoulement, il paraît ainsi plus pertinent de considérer des critères comme la hauteur de l'engravement, la profondeur des affouillements ou la taille des plus gros blocs transportés.

Le caractère brutal ou progressif de l'arrivée des débordements de la crue est aussi à prendre en compte car il apporte une information sur les possibilités de mise en sécurité spontanée des personnes exposées, par leur seule vigilance individuelle. Même si ces phénomènes n'ont rien de comparable sur le plan physique, il est par ailleurs fondamental d'évaluer les risques potentiels d'impact par des troncs flottants ou par des laves torrentielles. Ce point s'avère crucial car ils présentent tous deux un fort potentiel de destruction en cas d'impact. Enfin, comme pour les séismes, il s'avère judicieux d'exprimer le niveau d'intensité en termes d'effets prévisibles du phénomène sur les enjeux, en faisant par exemple la distinction entre les espaces naturels et agricoles, et entre les types de bâtiments, d'infrastructures, de réseaux ou d'ouvrages.

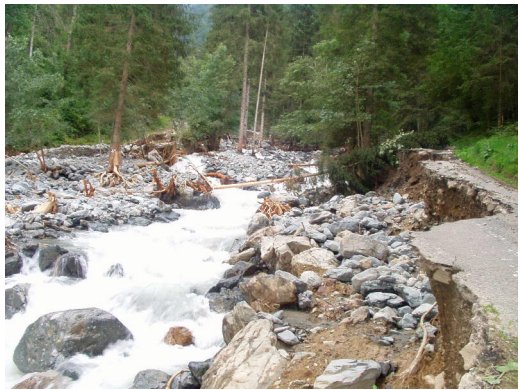
¹³ Voir "1875 - La catastrophe de Verdun" page 21

Document 3.4 : « Illustration de la grille d'intensité du phénomène torrentiel »
Extrait du guide PPR relatif aux crues des torrents de montagne

Critères d'intensité	Niveaux d'intensité retenus	Niveaux d'intensité retenus
	Fort	Moyen
Ordres de grandeur des paramètres hydrauliques	 La hauteur d'écoulement dépasse 1 m.	 La hauteur d'écoulement reste inférieure à 1 m.
	 La hauteur d'engravement dépasse 1 m.	 La hauteur d'engravement reste inférieure à 1 m.
	 La taille des plus gros sédiments transportés excède 50 cm.	 La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 50 cm.
	 Les affouillements verticaux ont une profondeur supérieure à 1 m.	 Les affouillements verticaux ont une profondeur qui ne dépasse pas 1 m.

Critères d'intensité	Niveaux d'intensité retenus	Niveaux d'intensité retenus
	Fort	Moyen
Flottants	 Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont importants. 	 Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont modérés. 
Laves torrentielles	 La parcelle peut être atteinte par des laves torrentielles. 	La parcelle est située en dehors des zones d'atteinte par des laves torrentielles.

Critères d'intensité		Niveaux d'intensité retenus	Niveaux d'intensité retenus
		Fort	Moyen
Effets prévisibles sur les enjeux	Bâtiments		
		<i>Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent détruire les bâtiments exposés.</i>	<i>Les bâtiments ayant des façades renforcées peuvent résister aux contraintes imposées par l'écoulement et les matériaux charriés.</i>
			
		<i>La ruine des constructions peut notamment intervenir par sapement des fondations.</i>	
			<i>Les constructions normalement fondées ne sont pas détruites par l'affouillement</i>
		<i>Les angles des bâtiments sont particulièrement menacés d'affouillement en raison des survitesses induites par la concentration des écoulements.</i>	<i>(A gauche, les fondations sont profondes, le bâtiment a résisté; à droite, les fondations sont trop superficielles, le bâtiment a été détruit).</i>

Critères d'intensité		Niveaux d'intensité retenus	Niveaux d'intensité retenus
		Fort	Moyen
Effets prévisibles sur les enjeux	Espaces naturels et agricoles	 Des phénomènes d'engravement ou d'érosion de grande ampleur sont prévisibles à cause des divagations du lit du torrent. Ils conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.	 Des phénomènes d'engravement ou d'érosion sont prévisibles sur les parcelles exposées mais leur ampleur reste limitée.
	Infrastructures et ouvrages	 Les ponts peuvent être engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements faisant obstacle aux divagations du torrent peuvent être détruites ou ensevelies par des dépôts.	 Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylônes, captages, ...) restent modérés.
		 Les voies de circulation sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.	 Les travaux de déblaiement et de remise en service peuvent être réalisés rapidement.

Risque résiduel

Le risque résiduel représente le risque persistant après la mise en œuvre des mesures de protection. Les raisons pour lesquelles ce risque peut subsister sont de différentes natures.

Il peut s'agir d'un événement météorologique exceptionnel qui dépasse l'intensité de la crue de référence du Plan de Prévention des Risques Naturels (PPR), ou de la crue de projet pour un aménagement.

D'autre part l'incertitude sur les données à notre disposition, même pour des sites très bien documentés, conduit à une certaine imprécision qu'il faut prendre en compte et garder en mémoire dans toutes les décisions.

Ces éléments peuvent conduire à une extension sensible des limites de débordement initialement prises en compte et doivent être intégrés dès lors que l'on envisage d'implanter une quelconque infrastructure (voirie, local technique, chalet, etc.) destinée à recevoir du public. Dès l'origine du projet, il s'avère ainsi primordial de prévoir les plans d'évacuation et de secours, ou les accès protégés.

4 IMPACT CONSTATÉ SUR LES CONSTRUCTIONS

Dans le chapitre précédent nous avons passé en revue les principales manifestations qui accompagnent les crues et les débordements torrentiels. Nous allons maintenant examiner quelles sont les conséquences de ces phénomènes pour les constructions.

4.1 Engrèvement

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

Les hauteurs atteintes sont parfois très spectaculaires, mais les bâtiments ne sont pas détruits : de nombreuses photos en témoignent et on trouve même parfois des éléments vitrés, tels que vérandas ou glaces de voiture, intacts bien que submergés. Bien sûr, un tel charriage est toujours extrêmement dangereux pour les personnes.

Photos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 : Dépôt sédimentaire

Brigue-Glis, Suisse, 1993



Source : Jean-Pierre Jordan OFEG

Brigue-Glis, Suisse, 1993



Source : Jean-Pierre Jordan OFEG

Baltschieder, Valais, 2000



Source : Andreas Götz PLANAT-OFEG

Domène, crue du Doménon, 2005



Source : IRMa, Sébastien Gominet

4.2 Affouillement des fondations

Nous avons vu dans la partie historique que l'affouillement des fondations, dû aux divagations incontrôlées des écoulements en dehors du lit ordinaire, était la cause principale des désordres causés aux bâtiments : Palladio en parlait déjà à la Renaissance, et Surell aussi en 1841 pour les ponts.

Dans les faits, l'affouillement des fondations est le risque majeur pour un bâtiment en cas de crue, mais il est très difficile d'en apprécier la localisation et l'ampleur, et donc de bien le quantifier.

Pour ce risque, il faut toutefois considérer plusieurs mécanismes possibles :

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

Photos 4.5, 4.6 : Affouillements
Torrent de la Ravoire, 1981



Source : ONF-RTM 73

Ischgl, Autriche, 2005



Source : Hugo Raetzo OFEV

4.3 Vulnérabilité des angles

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

Photos 4.7, 4.8, 4.9 : Vulnérabilité des angles des bâtiments en maçonnerie
Voiron, 1897



Source : photo d'époque DR

Valdaine, 2002



Source : ONF-RTM 38

Saint-Martin-d'Uriage, 2005



Source : Yannick Guigal, IRMa

4.4 Dommages sur les murs

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

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

Photos 4.10, 4.11 : Résistance des murs
Modane, crue du Saint Antoine, 1987



Source : Cemagref

Crue du torrent du Bez, 1995



Source : ONF-RTM 05

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

Photos 4.12, 4.13, 4.14, 4.15: Impact de flottants
St Geoire en Valdaine, 2002



Source : IRMa, Sébastien Gominet



Source : IRMa, Sébastien Gominet

Valais suisse, 2000



Source : Robert Marie



Source : Robert Marie

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

Photos 4.16 : Destruction de murs par impact de blocs
Val d'Aoste 2000



Source : Région Autonome Vallée d'Aoste



4.5 Destruction des ouvertures

Photos 4.17, 4.18 : Attaque des ouvertures
Crue du Breda, 2005



Source : IRMa, Sébastien Gominet

Inondation au Tyrol, 2005



Source : Siegfried Sauermoser

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

Photos 4.19, 4.20 : Destruction des ouvertures
Bourg St Maurice, crue de l'Arbonne, 1996



Source : ONF-RTM 73

Brigue-Glis, Suisse, 1993



Source : Roberto Loat OFEG

4.6 Envahissement de la construction

Et bien sûr, la destruction des ouvertures entraîne l'envahissement de la construction.

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

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

Photos 4.21, 4.22, 4.23 : Envahissement d'une construction
Saint-Chaffrey, crue du Peytavin, 1995



Le passage emprunté par la boue



Les dégâts au niveau inférieur



Source : ONF-RTM 05

5 CALCUL DES EFFORTS SUR LES CONSTRUCTIONS

En 2010, date de rédaction du présent guide, les efforts sur les constructions dus aux risques torrentiels ne font pas encore pour l'instant l'objet d'une règle de calcul, d'un Document Technique Unifié ou d'une norme Européenne de type Eurocode¹⁴. Il n'y a donc à l'heure actuelle pas de document de référence qui reflèterait le consensus des milieux du bâtiment et du génie civil sur le problème et sur les valeurs à prendre en compte.

Dans ce qui suit, nous nous efforcerons pourtant de donner des éléments d'appréciation et de quantification utiles pour pouvoir étudier et dimensionner une construction dans une zone soumise à ce risque. Pour cela, nous nous appuierons sur :

- les valeurs que l'on trouve couramment pour les bâtiments dans des règlements français concernant les risques naturels (PER, puis PPR après 1995)
- la manière dont le problème est pris en compte dans l'étude des ponts, dont les piles sont souvent situées dans les cours d'eau
- l'approche issue de la conception et du calcul des barrages de correction torrentielle
- les recommandations des établissements cantonaux d'assurance suisses (VKF-AEAI) dont la publication *Recommandations - Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels* est sans doute l'ouvrage le plus abouti sur la question

Avec ces approches diverses, ce document est plus à prendre comme un guide des pratiques constatées, un panorama de l'état de l'art qui reflète le "dire des experts", que comme un ensemble de prescriptions impératives à prendre absolument à la lettre.

Pour les unités, les valeurs seront données dans le système international en kN (kilo Newton) pour les charges et en kPa (kilo Pascal) pour les pressions (avec $1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN/m}^2$), mais d'une manière systématique elles seront aussi transcrites dans des unités plus parlantes pour le langage courant, en employant le kilo et la tonne¹⁵, sachant qu'un kilo Newton vaut environ 100 kg, et un kilo Pascal 100 kg/m².

¹⁴ toutefois on peut signaler que l'Eurocode 1, partie 1.6, traite à l'article 4.9 des effets hydrodynamiques de l'eau y compris l'accumulation de débris sur les obstacles

¹⁵ Pour être exact, on devrait parler de kilogramme-force ou de tonne-force, mais d'une manière usuelle dans le bâtiment on parle de kilo et de tonne.

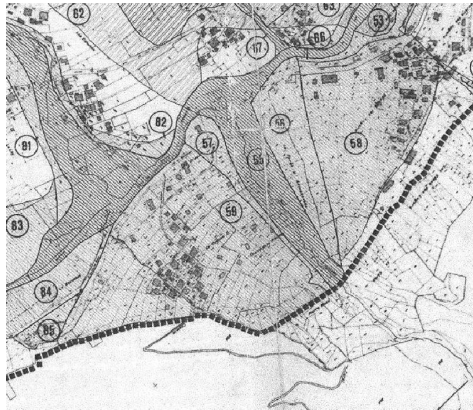
5.1 Extraits de règlements français concernant les bâtiments

Bien qu'il n'existe pas de règlement national type, dans la plupart des règlements français, que ce soit des PER (Plans d'Exposition aux Risques élaborés à partir de 1984) ou des PPR (Plans de Prévention des Risques, en vigueur depuis 1995), le risque "débordement torrentiel" ou "crue torrentielle", suivant les appellations, est quantifié par deux paramètres, une pression supposée uniforme et une hauteur d'application.

Par exemple, dans le PER des Contamines-Montjoie, pour le bassin du Nant d'Armancette dont nous avons déjà présenté quelques crues dans l'approche historique, on trouve cette indication *"concevoir les constructions de façon à résister à une poussée de $X \text{ t/m}^2$ sur la façade exposée, sur une hauteur de $Y \text{ m}$, dans le sens de la plus grande pente et perpendiculairement à la ligne d'écoulement moyenne"* avec les valeurs suivantes :

- 30 kPa (3 t/m²) et 2 m de haut pour les zones à proximité immédiate du torrent (zones 56 et 57 du plan)
- 10 kPa (1 t/m²) et 1 m de haut pour tout le reste du cône de déjection (zones 58 et 59 du plan)

Carte 5.1 : Extrait du PER des Contamines-Montjoie



Ces couples de valeurs (3 t/m² / 2 m ou 1 t/m² / 1 m) sont souvent cités comme valeurs de référence dans les règlements, mais on trouve parfois plus de diversité avec un raffinement parfois presque poussé à l'extrême.

Par exemple dans certains règlements, on trouve parfois tous les couples suivants :

- 30 kPa (3 t/m²) et 2 m
- 20 kPa (2 t/m²) et 1.50 m
- 15 kPa (1.5 t/m²) et 2 m
- 15 kPa (1.5 t/m²) et 1.50 m
- 15 kPa (1.5 t/m²) et 1 m
- 10 kPa (1 t/m²) et 1 m
- 5 kPa (500 kg/m²) et 1 m

Mais on doit toutefois signaler qu'un tel niveau de détail, sans doute un peu illusoire, n'est pas la règle commune et bien souvent dans les règlements on trouve des préconisations plus concises du type : *"les constructeurs prendront toutes les mesures nécessaires pour que les constructions et ouvrages résistent aux forces dynamiques et statiques engendrées par la crue de référence"*

On peut aussi indiquer que cette valeur de 30 kPa (3 t/m²) est une valeur très usitée dans le domaine des avalanches. Mais en matière d'avalanche, c'est une valeur arbitraire qui à l'origine provient de Suisse dans les années trente : à l'époque on estimait que c'était la limite constructive pour un bâtiment courant, une valeur qu'il ne fallait donc pas dépasser pour les zones constructibles. Depuis, cette valeur arbitraire s'est un peu imposé comme valeur de référence pour d'autres risques en montagne. A titre de comparaison, la valeur de référence retenue au Japon est de 50 kPa (5 t/m²) pour une hauteur de 1 m.

Il faut aussi savoir qu'à l'heure actuelle l'évolution envisagée pour les PPR est de laisser au constructeur la responsabilité de déterminer les valeurs physiques des différentes actions à prendre en compte à partir des caractéristiques principales de l'aléa données par le PPR.

Donc en résumé, dans les règlements français, pour des zones dites "constructibles" et pour le risque torrentiel, on trouve un ordre de grandeur de pression qui se situe entre 10 et 30 kPa (1 à 3 t/m²) et une hauteur d'application entre 1 et 2 m, ces valeurs méritant toutefois quelques réflexions.

5.2 Problématique des ponts

L'ouvrage de référence sur le sujet est l'ouvrage du SETRA, le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, intitulé "Guide technique - Cours d'eau et ponts" de juillet 2007.

Dans cet ouvrage qui cible plutôt le cas des rivières et des rivières torrentielles, on parle bien de transport solide ou de crue torrentielle, mais on se préoccupe surtout du risque d'affouillement des piles lié au transport solide par charriage, un risque qui est en fait "le risque majeur" pour l'effondrement des ponts. Bien entendu, cet ouvrage ne s'applique en aucun cas pour les laves torrentielles.

Profondeur des fonds affouillables

Pour la profondeur des fonds affouillables, le guide propose une formule de profondeur maximale des fonds susceptibles d'être affouillés en section rectiligne, sans cause de perturbations supplémentaires :

$$f_p = 0.73 * q^{2/3} / d^{1/6} \text{ avec}$$

f_p profondeur des fonds perturbés par rapport à la ligne d'eau correspondant au débit Q (m)

$q = Q/L$ débit liquide par unité de largeur L du lit mineur du cours d'eau ($m^3/s/m$)

d diamètre moyen des sédiments (m)

Toutefois les résultats de cette formule empirique doivent être considérés comme un premier ordre de grandeur, et il est précisé que *"le recours à une expertise beaucoup plus approfondie et à des moyens de simulations numériques éventuellement lourds (jusqu'au modèle physique) devront être envisagés dans les phases d'études de projet"*.

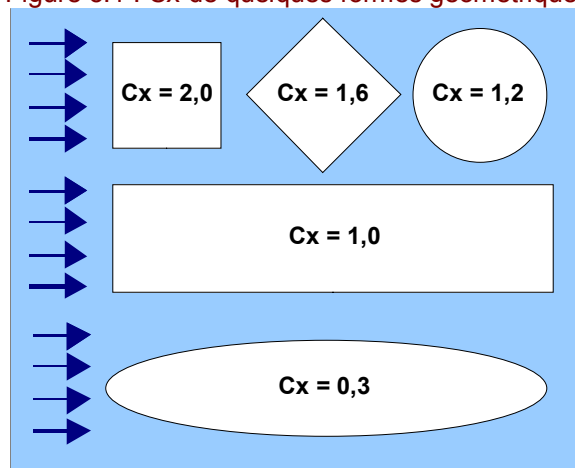
Une telle approche dédiée aux piles de pont est bien sûr difficilement transposable pour des bâtiments de dimensions plus conséquentes avec des écoulements torrentiels, mais on trouve dans ce guide des éléments pertinents pour la protection des ouvrages contre l'érosion dont nous ferons mention dans le chapitre consacré aux réponses constructives.

Dimensionnement des piles

Pour le dimensionnement des piles, ce guide ne donne que des éléments qui correspondent à l'hydraulique "fluviale", c'est à dire une hydraulique avec un écoulement essentiellement liquide. Malgré cette limitation, il est toutefois intéressant d'en donner les fondements.

Pour dimensionner une pile de pont, on s'appuie sur une formulation classique en mécanique des fluides : $F = 1/2 \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_x$ avec F force de traînée, ρ masse volumique, V vitesse de l'écoulement, A maître couple de l'obstacle et C_x coefficient de traînée, le coefficient de traînée C_x pouvant varier notablement (de 0.3 à 2 environ) suivant la forme de la pile.

Figure 5.1 : C_x de quelques formes géométriques



Source : SETRA Guide technique Cours d'eau et ponts

Avec cette formule, on peut calculer la vitesse en fixant la pression (ou la pression en donnant la vitesse). Dans les tableaux suivants, on trouvera quelques valeurs pour un bâtiment avec les hypothèses suivantes :

- un C_x variant de 1 à 2
- une masse volumique de 1.1 t/m^3 et 1.4 t/m^3 (crues avec transport solide par charriage plus ou moins concentré en matériaux)

Tableau 5-1 Crue avec peu de matériaux solides, pression et vitesse pour un bâtiment

Cx	1			2		
Masse volumique : $\rho \text{ (t/m}^3\text{)}$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Pression	10.0 kPa	20.0 kPa	30.0 kPa	10.0 kPa	20.0 kPa	30.0 kPa
Vitesse	4.3 m/s	6.0 m/s	7.4 m/s	3.0 m/s	4.3 m/s	5.2 m/s
Vitesse	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s
Pression	0.6 kPa 60 kg/m ²	5.0 kPa 500 kg/m ²	13.8 kPa 1.4 t/m ²	1.1 kPa 110 kg/m ²	9.9 kPa 990 kg/m ²	27.5 kPa 2.8 t/m ²

Tableau 5-2 Crue avec beaucoup de matériaux solides, pression et vitesse pour un bâtiment

Cx	1			2		
Masse volumique : $\rho \text{ (t/m}^3\text{)}$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Pression	10.0 kPa	20.0 kPa	30.0 kPa	10.0 kPa	20.0 kPa	30.0 kPa
Vitesse	3.8 m/s	5.3 m/s	6.5 m/s	2.7 m/s	3.8 m/s	4.6 m/s
Vitesse	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s
Pression	0.7 kPa 70 kg/m ²	6.3 kPa 630 kg/m ²	17.5 kPa 1.8 t/m ²	1.4 kPa 140 kg/m ²	12.6 kPa 1.3 t/m ²	35.0 kPa 3.5 t/m ²

De ces tableaux, on peut tirer que l'ordre de grandeur des pressions données dans les règlements pour les bâtiments, soit de 10 à 30 kPa (1 à 3 t/m²) semble compatible avec des vitesses vraisemblables (entre 1 et 5 m/s).

De plus à ces pressions qui sont des pressions "hydrodynamiques", il faudrait rajouter une pression "hydrostatique" qui varie en fonction de la hauteur d'eau (pour une pile de pont pleine, cette pression hydrostatique a peu d'importance en général, toute la pile étant immergée, mais pour une paroi de bâtiment dont une seule face est immergée, cette pression n'est pas négligeable).

Par ailleurs, cette approche, dite "en phase liquide", ne tient pas compte des forces d'impact induites par les transports solides accompagnant les crues torrentielles. Elle ne peut donc absolument pas s'appliquer dans les cas de laves torrentielles.

Avec tous ces éléments, il semble que la question de la valeur des pressions et surtout des hauteurs d'application à prendre en compte pour dimensionner un ouvrage de bâtiment mérite quelques approfondissements.

5.3 Barrages de correction torrentielle

Les barrages de correction torrentielle sont calculés et dimensionnés essentiellement pour résister aux gros transports solides engendrés par une crue torrentielle.

Le document qui fait pour l'instant référence en la matière est un ouvrage du Cemagref de 1995 "Conception et calcul de barrages de correction torrentielle" (Études n°18 - Équipements pour l'eau et l'environnement).

Document 5.1 : extrait de *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle*, Cemagref

Poussées dynamiques des écoulements de laves torrentielles contre un parement de barrage

La détermination exacte d'équivalents statiques de ces poussées de nature dynamique (chocs) est très difficile. Pour être possible, elle devrait être entreprise selon une approche de conservation de l'énergie nécessitant la connaissance de l'énergie cinétique des laves et l'étude des capacités d'absorption d'énergie par déformation des structures. Une telle approche n'est actuellement pas envisageable dans un contexte pratique courant.

En conséquence, il est retenu un modèle d'évaluation sommaire de l'ordre de grandeur de l'intensité de ces actions, copié sur l'approche retenue par les praticiens Suisses. Celle-ci est fondée sur quelques calculs de dimensionnement en retour de barrages détruits par des chocs de laves torrentielles.

Ceux-ci ont montré que l'ordre de grandeur des poussées statiques horizontales équivalentes exercées sur une surface de parement de barrage, atteinte de plein fouet par une lave torrentielle, pouvait être approximée par n fois la poussée hydrostatique évaluée en considérant, à la place de la lave, une lame d'eau statique de même épaisseur. Le coefficient n mis en évidence par ces calculs peut atteindre une valeur de 7 à 10 dans certains contextes.

