



HAL
open science

Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées

Guillaume Piton, Simon Carladous, Jean-Marc Tacnet

► To cite this version:

Guillaume Piton, Simon Carladous, Jean-Marc Tacnet. Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées. CGDD (Commissariat général au développement durable - Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires). 2022, pp.67. hal-03985981

HAL Id: hal-03985981

<https://hal.inrae.fr/hal-03985981v1>

Submitted on 27 Feb 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées

Application à la problématique des crues des cours d'eau torrentiels :
approche et cas d'étude

Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées

Application à la problématique des crues des cours d'eau torrentiels : approche et cas d'étude

Guillaume Piton¹, Simon Carladous², Jean-Marc Tacnet¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France.

² ONF, Département Risques Naturels (DRN), Pôle RTM, Toulouse, France

Citation : Piton, G., Carladous, S., Tacnet, J-M. 2022. *Caractérisation des sous-scénarios de crues et des probabilités conditionnelles associées - Application à la problématique des crues des cours d'eau torrentiels : approche et cas d'étude*. Rapport scientifique réalisé pour le compte du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). V2.2. 66 p. <https://hal.inrae.fr/hal-03985981>



Ce travail a bénéficié des financements du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.

Tableau 1 : Suivi des versions

VERSION	DATE D'EDITION	REMARQUES	REDIGE PAR	CONTROLE PAR
1.0	28/12/2020	PREMIERE EDITION DU RAPPORT DE TRAVAIL 2020	G. PITON	J.M. TACNET, S. CARLADOUS
1.1	19/4/2021	MISE A JOUR DE LA FIGURE 2.	G. PITON	
2.0	11/10/2021	VERSION COMPLETE PROVISoire POUR ATELIER DE TRAVAIL LANCEY	G. PITON	
2.1	05/11/2021	PREMIERE EDITION DU RAPPORT COMPLET 2021	G. PITON, S. CARLADOUS	
2.2	DEC. 2022	VERSION COMPLETE AMENDEE	G. PITON, S. CARLADOUS	J.M. TACNET B. MEURISSE L. BRENEVAL D. KUSS J. BOUFFIER

Que l'ensemble des relecteurs de ce rapport soient vivement remerciés pour leurs nombreuses remarques très pertinentes.

Résumé

La présente mission a été confiée à INRAE/IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) et au DRN (Département Risques Naturels) de l'ONF (Office National des Forêts) par le CGDD (Commissariat général au développement durable - Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires). Elle s'insère dans la démarche générale d'amélioration des méthodes d'analyses multicritères (analyses coûts-bénéfices – ACB - étendues) aidant la justification des stratégies de réduction du risque inondation demandée dans le cadre des PAPI (Programmes d'Action de Prévention des Inondations). L'amélioration de ces approches consiste ici en leur adaptation au contexte des crues torrentielles. Les effets potentiels d'une crue torrentielle sont multiples (submersion, érosion, dépôt, impact) et se manifestent avec différents niveaux d'intensité. Dans ce contexte, des crues de même magnitude (même débit de pointe, même volume solide transporté) peuvent avoir une répartition spatiale très différente de ces niveaux d'intensité en raison d'effets locaux comme, par exemple, l'obturation (ou non) d'un pont liée à la formation d'embâcles. Nous proposons ainsi de considérer ces différences dans la manifestation des intensités relatives à une crue torrentielle comme des sous-scénarios d'un scénario de magnitude donnée (associée à une période de retour donnée correspondant à une probabilité annuelle d'occurrence). Ce rapport présente l'approche proposée pour identifier les sous-scénarios et leur assigner des probabilités conditionnelles. Deux cas d'exemple illustrent son application.

Pour mener ce type d'analyse (ACB et/ou analyse multicritère), les chargés d'étude doivent analyser l'aléa en identifiant la distribution spatiale du niveau d'intensité pour plusieurs scénarios de crues : chaque scénario est défini par un niveau de magnitude donné, noté M (par exemple, des volumes d'apport solide de 2 000 m³, 10 000 m³ et 50 000 m³). Chaque solution de réduction du risque (ouvrage de protection par exemple) doit alors être analysée en établissant une carte d'intensité qui tient compte de sa présence. In fine, à partir de ces cartes d'intensité, une évaluation des dommages est établie pour chaque scénario de crue puis la moyenne annuelle est calculée comme la valeur espérée des dommages (dommages moyens annualisés), dans les situations avec ou sans solution de réduction du risque.

Or, en contexte torrentiel, à magnitude donnée, la carte d'intensité, et donc les dommages associés, peut varier pour les différents sous-scénarios de crue. Et pour chaque scénario de crue de magnitude M , chaque sous-scénario à une probabilité plus ou moins forte d'avoir lieu : il s'agit de la probabilité conditionnelle de survenue de ce sous-scénario, sachant que l'évènement est de magnitude M . Les dommages moyens annualisés (avec ou sans stratégie de protection) correspondent alors à la valeur moyenne des dommages calculés pour l'ensemble des sous-scénarios, pondérés par leur probabilité conditionnelle.

En accord avec la mission confiée, **ce rapport traite de la question intermédiaire de la définition des sous-scénarios et des probabilités conditionnelles associées**. Il ne traite pas la question préalable d'assigner une période de retour à un scénario de crue de magnitude donnée ni celle de cartographier le niveau d'intensité pour un sous-scénario défini.

Dans le Chapitre 1, nous décrivons le contexte et l'intérêt de l'explicitation de scénarios et sous-scénarios pour simplifier l'analyse et tracer le raisonnement associé. La décomposition en sous-scénarios consiste à identifier les phénomènes à l'origine des différentes répartitions spatiales du niveau d'intensité pour un scénario de magnitude donnée, et qui peuvent être de plusieurs types :

- (i) Un paramètre secondaire à celui qui caractérise le scénario de crue (volume solide, débit de pointe) joue un rôle important sur les conditions d'écoulement : par exemple, la fluidité d'une lave torrentielle ;
- (ii) L'interaction entre la crue et un secteur particulier du cours d'eau peut amener à un changement macroscopique des conditions d'écoulement : par exemple, l'obstruction d'un pont par des embâcles.

Dans le Chapitre 2, nous détaillons comment identifier les sous-scénarios à étudier grâce à une analyse fonctionnelle des systèmes torrentiels. Il s'agit d'identifier les singularités et tronçons principaux du système, puis de clarifier leur mode de fonctionnement et les défaillances potentielles en fonction des caractéristiques de l'évènement. Afin de tracer l'ensemble des réflexions, nous insistons sur la nécessité d'une première étape ouverte, la plus exhaustive possible, durant laquelle un grand nombre de sous-scénarios sont identifiés. Pour simplifier l'analyse, une seconde étape consiste à réduire le nombre de sous-scénarios en éliminant ceux qui n'occasionnent pas de dommages, en définissant les modes de fonctionnement quasi-certains et en regroupant des sous-scénarios aux caractéristiques légèrement différentes mais ayant une similarité en termes de cartographie du niveau d'intensité pour le niveau de précision de l'étude.

Dans le Chapitre 3, nous présentons des approches utilisables pour assigner les probabilités conditionnelles aux sous-scénarios retenus. Dans certains cas, cette assignation peut être basée sur une analyse statistique de données et / ou des critères objectifs. Dans d'autres cas, le manque de données et la complexité du site obligent à se reposer sur un avis d'expert, l'enjeu étant alors de tracer le raisonnement associé. Pour cela, nous discutons des approches possibles et proposons une méthode simplifiée d'inter-comparaison des sous-scénarios qui repose sur la construction d'une échelle de référence de probabilités conditionnelles qualitatives puis son application aux différents scénarios. La terminologie est cohérente avec les approches opérationnelles utilisées pour les études de danger (digues et barrages).

Le Chapitre 4 illustre l'application de l'approche proposée au travers de deux cas d'études bien documentés :

- (i) Le ruisseau de la Combe de Lancey est un torrent à charriage affluent de l'Isère ;
- (ii) Le torrent d'Arcelle, affluent de l'Arc, est sujet à des épisodes de laves torrentielles.

Les études hydrauliques de ces deux cas d'études sont simplement synthétisées dans le présent rapport. Seuls les éléments clés sont fournis : ils permettant de cerner le contexte et d'alimenter le protocole d'analyse.

Le rapport est clôturé par une courte conclusion.

Plusieurs limites de ce protocole sont décrites dans le rapport : nous avons cherché à trouver un équilibre entre une complexité d'application raisonnable et une rigueur acceptable du raisonnement. Ce protocole ne doit en aucun cas être vu comme un carcan mais plus simplement comme une façon d'aborder un problème complexe en le segmentant en une série de petites tâches de moindre complexité. L'ambition première est d'aider à tracer le raisonnement qui conduit les chargés d'études à proposer leur évaluation des probabilités conditionnelles et à le soumettre au regard critique du commanditaire de l'étude. D'autres approches sont possibles, certaines étant citées dans le rapport. Quelle que soit l'approche retenue, nous insistons une dernière fois sur l'importance de tracer le raisonnement et d'explicité les hypothèses de travail et d'analyse.

Contenu

Résumé	3
1 Introduction	6
1.1 Rappel préalable sur la terminologie.....	6
1.2 Contexte et objectif du présent rapport	9
2 Inventorier les sous-scénarios	12
2.1 Inventaire des tronçons, verrous et enjeux : le système à risques torrentiels	13
2.2 Identification des modes de défaillances	13
2.3 Tri des sous-scénarios et simplification du problème	17
2.4 Inventaire final des sous-scénarios.....	20
2.5 Cartographie du niveau d'intensité du processus torrentiel par chaque sous-scénario	22
2.6 En synthèse.....	22
3 Estimer une probabilité conditionnelle d'occurrence de chaque sous-scénario : proposition d'un protocole 24	
3.1 Différents modes d'évaluation des probabilités	24
3.2 Probabilités absolues objectives, quantitatives précises	27
3.3 Probabilités absolues subjectives, qualitatives et quantitatives.....	28
3.4 Probabilités relatives objectives	32
3.5 Extension de l'approche du GIEC aux probabilités relatives subjectives	34
3.6 Lien entre sous-scénarios et probabilité d'atteinte.....	36
3.7 Modalités de prise en compte des incertitudes.....	37
3.8 En synthèse.....	37
4 Illustration sur deux cas d'études.....	38
4.1 Les crues de charriage du ruisseau de la Combe de Lancey à Villard-Bonnot (38)	39
4.2 Les laves torrentielles du torrent de l'Arcelle à Lanslevillard (73).....	52
5 Conclusion et perspectives	59
Bibliographie.....	60
Annexes	64
A : Formules empiriques d'estimation des volumes d'apports de flottants	64
Table des figures et tableaux.....	65