En France, et bien que le modèle d'évaluation suisse soulève de nombreuses interrogations (notamment quant à la forme du diagramme de poussées par unité de surface qui en résulte), on a en pratique utilisé depuis de nombreuses années une approche forfaitaire similaire

Il apparaît généralement raisonnable de prendre en compte :

- une valeur de n estimée entre 5 et 7 pour des sites étroits, sans facteurs (naturels ou artificiels) favorisant un ralentissement des écoulements de laves préalablement à leur choc sur un barrage
- une valeur de n estimée entre 3 et 5 dans la plupart des cas courants de barrages de consolidation
- une réduction sensible de l'énergie cinétique des laves torrentielles atteignant les parements dans la plupart des cas courants de barrages de sortie d'ouvrage de sédimentation, d'où l'estimation d'une valeur de $n \leq 3$ compte tenu des conditions de topographie et de fonctionnement des ouvrages

En conséquence, dans le cas de barrage à parement amont vertical soumis à un choc de lave, si h_{lav} désigne la hauteur totale de lave et h_{par} la hauteur totale de parement soumis à ce choc :

- si $h_{lav} = h_{par}$ (cf. figure 6.13)

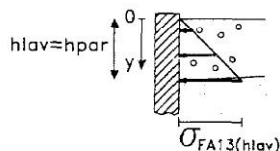


figure 6.13 : diagramme des poussées par unité de surface

le diagramme des poussées par unité de surface de parement, dues aux chocs de lave, est triangulaire et défini par $\sigma_{FA13}(y) = n \cdot \gamma_w \cdot y$

la résultante, sur une tranche verticale de largeur unité, des poussées correspondantes est une force horizontale d'intensité

$FA13 = n \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_{par}^2$, appliquée sur le parement au dessus de l'atterrissement à une distance $h_{par}/3$ de la surface supérieure de l'atterrissement.

On peut transposer aux bâtiments cette approche qui consiste à appliquer un facteur d'amplification N à la poussée hydrostatique. Dans le tableau 5.3, on trouvera quelques simulations pour des hauteurs de 1 m et de 2 m, et un facteur N égal à 3, 5 et 7.

Suivant la règle des barrages, cela se traduit, pour un élément de largeur unité, par une force résultante appliquée au tiers inférieur, avec un diagramme de charge triangulaire. Pour permettre des comparaisons, on peut transformer cette force en une pression uniformément répartie équivalente (cette équivalence n'est pas rigoureusement exacte par rapport au diagramme de charge triangulaire initial, mais cette approximation a surtout une influence sur les moments de renversement, et on peut estimer que les ordres de grandeur restent valables).

Tableau 5-3 Pression équivalente pour un barrage de correction torrentielle

Facteur : N	3		5		7	
Hauteur : h	1.00 m	2.00 m	1.00 m	2.00 m	1.00 m	2.00 m
Masse volumique : ρ (t/m ³)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Force (pour 1 m de large) : $F = 1/2 \cdot N \cdot \rho \cdot h^2$	15 kN	60 kN	25 kN	100 kN	35 kN	140 kN
Équivalent pression répartie : $P = F/h$	15 kPa 1.5 t/m ²	30 kPa 3.0 t/m ²	25 kPa 2.5 t/m ²	50 kPa 5.0 t/m ²	35 kPa 3.5 t/m ²	70 kPa 7.0 t/m ²

Avec ce calcul, on retrouve pour une hauteur de 2 m et un facteur N de 3, une pression de 30 kPa (3 t/m²), qui est un ordre de grandeur déjà rencontré et qu'on peut considérer comme plausible.

Il est évident que la pression augmente linéairement avec le facteur N , mais il faut rappeler qu'un facteur de 5 ou de 7, correspond à des laves qui n'ont subi aucun ralentissement avant le choc et qui impactent directement l'ouvrage : dans le cas d'un bâtiment c'est une situation assez peu probable, sauf à être implanté directement dans le lit d'un torrent ou dans une situation susceptible d'être très exposée qui mériterait une étude spécifique.

5.4 Recommandations des établissements d'assurance suisses

L'approche la plus complète sur les risques torrentiels provient des établissements cantonaux d'assurance suisses VKF-AEAI.

Ce sigle signifie Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen - Association des Etablissements cantonaux d'Assurance Incendie, une association qui regroupe les établissements d'assurances des 19 cantons suisses. En effet, en Suisse, l'assurance des risques naturels est gérée à l'échelle cantonale.

Du point de vue des dangers naturels, en Suisse on distingue :

- les dangers gravitationnels (avalanches, crues, glissements de terrain, laves torrentielles, chutes de pierres et de blocs, éboulements, écroulements, chutes de glace)
- les dangers climatiques (sécheresse, vagues de froid ou de chaleur, tempêtes, grêle, pluies intenses, neige)
- les dangers tectoniques (tremblements de terre)

Le document de référence concernant les dangers gravitationnels est la publication suivante :

*"EGLI Thomas, Recommandations pour la protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels, éditées par l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, Berne 2005"*¹⁶

Ces recommandations, rédigées par Dr Thomas Egli et publiées en 2005, s'adressent aux ingénieurs, aux architectes et aux autorités en charge de la construction. Elles supposent bien sûr quelques connaissances dans le domaine de la construction et du calcul des structures (mais on peut supposer que construire des bâtiments nécessite en général d'avoir quelques connaissances... et construire des bâtiments dans des zones de dangers sans doute encore plus).

Pour les risques torrentiels, le document sépare nettement les crues et les laves torrentielles en prenant en compte trois classes d'intensité (suivant les *Cartes de Danger* suisses et en référence à la norme *SIA 260*).

Tableau 5-4 Classes d'intensité (suivant VKF-AEAI)

Phénomène	intensité faible	intensité moyenne	intensité forte
Inondation, y compris épandage d'alluvions	$h_f < 0.5 \text{ m}$ ou $v_f * h_f < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.5 \text{ m} < h_f < 2 \text{ m}$ ou $0.5 \text{ m}^2/\text{s} < v_f * h_f < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h_f > 2 \text{ m}$ ou $v_f * h_f > 2 \text{ m}^2/\text{s}$
Érosion des berges	$h_u < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < h_u < 2 \text{ m}$	$h_u > 2 \text{ m}$
Lave torrentielle et coulée de boue	n'existe pas	$h_f < 1 \text{ m}$ ou $v_f < 1 \text{ m/s}$	$h_f > 1 \text{ m}$ et $v_f > 1 \text{ m/s}$

h_f : hauteur d'eau

v_f : vitesse

h_u : profondeur d'érosion

De même, il considère 4 classes de fréquence. Ce classement a une très grande incidence de calcul puisque suivant les cas, l'action est considérée comme "normale" ou comme "accidentelle", de même les coefficients de sécurité partiels γ_F varient notablement suivant la période de retour de l'événement

Tableau 5-5 Classes de fréquence et pondérations (suivant VKF-AEAI)

Probabilité	Période de retour	Nature de l'action	Pondération
Élevée	1 à 30 ans	Fd : action normale	$\gamma_F = 1.5$
Moyenne	30 à 100 ans	Ad : action accidentelle	$\gamma_F = 1.3$ pour les laves torrentielles $\gamma_F = 1.2$ pour les crues
Faible Très faible	100 à 300 ans plus de 300 ans	Ad : action accidentelle	$\gamma_F = 1.2$ pour les laves torrentielles $\gamma_F = 1.1$ pour les crues

¹⁶ Ce document peut se commander sur www.vkf.ch

Crues : définition des situations de danger suivant VKF-AEI

Pour la vitesse des écoulements, le document considère que :

- lorsqu'un terrain de forte déclivité (5-10%) est inondé, la vitesse d'écoulement atteint 3 à 5 m/s
- de telles vitesses apparaissent également sur les tronçons canalisés (rue)
- en terrain peu incliné (< 2%) la vitesse tombe généralement sous les 2 m/s

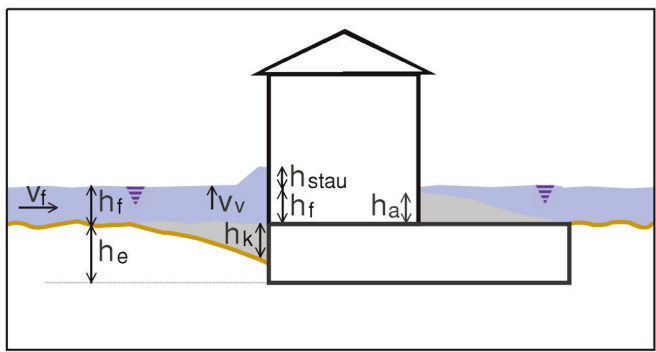
Pour les situations de danger "crues", il faut disposer de :

- la hauteur d'inondation (h_f)
- la vitesse d'écoulement (v_f)
- l'épaisseur du terrain érodée (h_k)
- l'épaisseur du dépôt de matériaux solides (h_a)

En Suisse, ces données sont normalement tirées des cartes d'intensités. Et si elles font défaut, elles doivent être déterminées par un spécialiste des dangers naturels. Avec ces éléments, cinq situations de danger sont considérées dans le document :

1. inondation statique
2. inondation dynamique
3. inondation dynamique avec érosion et alluvionnement
4. déplacement du lit du cours d'eau
5. glissement de la berge

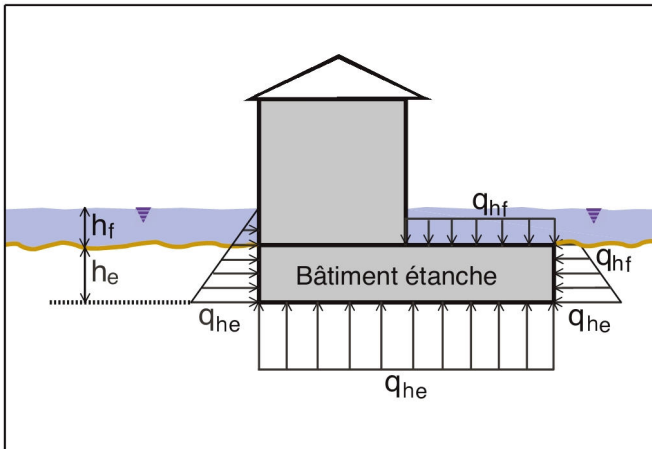
Figure 5.2 : Crues : notations (suivant VKF-AEI)



v_f	<i>vitesse de l'écoulement</i>	<i>[m/s]</i>
v_v	<i>vitesse de montée des eaux</i>	<i>[m/h]</i>
h_f	<i>hauteur d'inondation</i>	<i>[m]</i>
h_e	<i>profondeur de la fondation</i>	<i>[m]</i>
h_k	<i>profondeur d'affouillement</i>	<i>[m]</i>
h_{stau}	<i>hauteur de retenue</i>	<i>[m]</i>
h_a	<i>épaisseur du dépôt</i>	<i>[m]</i>

Crues : 1 - inondation statique suivant VKF-AEAI

Figure 5.3 Crues : pression résultant de la contrainte hydrostatique (suivant VKF-AEAI)



L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement faible :

$$V_f < 1 \text{ m/s}$$

Il n'en résulte aucune contrainte dynamique à prendre en considération. L'action déterminante résulte de la pression hydrostatique q_h exercée sur l'enveloppe étanche du bâtiment. Celle-ci croît avec la profondeur.

On admet que le sol se sature totalement durant l'inondation. La pression hydrostatique exercée sur le radier de l'ouvrage correspond à la poussée d'Archimède.

Exemples d'application

Pression à la surface du terrain pour une hauteur d'inondation h_f :

$$q_{hf} = \rho_{hw} * g * h_f \text{ [kPa]}$$

Pression au niveau de la fondation pour une hauteur d'inondation h_f :

$$q_{he} = \rho_{hw} * g * (h_f + h_e) \text{ [kPa]}$$

Avec :

ρ_{hw} densité [t/m^3]
 $= 1.1 \text{ t/m}^3$ si peu de matériaux solides
 $= 1.4 \text{ t/m}^3$ si beaucoup de matériaux solides

g accélération de la pesanteur [m/s^2]
 $= 10 \text{ m/s}^2$

h_f hauteur d'inondation [m]

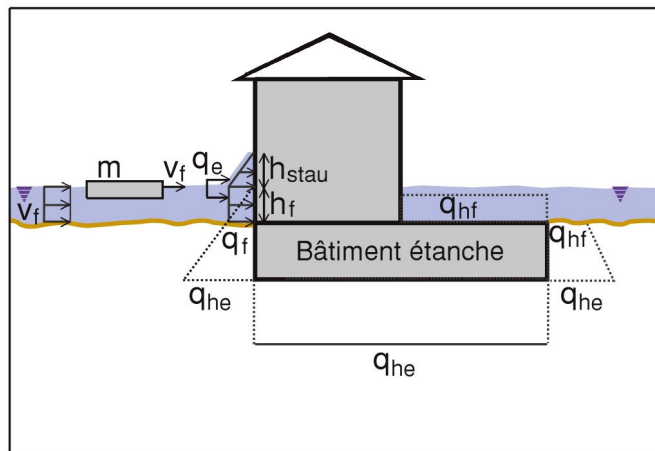
h_e profondeur de la fondation [m]

h_f hauteur d'inondation	0.50 m	2.00 m
h_e profondeur fondation (hypothèse 1 niveau de sous sol)	3.00 m	3.00 m
ρ_{hw} densité (peu de matériaux solides)	1.1 t/m ³	1.1 t/m ³
q_{hf} pression à la surface du terrain	5.5 kPa (550 kg/m ²)	22.0 kPa (2.2 t/m ²)
q_{he} pression au niveau de la fondation	39 kPa (3.9 t/m ²)	55 kPa (5.5 t/m ²)

h_f hauteur d'inondation	0.50 m	2.00 m
h_e profondeur fondation (hypothèse 1 niveau de sous sol)	3.00 m	3.00 m
ρ_{hw} densité (beaucoup de matériaux solides)	1.4 t/m ³	1.4 t/m ³
q_{hf} pression à la surface du terrain	7.0 kPa (700 kg/m ²)	28.0 kPa (2.8 t/m ²)
q_{he} pression au niveau de la fondation	49.0 kPa (4.9 t/m ²)	70.0 kPa (7.0 t/m ²)

Crues : 2 - inondation dynamique suivant VKF-AEAI

Figure 5.4 : Crues : pression résultant de la contrainte hydrodynamique (suivant VKF-AEAI)



L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement moyenne à élevée :

$$V_f > 1 \text{ m/s}$$

Pour déterminer l'action subie par l'ouvrage, on tient compte, outre la force hydrostatique, de la force dynamique exercée par l'écoulement.

Il est admis que la vitesse de l'écoulement est uniforme sur toute la hauteur d'inondation h_f . Il en résulte une pression uniforme q_f due à la contrainte hydrodynamique exercée sur la paroi de l'ouvrage exposée au courant.

Cette paroi peut également être percutée par des matériaux solides charriés par la crue (troncs d'arbre, matériaux grossiers). La pression statique de remplacement q_e ainsi engendrée est aussi considérée comme une action.

On ne tient pas compte des actions résultant de surpressions ou de sous-pressions locales (suction) dues à des formes de bâtiment particulières. La pression de soulèvement hydrodynamique est également négligée.

Exemples d'application

Pression sur la paroi exposée au courant :

$$q_f = 0.5 * C_d * \rho_{hw} * v_f^2 \text{ [kPa]}$$

Avec :

C_d coefficient de résistance de forme
 = 1.25 à 1.5 si longueur de la paroi exposée / hauteur d'inondation < 40
 = 1.5 à 2 si longueur de la paroi exposée / hauteur d'inondation > 40

ρ_{hw} densité [t/m³]
 = 1.1 t/m³ si peu de matériaux solides
 = 1.4 t/m³ si beaucoup de matériaux solides

v_f vitesse d'écoulement [m/s]

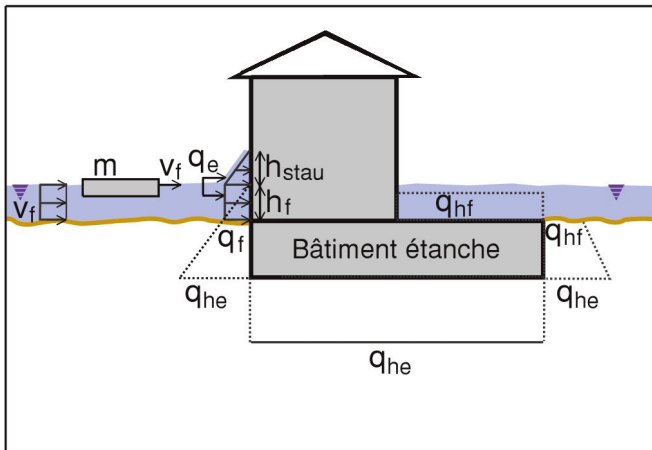
C_d	1.25	2	1.25	2
ρ_{hw} densité	1.1 t/m ³	1.4 t/m ³	1.1 t/m ³	1.4 t/m ³
v_f vitesse	1.0 m/s	1.0 m/s	2.0 m/s	2.0 m/s
q_f pression	0.7 kPa (70 kg/m ²)	1.4 kPa (140 kg/m ²)	2.8 kPa (280 kg/m ²)	5.6 kPa (560 kg/m ²)

Nota : lorsqu'on parle de vitesse et de pression, il faut bien garder à l'esprit la définition que l'on donne en Suisse d'une intensité "moyenne". En effet, comme nous l'avons déjà vu, l'intensité d'une inondation s'exprime par le produit d'une vitesse par une hauteur.

Exprimée avec les notations du document, l'intensité moyenne correspond à : $0.5 \text{ m}^2/\text{s} < v_f * h_f < 2 \text{ m}^2/\text{s}$

Si on retient la borne haute, soit 2 m²/s, une vitesse de 1 m/s donne une hauteur de 2 m, 2 m/s une hauteur de 1 m et 4 m/s une hauteur de 0.50 m.

Figure 5.5 : Crues : hauteur de retenue due à un obstacle (suivant VKF-AEAI)



La hauteur de retenue correspond à la surélévation de l'écoulement contre l'ouvrage entouré d'eau. Elle vaut au maximum :

$$h_{stau} = (v_f^2) / (2 * g) \quad [m]$$

Avec :

V_f vitesse d'écoulement [m/s]

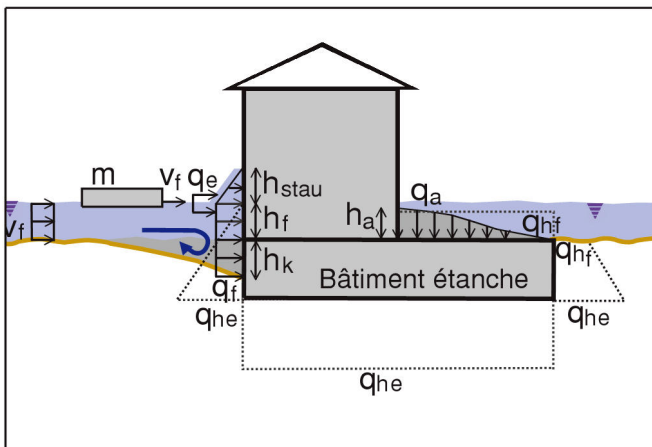
g accélération de la pesanteur $[m/s^2]$
 $= 10 \text{ m/s}^2$

Exemples d'application

v_f	1.0 m/s	2.0 m/s	3.0 m/s
h_{stau}	0.05 m	0.20 m	0.45 m

Crues : 3 - inondation dynamique avec érosion et alluvionnement suivant VKF-AEAI

Figure 5.6 : Crues : inondation dynamique avec érosion et alluvionnement (suivant VKF-AEAI)



L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement élevée :

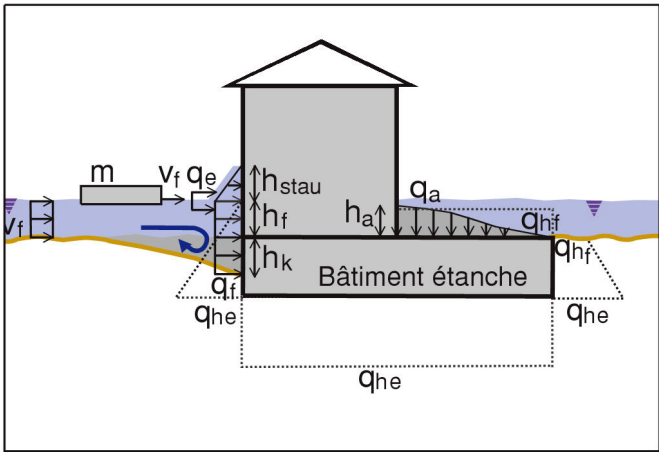
$V_f > \text{env. } 2 \text{ m/s}$

La dynamique de cet écoulement provoque l'érosion h_k (affouillement) et le dépôt h_a de matériaux solides.

Ce phénomène se produit principalement lorsque des ouvrages sont construits le long de chenaux largement canalisés et de déclivité marquée (rue dans les localités).

Les actions hydrostatiques et hydrodynamiques exercées par l'écoulement sont prises en compte (comme dans la situation de danger 2, inondation dynamique).

Figure 5.7 : Crues : surcharge due au dépôt de matériaux solides (suivant VKF-AEAI)



Les dépôts de matériaux solides génèrent des forces verticales et horizontales dues à la poussée des terres. Celles ci doivent être prises en compte, si cela n'a pas déjà été fait, en augmentant la valeur de la densité de la crue dans le calcul des forces hydros-tatiques. La pression des terres dans l'axe vertical (surcharge) vaut :

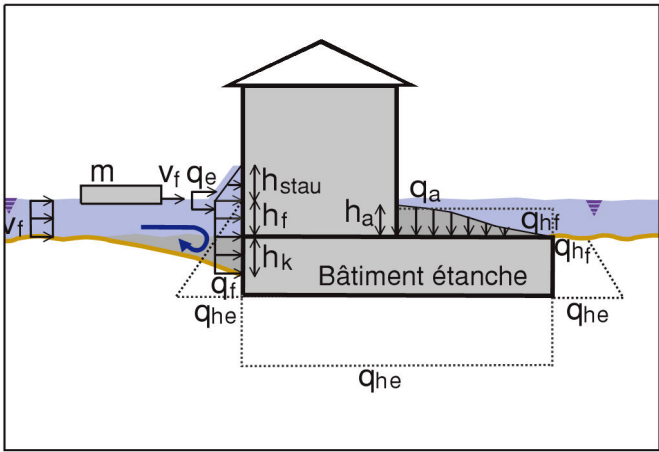
$$q_a = \rho_a * g * h_a \quad [kPa]$$

ρ_a densité du dépôt $[t/m^3]$
 = 2 t/m³ (valeur indicative)
 g accélération de la pesanteur $[m/s^2]$
 = 10 m/s²
 h_a hauteur du dépôt $[m]$

Exemples d'application

h_a	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m
q_a	10.0 kPa (1.0 t/m ²)	20.0 kPa (2.0 t/m ²)	30.0 kPa (3.0 t/m ²)	40.0 kPa (4.0 t/m ²)

Figure 5.8 : Crues : force de choc due à des charges concentrées (suivant VKF-AEAI)



Si la crue peut entraîner des blocs ou d'au-tres matériaux solides, il faut ajouter à la pression résultant des contraintes hydrosta-tiques q_h et hydrodynamiques q_f la force de choc due à ces charges concentrées.

Le calcul de cette force de choc est com-plexe car il dépend de l'énergie cinétique du bloc ($E = \frac{1}{2} mv^2$) et de la capacité de défor-mation de la structure.

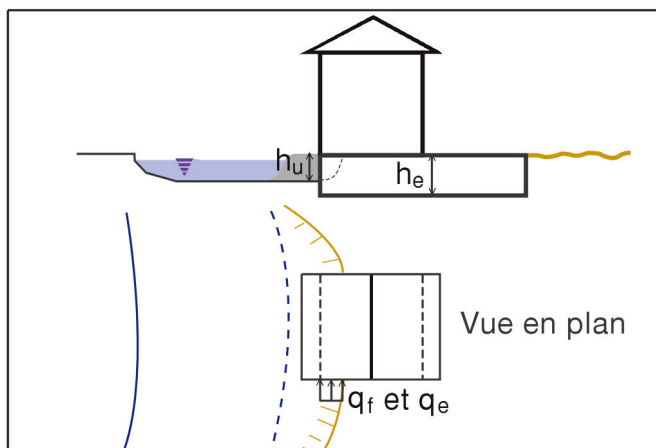
A titre d'ordre de grandeur, pour une paroi en béton de 0.30 m d'épaisseur et 2.50 m de portée, le tableau suivant donne la force statique de remplacement Q_e et la surface d'impact A à prendre en compte.

Exemples de valeurs

v_f	vitesse de l'écoulement	2 m/s		4 m/s	
m	masse du bloc	100 kg	500 kg	100 kg	500 kg
E_{trans}	énergie cinétique de translation	0.2 kJ	1.0 kJ	0.8 kJ	4.0 kJ
Q_e	force statique de remplacement	2 kN (0.2 t)	10 kN (1 t)	8 kN (0.8 t)	40 kN (4 t)
A	surface d'impact	30 x 30 cm	50 x 50 cm	30 x 30 cm	50 x 50 cm
q_e	pression d'impact localisée = Q_e / A	22.2 kPa (2.2 t/m ²)	40.0 kPa (4.0 t/m ²)	88.9 kPa (8.9 t/m ²)	160.0 kPa (16.0 t/m ²)

Crues : 4 - déplacement du lit du cours d'eau suivant VKF-AEAI

Figure 5.9 : Crues : déplacement du lit du cours d'eau (suivant VKF-AEAI)



L'érosion de la berge revêt la forme d'un déplacement du lit du cours d'eau. La berge est érodée jusqu'à une profondeur h_u . La fondation de l'ouvrage n'est pas menacée, car sa profondeur h_e est supérieure à h_u .

Du fait de l'érosion latérale, une partie du bâtiment est touchée directement par l'écoulement dans le chenal.

Les actions qu'il subit sont donc la pression occasionnée par l'écoulement q_f et la pression exercée sur la façade frontale par les chocs dus aux matériaux solides charriés q_e .

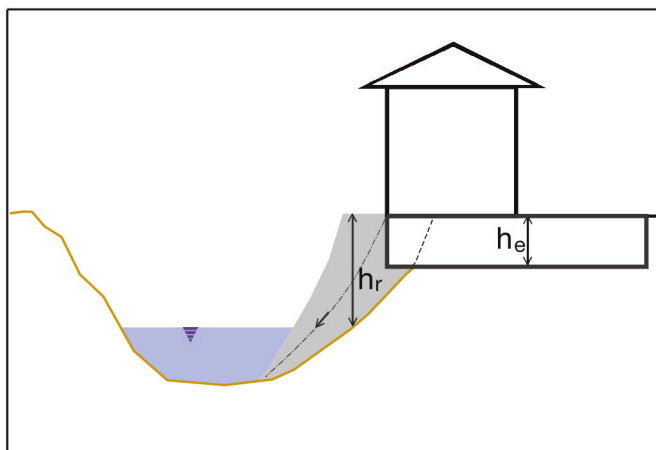
Profondeur d'affouillement (valeurs types)

La profondeur de l'affouillement susceptible d'affecter un bâtiment menacé d'inondation peut être déterminée de manière détaillée selon Kohli (1998). A cet effet, il faut connaître, outre la vitesse d'écoulement et la hauteur d'inondation, la granulométrie du sol menacé et la durée de l'inondation. Les bâtiments ne comprenant pas de cave nécessitent un calcul détaillé. Le tableau expose les résultats pour deux cas standard. Pour les bâtiments comprenant une cave, le danger d'affouillement concerne principalement ceux qui sont construits le long d'un cours d'eau.

Paramètre	Exemple 1	Exemple 2
v_f vitesse d'écoulement	2 m/s	0.90 m/s
h_f hauteur d'inondation	0.5 m	1 m
T durée de l'inondation	9 h	24 h
d_{50} diamètre granulométrique	0.02 m	0.008 m
d_{90} diamètre granulométrique	0.08 m	0.03 m
h_u profondeur d'affouillement	1.10 m	0.60 m

Crues : 5 - glissement de la berge suivant VKF-AEAI

Figure 5.10 : Crues : glissement de la berge (suivant VKF-AEAI)



L'érosion de la berge revêt la forme d'un glissement de terrain. Fréquemment déclenchés par l'érosion verticale du lit du cours d'eau, ces glissements peuvent avoir une grande extension. Ils sont profonds ou superficiels selon la topographie et la géologie locales.

L'action sur l'ouvrage correspond à celle qui est exercée lorsque le plan de glissement est semi-profond à profond (h_r). Les contraintes correspondantes sont traitées comme pour un glissement de terrain.

Si la crue atteint l'ouvrage, il y a lieu de considérer également les actions correspondant à la situation de danger 4 (déplacement du lit du cours d'eau).

Laves torrentielles : définition des situations de danger suivant VKF-AEI

Les laves torrentielles sont considérées comme des phénomènes très dangereux, car la vitesse des coulées dévalant des chenaux, qui peut atteindre 15 à 20 m/s, est supérieure à celle des inondations¹⁷.

Cette vitesse tombe à une valeur comprise entre 2 et 7 m/s aux endroits où la déclivité diminue et où les coulées peuvent s'étaler.

La hauteur d'écoulement d'une lave torrentielle est de l'ordre de 0.5 à 3 m. Lorsqu'elle s'étale, sa hauteur décroît en conséquence.

Pour mémoire, on peut rappeler qu'en Suisse les laves torrentielles sont qualifiées :

- d'intensité moyenne si leur hauteur est inférieure à 1 m ou leur vitesse est inférieure à 1 m/s
- d'intensité forte si leur hauteur est supérieure à 1 m et leur vitesse est supérieure à 1 m/s

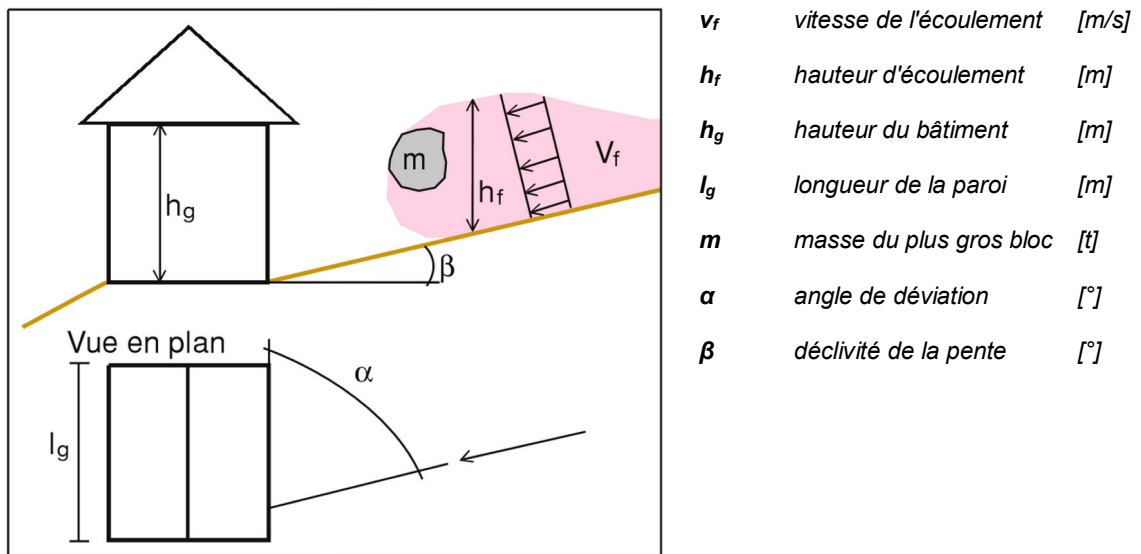
Pour les situations de danger "laves torrentielles", il faut disposer de :

- la hauteur
- la vitesse d'écoulement

En Suisse, ces données sont normalement tirées des cartes d'intensités. Et si elles font défaut, elles doivent être déterminées par un spécialiste des dangers naturels. Avec ces éléments, deux situations de danger sont considérées dans le document :

1. choc frontal
2. bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation

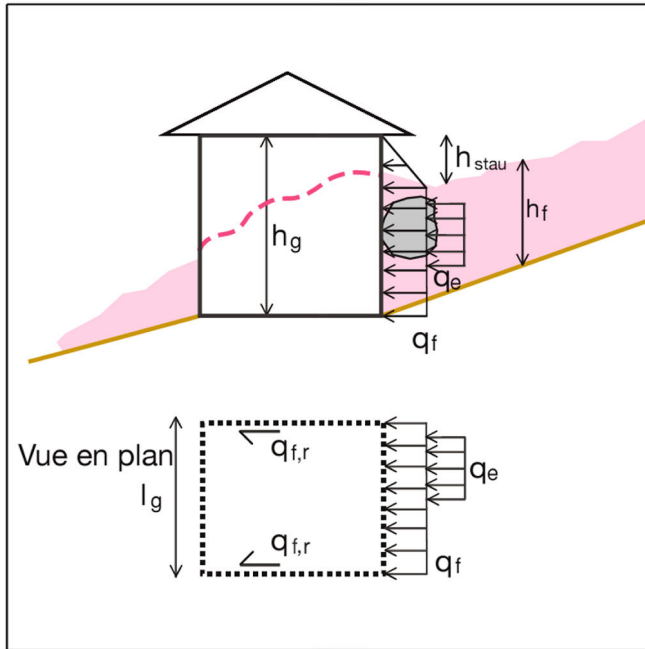
Figure 5.11 : Laves torrentielles : notations (suivant VKF-AEI)



¹⁷ En France, de telles valeurs sont considérées comme très extrêmes surtout en zone constructible.

Laves torrentielles : 1 - choc frontal suivant VKF-AEAI

Figure 5.12 : Laves torrentielles : pression résultant de la contrainte dynamique (suivant VKF-AEAI)



Une lave torrentielle percute un bâtiment. Le mélange d'eau et de matériaux solides percute la façade frontale du bâtiment.

L'action déterminante est la pression exercée sur la paroi extérieure. Elle est notamment influencée par la forme du bâtiment ainsi que par la densité et la vitesse de la lave torrentielle. On admet que cette vitesse est constante sur toute la hauteur d'écoulement.

Pour les parois latérales et toutes les parois atteintes obliquement, on appliquera une pression réduite en fonction de l'angle incidence. Ces parois subissent également des actions dues aux frottements.

Le choc occasionné par les composantes individuelles de grande taille (blocs, troncs d'arbres) est pris en compte en appliquant une pression statique de remplacement.

Exemples d'application

Pression exercée par une lave torrentielle :

$$q_f = a \cdot \rho_f \cdot v_f^2 \quad [\text{kPa}]$$

Avec :

a coefficient de pression empirique
 ρ_f densité $[\text{t/m}^3]$

$a = 2$ et $\rho_f = 1.8 \text{ t/m}^3$ pour les laves torrentielles boueuses

$a = 4$ et $\rho_f = 2.2 \text{ t/m}^3$ pour les laves torrentielles granulaires

v_f vitesse de l'écoulement $[\text{m/s}]$

Pour les surfaces non perpendiculaires à l'écoulement, on tient compte de l'angle de déviation α :

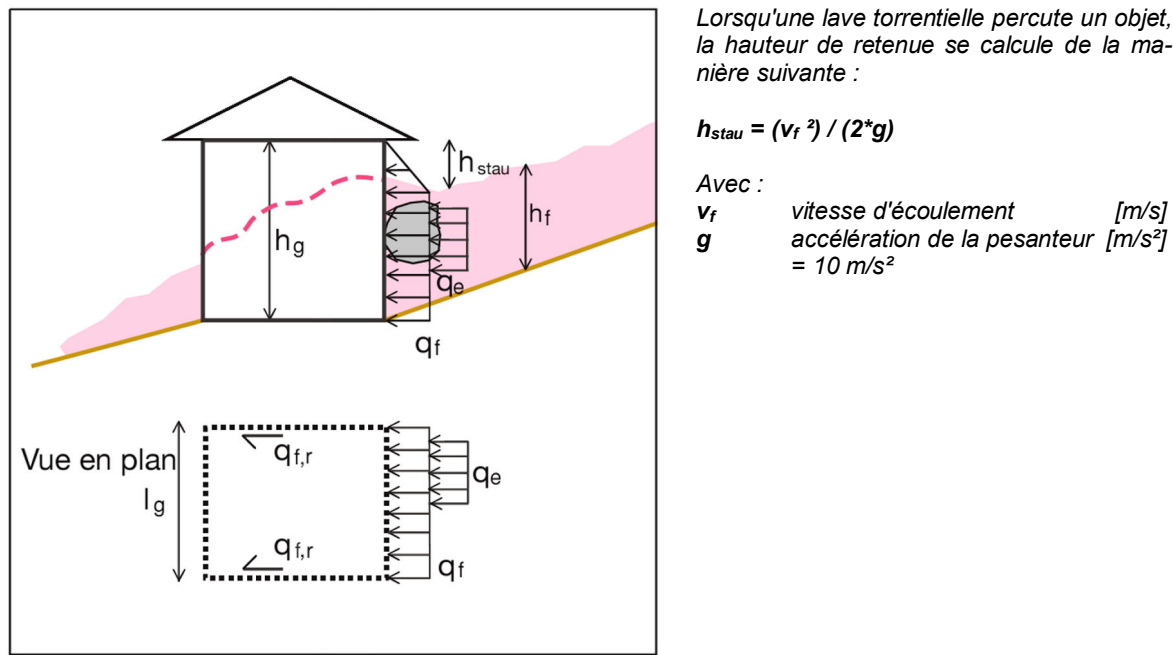
$$q_{f,\alpha} = q_f \cdot \sin^2 \alpha \quad [\text{kPa}]$$

Pour les parois latérales on prend $\alpha = 20^\circ$

lave torrentielle boueuse			
a	2	2	2
ρ_f densité	1.8 t/m ³	1.8 t/m ³	1.8 t/m ³
v_f vitesse de l'écoulement	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s
q_f pression sur une paroi perpendiculaire	3.6 kPa (360 kg/m ²)	32.4 kPa (3.2 t/m ²)	90.0 kPa (9.0 t/m ²)
$q_{f,\alpha}$ pression sur une paroi oblique ($\alpha = 45^\circ$)	1.8 kPa (180 kg/m ²)	16.2 kPa (1.6 t/m ²)	45.0 kPa (4.5 t/m ²)
$q_{f,\alpha}$ pression sur une paroi latérale ($\alpha = 20^\circ$)	0.4 kPa (40 kg/m ²)	3.8 kPa (380 kg/m ²)	10.5 kPa (1.1 t/m ²)

lave torrentielle granulaire			
a	4	4	4
ρ_f densité	2.2 t/m ³	2.2 t/m ³	2.2 t/m ³
v_f vitesse de l'écoulement	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s
q_f pression sur une paroi perpendiculaire	8.8 kPa (880 kg/m ²)	79.2 kPa (7.9 t/m ²)	220.0 kPa (22.0 t/m ²)
$q_{f,\alpha}$ pression sur une paroi oblique ($\alpha = 45^\circ$)	4.4 kPa (440 kg/m ²)	39.6 kPa (4.0 t/m ²)	110.0 kPa (11.0 t/m ²)
$q_{f,\alpha}$ pression sur une paroi latérale ($\alpha = 20^\circ$)	1.0 kPa (100 kg/m ²)	9.3 kPa (930 kg/m ²)	25.7 kPa (2.6 t/m ²)

Figure 5.13 : Laves torrentielles : hauteur de retenue due à un obstacle (suivant VKF-AEAI)



Exemples d'application

v_f	1.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s
h_{stau}	0.05 m	0.45 m	1.25 m

Figure 5.14 : Laves torrentielles : surcharge due au dépôt de matériaux solides (suivant VKF-AEAI)

Comme pour les crues, la surcharge due aux matériaux déposés sur un bâtiment submergé vaut :

$q_a = \rho_f \cdot g \cdot h_a$ [kPa]

ρ_f : densité du dépôt de matériaux solides = 2.2 t/m³ (valeur indicative)
 g : accélération de la pesanteur (= 10 m/s²)
 h_a : hauteur du dépôt

Exemples d'application

h_a	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m
q_a	11.0 kPa (1.1 t/m²)	22.0 kPa (2.2 t/m²)	33.0 kPa (3.3 t/m²)	44.0 kPa (4.4 t/m²)

Laves torrentielles : 2 - bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation suivant VKF-AEAI

Figure 5.16 : Laves torrentielles : bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation (suivant VKF-AEAI)

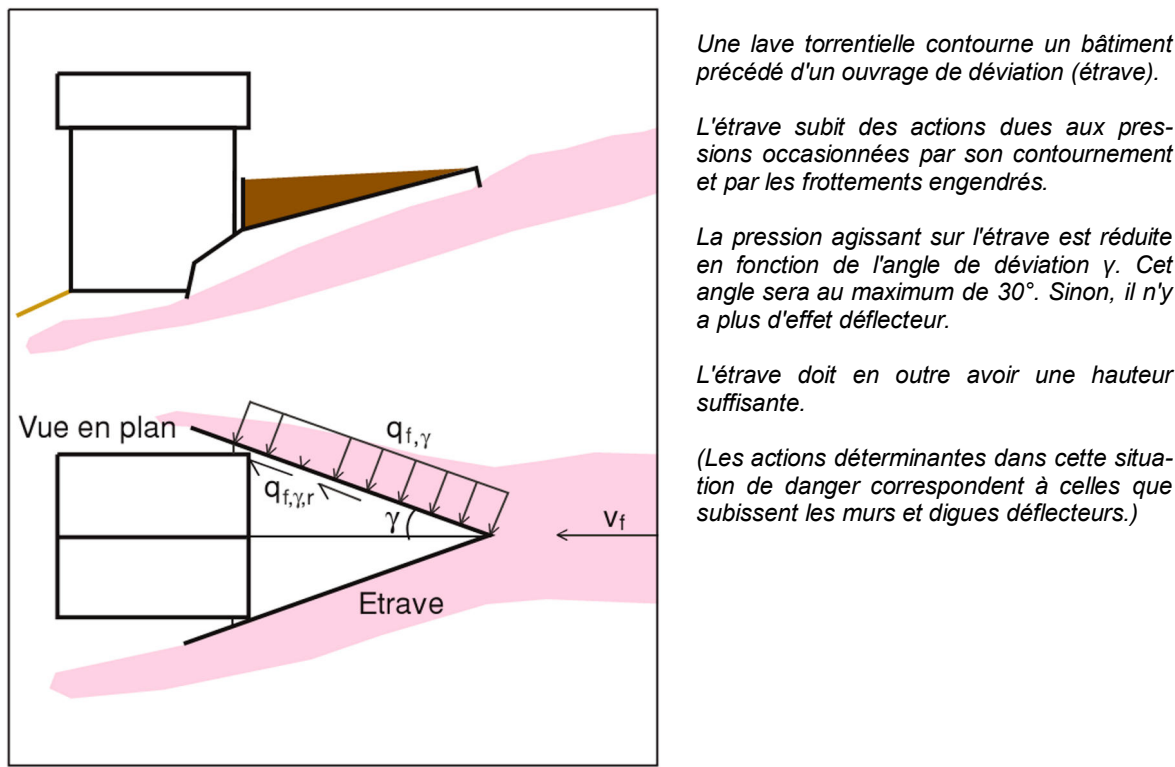


Figure 5.17 : Laves torrentielles : pression due aux frottements (suivant VKF-AEAI)

Les forces de frottement doivent être prises en compte lorsqu'on traite un ouvrage de déviation tel qu'étrave ou mur déflecteur. Pour les laves torrentielles on peut les estimer en appliquant la formule qui décrit la contrainte d'entraînement par un liquide :

$q_{f,r} = \rho_f \cdot g \cdot h_f \cdot \tan\beta$ [kPa]

Avec

ρ_f densité [t/m³]
= 1.8 t/m³ pour les laves torrentielles boueuses
= 2.2 t/m³ pour les laves torrentielles granulaires

g accélération de la pesanteur
= 10 m/s²

h_f hauteur d'écoulement [m]

β déclivité de la pente [°]

Exemples d'application

lave torrentielle granulaire pente 10% ($\tan\beta = 0.1$)			
ρ_f densité	2.2 t/m3	2.2 t/m3	2.2 t/m3
h_f hauteur	1.00 m	2.00 m	3.00 m
$q_{f,r}$ frottement spécifique	2.2 kPa	4.4 kPa	6.6 kPa

5.5 Pondérations et combinaisons d'action

En France pour les combinaisons d'actions, on admet en général les éléments suivants, dans la mesure où la construction ne joue pas un rôle spécifique de protection :

- les cas "risques torrentiels" sont des cas "accidentels" avec le coefficient de sécurité partiel $\gamma_F = 1$
- sauf cas particulier expressément spécifié (par exemple une construction quasiment "les pieds dans l'eau" et régulièrement soumise au risque), on ne les vérifie qu'à l'ELU "accidentel" (Etat Limite Ultime) et non à l'ELS (Etat Limite de Service). Ce qui en clair veut dire qu'on ne vérifie que les résistances et pas les déformations. On admet donc qu'après un événement torrentiel certains éléments soient très déformés, voire endommagés d'une manière irréversible, mais on n'admet pas qu'une paroi soit totalement enfoncée (par exemple, on accepte qu'un mur en béton soit très fissuré, on ne veut pas qu'il soit effondré). Bien entendu, un maître d'ouvrage peut toujours renforcer les prescriptions qu'il souhaite, mais cela a toujours un coût.
- comme nous l'avons vu, dans la plupart des cas on doit combiner toutes les actions torrentielles (pression hydrostatique, pression hydrodynamique, affouillement, dépôt, chocs de bloc ou de tronc) qui peuvent toutes agir simultanément
- par contre, on ne combine pas les cas "risques torrentiels" avec d'autres cas "accidentels". Par exemple, même si un séisme peut provoquer des écoulements de laves torrentielles, il est très peu probable qu'ils agissent dans le même intervalle de temps. De même, une avalanche peut suivre le même chemin qu'une crue torrentielle, mais il est très peu probable qu'elle se produise en même temps.

5.6 Direction d'application

Dans tout ce qui précède on a parlé de "façade frontale" ou de "façade exposée" avec l'idée implicite que la direction de propagation du phénomène était la ligne de plus grande pente.

En général, c'est globalement le sens de l'écoulement, mais il faut être conscient qu'un écoulement torrentiel ressemble rarement à un beau vecteur bien rectiligne et qu'il peut s'écarter significativement de cette figure idéale, en raison de la dynamique propre du phénomène, d'irrégularités de la surface topographique, de l'accumulation locale d'éléments transportés ou même de la présence de constructions à proximité.

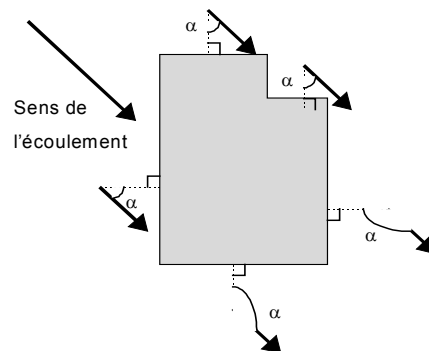
En général, on considère une fluctuation minimum de plus ou moins 45° dans la direction.

Figure 5.18 : Direction d'application : extrait du règlement PPR type de l'Isère

Sont considérés comme :

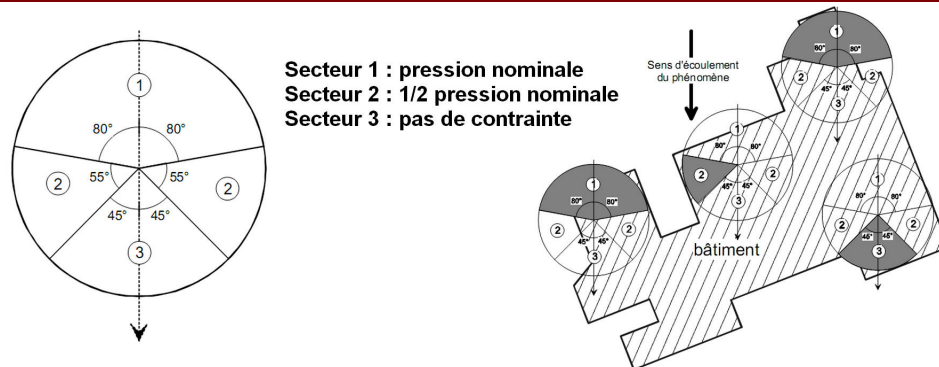
- *directement exposées, les façades pour lesquelles $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$*
- *indirectement ou non exposées, les façades pour lesquelles $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$*

Le mode de mesure de l'angle α est schématisé ci après.



Dans certains PPR, comme par exemple dans celui de Val d'Isère, on donne une méthode de cercles tangents. Pour savoir dans quel secteur se situe la façade, le cercle doit être placé côté intérieur de la façade et tangentiellement à celle-ci : le secteur est celui concerné par le point de contact avec la façade.

Figure 5.19 : Direction d'application : extrait du PPR de Val d'Isère



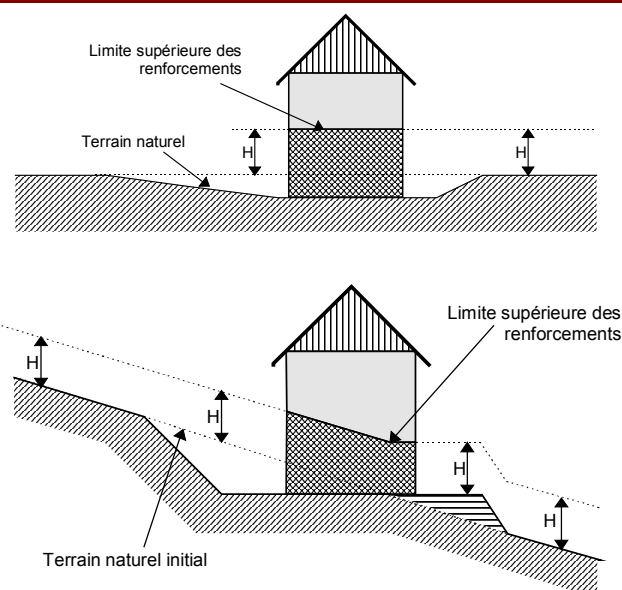
5.7 Hauteur par rapport au terrain naturel

De même, lorsqu'on parle de hauteur de renforcement par rapport au terrain naturel, il faut être conscient que :

- les irrégularités locales de la topographie ne sont pas forcément prises en compte si elles sont de surface faible par rapport à la surface totale de la zone considérée. Aussi, dans le cas de petits thalwegs ou de petites cuvettes, il faut considérer que la cote du terrain naturel est la cote des terrains environnants
- en cas de **terrassements en déblais**, la hauteur doit être mesurée par rapport au terrain naturel initial (les creux étant vite remplis par les écoulements)
- 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 (parement exposé aux écoulements subverticaux sauf pour les inondations de plaine, dimensionnement pour résister aux efforts prévisibles, ...) . Dans le cas général, la hauteur à renforcer sera mesurée **depuis le sommet des remblais**.

Pour ce problème des hauteurs, il faut accorder une attention particulière au cas des voiries périphériques, qui sont parfois surplombantes par rapport au terrain naturel.

Figure 5.20 : Hauteur par rapport au terrain naturel : extrait du règlement PPR type de l'Isère



5.8 Commentaires et préconisations

Dans ce chapitre nous avons vu que pour des zones dites "constructibles", l'ordre de grandeur des pressions et des hauteurs d'application que l'on trouve en général dans les règlements français (de 10 à 30 kPa, 1 à 3 t/m², pour une hauteur de 1 à 2 m) était un ordre de grandeur plausible.

Mais nous avons vu aussi que, dans les recommandations des Etablissements Cantonaux d'Assurance Suisses, on trouvait des analyses beaucoup plus fines des situations de danger à considérer et des efforts à prendre en compte.

De la sorte, la simple prise en compte d'une pression uniforme et d'une hauteur d'application ne semble pas suffisante pour bien couvrir la variété des sollicitations envisageables :

- pression statique
- pression dynamique
- chocs

Nous avons vu que le point de départ de ces analyses nécessitait de disposer de données concernant des vitesses, des hauteurs, des tailles de blocs en mouvement, des directions d'application... des données que l'on trouve rarement dans nos règlements mais qu'il serait souhaitable de connaître pour dimensionner correctement un bâtiment.

Compte tenu de l'importance et de la variété de ces données, qui sont souvent influencées par des effets très locaux, la réalisation d'études particulières est tout à fait justifiée aussi bien sur un plan humain (en raison des risques encourus) que sur un plan financier (vu le coût des travaux à réaliser).

En effet, quand on sait que la plupart des efforts varient avec le carré de la vitesse, il est à l'évidence économique de calibrer au mieux les valeurs à prendre en compte et on ne peut que recommander aux constructeurs de faire réaliser une étude spécifique par un bureau spécialisé, tout particulièrement dans les zones où l'on ne dispose pas de valeur des contraintes à prendre en compte.

En dernier lieu, et quelles que soient la qualité des études et la précision des calculs réalisés une certaine prudence reste toujours nécessaire. A ce sujet on peut citer l'introduction de la publication des Etablissements Cantonaux d'Assurance Suisses VKF-AEAI que nous avons abondamment utilisée.

Document 5.2 : extrait de *Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels*, VKF-AEAI

Exclusion de la responsabilité

La présente publication a été élaborée avec le plus grand soin. Elle correspond à l'état actuel de la science et de la technique. Cependant, il est souligné expressément que des dommages peuvent survenir même si les mesures proposées sont respectées.

En règle générale, les mesures proposées ne permettent d'empêcher des dommages ou de diminuer leur ampleur que jusqu'à un certain point, elles ne garantissent aucunement qu'aucun dommage ne surviendra.

En outre, il est précisé expressément que la présente publication contient des instructions visant à empêcher des dommages matériels prévisibles ordinairement occasionnés par les dangers naturels décrits, ou à diminuer l'ampleur de ces dommages. Les événements soudains ou extrêmes peuvent causer des dommages considérables même si les mesures proposées sont respectées.

Toute responsabilité de l'AEAI pour des dommages matériels ou corporels survenus malgré, par suite, ou en relation avec le respect ou l'application de la présente publication est exclue. Quiconque respecte ou applique cette publication adhère expressément à cette exclusion de responsabilité.

6 RÉPONSES CONSTRUCTIVES

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes efforcés de fournir des indications sur l'impact des risques torrentiels sur les constructions, puis de donner des éléments de quantification sur les efforts à prendre en compte.

Dans ce chapitre, nous parlerons des réponses constructives possibles, mais avant de donner ce qui pourrait être considéré comme un simple catalogue de mesures à mettre en œuvre, il nous semble important de réfléchir d'abord sur les stratégies envisageables.

Le terme stratégie est bien sûr d'origine militaire, mais en l'espèce il n'est pas inadéquat, l'art de la fortification pouvant sans doute inspirer l'art de construire dans les zones "à risques", voire dans les zones "de dangers".

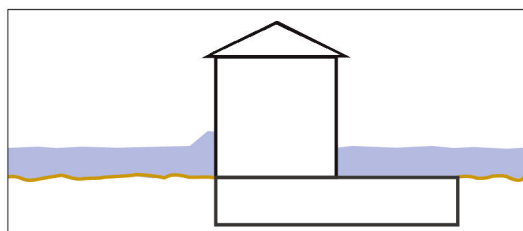
En parlant "d'impact" ou "d'efforts", nous avons présenté le point de vue de l'attaque. Dans ce qui suit, nous donnerons donc le point de vue de la défense.

6.1 Stratégies de défense

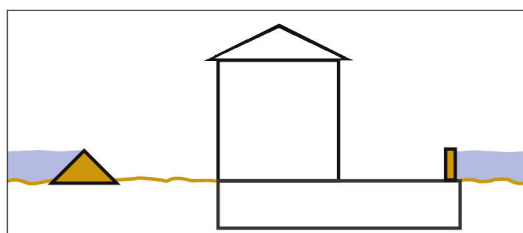
Du point de vue de la défense, on peut envisager trois stratégies possibles :

- "la forteresse imprenable" : le bâtiment est conçu d'une manière résistante et étanche, pour pouvoir faire face directement aux sollicitations
- "la défense à distance" : le bâtiment, non résistant ou non étanche, est protégé par des écrans ou par une surélévation
- "la part du feu" : le bâtiment peut être envahi mais on s'efforce de minimiser les conséquences

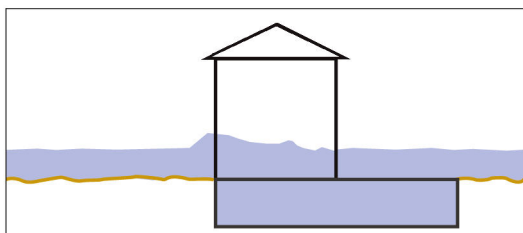
Figure 6.1 : Vue d'ensemble des mesures possibles (suivant assurances suisses VKF-AEAI)



Etanchement



Ecran



Inondation contrôlée

"La forteresse imprenable"

La première stratégie, "la forteresse imprenable", est sans doute la plus efficace et on se doit de la recommander, tout particulièrement pour les bâtiments neufs.

Avec une telle stratégie, l'intérieur reste à l'abri et les seuls dégâts à prévoir sont des souillures de l'enveloppe et éventuellement des dégradations des ouvrages extérieurs.

Pour une telle stratégie, il faut toutefois signaler que, si pour des constructions courantes une résistance satisfaisante peut raisonnablement être envisagée, une "parfaite étanchéité" est plus difficile à réaliser : en général cela nécessite des ouvrages très spécifiques d'étanchéité ou de cuvelage qui sont assez coûteux.

"La défense à distance"

La seconde stratégie, "la défense à distance", peut être intéressante, tout particulièrement pour des bâtiments existants qui seraient non résistants et difficiles à conforter, mais elle n'est pas toujours praticable.

En effet, elle suppose d'une part d'avoir de la place, mais surtout de ne pas aggraver le risque chez les voisins.

De la sorte, cette stratégie nécessite bien souvent d'être étudiée d'une manière collective, et nous en reparlerons plus particulièrement dans le chapitre consacré aux réflexions d'urbanisme.

"La part du feu"

Cette dernière stratégie, "la part du feu" (ou plutôt "la part de l'eau") n'est jamais à négliger.

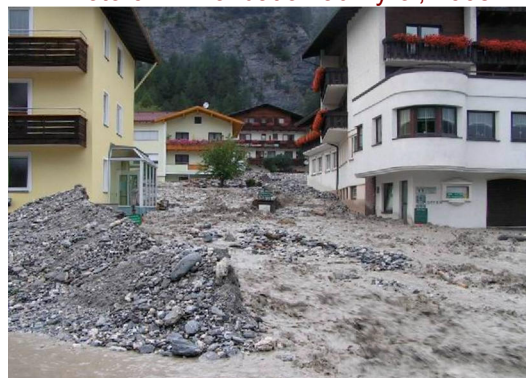
En effet, pour beaucoup de constructions existantes, c'est parfois la seule envisageable. En particulier, pour des bâtiments dont la résistance au soulèvement serait insuffisante, une inondation "contrôlée" est parfois la seule issue.

Mais même pour des bâtiments "imprenables" ou "défendus à distance", elle doit être considérée. En effet, malgré toutes les précautions prises, les forteresses imprenables peuvent être un jour envahies et les défenses avancées submergées. Il importe donc d'en limiter les effets.

Pour se faire, on peut envisager de se préoccuper :

- de l'utilisation des espaces intérieurs
- des dispositions d'évacuation ou de mise à l'abri des personnes
- des conséquences d'un éventuel envahissement

Photo 6.1 : Inondation au Tyrol, 2005



Source : Siegfried Sauermoser

Utilisation des espaces intérieurs

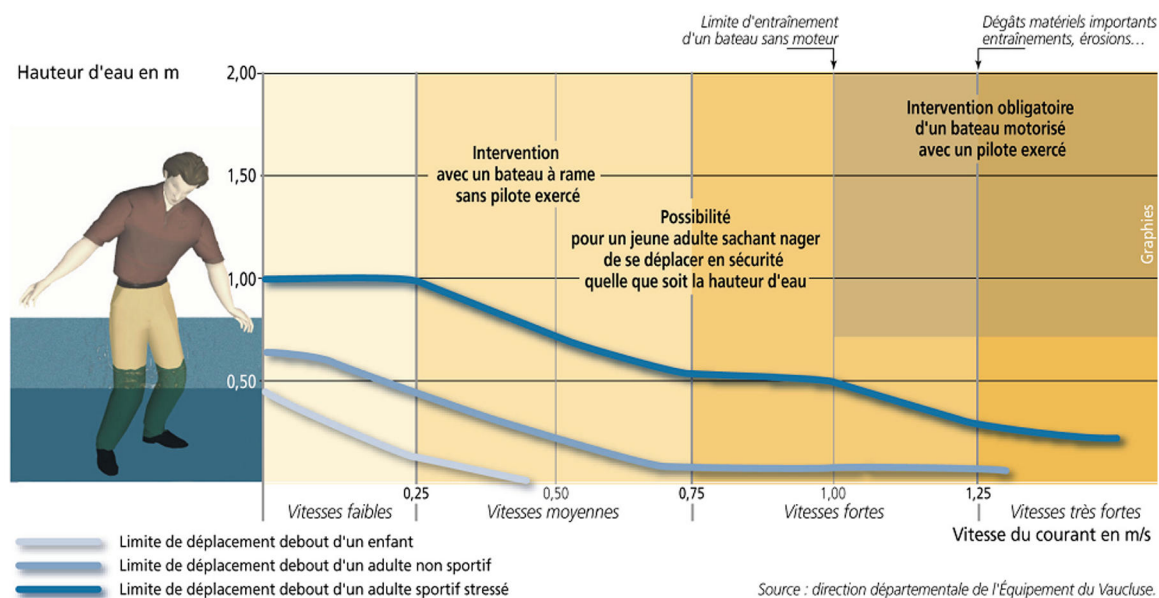
Ce point est du ressort du bon sens (et surtout de la prise de conscience du risque) : il est évident que dans l'usage intérieur d'un bâtiment, il vaut mieux mettre en première ligne les locaux où on stationne le moins et dont le contenu est le moins précieux.

Par exemple, dans bien des règlements, on recommande souvent de disposer contre les parois exposées les pièces généralement occupées pour de courtes durées, telles que les couloirs de circulation, et d'implanter les séjours et les chambres dans les lieux les moins exposés. De même, dans l'utilisation des niveaux, on prescrit souvent que le premier plancher habitable des constructions soit situé au-dessus du niveau d'écoulement de référence.

Evacuation ou mise à l'abri des personnes

Le choix entre l'évacuation ou la mise à l'abri des personnes est délicat à traiter d'une manière absolue. En effet, s'il n'est pas très raisonnable de rester dans une construction qui risquerait de s'effondrer, il faut aussi savoir qu'en cas de crue torrentielle le milieu extérieur devient très vite dangereux.

En effet, pour une inondation, on estime généralement que pour un enfant la limite de déplacement est de 50 cm d'eau ou une vitesse de courant supérieure à 50 cm/s, et pour un adulte 1 m d'eau ou une vitesse de 1 m/s. Mais comme ces valeurs sont données pour une inondation "normale", c'est à dire avec presque uniquement de l'eau, il est évident que pour une crue torrentielle, qui charrie aussi des éléments solides, tout déplacement extérieur peut être considéré comme extrêmement dangereux.



Avec ces éléments, il est en général peu opportun d'envisager une mise à l'abri des personnes pendant la crue par une évacuation extérieure, sauf si un cheminement sûr reste praticable. En général, et comme pour les inondations courantes, on recommande de prévoir un "plancher refuge" accessible par escalier ou échelle, et permettant d'attendre la fin de la crue en bonne sécurité. Pour permettre l'intervention des secours, notamment dans le cas d'une évacuation par hélicoptère, on prescrit souvent que cet espace refuge dispose d'un accès par l'extérieur¹⁸.

Il existe bien entendu des cas d'espèces où une évacuation sera préférable : par exemple pour un bâtiment à proximité d'un torrent, dont les fondations seraient affouillées et dont on pourrait s'échapper à l'opposé.

Dans tous les cas, et pour envisager les mesures les plus judicieuses, il importe d'avoir une bonne conscience des risques réels que l'on peut courir. Au delà des prescriptions normatives qui sont nécessairement générales, réfléchir aux situations de danger possible et prévoir la manière d'y faire face est sans doute une bonne méthode.

¹⁸ Pour les inondations courantes, on recommande aussi de poser des anneaux d'amarrage pour faciliter l'évacuation par bateau, mais en situation de crue torrentielle, il est peu probable que cela soit utile, quand bien même les services de secours seraient des professionnels du rafting ...

Photo 6.2 : Inondation au Tyrol, 2005
Situation où une évacuation est à prohiber



Source : Siegfried Sauermoser

Photo 6.3 : St Martin d'Uriage, 2005
Situation où une évacuation semble préférable



Source : Yannick Guigal, IRMA

Conséquences d'un éventuel envahissement

Quelles que soient les précautions prises lors de sa construction, il faut toujours garder à l'esprit qu'un bâtiment situé en zone de risques torrentiels pourrait être un jour envahi, lors d'un événement très exceptionnel. Il importe donc d'envisager ce risque et de s'efforcer d'en limiter les conséquences.

A ce titre, on trouve souvent dans les règlements ce type de recommandations :

- les matériaux employés sous la cote de référence devront être les moins sensibles possible aux dégradations par immersion.
- les locaux seront aménagés afin de réduire leur vulnérabilité par rapport à la submersion (par exemple en disposant les équipements sensibles à l'étage ou au-dessus du niveau d'eau prévisible).
- les installations d'assainissement, d'alimentation en eau potable et d'électricité devront être réalisées de telle sorte que leur fonctionnement ne soit pas perturbé et qu'elles n'occasionnent ni ne subissent de dommages lors des crues.
- les réseaux et équipements électriques, électroniques, micro-mécaniques et les installations de chauffage, à l'exception de ceux conçus pour être immergés, devront être placés au-dessus de la cote de référence. Dans tous les cas, leurs dispositifs de coupure devront être placés au-dessus de cette cote.

Mais là aussi, il s'agit de bon sens et surtout de prise de conscience du risque. A ce titre, une bonne démarche est peut-être de raisonner sous la forme de "scénarios catastrophes" et de "penser le pire" pour l'empêcher d'advenir. Et la bonne question à se poser est sans doute la suivante : que peut-il se passer si l'eau et la boue atteignent ce niveau ? A ce sujet, on pourra se référer aux recommandations que l'on trouve sur le site prim.net, le portail de la prévention des risques majeurs.

Document 6.1 : extrait de prim.net, rubrique "Comment anticiper ?"

Le temps d'alerte qui vous permet de vous protéger et de protéger vos biens avant un événement exceptionnel est au pire inexistant, au mieux extrêmement court. Dans tous les cas, il est insuffisant pour être efficace sans un minimum de préparation

Une catastrophe naturelle majeure, par définition, est une épreuve qui désorganise la société et laisse l'individu seul face à la crise pendant un temps plus ou moins long. Pour la surmonter, il est essentiel d'éviter de vous mettre en danger et de limiter les dégâts éventuels sur vos biens.

La préparation est une responsabilité partagée, qui incombe aux pouvoirs publics mais également à chaque citoyen qui peut et doit y participer.

Une bonne préparation : le Plan Familial de Mise en Sécurité (PFMS). Établir un Plan Familial de Mise en Sécurité vous aidera à vous préparer et donc à traverser ces périodes de crise. Ce plan commence par un recueil des informations disponibles. Créez-le avec vos proches, expliquez leur ce qu'il faut faire et mettez-le en pratique dès que possible, pour ne jamais être pris au dépourvu !

Vous devez profiter de l'occasion de la réalisation de ce plan pour apprendre les consignes de sauvegarde et les comportements à adopter en cas de survenue d'un événement exceptionnel.

Les exercices de simulation nécessitent également votre participation et votre suivi. Vous pourrez en tirer des informations précieuses.

6.2 Fondations

Nous avons vu précédemment au titre de l'impact sur les constructions que l'affouillement des fondations était le risque majeur pour un bâtiment en cas de crue et dans bien des règlements on trouve cette prescription : *"les fondations des constructions et des ouvrages devront résister aux affouillements prévisibles, même en cas d'érosion non uniforme"*.

Mais cette prescription parfaitement fondée est sans doute plus facile à dire qu'à faire. Toutefois pour y répondre, on peut envisager trois démarches :

- réaliser des fondations non affouillables
- éviter que le courant puisse atteindre la base des murs
- limiter les conséquences d'un affouillement partiel

Fondations non affouillables

Réaliser des fondations suffisamment profondes pour ne pas être touchées par le risque d'affouillement est bien entendu la meilleure démarche, mais il n'est pas toujours facile de définir la profondeur d'affouillement à prendre en compte.

En effet, si dans le cas d'un affouillement par érosion des berges on peut se faire une idée de la cote de profondeur à considérer (dans certains règlement on indique : *"les bâtiments construits en limite de berge devront être fondés 2 mètres sous le niveau du lit"*), dans le cas d'un affouillement par divagation ou surcreusement du lit du torrent il est impossible de donner d'une manière générale une profondeur indicative de référence.

Dans le cas de risques d'affouillements, il est fortement recommandé de faire réaliser une étude technique particulière par un praticien compétent pour préciser le risque et définir les conditions de réalisation des fondations¹⁹. A partir de ces éléments, la réalisation des fondations ne pose pas de problèmes particuliers. On trouve les indications nécessaires dans les DTU (Documents Techniques Unifiés) et les normes correspondants à ce type d'ouvrage.

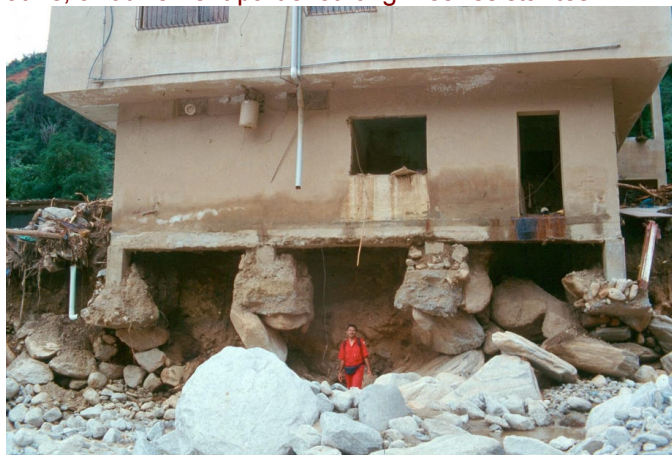
Il faut toutefois signaler un point spécifique en cas d'affouillement. En effet, dans ce cas, les fondations, en général prévues pour être enterrées, vont se retrouver "hors sol" et de surcroît soumises à des efforts horizontaux non négligeables.

Dans ce contexte, on ne peut que recommander des systèmes de fondations continus (semelles filantes, radiers). Mais si pour des raisons de portance et de profondeur d'appui, des systèmes ponctuels doivent être employés (barrettes, pieux, micropieux), des longrines de liaison conséquentes sont à prévoir.

Photos 6.4, 6.5: Amérique latine, affouillement partiel et longrines résistantes



Source : Cemagref DR



Source : Cemagref DR

¹⁹ concernant les études de sol : en cas de sinistre provenant d'un défaut du sol, on estime que c'est une faute pour un architecte ou un maître d'œuvre d'avoir construit un bâtiment courant dans une situation courante sans avoir fait procéder à des études de sol. Dans le cas d'une situation à risque avéré, une telle faute serait encore plus caractérisée.

Sur le plan du risque d'affouillement, il faut aussi noter que la réalisation d'un sous-sol enterré est parfois une bonne solution : d'une part, cela permet d'approfondir le niveau des fondations, d'autre part les murs enterrés dans la hauteur du sous sol permettent de donner une plus grande raideur à la construction.

Bien entendu, les risques de submersion et d'envahissement sont aggravés dans le cas des sous-sols, mais si on considère que la ruine par affouillement est le risque majeur en cas de crue torrentielle, la réalisation d'un sous-sol (éventuellement submersible) est une hypothèse qu'on ne devrait pas systématiquement exclure.

Renfort de pied

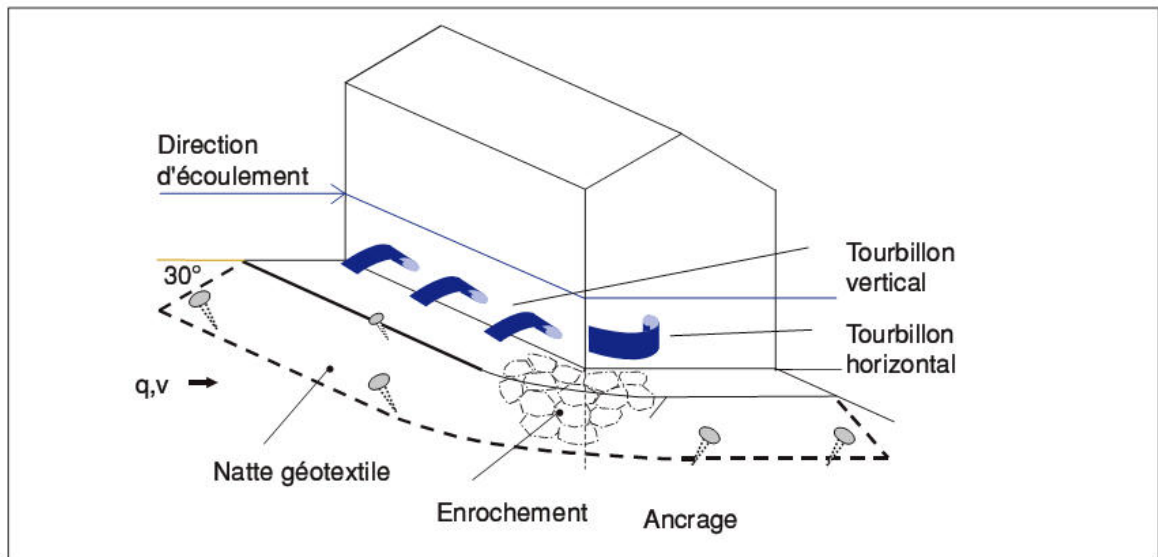
Une autre solution pour empêcher les affouillements, et par suite réduire la profondeur des fondations, est de mettre un dispositif de protection en pied.

Dans le domaine des piles de pont, on réalise parfois un caisson dans un batardeau de palplanches, le diamètre du caisson étant égal à 3 fois le diamètre de la pile.

On envisage aussi parfois la protection des appuis par des tapis d'enrochement, là aussi les dimensions du tapis sont de l'ordre de 3 fois le diamètre de la pile, ce qui correspond à l'emprise totale de la fosse d'affouillement. Pour ces tapis, il existe, dans le Guide SETRA sur les ponts, une formule empirique qui donne le diamètre D des blocs en fonction de la vitesse V du courant : $D = V^2/10$ (ce qui donne un diamètre de 40 cm pour une vitesse de 2 m/s, 90 cm pour 3m/s et 1.6 m pour 4 m/s).

Pour les bâtiments, on donne aussi dans certains règlements des recommandations similaires : *"Au niveau des angles du bâtiment sur la face amont, une couche d'enrochements sera disposée sur une longueur de 5 mètres de part et d'autre de l'angle du mur. Ces enrochements présenteront un poids unitaire de l'ordre d'une tonne dont le sommet sera calé au niveau du lit"*.

Figure 6.2 : Protection des fondations contre l'affouillement (suivant assurances suisses VKF-AEAI)



Liaisons et chaînages

Dans tous les cas de figures, il y a un intérêt évident à avoir un fonctionnement de la structure le plus monolithique possible, et donc à réaliser le maximum de liaisons et de chaînages. On rencontre parfois des bâtiments très affouillés qui se sont quand même maintenus : par exemple la patinoire de Saint Lary, qui après la crue de la Neste d'Aure en 1982 donnait l'impression d'avoir été construite en porte à faux au dessus du torrent.

Photos 6.6, 6.7 : Saint Lary 1982, affouillement de la patinoire



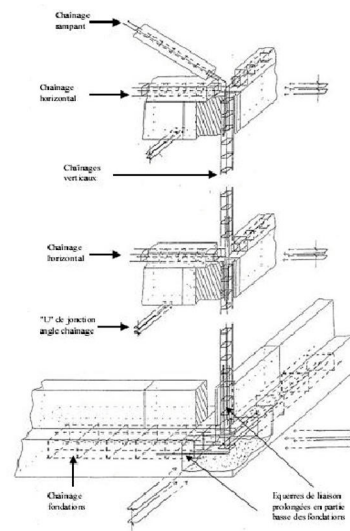
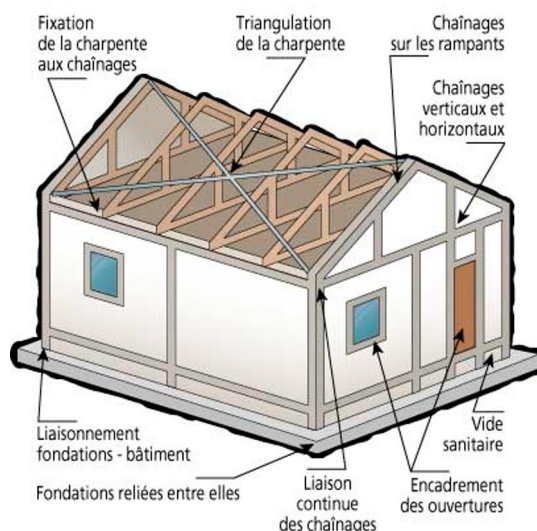
Source : ONF-RTM 65

Pour des constructions plus courantes, on peut s'inspirer des dispositions de chaînage recommandées au titre des constructions parasismiques. En fait, on devrait plutôt dire "on doit" appliquer les dispositions parasismiques, car presque toutes les zones montagneuses sont soumises à risque sismique.

Au minimum on doit donc réaliser :

- des liaisons entre les éléments de fondation et la structure
- des chaînages horizontaux au niveau bas, au niveau de chaque plancher et au niveau du contreventement haut des murs
- des chaînages verticaux en bordure des panneaux de contreventement, à tous les angles saillants ou rentrants de la construction, aux jonctions des murs, en encadrant les ouvertures de hauteur supérieure à 1.80 m

Figures 6.3, 6.4 : Disposition de chaînage parasismique (suivant document Plan Séisme)



Problématique des bâtiments existants

Pour les constructions anciennes en maçonnerie, nous avons vu que le risque d'affouillement était le risque prépondérant et que dans ce cas l'endommagement commençait préférentiellement par un angle.

Photo 6.8 : Val d'Aoste 2000, endommagement d'un angle



Source : Région Autonome Vallée d'Aoste

On peut s'efforcer de répondre en renforçant et surtout en approfondissant les fondations, mais pour une construction existante cela impose des reprises en sous-œuvre délicates, voire dangereuses à réaliser. On pourrait à ce sujet envisager des solutions par forage de micro pieux, mais il n'est pas sûr que ce type d'ouvrage se comporte bien face à des poussées horizontales. On peut aussi bien sûr envisager des solutions de protection par tapis d'enrochement, si les abords le permettent.

Mais dans tous les cas et préférentiellement on doit d'abord envisager des dispositifs de chaînage de l'ensemble de la construction et des angles en particulier : avec des chaînages correctement réalisés, il est quasi certain qu'il aurait été possible d'éviter les désordres d'angle que nous avons pu voir sur certains bâtiments qui étaient intacts par ailleurs.

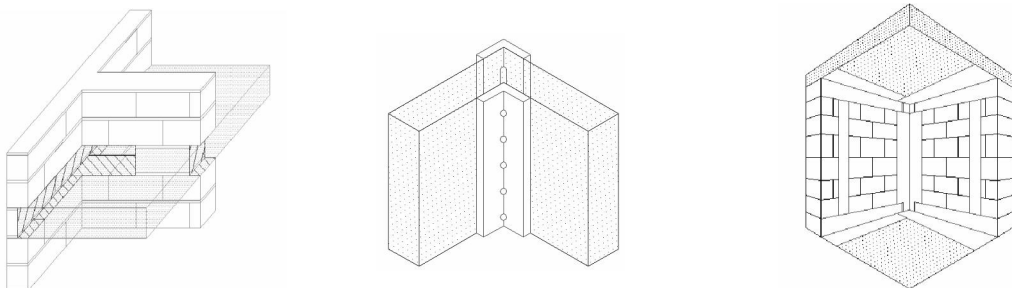
Pour la réalisation de ces chaînages deux possibilités sont envisageables :

- soit chaînage en béton armé coulé dans des saignées réalisées dans les murs
- soit chaînage métallique réalisé par des plats et des cornières scellés ponctuellement dans la maçonnerie

Il existe aussi d'autres possibilités de réalisation avec des plats métalliques collés, et même avec des tissus en fibres de carbone collés (dans le jargon technique on parle de TFC), mais ces dispositifs, qui sont très performants et qu'on emploie couramment pour les ouvrages d'arts, sont très difficiles à mettre en œuvre pour des murs avec des maçonneries en pierre de surface irrégulière : ces dispositifs sont plutôt à envisager pour des ouvrages en béton ou des maçonneries assez lisses.

Dans tous les cas, il faut veiller à assurer la continuité des chaînages et une bonne liaison entre le chaînage vertical d'angle et les chaînages horizontaux.

Figure 6.5 : Extrait de "Renforcement parasismique du bâti existant" (document RGPU)



Réseaux enterrés

Les réseaux enterrés peuvent eux aussi être soumis aux risques d'affouillement. Mais comme il est quasi impossible de les prévoir avec une résistance suffisante en cas d'affouillement, il faut soit les enterrer à une profondeur suffisante, soit dans le cas d'un risque d'érosion des berges les disposer sur les façades les moins exposées.

Photo 6.9 : Val d'Aoste 2000, destruction des réseaux



Source : Région Autonome Vallée d'Aoste

Une attention particulière doit être assurée pour toutes les citernes enterrées. Dans les faits, tous les réservoirs contenant des hydrocarbures ou du gaz liquéfié, enterrés ou en surface, sont à prohiber en extérieur dans les zones soumises à un risque torrentiel avec affouillement.

De même la réalisation de piscine n'est pas à conseiller dans ces zones : non seulement les problèmes structuraux à résoudre ne sont pas négligeables, mais surtout les piscines, rendues invisibles par la crue, peuvent constituer un risque important de noyade.

En effet, après la crue les bassins ne sont plus visibles et leur profondeur importante peut constituer un risque grave pour les sauveteurs. Pour les inondations de plaine, on demande de matérialiser les emprises des piscines et des bassins enterrés par des balises, mais pour les crues torrentielles, il semble totalement illusoire d'envisager un système de balisage efficace qui puisse rester visible après une crue

Photo 6.10 : Saint-Lary 1982, dégâts à la piscine



Source : ONF-RTM 65

Photo 6.11 : Vaulnaveys-le-Haut, 2005



Source : IRMa, Sébastien Gominet

6.3 Résistance des murs pleins en maçonnerie

Nous avons vu dans le chapitre précédent consacré aux efforts que la plage des valeurs de pression envisageables pouvait être très large : de quelques kPa (quelques centaines de kg au m²) à quelques dizaines de kPa (quelques tonnes au m²), 10 à 30 kPa (1 à 3 t/m²) pour une hauteur de 1 à 2 m étant un ordre de grandeur plausible.

Mais, nous avons vu aussi dans le chapitre consacré aux impacts que les destructions de murs pleins, sans affouillements de fondations, étaient dans l'ensemble très rares.

Si on se place maintenant du point de vue de la résistance, on peut donner quelques ordres de grandeur :

- un mur de soutènement en béton armé simplement stabilisé en pied, peut reprendre 30 kPa (3 t/m²) pour 2 mètres de haut, sans difficulté particulière (mais bien sûr avec une étude sérieuse et un ferrailage correct)
- des murs courants en béton de 20 cm d'épaisseur s'appuyant entre deux planchers ou entre deux murs de refends, peuvent résister avec des dispositions de ferrailage adéquates à des pressions de 10 à 30 kPa (1 à 3 t/m²)
- on estime en général que des murs en vieille maçonnerie de pierres, avec des mortiers n'offrant que peu de cohésion, ne peuvent résister à une pression supérieure à 2.5 kPa (250 kg/m²) pour une épaisseur de 50 cm, et à 10 kPa (1 t/m²) pour une épaisseur d'un mètre
- des murs en maçonnerie de blocs creux en béton de 20 cm d'épaisseur peuvent avoir une résistance très variable suivant la dimension des panneaux et les conditions d'appui. Avec une distance entre murs de refends de 5 à 6 m, on peut résister à des pressions de l'ordre de 2.5 à 4.5 kPa (de 250 à 450 kg/m²), suivant qu'il s'agit d'un pignon libre en tête ou d'un mur appuyé entre deux planchers. Avec une distance entre raidisseurs de l'ordre de 3 m, on peut envisager des pressions de 7.5 à 10 kPa (de 750 kg/m² à 1 t/m²). Pour aller au delà, il faut envisager des dispositions de renforcement et de ferrailage, qui sont quasiment les dispositions des constructions en béton armé.

6.4 Matériaux

De ce qui précède on pourrait retenir l'idée que l'on doit réaliser uniquement des constructions en maçonnerie dans les zones soumises à risque torrentiel. Mais cela n'est absolument pas le cas, et il n'y a aucune raison d'imposer un type de matériaux dans ce genre de situation : ce que l'on doit considérer c'est une résistance à obtenir, et il n'existe pas de matériaux à imposer ou à exclure.

Sur le plan des matériaux, on peut rappeler que les premiers ouvrages de correction torrentielle ont souvent été réalisés avec des éléments en bois, et dans le domaine maritime et fluvial des ouvrages en palplanches métalliques sont très souvent employés.

Photo 6.12 : Morzine ouvrages en bois



Source : ONF-RTM national

Photo 6.13 : Rideau de palplanches en acier



Source DR

Bien sûr, il ne s'agit pas là de construction "légère" et le dimensionnement des ouvrages doit être adapté à la nature des matériaux.

A titre d'ordre de grandeur, l'épaisseur de tôle des palplanches se situe entre 10 et 20 mm, alors qu'un bardage métallique courant se situe entre 0.75 et 1 mm.

Pour ce qui concerne les ouvrages en bois et pour fixer les idées, on peut signaler que le bois et le béton ont des limites de résistance assez similaires (de l'ordre de 30 MPa) et qu'une paroi en béton et une paroi en bois réalisées avec la même épaisseur pourraient offrir des résistances semblables pour des efforts statiques, la paroi en bois se comportant mieux pour des efforts dynamiques avec des chocs et des impacts.

Bien entendu le raisonnement ne vaut que si on travaille avec des épaisseurs consistantes et surtout des liaisons et des assemblages sérieux entre les éléments : si on se contente d'empiler des bois sans aucune liaison et sans ancrage aux fondations, il est évident qu'en cas de crue torrentielle tout cela va voltiger comme un tas d'allumettes.

Mais avec des dispositions constructives adéquates, on peut obtenir des résistances très élevées. Pour fixer les idées, pour une charge de 30 kPa (3 t/m²) et pour une paroi s'appuyant sur des refends :

- des rondins de 15 cm de diamètre nécessitent 3,5 m entre refends
- des rondins de 20 cm de diamètre nécessitent 4,5 m entre refends
- des bois rectangulaires formant une paroi de 10 cm d'épaisseur nécessitent 3 m entre refends
- avec une paroi en bois de 15 cm d'épaisseur on obtient 4,5 m entre refends
- avec une paroi en bois de 20 cm d'épaisseur on obtient 6 m entre refends

Si à cette charge répartie de 30 kPa (3 t/m²), on ajoute une charge ponctuelle de 100 kN (10 T) correspondant au choc d'un bloc ou d'un tronc d'arbre :

- une paroi en bois de 15 cm d'épaisseur nécessite 2 m entre refends
- une paroi en bois de 20 cm d'épaisseur nécessite 3 m entre refends

Tous ces éléments, bien sûr, ne sont que des ordres de grandeur : ils demandent à être précisés, justifiés et validés par une étude particulière, en fonction de la qualité des matériaux, des conditions d'appuis, des liaisons ..., mais il n'y a là rien d'autre que les études classiques auxquelles on doit procéder pour toute construction.

A ce sujet on peut signaler que le cas "crue torrentielle" est un cas qui ne pose pas de problème de calcul particulier. Phénomène éminemment dynamique, il est la plupart du temps "traduit" par un effort statique équivalent : une démarche qui est couramment employée pour d'autres sollicitations dynamiques, tel le choc d'un poids lourd ou d'une péniche contre une pile de pont (à la différence des cas de séisme, par exemple, qui nécessitent parfois des modélisations plus complexes et des calculs plus sophistiqués).

En fait, la difficulté ne provient pas du calcul de la résistance de l'ouvrage, mais plutôt de l'appréciation et de la quantification des sollicitations à prendre en compte.

6.5 Problématique des ouvertures

Dans ce qui précède nous nous sommes rendus compte que sur le plan des structures, qu'elles soient en béton, en bois ou en acier, il n'y avait pas de problèmes constructifs insurmontables. Certes, les efforts à prendre en compte peuvent être conséquents, mais tout cela peut trouver une solution dans le cadre d'une construction courante.

Par contre, dès qu'on se préoccupe d'ouverture, les problèmes sont moins évidents et la plupart du temps on conseille, voire on prescrit, d'éviter les ouvertures sur une certaine hauteur pour les façades exposées. Mais il faut être conscient que cette prescription est très pénalisante pour les constructions.

A ce sujet, on trouve parfois dans les règlements cette prescription "d'aveuglement des façades sur une certaine hauteur" imposée non seulement pour le bâti futur, mais aussi pour le bâti existant : lorsque le bâti en question est situé au centre d'un village, avec de surcroît des commerces donnant sur la rue, il est évident que cette prescription ne sera pas suivie d'effet et qu'elle va devenir une parfaite vue de l'esprit.

Réfléchir à la problématique des ouvertures en cas de risques torrentiels, semble donc indispensable.

En fait, le problème d'une ouverture, c'est que, suivant le dicton, il faut qu'elle soit "ouverte" ou "fermée".

Quand elle est ouverte, sa résistance est très facile à déterminer : elle est nulle. Donc pour pouvoir envisager des ouvertures, il faut qu'elles soient fermées pendant la crise. Et pour cela, on peut considérer deux démarches : soit l'ouverture est a priori en permanence "fermée", et on ne l'ouvre que quand on est sûr qu'il n'y a pas de crise, soit l'ouverture peut rester "ouverte", mais un dispositif garantit sa fermeture en cas de crise.

Ce raisonnement est admis par exemple en sécurité d'incendie où il existe deux systèmes pour les portes coupe-feu : soit la porte est maintenue en permanence fermée par un ferme-porte, et on ne la franchit normalement que quand il n'y a pas d'incendie, soit elle peut rester ouverte et un système DAS (Dispositif d'Asservissement de Sécurité) déclenche sa fermeture en cas d'incendie.

Pour des bâtiments courants, des systèmes actifs de type DAS pour crue torrentielle ne sont pas encore très usités (on trouve toutefois des dispositifs de ce type pour manœuvrer des ponts ou des ouvrages hydrauliques) et pour l'instant il semble plus raisonnable de se cantonner à la première stratégie, où les ouvertures sont normalement fermées, sauf franchissement "en l'absence de crue".

Dans ces conditions, la résistance des ouvertures "fermées" est à envisager²⁰.

Châssis ouvrants

Pour aborder le problème, on peut donner les valeurs de résistance des ouvertures standards. En effet, pour ces ouvertures, il existe un classement dit AEV, donnant l'étanchéité à l'air, A, à l'eau, E, et la résistance au vent, V. Pour la résistance, seul le terme V nous intéresse. Pour ce terme, le classement donne la résistance à une pression brusque pour laquelle la fenêtre ne doit pas se rompre, ni s'ouvrir brusquement, sous une pression de :

- 0,9 kPa (90 kg/m²) en classe V1
- 1,7 kPa (170 kg/m²) en classe V2
- 2,3 kPa (230 kg/m²) en classe VE, classe dite Exceptionnelle

Avec ces valeurs, on voit tout de suite que l'ordre de grandeur de résistance des ouvertures standards, même de classe E, exceptionnelle, risque d'être assez loin des valeurs de résistance auxquelles il faut répondre sur des façades exposées à un risque de crue torrentielle.

Par ailleurs, il est fortement probable qu'une étanchéité minimale à l'eau sous pression soit difficile à obtenir avec des produits standards.

Photo 6.14 : Inondation au Tyrol, 2005



Source : Siegfried Sauermoser

²⁰ au lieu "d'ouverture fermée, on pourrait bien sûr employer le terme "ouvrant en position fermée"

Vitrages fixes

Pour s'efforcer d'améliorer les résistances, en restant tout d'abord dans des panneaux vitrés, on peut considérer des vitrages fixes. Toujours à titre d'ordre de grandeur, on peut donner les éléments d'appréciation suivants pour des vitrages de 1m de large :

- pour résister à une pression de 5 kPa (500 kg/m²), il faudrait une épaisseur de 10 à 15 mm
- pour résister à une pression de 10 kPa (1 t/m²), il faudrait une épaisseur de 15 à 25 mm
- pour résister à une pression de 30 kPa (3 t/m²), il faudrait une épaisseur de 25 à 40 mm

A l'inverse, pour des vitrages feuilletés de protection spécifiés, le tableau suivant donne la surface et la largeur maximum à respecter en fonction de la pression :

Vitrage	5 kPa (500 kg/m ²)		10 kPa (1 t/m ²)		30 kPa (3 t/m ²)	
	S maxi	L maxi	S maxi	L maxi	S maxi	L maxi
44.2	0,61 m ²	45 cm				
66.2	1.42 m ²	69 cm	0,71 m ²	49 cm		
SP 722	2.10 m ²	84 cm	1.05 m ²	59 cm	0,35 m ²	34 cm

De ces approches, on peut retenir que pour des vitrages fixes²¹ :

- pour une pression de 5 kPa (500 kg/m²), on sait faire à un coût raisonnable, pour un format raisonnable
- pour une pression de 10 kPa (1 t/m²), avec un format pas trop grand, on sait encore faire
- pour une pression de 30 kPa (3 t/m²), on sait toujours faire mais avec un coût et un poids très élevés, ou bien un format très petit (à ce niveau de pression, c'est équivalent à des glaces d'aquarium, avec 3 mètres de hauteur d'eau)

Mais si on rajoute à cette pression de 30 kPa (3 t/m²), la force d'impact d'un bloc ou d'un tronc, soit environ 100 kN (10 T) sur un diamètre de 25 cm, on ne sait plus faire avec une surface importante : c'est la raison pour laquelle, la plupart des règlements ou des recommandations limite à 20 cm la largeur d'un élément d'ouverture vitrée dans une façade très exposée en terme d'impact direct (Nota : cette limitation de largeur peut s'envisager sous la forme de grilles ou de barreaudage).

Panneaux pleins

Si pour des ouvertures vitrées, surtout ouvrantes, il est difficile d'obtenir des valeurs de résistance élevées, c'est moins le cas pour des panneaux pleins.

Par exemple, pour des volets en bois on peut donner un ordre de grandeur des portées admissibles en fonction de l'épaisseur et de la pression :

Epaisseur	10 kPa (1 t/m ²)	30 kPa (3 t/m ²)
20 mm	1 m	0,50 m
40 mm	2 m	1,20 m
60 mm	3 m	1,75 m

Moyennant des épaisseurs non négligeables, il est possible de réaliser des fermetures résistantes. Des solutions mixtes, bois-métal, ou tout métal peuvent aussi être réalisées (à titre d'information, on peut signaler qu'on sait faire d'une manière courante des portes "anti-explosion" résistant de 0.34 à 1.52 bars, soit de 3 à 15 t/m², 30 à 150 kPa), mais il faut bien garder à l'esprit que ces ouvrages auront un poids non négligeable.

A l'opposé, on peut signaler que des persiennes courantes ou des volets roulants n'ont pas une résistance suffisante pour pouvoir être employés sur des façades exposées.

²¹ Ces éléments sont corroborés par les assurances suisses VKF-AEAI qui donnent le tableau suivant :

Dimensions du vitrage de sécurité en verre feuilleté	5 kPa (500 kg/m ²)	10 kPa (1 t/m ²)	30 kPa (3 t/m ²)
60 x 60 cm	2 x 5 mm	2 x 8 mm	2 x 19 mm
100 x 100 cm	2 x 8 mm	2 x 12 mm	
100 x 200 cm	2 x 12 mm	2 x 19 mm	

Ouvertures défilées

Une autre approche peut consister, au lieu d'augmenter les résistances, à s'efforcer de diminuer les sollicitations par une orientation judicieuse des ouvertures ou par la réalisation de murs d'aile. Cette approche a été souvent pratiquée, de nombreux exemples l'attestent. Par exemple, à Valloire où les entrées d'un immeuble sont ainsi protégées par un mur en épis très judicieux et qui a bien faillit servir en 2006 lors d'une crue du Rieu Benoît.

Photos 6.15, 6.16 : Valloire, "mur d'aile" protégeant une entrée près du Rieu Benoît



Source : Marc Givry



Source : Alain Delalune, le Rieu Benoît, 7/9/2006

Une interrogation toutefois demeure sur le secteur protégé par ce type de disposition : certes les crues et les laves s'écoulent globalement dans le sens de la pente, mais elles ont aussi tendance à pas mal divaguer, de la sorte l'implantation et le dimensionnement de ces éléments de protection méritent une réflexion attentive.

6.6 Second oeuvre

Ce paragraphe donne quelques recommandations concernant les éléments de second œuvre, la plupart situés à l'intérieur des constructions, ou à la limite intérieur/extérieur.

Ces recommandations sont assez proches des recommandations que l'on formule en général pour les zones inondables, la problématique pouvant être assez semblable. Comme nous l'avons déjà indiqué, il n'y a dans tout cela rien de bien compliqué : juste un peu de bon sens et de réflexion préliminaire.

Isolement des réseaux

Les réseaux électriques, téléphoniques ou d'assainissement, voire d'alimentation en eau potable qui proviennent du domaine public, sont posés dans des gaines qui sont autant d'entrées d'eau possibles en cas d'inondation. On recommande donc d'assurer l'étanchéité de toutes les pénétrations de réseau dans le bâtiment.

De même pour éviter une inondation par la remontée des eaux d'égout, on recommande de mettre en place un clapet anti-retour sur le raccordement à l'égout.

Pour tous les réseaux, on recommande que les organes de coupure et de manœuvre soient situés au-dessus de la cote inondable.

Electricité

Pour les réseaux électriques, on recommande :

- de veiller à mettre le tableau général au-dessus de la cote d'inondation, voire à l'étage
- de prévoir une séparation possible entre les parties "inondables" et le reste, pour permettre d'assurer le fonctionnement indépendant de la partie non inondée
- de veiller à ce que l'éclairage de sécurité puisse rester opérationnel (ce qui incite à employer des systèmes avec des blocs autonomes plutôt qu'avec une source centrale)
- de réaliser, dans la partie inondable, le réseau de gaine d'une manière descendante pour que l'eau ne reste pas dans les gaines après la crue

Chauffage, ventilation, installations techniques, dispositifs de sécurité

On recommande d'installer les équipements en dehors des parties inondables, éventuellement même dans les combles.

Ascenseur

On recommande pour les ascenseurs qui desservent des sous-sols ou des zones potentiellement inondables de prévoir un dispositif de capteur qui détecte l'accumulation d'eau et empêche la descente de l'ascenseur à ce niveau²². De même, il paraît judicieux d'installer les machineries en dehors des niveaux exposés.

Citernes, réservoirs

Il est obligatoire, même en intérieur, d'ancrer toutes les citernes et tous les réservoirs qui pourraient se soulever sous la poussée d'Archimède et causer des dégâts avec une grave pollution. Cet impératif fait d'ailleurs partie des règles techniques et de sécurité applicable aux stockages fixes d'hydrocarbures.

Choix des matériaux

On recommande dans le choix des matériaux et des revêtements de prévoir des produits si possible peu sensibles à l'eau. Par exemple, pour les sols, un carrelage sera moins vulnérable qu'un parquet ou une moquette, pour les cloisons des plaques de plâtre "hydrofuge" seront préférables, et pour les isolants, les isolants hydrophiles (laines de verre, de roche ou de bois, polystyrène expansé...) sont à éviter.

Photos 6.17, 6.18 : "Problèmes intérieurs", Bourg St Maurice, crue de l'Arbonne, 1996



Source : ONF-RTM 73



Source : ONF-RTM 73

²² Il y a des cas rapportés où des ascenseurs sont descendus et se sont ouverts dans un niveau inondé

7 RÉFLEXIONS D'URBANISME

Dans les chapitres précédents, nous avons abordé la question des risques torrentiels au niveau des constructions, chaque construction étant considérée plutôt d'une manière individuelle.

Pourtant, si on considère les quelques aperçus historiques que nous avons donné au début de l'ouvrage, il est évident que le risque torrentiel est un risque collectif.

En effet, d'une part en cas de crise ou de catastrophe, il est très rare qu'un seul bâtiment soit touché.

D'autre part, la gestion du risque, la police des eaux, les systèmes de protection ont presque toujours été mis en place sur une base collective.

Pour s'en convaincre, il suffit d'ailleurs de se référer à l'histoire du "droit de l'eau"²³. Les premières civilisations, l'Égypte ou la Mésopotamie, ont été des civilisations de la gestion de l'eau (et des crues). Et nous devons aux Romains les premiers éléments du droit de l'eau. Avec leur souci des définitions et des classifications, les Romains ont laissé des cadres dont nous nous servons encore. Pour eux, l'eau courante, la mer et l'air sont classés "choses communes" et ne peuvent être la propriété exclusive de personne. Les fleuves pouvant servir à la navigation sont rangés parmi les "choses publiques" et mis à la disposition de tous. Par contre les petites rivières, les torrents et les ruisseaux appartenaient aux riverains. Mais les Romains distinguaient le lit propriété du riverain, de l'eau courante qui n'est à personne.

Après, le droit féodal, le droit coutumier, la législation royale, la Révolution et le Code Civil donneront des règles pour la gestion des eaux, le but principal de cette gestion étant d'empêcher les inondations et de veiller à la bonne répartition de l'eau.

Pour ce qui concerne la "législation des torrents", on peut rappeler l'ouvrage de Surell, écrit en 1841, dont un chapitre complet traitait de la question et qui citait notamment un décret du 4 thermidor an VIII (23 juillet 1800) qui "*a rendu de grands services au département, parce qu'il a assujetti à une règle une foule d'ouvrages qui se construisaient autrefois au hasard et se nuisaient réciproquement*".

Aborder la question avec un regard collectif, et donner quelques réflexions d'urbanisme semble donc indispensable.

Document 7.1 : extrait de *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, Alexandre Surell, 1841

Législation des torrents (extraits)

Lorsqu'une rive d'une certaine étendue est ravagée par un torrent, les propriétaires se réunissent et constituent un syndicat. Une demande est adressée au préfet ; celui-ci commet un ingénieur des ponts et chaussées pour examiner le terrain, et, s'il y a lieu, pour dresser le projet des ouvrages propres à défendre la rive. Le travail s'exécute par voie d'adjudication ; l'ingénieur en surveille la construction et il en prononce la réception. Les frais sont ensuite répartis entre les intéressés, conformément à un rôle dressé par les syndics.

Toute cette marche est tracée par un décret spécial, qui soumet les torrents à un régime particulier et les place sous la surveillance immédiate de l'administration (Décret du 4 thermidor an VIII).

Ce décret a rendu de grands services au département, parce qu'il a assujetti à une règle une foule d'ouvrages qui se construisaient autrefois au hasard et se nuisaient réciproquement. S'il n'a pas donné tous les fruits qu'on devait espérer, il faut s'en prendre à l'esprit d'hostilité qui anime ordinairement les propriétaires des rives opposées. Cette malheureuse division les détourne de se réunir, pour faire en commun un encaissement complet : ce qui serait le seul moyen de rendre les défenses parfaitement inoffensives, et partant d'en tirer le plus grand avantage possible.

²³ On pourra à ce sujet se référer à "L'eau : usages et gestion", Guide pratique administration territoriale, de J.L. Gazzaniga, J.P. Ourliac, X. Larrouy-Castéra

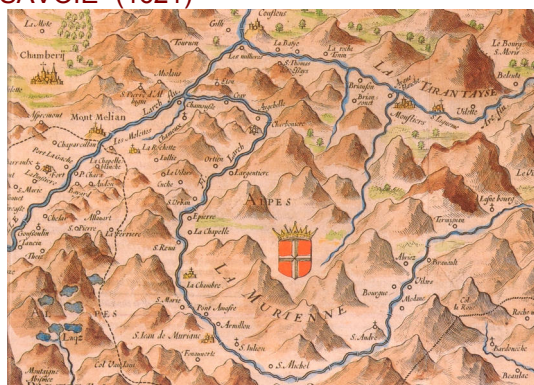
7.1 Composer avec les torrents

Il est très frappant lorsqu'on examine les premières cartes "modernes" réalisées à la Renaissance de constater que pour les pays de montagne l'hydrographie constituait toujours l'ossature générale de la carte.

Mais il est très frappant aussi, lorsque l'on examine nos plans d'occupation des sols, les "POS", qui sont devenus maintenant des plans locaux d'urbanisme, des "PLU" dans le poétique langage en vigueur, de constater que les cours d'eau et les torrents y sont fort peu perceptibles.

Ce fait est très marqué si on consulte maintenant une base de données cartographiques contemporaines structurée par couche : en allumant uniquement la couche "PLU", on a beaucoup de mal à sentir la présence d'un torrent. Et cette présence apparaît seulement dans la couche "PPR", plan de prévention des risques (si cette couche existe, ce qui n'est pas toujours le cas).

Figure 7.1 : "SABAUDIA DUCATUS LA SAVOIE" (1621)



"La Carte de Savoie" Musée Savoisien 1988

Figure 7.2 : "CARTA GENERALE DE STATI DI SUA ALTEZZA REALE" (1680)

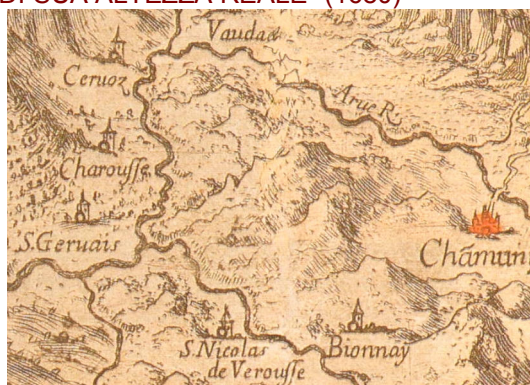
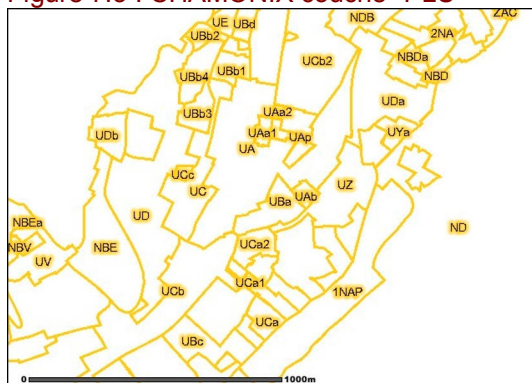
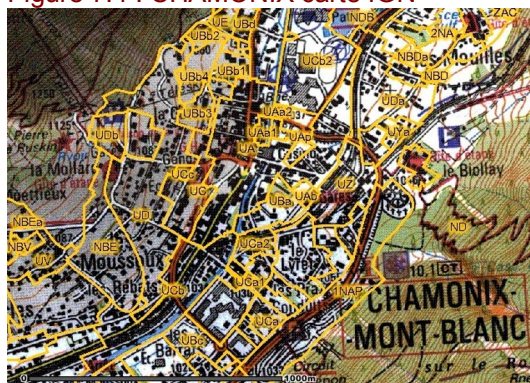


Figure 7.3 : CHAMONIX couche "PLU"



Géoportail des Savoies

Figure 7.4 : CHAMONIX carte IGN



De la sorte, l'eau qui était jadis l'ossature des cartes, et sans doute aussi la base de tout l'aménagement de l'espace, a disparu des plans d'urbanisme : ce n'est plus un élément structurant de la représentation, ni de la réflexion, tout au plus une nuisance ou un risque à prévenir.

Mais pour prendre en compte intelligemment le risque torrentiel dans les projets d'urbanisme, peut être faudrait-il changer de point de vue et se remettre à composer avec les torrents.

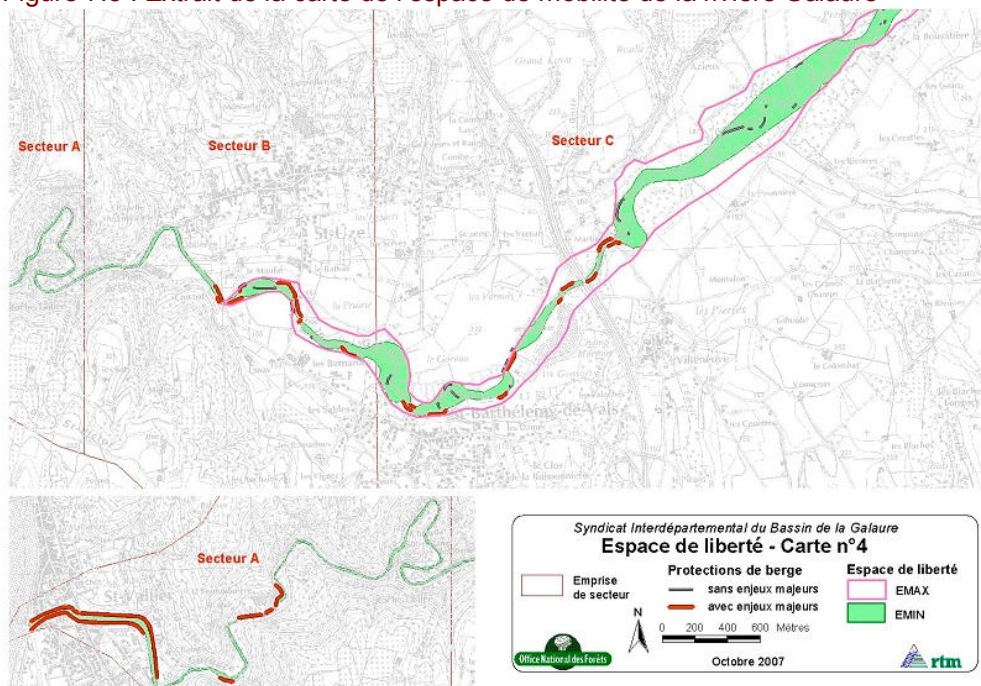
Bien sûr, le mot composer est à prendre dans son double sens : d'un côté, agencer, arranger ou disposer, mais aussi de l'autre, s'accorder, s'accommoder et s'entendre.

7.2 Assurer l'espace nécessaire

En France, on assiste depuis les années 1990 à une prise de conscience collective concernant l'impact des travaux d'aménagement engagés sur les cours d'eau, à partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle.

Cette prise de conscience a ouvert la voie à de nouveaux concepts de gestion : la préservation d'un espace de mobilité minimal. Ce concept s'appuie notamment sur la capacité des cours d'eau à réguler naturellement leurs excès et leurs déficits d'apports sédimentaires, la finalité visée étant l'atteinte d'un fonctionnement équilibré, compatible avec les différents enjeux et usages entourant le cours d'eau.

Figure 7.5 : Extrait de la carte de l'espace de mobilité de la rivière Galaure



Source : ONF-RTM38, 2008

Dans les PPR et dans les DDRM, les Dossiers Départementaux des Risques Majeurs, on trouve aussi des indications allant dans ce sens. Ces indications sont souvent reprises dans les règlements d'urbanisme sous la forme de "Prescriptions de mesures conservatoires le long des ruisseaux et torrents".

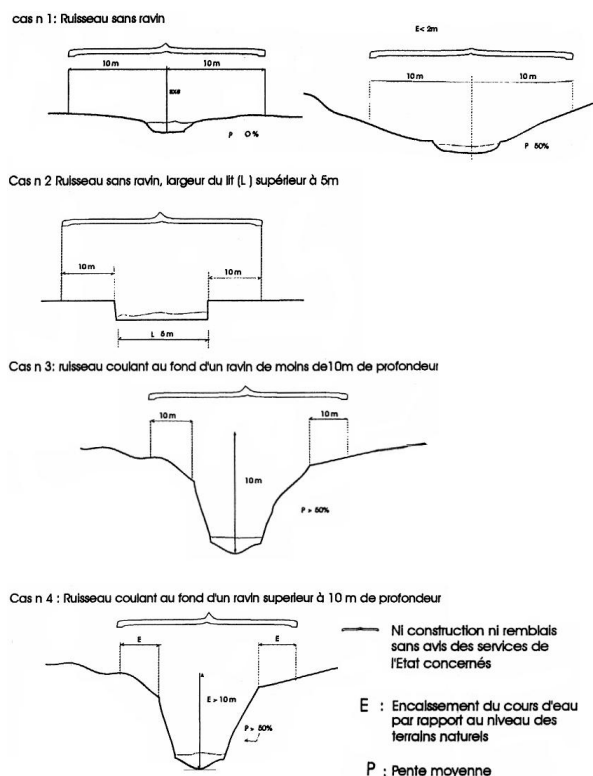
En général, on donne une bande d'environ 10 mètres à ménager depuis l'axe (pour un lit inférieur à 5m) ou depuis le bord du cours d'eau (pour un lit supérieur à 5m). Pour un cours d'eau avec un ravin supérieur à 10 m, la largeur à ménager est égale à la profondeur du ravin.

Dans cette bande, on ne doit réaliser ni construction, ni remblais sans avoir pris l'avis des services de l'Etat concernés.

En fait, cet ordre de grandeur de 10 m n'est pas un absolu. Dans certaines zones et certains règlements, on pourra prescrire un recul de 20 m du sommet de la berge, voire 60 m. Et 5 m est souvent un minimum pour permettre le passage des engins.

Ces valeurs ont surtout pour objectif de préserver l'accès aux torrents et de prévenir les risques liés à l'afouillement des berges, mais il faut bien être conscient que ces marges de recul ne sont pas une garantie absolue : dans beaucoup d'exemples, nous avons pu voir que les débordements d'un torrent pouvaient aller bien au delà d'une bande de 10, de 20 ou même de 60 mètres.

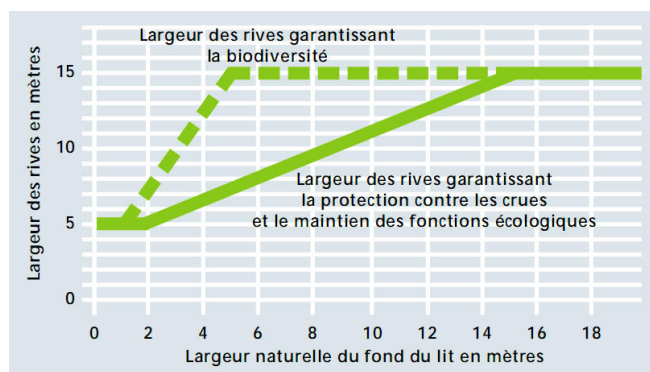
Figure 7.6 : Prescriptions de mesures conservatoires le long des ruisseaux et torrents
Annexe du PLU de Divonne



En Suisse, ces préoccupations sont aussi de mise. En 2001, l'OFEG, l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie suisse, a publié une directive intitulée *Protection contre les crues des cours d'eau*. Dans cette directive, on trouve au titre de la stratégie contre les crues, le principe suivant : "**Assurer l'espace nécessaire.** Un ruisseau doit être plus qu'un caniveau d'écoulement, une rivière plus qu'un canal. Pour cette raison, l'utilisation du sol doit respecter une distance suffisante au cours d'eau. Les cantons sont tenus de fixer l'espace nécessaire aux cours d'eau, de l'inscrire dans les plans directeurs et les plans d'affectation, et d'en tenir compte dans toutes les activités ayant un effet sur l'organisation du territoire."

Et pour appuyer ce principe, la directive donne une courbe de référence qui indique des largeurs de rives à prévoir de 5 à 15 m.

Document 7.2 : extrait de *Protection contre les crues des cours d'eau*, OFEG 2001



Courbe de référence: la largeur naturelle du fond du lit est une donnée déterminante pour définir l'espace nécessaire aux cours d'eau.

Elle permet de déduire la largeur minimale de la zone riveraine recommandée : elle est de 5 mètres au minimum même pour de petits ruisseaux. A partir de 15 mètres de largeur, une zone riveraine peut fonctionner en tant que biotope indépendant.

Pour les petits cours d'eau, il est particulièrement important de fixer une large zone riveraine (vert strié), ceci afin de favoriser la diversité biologique, diversité naturelle de la végétation et de la faune, le long du cours d'eau.

7.3 Implantation et type des constructions

Du point de vue de l'implantation des constructions, on trouve souvent dans les règlements des indications de ce type :

- le coefficient d'emprise au sol des constructions, remblais ou autres dépôts devra rester inférieur à 20% de la surface du terrain
- en suivant la direction générale du lit, les constructions devront être alignées (afin d'être abritée par le bâtiment amont) et préserver au moins 50 % de la largeur pour l'écoulement

Ces indications ont surtout pour objectif de maintenir le libre écoulement des eaux en cas de crues, ce qui est tout à fait légitime. On peut toutefois s'interroger sur l'effet d'un coefficient d'emprise au sol limité à 0,2 : un tel coefficient est assez faible et il pousse à la réalisation de zones pavillonnaires, des zones de très faibles densités qui sont grosses consommatrices d'espace, et qui au final deviennent de grands facteurs de risque, surtout en montagne où l'espace devient particulièrement rare et convoité.

Mais plutôt que de transformer les montagnes en un immense lotissement généralisé, "typique" de surcroît, peut être faudrait-il revenir à un peu de sagesse et s'orienter vers d'autres démarches. Deux photos, toutes les deux prises en 2005, peuvent illustrer le propos. Dans la première, prise au Tyrol lors des inondations catastrophiques de cette année là, des constructions collectives, groupés d'un seul côté d'un torrent, et se protégeant mutuellement, ont laissé libre la rive opposée qui a pu servir d'exutoire à la crue sans dommage pour les constructions (dans ce type de fonctionnement on parle parfois de "parcours à moindre dommage").

Photo 7.1 : Inondation au Tyrol, 2005



Source : Siegfried Sauermoser

Dans la seconde, prise la même année à Brienz en Suisse, des laves torrentielles ont envahi largement un lotissement bien implanté sur le cône de déjection d'un torrent où chacun devait sans doute se sentir "bien, chacun chez soi". Rétrospectivement, et si on jette un coup d'œil au bassin versant du torrent, ces laves apparaissent comme un risque inévitable et récurrent.. La collectivité a envisagé des travaux de protection à hauteur de 18 millions de francs suisses pour que chacun puisse continuer à se sentir bien, chacun chez soi... Des enseignements ont également été tirés : la majorité des bâtiments détruits à proximité du torrent ne seront pas reconstruits pour laisser plus de place à disposition du cours d'eau.

Photo 7.2, 7.3, 7.4 : Laves torrentielles, Brienz, Suisse 2005



Source : aviation militaire suisse

7.4 Forme préférentielle des constructions

Si on s'interroge sur la forme préférentielle à donner à des constructions en zone torrentielle et qu'on examine des photos aériennes prises en situation de crise, deux types de situation apparaissent assez souvent nettement.

Photos 7.5, 7.6 : Inondation au Tyrol, 2005



Source : Siegfried Sauermoser

Dans la photo de gauche, on se trouve dans des terrains peu pentus et en situation de crue assez liquide : dans ces cas là, il n'y a pas de forme préférentielle qui semble se dessiner : quelle que soit la forme et l'orientation des bâtiments, toutes les façades sont noyées, et mis à part des constructions sur pilotis, on ne voit pas trop quelle forme préconiser pour minimiser le risque.

Dans la photo de droite, on se trouve dans des terrains plus pentus et avec du transport solide (charriage, lave torrentielle) : dans ces situations, il y a manifestement des orientations, des tailles de bâtiments et des formes à privilégier. Avec de la pente, immédiatement se pose la différence entre l'aval et l'amont, et des formes bien orientées, éventuellement en V ou en U, deviennent plus favorables. De même, il existe un facteur de taille : les bâtiments collectifs, plus larges, jouent souvent un rôle d'écran et leur façade aval est souvent plus à l'abri.

Depuis toujours d'ailleurs en montagne, l'amont protège l'aval. Cela est vrai pour le risque d'avalanche, cela l'est aussi pour le risque torrentiel. Pour s'en persuader, il suffit de se rappeler la catastrophe des thermes de Saint-Gervais en 1892, où malgré le pire impact que des bâtiments aient jamais dû subir, les deux bâtiments aval sont restés intacts : ils étaient sans doute plus récents et mieux construits, mais ils ont dû aussi bénéficier de l'effet "bouclier" des bâtiments amont.

Un effet bouclier qui faisait partie de la pratique courante des constructions en montagne, qui se groupaient et se regroupaient dans les hameaux et les villages, un effet qui se dilue et se perd maintenant dans le lotissement généralisé qui est devenu la forme d'aménagement dominante, chacun voulant dorénavant une liberté totale (assortie bien sûr d'une sécurité absolue)²⁴.

A ce sujet, un géologue lucide, spécialiste de risques naturels, indiquait que "le tank était sans doute la bonne réponse pour répondre aux aspirations à la sécurité absolue et à la liberté individuelle la plus totale. De la sorte, faire de l'urbanisme reviendrait à gérer des colonnes blindées (amphibies et submersibles bien sûr dans les zones à risques torrentiels ...)".

²⁴ En son temps, l'architecte Denys Pradelle, fondateur de l'Atelier d'Architecture en Montagne, et membre de ce qu'on a appelé "l'Ecole de Courchevel", avait déjà pointé ce phénomène d'individualisation à outrance en montagne et il l'expliquait par la problématique de l'eau en expliquant que "le tuyau tuerait le village" : il est certain que dans le temps, en absence d'adduction d'eau, il y avait une nécessité absolue à se trouver à proximité d'un point d'eau ou d'une fontaine, et donc à se regrouper en hameau et village.

Dans le choix des formes et des implantations, il faut aussi garder à l'esprit qu'un écoulement est rarement linéaire et qu'une divagation importante est toujours à envisager.

Photo 7.7 : Forme en U



Source : ONF-RTM

Photo 7.8 : Isola 1957, divagation



Source : ONF-RTM 06

7.5 Impact des ponts

Au sujet de la divagation des torrents, on doit aussi rappeler l'importance des ponts dont l'obstruction par embâcle déclenche bien souvent un point de débordement important. Dans les "fiches pédagogiques" de la Société Géologique et Minière du Briançonnais, on trouve d'ailleurs deux questions très pertinentes pour la problématique.

Lors de la mise au point des plans d'urbanisme, il serait sans doute judicieux de s'interroger sur la position des ponts dans les zones de risque torrentiel : certes, ils doivent être implantés en fonction des impératifs de la communication, mais on devrait aussi intégrer le risque de "point d'arrêt" des écoulements qu'ils peuvent constituer et s'efforcer de les implanter judicieusement pour minimiser l'impact des débordements induits.

Document 7.3 : extrait de *Le risque torrentiel - fiches pédagogiques*, SGMB janvier 2003



Cette photo indique les trajectoires empruntées par le torrent du Bez pendant la crue du 24 juillet 1995.

Questions :

1. recherchez dans ce document des éléments montrant le rôle des ponts lors des inondations
2. comment expliquez-vous ces relations entre ponts et inondations ?

7.6 Éléments de synthèse

Pour illustrer d'une manière synthétique les notions développées précédemment, on peut reprendre une photo aérienne que nous avons déjà vue dans la partie historique : il s'agit de la photo aérienne de Ville-Vieille prise pendant la grande crue de 1957.

Photos 7.9: Ville-Vieille, 1957



Source : archives départementales 05 (fond Henri Vincent)

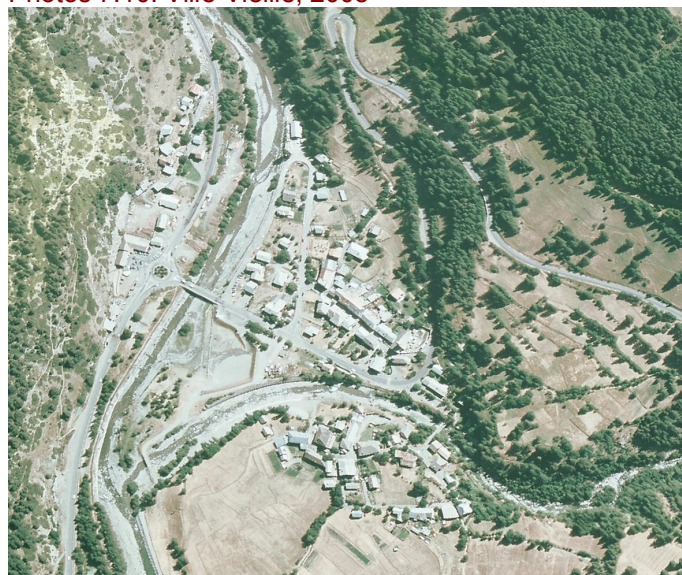
Ville-Vieille se trouve à la confluence de deux torrents, l'Aigue-Blanche et le Guil, qui tous les deux ont débordés en 1957. Cette photo aérienne prise juste après la crue illustre parfaitement les thèmes développés précédemment :

- une implantation des bâtiments qui assure l'espace nécessaire à l'écoulement des fortes crues des torrents
- des constructions collectives groupées, judicieusement implantées et se protégeant mutuellement

En 1957, ces dispositions semblent avoir correctement fonctionné : elles étaient sans doute le fruit de l'observation des catastrophes du passé et d'une expérience accumulée.

Mais si on analyse maintenant une nouvelle photo aérienne prise en 2005, on peut voir que l'espace de liberté du torrent a été fortement contraint par les aménagements réalisés et que la construction de nombreux bâtiments dans la plaine a conduit à une augmentation sensible de la vulnérabilité...

Photos 7.10: Ville-Vieille, 2005



Source : IGN 2005

Document 7.4 : extrait de *Attention, dangers naturels*, Berne 1999

Ces semaines critiques nous ont rappelé, une fois de plus, que les débordements des forces naturelles peuvent être une source de dangers considérables. Ces dangers, nous devons vivre avec aujourd'hui, demain, après-demain. Malgré les efforts accomplis pendant des décennies et des investissements se chiffrant en millions, il n'existe pas de protection totale contre les dangers naturels. Cette prise de conscience a scellé le sort de la culture de la sécurité qui prospérait aux alentours des torrents aménagés et des rivières endiguées : la valeur des biens menacés augmente bien trop vite pour que l'on puisse faire face aux dangers existants uniquement par des mesures de protection active supplémentaires. Sur le plan économique, on ne peut de toute façon plus admettre de laisser se développer la valeur des biens matériels dans les zones menacées pour ensuite devoir les protéger grâce à des mesures financées par l'argent des contribuables.

Elisabeth Zölch-Balmer
Direction de l'économie
publique

Dori Schaer-Born
Direction des travaux publics,
des transports et de l'énergie

Werner Luginbühl
Direction de la justice,
des affaires communales et
des affaires ecclésiastiques

La protection technique contre les risques a des limites. Dès que des rivières bouillonnantes déracinent des arbres ou que des fleuves tumultueux inondent de larges portions de territoire, dès que la montagne n'attend plus que l'on vienne à elle mais vient à nous, la nature montre ce qu'elle recèle : des forces titanesques auxquelles beaucoup d'ouvrages humains sont exposés sans protection. Depuis la nuit des temps, les hommes tentent de dompter les forces déchaînées de la nature. Mais ces efforts restaient généralement isolés, sans s'inscrire dans une stratégie d'ensemble.

Une législation d'avant-garde

Les choses n'ont commencé à changer qu'au milieu du 19^e siècle. Après une série de crues dévastatrices, la responsabilité de la Confédération a été engagée. Cela s'est traduit par l'adoption immédiate des lois fédérales de 1876 et 1902 sur les forêts et de la loi fédérale de 1877 sur l'aménagement des eaux. C'est sur ces bases, et avec l'appui des dispositions d'exécution cantonales, que les pouvoirs publics ont entrepris de grands travaux pour dompter les dangers naturels : des forêts ont été plantées, des pentes avalancheuses ont été équipées, des torrents ont été stabilisés, des rivières ont été endiguées, des parois rocheuses ont été sécurisées.

De la protection contre les risques...

L'efficacité de cette démarche est indubitable. Les mesures de protection actives prises dans le canton de Berne, comme ailleurs en Suisse, n'ont pas seulement eu une influence sur le développement économique de nombreuses régions ; sans elles, ce développement n'aurait tout simplement pas été possible. C'est pourquoi cette démarche conserve sa raison d'être. Mais les priorités doivent être revues. Même si l'entretien des forêts protectrices existantes et le reboisement de zones critiques restent des mesures relativement économiques pour se prémunir contre les dangers naturels, la construction d'ouvrages de protection se heurte aujourd'hui à des limites de plusieurs ordres :

- Limites techniques : des équipements même coûteux ne pourront jamais fournir une protection totale contre les dangers naturels.

- Limites écologiques : les constructions constituent des atteintes à la nature qui sont souvent en contradiction avec la démarche aujourd'hui largement répandue consistant à porter le moins d'atteintes possible aux paysages naturels ou proches du naturel.

- Limites économiques : compte tenu de la situation financière difficile de la Confédération, du canton de Berne et de beaucoup de communes, on ne peut plus s'engager dans l'étude et la réalisation mais aussi dans l'entretien d'ouvrages de protection coûteux.

- Limites de l'efficacité : la protection assurée par les digues et autres aménagements a nourri en bien des endroits une préoccupante culture de la sécurité. Le sentiment d'être armé contre tous les dangers naturels grâce à des mesures techniques se traduit par une augmentation de la valeur des biens situés aux abords immédiats des zones de danger. A son tour, cette concentration de biens fait augmenter les exigences de sécurité.

...à la culture de la prise de risques

Même si l'on ne peut pas assurer une protection totale, il n'en reste pas moins que les autorités cantonales et communales sont responsables de la sécurité de la population. Pour sortir de ce dilemme manifeste, une seule issue : la protection contre les dangers naturels ne suffit plus, il faut aussi intégrer dans notre réflexion l'acceptation et l'acceptabilité de certains risques. C'est ainsi que deux questions viennent au premier plan : quelle protection peut-on obtenir à quel prix et quelle est l'ampleur du risque résiduel que nous sommes obligés d'accepter ?

La sécurité la plus économique consiste à ne pas s'exposer aux dangers naturels afin de ne pas courir de risques. Ce principe n'a rien de nouveau. Nos ancêtres l'ont suivi, ne serait-ce que par nécessité : ils n'avaient généralement pas d'autre possibilité que de se plier au diktat de la nature.

Et voici qu'à l'aube du prochain millénaire, cette très ancienne stratégie d'adaptation retrouve un sens puisque les mesures techniques seules ne peuvent plus répondre aux exigences croissantes de sécurité : il faut revenir à une plus grande subordination des affectations aux conditions naturelles, et non pas le contraire.

8 CONCLUSION

Au début du XXI^e siècle, pour construire en montagne et faire face aux risques torrentiels, on peut comme par le passé invoquer les Dieux, les Saints ou rêver de "l'extinction des torrents".

Mais on peut aussi tirer parti de l'expérience accumulée et des connaissances qui petit à petit se sont établies, expérience et connaissances que l'on peut brièvement résumer ici.

Tout d'abord, on doit signaler que le risque torrentiel, qui a été de tout temps le risque majeur en pays de montagne, est un risque prévisible que l'on peut cartographier et que l'on est maintenant capable d'étudier. Pour un torrent donné, on sait dire qu'il n'est pas improbable que sur une période de 30 ans, on puisse avoir une coulée de tant de milliers de m³, dont l'extension aura telles limites.

En revanche, on ne sait pas encore dire que cette coulée aura lieu demain dans la matinée, ou après demain en soirée.

Par ailleurs la faible densité des réseaux de suivi hydro-météorologique en montagne rend quasiment impossible la mise en place d'un dispositif d'alerte efficace permettant la mise en sécurité préalable des populations. De plus, cette situation est notablement compliquée par le caractère brutal et rapide des phénomènes torrentiels. Il s'agit donc d'un risque pour lequel toute prévision en temps réel n'est pour l'instant pas possible.

Ne sachant pas prévoir, il faut donc prévenir.

Au XIX^e siècle, on a pensé que l'on pourrait régler le problème "à la source" par des travaux de correction adéquats et une œuvre considérable a été réalisée. Mais à la fin du XX^e siècle on s'est rendu compte que même avec des travaux colossaux on ne pourrait pas faire face par des protections collectives à toutes les situations.

Cette prise de conscience a été générale dans tout l'arc alpin. De surcroît, et vu le réchauffement climatique en cours, beaucoup pensent qu'une évolution de la pluviométrie et du régime des crues des bassins versants de montagne est inévitable, cette évolution pouvant se traduire par une aggravation des crues hivernales et des crues de fonte au printemps, de même que par une mobilisation accrue des matières solides en haute montagne, notamment sous l'effet du recul des glaciers et du dégel du permafrost (sols gelés). Ce guide contribue donc à une nécessaire adaptation au changement climatique.

Pour l'instant toutefois, les éléments de connaissance disponibles ne remettent pas en cause les ordres de grandeur des phénomènes à prendre en compte mais surtout les fréquences d'apparition.

L'extension indéfinie des zones constructibles sans prise en compte des risques, la collectivité étant chargée ultérieurement des travaux de protection nécessaire, n'est donc plus à l'ordre du jour.

Pour toute démarche d'urbanisme en montagne, il faudra donc réapprendre à vivre et à composer avec les torrents, en gardant toutefois à l'esprit que :

1. toujours, les torrents ont débordé et déborderont
2. jamais, les hommes n'ont abandonné et n'abandonneront certains sites qu'ils occupent depuis bien longtemps

Dans ces conditions se préoccuper de la résistance des constructions, face à un risque qui est quand même peu fréquent est une démarche qui reste pertinente.

Grâce aux catastrophes passées et surtout aux "retours d'expérience" dont les services ONF-RTM sont depuis plus d'un siècle la mémoire, l'impact des torrents sur les constructions peut être correctement apprécié en termes qualitatifs, on pourrait presque dire en termes "naturalistes".

Par contre, une quantification précise des efforts à prendre en compte n'est pas encore établie et pour l'instant on ne dispose pas de normes ou de règles de calcul faisant autorité sur la question, comme il peut en exister par exemple pour les séismes à l'échelle européenne dans le cadre des "Eurocodes".

Pour ce qui concerne la quantification des sollicitations, il semble que la démarche la plus avancée soit celle des établissements cantonaux d'assurances suisses, à laquelle on peut conseiller de se référer.

Pour ce qui concerne les réponses constructives envisageables, on dispose d'une large palette de solutions avec les techniques habituelles des ouvrages de bâtiment. On peut toutefois signaler que si le problème de la résistance des murs pleins est assez facile à régler, le problème des ouvertures est plus délicat. D'autre part, le problème des fondations doit être étudié avec soin, l'affouillement des fondations étant presque toujours la cause des destructions constatées.

Si pour des ouvrages neufs, on dispose de réponses constructives adaptées, le renforcement des bâtiments existants reste encore un réel problème.

Dans tous les cas, par delà les aspects réglementaires ou normatifs, la réponse aux risques torrentiels n'implique pas des démarches de conception compliquées : pour un constructeur normalement compétent, une bonne appréhension du risque et un peu de bon sens peuvent largement suffire. Dans cette optique, on ne peut que conseiller de travailler en envisageant tous les "scénarios de danger" possibles.

L'histoire tumultueuse des hommes et des torrents n'est sans doute pas encore terminée, mais nous ne voulons pas clore cet ouvrage sur une tonalité qui serait par trop négative.

Les torrents, risques, dangers ou fléaux, certes.

Mais aussi mythe, et mythe quasiment homérique.

En effet, il faut rappeler qu'Homère, avant de s'appeler Homère s'appelait Méléstigène (engendré par Mélès).

C'était en effet le fils de Mélès, le dieu du torrent, et de la nymphe Krithéis.



*Homère trônant, la main droite soutenant sa tête, la gauche tenant un manuscrit roulé, et derrière lui un sceptre oblique.
Pièce en bronze de Smyrne, env. 95-85 av. J.-C. – Fondation de la fédération universitaire, SNG Tübingen 3178.*



*Krithéis, la mère d'Homère, debout, tient dans la main droite un voile, telle une fiancée,
et dans la main gauche, une tige de roseau.
Pièce en bronze de Cumae, env. 193-211 apr. J.-C. – donation variée d'Hildebrecht Hommel, SNG Tübingen 2704*

ADRESSES ET SITES UTILES

- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
92055 La Défense cedex.
www.developpement-durable.gouv.fr
- Portail officiel de la prévention des risques majeurs : www.prim.net
Une introduction et des dossiers d'information complets, ainsi qu'un annuaire des sites relatif aux différents risques
- Cemagref, unité de recherche érosion torrentielle, neige et avalanches
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex.
www.grenoble.cemagref.fr
- Office National des Forêts - Services de Restauration des Terrains en Montagne :
Direction Technique RTM : Hôtel des administrations, 9 quai Créqui 38000 Grenoble.
www.onf.fr

SIGLES

AD	Archives départementales
CEMAGREF	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CES	Coefficient d'emprise au sol
DDRM	Dossier départemental des risques majeurs
DR	Droits réservés
DTU	Document technique unifié
ELS	Etat limite de service
ELU	Etat limite ultime
IRMa	Institut des risques majeurs de Grenoble
OFEV	Office fédéral suisse de l'environnement (anciennement OFEG)
ONF	Office national des forêts
PCS	Plan communal de sauvegarde
PER	Plan d'exposition aux risques
POS	Plan d'occupation des sols
PLU	Plan local d'urbanisme (remplace les POS)
PPR	Plans de prévention des risques naturels prévisibles (a remplacé les PER)
RTM	Restauration des terrains en montagne
SETRA	Service d'études techniques des routes et autoroutes
SGMB	Société géologique et minière du briançonnais
VKF-AEAI	Etablissements cantonaux d'assurance suisse

GLOSSAIRE

Affouillement : action de surcreusement vertical ou latéral des eaux.

Aléa : phénomène potentiellement destructeur caractérisé par sa probabilité d'occurrence et son intensité.

Alluvionnements, dépôts alluviaux, sédimentation : dépôts de sédiments transportés par le cours d'eau, préférentiellement dans les zones de diminution de pente.

Charriage : transport sur le fond de sédiments.

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.

Divagation : déplacements latéraux de la position du lit (ou de lits multiples) d'un cours d'eau.

Lave torrentielle : écoulement d'un mélange homogène d'eau et de matériaux à forte concentration solide, se formant typiquement dans les torrents.

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.

Pression hydrostatique : pour un fluide au repos, pression due au poids de la colonne d'eau située au-dessus du point considéré.

Transport solide : phénomène d'entraînement et de transport de matériaux solides par un écoulement liquide d'intensité suffisante.

BIBLIOGRAPHIE

Etude sur les torrents des Hautes-Alpes

Alexandre Surell – 1841

L'extinction des torrents en France par le reboisement

Prosper Demontzey – 1894

Les torrents de la Savoie

Paul Mougin – 1914

Éléments d'hydraulique torrentielle

Maurice Meunier, Cemagref – 1992

Conception et calcul de barrages de correction torrentielle

Christian Deymier, Jean-Marc Tacnet, Nicole Mathys, Cemagref – 1995

Les laves torrentielles : connaissances à usage du praticien

Philippe Coussot, Cemagref – 1996

Le risque torrentiel – fiches pédagogiques

SGMB – 2003

Restaurer la montagne – Photographies des eaux et forêts du XIX^e siècle

Museon Arlaten – 2004

Recommandation – Aménagement du territoire et dangers naturels

OFEV – 2005

Recommandations pour la protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels

Thomas Egli – Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, Berne – 2005

Les risques naturels – de la connaissance pratique à la gestion administrative

Liliane Besson – Editions Techni.Cités – 2005

Montagne maudite, montagne appriivoisée

Jean-Marie Jeudy – La Fontaine de Siloé – 2006

Guide technique – Cours d'eau et ponts

SETRA – 2007

Guide PPR - Risques d'inondation – Crues des torrents de montagne

MEEDDAT – à paraître

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Photographies

Photo 0.1 : Torrent "délicieux", début du XXI°	7
Photo 0.2 : Orage et crue torrentielle dans l'Oberland. Gravure sur cuivre du XIX°	7
Photos 0.3, 0.4 : Saint Marc et Saint Claude à Sollières-Sardières	8
Photo 0.5 : Restaurer la montagne - Photographies des Eaux et Forêts du XIX°	10
Photo 1.1 : Pierre gravée, Musée d'Aime	13
Photo 1.2 : Plaque de rue à Beaucroissant	14
Photo 1.3 : Utilisation de caissons en bois pour un barrage en torrent	15
Photo 1.4 : Vallée de Chamonix, le torrent de la Griaz en 2007	18
Photos 1.5, 1.6 : La disparition du hameau de Champet	22
Photos 1.7, 1.8 : Glacier de Tête Rousse et vallée du torrent de Bionnassay	22
Photos 1.9, 1.10 : L'établissement thermal de Saint-Gervais, avant-après	23
Photos 1.11, 1.12 : La catastrophe de Voiron	23
Photos 1.13, 1.14 : Modane, crue du Saint Antoine de 1987	24
Photo 1.15 : Le Manival	25
Photo 1.16 : L'église de Salau, avant et après la crue de 1982	26
Photo 1.17 : Salau, crue de 1982	26
Photo 1.18, 1.19 : L'aiguat de 1940, dégâts à Néfiach	27
Photos 1.20, 1.21 : 1957, crue de l'Arc	28
Photos 1.22, 1.23 : crue de l'Arc, destruction de maisons à Lanslevillard	29
Photos 1.24, 1.25 : 1957-2007, Lanslevillard presque au même endroit l'Office du Tourisme	29
Photos 1.26, 1.27, 1.28 : 1957, mission aérienne, Ceillac, Ville-Vieille, Mont-Dauphin	30
Photos 1.29, 1.30 : Pontamafrey, le dégagement de la voie ferrée en 1965, le pont levant en 2007	31
Photos 1.31, 1.32 : Brigue-Glis, inondation de 1993 et nouveau pont soulevant	31
Photos 1.33, 1.34 : 1996, Bourg-Saint-Maurice, la crue de l'Arbonne	32
Photo 1.35 : 1998, le bloc du Boscodon	32
Photos 1.36, 1.37 : 1892, la catastrophe de Saint-Gervais	32
Photos 1.38, 1.39 : les Contamines-Montjoie, Armancette 2005 et 1964	33
Photo 2.1 : Bassin versant d'un torrent - Loudenvielle	37
Photo 2.2 : Dépôts de charriage	39
Photo 2.3 : Bouffée d'une lave torrentielle	40
Photo 2.4 : Bourrelet latéral typique	40
Photo 2.5 : Accumulation de bois dans un lit torrentiel à la suite d'une avalanche – Saint Paul en Ubaye	42
Photo 2.6 : Divagation d'une rivière torrentielle	42
Photos 2.7 : Formation d'embâcles au droit d'un pont	42
Photo 2.8 : Etalement d'une coulée de lave torrentielle - Bourg-Saint-Maurice	43
Photo 2.9 : Divagations et alluvionnements d'un torrent – La Salle les Alpes	43
Photo 2.10 : Ravinement intense sur un versant – Saint Geoire en Valdaine	43
Photo 2.11 : Capacité érosive d'écoulements torrentiels déchargés de leur composante solide	43
Photo 2.12 : Correction de versant à l'aide de banquettes grillagées – La Motte du Caire	44
Photo 2.13 : Correction de ravines à l'aide de palissades et de boutures - Draix	44
Photo 2.14 : Correction de ravins à l'aide de seuils en bois – Le Monetier les Bains	44
Photo 2.15 : Barrage en maçonnerie – Villeneuve d'Entraunes	44
Photo 2.16 : Barrages en enrochements - Embrun	44
Photo 2.17 : Tunnel de dérivation - Guillestre	44
Photo 2.18 : Epis plongeant – Saint Barthélemy de Vals	45
Photo 2.19 : Plage de dépôt - Verdun sur Ariège	45
Photo 2.20 : Plage de dépôt - Saint Martin la Porte	45
Photo 2.21 : Opération de curage - Tréminis	45
Photo 2.22 : Piège à flottants - Eaux Bonnes	45
Photo 2.23 : Détecteur de lave torrentielle	45
Photo 2.24 : Endiguement d'une rivière torrentielle - Soulom	45
Photo 2.25 : Digue de déviation de coulée de lave torrentielle – Loudenvielle	45
Photo 2.26 : Canalisations d'un torrent - Bielle	45
Photo 3.1 : Divagation et alluvionnement incontrôlés d'un torrent - Ceillac	51
Photo 3.2 : Dégâts provoqués par la crue d'une rivière torrentielle en août 2005 (Autriche)	51
Photos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 : Dépôt sédimentaire	61

Photos 4.5, 4.6 : Affouillements.....	62
Photos 4.7, 4.8, 4.9 : Vulnérabilité des angles des bâtiments en maçonnerie	62
Photos 4.10, 4.11 : Résistance des murs.....	63
Photos 4.12, 4.13, 4.14, 4.15: Impact de flottants	63
Photos 4.16 : Destruction de murs par impact de blocs	64
Photos 4.17, 4.18 : Attaque des ouvertures.....	64
Photos 4.19, 4.20 : Destruction des ouvertures	64
Photos 4.21, 4.22, 4.23 : Envahissement d'une construction.....	65
Photo 6.1 : Inondation au Tyrol, 2005	90
Photo 6.2 : Inondation au Tyrol, 2005	92
Photo 6.3 : St Martin d'Uriage, 2005	92
Photos 6.4, 6.5: Amérique latine, affouillement partiel et longrines résistantes.....	93
Photos 6.6, 6.7 : Saint Lary 1982, affouillement de la patinoire	95
Photo 6.8 : Val d'Aoste 2000, endommagement d'un angle.....	96
Photo 6.9 : Val d'Aoste 2000, destruction des réseaux	97
Photo 6.10 : Saint-Lary 1982, dégâts à la piscine	97
Photo 6.11 : Vaulnaveys-le-Haut, 2005	97
Photo 6.12 : Morzine ouvrages en bois.....	98
Photo 6.13 : Rideau de palplanches en acier	98
Photo 6.14 : Inondation au Tyrol, 2005	100
Photos 6.15, 6.16 : Valloire, "mur d'aile" protégeant une entrée près du Rieu Benoît	102
Photos 6.17, 6.18 : "Problèmes intérieurs", Bourg St Maurice, crue de l'Arbonne, 1996	103
Photo 7.1 : Inondation au Tyrol, 2005	109
Photo 7.2, 7.3, 7.4 : Laves torrentielles, Brienz, Suisse 2005	109
Photos 7.5, 7.6 : Inondation au Tyrol, 2005.....	110
Photo 7.7 : Forme en U.....	111
Photo 7.8 : Isola 1957, divagation.....	111
Photos 7.9: Ville-Vieille, 1957	112
Photos 7.10: Ville-Vieille, 2005.....	112

Documents

Document 0.1 : extrait de <i>Montagne maudite, montagne apprivoisée</i> de Jean-Marie Jeudy	9
Document 0.2 : extrait de <i>Restaurer la montagne</i> , Museon Arlaten, 2004.....	11
Document 1.1 : extrait de <i>Recueil raisonné des inscriptions latines des Musées d'Aime et des Alpes Grées</i> ..	13
Document 1.2 : extrait de <i>Les Quatre Livres De l'Architecture</i> , Andrea Palladio.....	16
Document 1.3 : extrait de <i>Lave du 13 août 1876 dans le torrent de Faucon</i>	17
Document 1.4 : extrait de <i>Récit d'une excursion de l'Impératrice Marie-Louise aux glaciers de Savoie</i>	18
Document 1.5 : extrait de <i>Étude sur les torrents des Hautes-Alpes</i> , Alexandre Surell, 1841	19
Document 1.6 : extrait de <i>Rapport du commandant Itier, de la Place d'Armes de Briançon</i>	20
Document 1.7 : extrait de <i>Procès verbal de Gendarmerie du 29 juin 1875</i>	21
Document 1.8 : extrait de <i>Le Manival – Etude de cône de déjection</i> , Ernest Bénévent, 1915	25
Document 1.9 : extrait de <i>Huit siècles d'histoire à Salau</i> , Geneviève Durand-Sendrail, 1992	26
Document 1.10 : extrait de <i>ceillac.com</i> , rubrique "Articles de presse"	30
Document 1.11 : extrait du <i>Bulletin municipal des Contamines-Montjoie</i> , août 2007	34
Document 2.1 : <i>Correspondance entre cours d'eau, transports solides et types de crues</i>	38
Document 2.2 : « Influence du profil en long d'après Bezzola (1996) »	39
Document 3.1 : PPR d'Ancizan - Plan de zonage réglementaire.....	48
Document 3.2 : PPR d'Ancizan – Description des zones.....	49
Document 3.3 : « Événements dommageables recensés relatifs au torrent des Moulines ».....	54
Document 3.4 : « Illustration de la grille d'intensité du phénomène torrentiel »	55
Document 5.1 : extrait de <i>Conception et calcul de barrages de correction torrentielle</i> , Cemagref.....	71
Document 5.2 : extrait de <i>Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels</i> , VKF-AEAI... 87	
Document 6.1 : extrait de <i>prim.net</i> , rubrique "Comment anticiper ?".....	92
Document 7.1 : extrait de <i>Étude sur les torrents des Hautes-Alpes</i> , Alexandre Surell, 1841	105
Document 7.2 : extrait de <i>Protection contre les crues des cours d'eau</i> , OFEG 2001	108
Document 7.3 : extrait de <i>Le risque torrentiel - fiches pédagogiques</i> , SGMB janvier 2003	111
Document 7.4 : extrait de <i>Attention, dangers naturels</i> , Berne 1999.....	113

Cartes

Carte 1.1 : les Contamines-Montjoie, extrait du PER, secteur du cône d'Armancette.....	33
Carte 2.1 : Phénomènes naturels affectant un bassin versant torrentiel - Ancizan.....	36
Carte 3.1 : Carte des aléas torrentiels du torrent du Cambasque – Commune de Cauterets.....	52
Carte 3.2 : Carte des crues historiques de l'Arriussé – Laruns.....	53
Carte 3.3 : En noir maisons détruites par la lave torrentielle de 1875 – Verdun sur Ariège.....	53
Carte 5.1 : Extrait du PER des Contamines-Montjoie.....	68

Tableaux

Tableau 5-1 Crue avec peu de matériaux solides, pression et vitesse pour un bâtiment.....	70
Tableau 5-2 Crue avec beaucoup de matériaux solides, pression et vitesse pour un bâtiment.....	70
Tableau 5-3 Pression équivalente pour un barrage de correction torrentielle.....	72
Tableau 5-4 Classes d'intensité (suivant VKF-AEAI).....	73
Tableau 5-5 Classes de fréquence et pondérations (suivant VKF-AEAI).....	73

Figures

Figure 2.1 : Profil en long d'un torrent – Crolles.....	35
Figure 2.2 : Collection de quelques records de pluies intenses sur le massif des Pyrénées.....	36
Figure 2.3 : Schéma de synthèse des différentes modalités de transport.....	39
Figure 2.4 : Allure typique d'une bouffée de lave torrentielle.....	41
Figure 3.1 : Variabilité des estimations du volume probable des coulées de laves torrentielles.....	50
Figure 5.1 : Cx de quelques formes géométriques.....	69
Figure 5.2 : Crues : notations (suivant VKF-AEAI).....	74
Figure 5.3 : Crues : pression résultant de la contrainte hydrostatique (suivant VKF-AEAI).....	75
Figure 5.4 : Crues : pression résultant de la contrainte hydrodynamique (suivant VKF-AEAI).....	76
Figure 5.5 : Crues : hauteur de retenue due à un obstacle (suivant VKF-AEAI).....	77
Figure 5.6 : Crues : inondation dynamique avec érosion et alluvionnement (suivant VKF-AEAI).....	77
Figure 5.7 : Crues : surcharge due au dépôt de matériaux solides (suivant VKF-AEAI).....	78
Figure 5.8 : Crues : force de choc due à des charges concentrées (suivant VKF-AEAI).....	78
Figure 5.9 : Crues : déplacement du lit du cours d'eau (suivant VKF-AEAI).....	79
Figure 5.10 : Crues : glissement de la berge (suivant VKF-AEAI).....	79
Figure 5.11 : Laves torrentielles : notations (suivant VKF-AEAI).....	80
Figure 5.12 : Laves torrentielles : pression résultant de la contrainte dynamique (suivant VKF-AEAI).....	81
Figure 5.13 : Laves torrentielles : hauteur de retenue due à un obstacle (suivant VKF-AEAI).....	82
Figure 5.14 : Laves torrentielles : surcharge due au dépôt de matériaux solides (suivant VKF-AEAI).....	82
Figure 5.15 : Laves torrentielles : force de choc due aux composantes individuelles (suivant VKF-AEAI).....	83
Figure 5.16 : Laves torrentielles : bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation (suivant VKF-AEAI).....	84
Figure 5.17 : Laves torrentielles : pression due aux frottements (suivant VKF-AEAI).....	84
Figure 5.18 : Direction d'application : extrait du règlement PPR type de l'Isère.....	85
Figure 5.19 : Direction d'application : extrait du PPR de Val d'Isère.....	86
Figure 5.20 : Hauteur par rapport au terrain naturel : extrait du règlement PPR type de l'Isère.....	86
Figure 6.1 : Vue d'ensemble des mesures possibles (suivant assurances suisses VKF-AEAI).....	89
Figure 6.2 : Protection des fondations contre l'affouillement (suivant assurances suisses VKF-AEAI).....	94
Figures 6.3, 6.4 : Disposition de chaînage parasismique (suivant document Plan Séisme).....	95
Figure 6.5 : Extrait de "Renforcement parasismique du bâti existant" (document RGPU).....	96
Figure 7.1 : "SABAUDIA DUCATUS LA SAVOIE" (1621).....	106
Figure 7.2 : "CARTA GENERALE DE STATI DI SUA ALTEZZA REALE" (1680).....	106
Figure 7.3 : CHAMONIX couche "PLU".....	106
Figure 7.4 : CHAMONIX carte IGN.....	106
Figure 7.5 : Extrait de la carte de l'espace de mobilité de la rivière Galaure.....	107
Figure 7.6 : Prescriptions de mesures conservatoires le long des ruisseaux et torrents.....	108

TABLE DES MATIÈRES

0	INTRODUCTION	7
1	APERÇU HISTORIQUE	13
	163 après Jésus Christ, Bergintrum, "La violence des torrents"	13
	1219, Grenoble, "Diluvium et destructio civitatis Gratianopolis"	14
	1475, Lucerne, "Ce ruisseau occasionne de grands soucis"	15
	1570, Andrea Palladio, "Quattro Libri dell'architettura"	16
	1781, Horace-Bénédict de Saussure, "Ce n'est pas de l'eau pure"	17
	1814, Vallée de Chamonix, "Les mugissements du torrent"	18
	1841, Alexandre Surell, "Le plus funeste des fléaux"	19
	1856, Briançon, "Une crue millénale "	20
	1875, Pyrénées, "La catastrophe de Verdun"	21
	1883, Saint Foy Tarentaise, "Un hameau disparaît"	22
	1892, Saint-Gervais, "Le désastre de l'établissement thermal"	22
	1897, "La catastrophe de Voiron"	23
	1914, Paul Mougin, "Les torrents de la Savoie"	24
	1915, Ernest Bénévent, "Le cône du Manival"	25
	1937, Salau dans l'Ariège, "Deux nuits de cauchemar"	26
	1940, Pyrénées Orientales, "L'Aiguat record"	27
	1957, Maurienne, Queyras, "L'année du déluge"	28
	1965, Savoie, "Les méfaits du Pontamafrey"	31
	1996, Bourg-Saint-Maurice, "La crue de l'Arbonne"	32
	1998, Hautes-Alpes, "Le bloc du Boscodon"	32
	2005, les Contamines-Montjoie, "Armançette ... toujours et encore ?"	33
	2010, début du XXI ^e siècle, "La prise en compte du risque torrentiel"	34
2	LE RISQUE TORRENTIEL.....	35
2.1	PORTRAIT DES BASSINS VERSANTS TORRENTIELS	35
2.2	CRUES DES TORRENTS ET DES RIVIÈRES TORRENTIELLES	38
	Charriage.....	39
	Laves torrentielles.....	40
	Flottants.....	41
	Causes et conséquences des débordements	42
2.3	TECHNIQUES DE PROTECTION.....	44
	Correction active.....	44
	Protection passive.....	45
3	CONNAISSANCE ET AFFICHAGE DU RISQUE	47
3.1	INFORMATION DISPONIBLE.....	47
	Plan de Prévention des Risques Naturels.....	47
	Cartes d'aléas.....	48
3.2	ÉLÉMENTS POUR LA QUALIFICATION DES ALÉAS.....	50
	Période de retour de la crue de référence	50
	Principales spécificités à prendre en compte	51
	Critères de qualification.....	52
	Risque résiduel	59
4	IMPACT CONSTATÉ SUR LES CONSTRUCTIONS.....	61
4.1	ENGRAVEMENT.....	61
4.2	AFFOUILLEMENT DES FONDATIONS	62
4.3	VULNÉRABILITÉ DES ANGLES	62
4.4	DOMMAGES SUR LES MURS	63
4.5	DESTRUCTION DES OUVERTURES.....	64
4.6	ENVAHISSEMENT DE LA CONSTRUCTION.....	65

5	CALCUL DES EFFORTS SUR LES CONSTRUCTIONS	67
5.1	EXTRAITS DE RÈGLEMENTS FRANÇAIS CONCERNANT LES BÂTIMENTS	68
5.2	PROBLÉMATIQUE DES PONTS.....	69
	Profondeur des fonds affouillables.....	69
	Dimensionnement des piles	69
5.3	BARRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE	71
5.4	RECOMMANDATIONS DES ÉTABLISSEMENTS D'ASSURANCE SUISSES.....	73
	Crues : définition des situations de danger suivant VKF-AEAI	74
	Crues : 1 - inondation statique suivant VKF-AEAI	75
	Crues : 2 - inondation dynamique suivant VKF-AEAI	76
	Crues : 3 - inondation dynamique avec érosion et alluvionnement suivant VKF-AEAI	77
	Crues : 4 - déplacement du lit du cours d'eau suivant VKF-AEAI	79
	Crues : 5 - glissement de la berge suivant VKF-AEAI	79
	Laves torrentielles : définition des situations de danger suivant VKF-AEAI.....	80
	Laves torrentielles : 1 - choc frontal suivant VKF-AEAI	81
	Laves torrentielles : 2 - bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation suivant VKF-AEAI	84
5.5	PONDÉRATIONS ET COMBINAISONS D'ACTION	85
5.6	DIRECTION D'APPLICATION	85
5.7	HAUTEUR PAR RAPPORT AU TERRAIN NATUREL	86
5.8	COMMENTAIRES ET PRÉCONISATIONS	87
6	RÉPONSES CONSTRUCTIVES.....	89
6.1	STRATÉGIES DE DÉFENSE.....	89
	"La forteresse imprenable"	90
	"La défense à distance"	90
	"La part du feu"	90
	Utilisation des espaces intérieurs	91
	Evacuation ou mise à l'abri des personnes	91
	Conséquences d'un éventuel envahissement	92
6.2	FONDACTIONS	93
	Fondations non affouillables	93
	Renfort de pied	94
	Liaisons et chaînages.....	95
	Problématique des bâtiments existants.....	96
	Réseaux enterrés.....	97
6.3	RÉSISTANCE DES MURS PLEINS EN MAÇONNERIE	98
6.4	MATÉRIAUX	98
6.5	PROBLÉMATIQUE DES OUVERTURES	99
	Châssis ouvrants	100
	Vitrages fixes	101
	Panneaux pleins	101
	Ouvertures défilées	102
6.6	SECOND OEUVRE	102
	Isolement des réseaux	102
	Electricité	102
	Chauffage, ventilation, installations techniques, dispositifs de sécurité.....	103
	Ascenseur.....	103
	Citernes, réservoirs	103
	Choix des matériaux	103
7	RÉFLEXIONS D'URBANISME.....	105
7.1	COMPOSER AVEC LES TORRENTS.....	106
7.2	ASSURER L'ESPACE NÉCESSAIRE	107
7.3	IMPLANTATION ET TYPE DES CONSTRUCTIONS	109
7.4	FORME PRÉFÉRENTIELLE DES CONSTRUCTIONS	110
7.5	IMPACT DES PONTS	111
7.6	ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE	112
8	CONCLUSION.....	115

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

**Ministère de l'Écologie, du Développement durable,
des Transports et du Logement**
Direction de la Prévention des risques
92 055 La Défense cedex
Tél. 01 40 81 21 22