1 Introduction

1.1 Rappel préalable sur la terminologie

Les analyses multicritères s'appuient sur une analyse des dommages moyens annualisés, autrement appelé analyse de risque en Suisse, sans et avec chacune des stratégies de protection à analyser. Cela implique la manipulation de termes et de notions qui peuvent introduire des ambiguïtés quand ils sont employés en référence à leur seule signification dans le langage commun. Pour les éviter, il est nécessaire d'avoir recours à des définitions précises des concepts utilisés pour mener cette analyse de risque¹. En ce sens, les définitions des termes suivants, utilisés au travers de ce rapport, sont largement issus de Carladous and Tacnet (2019) qui ont fourni au MTE (Ministère de la Transition Ecologique) un glossaire relatif à l'efficacité des dispositifs de protection contre les risques naturels en montagne.

- **Aléa** : Manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données (MATETL, 1999, p. 151). Une carte du niveau d'intensité d'un phénomène sur un territoire donné devient une carte d'aléa dès lors qu'une probabilité d'occurrence lui est associée. En pratique, il s'agit de la probabilité d'occurrence annuelle du (sous)-scénario de crue sur la base duquel la carte a été établie.
- **Crue (ou scénario de crue)** : Augmentation significative et temporaire du débit. Terme générique utilisé dans le présent rapport pour désigner un événement susceptible de se produire pour un phénomène torrentiel donné (lave torrentielle, crue de charriage, crue chargée de flottants, crue éclair) avec un niveau de magnitude donné (débit de pointe liquide ou de lave, volume de lave, volume solide, etc.).
- **Changement macroscopique** (de la répartition spatiale du niveau d'intensité / des écoulements) : Cette notion est utilisée de façon récurrente dans ce rapport. Elle s'oppose à un changement local ou marginal de la répartition spatiale des processus. Un changement est macroscopique s'il amène à une modification de la carte de répartition spatiale du niveau d'intensité (contour des zones et/ou classe d'intensité des zones). Ceci sous-entend que le processus associé à ce changement engendre un effet dont l'ampleur est évidente à l'échelle de travail. A contrario, une infinité de processus à petite échelle sont incertains mais n'engendrent pas de différence macroscopique de la répartition du niveau d'intensité (dépôts locaux de graviers ou de quelques flottants, présence de véhicule ou de mobilier urbain déviant localement les écoulements, vagues, etc.). Des changements macroscopiques émergent typiquement en cas d'obstruction du chenal aboutissant à une bifurcation des directions d'écoulement (phénomène d'avulsion) ou, potentiellement, en cas de défaillance d'un ouvrage de protection.
- **Dommages** : Conséquences défavorables d'un phénomène naturel sur les biens, les activités et les personnes. Dans le cadre des analyses coûts-bénéfices étendues (ACB étendues), ils sont exprimés sous forme quantitatives ou monétaires.
- **Embâcle** : accumulation de débris, souvent du bois flottant mais aussi potentiel des déchets et véhicules, formée par une crue.
- **Endommagement (taux, courbe) et dommage (courbe)** : L'endommagement est la mesure du niveau de dégradation d'un enjeu exposé exprimé soit quantitativement en pourcentage de destruction, soit qualitativement en classes d'endommagement (par exemple suivant les classes utilisés par Kean et al., 2019 : Aucun dégât visible : Taux d'endommagement ~ 0% ; Dégâts mineurs : Taux d'endommagement < 5% ; Partiellement détruits : 5% < Taux d'endommagement < 25% ; Dégâts importants – Menace de ruine : Taux d'endommagement > 25% ; Destruction complète : 100% d'endommagement).
Pour chaque type de phénomène et chaque type d'enjeux, une connaissance plus fine de ces taux d'endommagement conduit à établir une courbe d'endommagement qui associe un niveau d'endommagement du type d'enjeux avec un niveau d'intensité. Dans le domaine des inondations fluviales, les courbes associent un coût de dommages (ou de réparation) au niveau d'intensité (hauteur d'eau, temps de submersion). On a alors une courbe d'endommagement : $Taux\ d'endommagement =$

¹ Cette terminologie est également utilisée dans le cadre de la méthodologie proposée pour la mise en œuvre des STePRIM (Stratégie Territoriale pour la Prévention des Risques en Montagne).

$f(\text{intensité})$ et/ou une courbe de dommage : $\text{Dommage} = f(\text{intensité})$. Dans le domaine torrentiel, en France, il n'a pas encore été validé par l'Etat de courbes d'endommagement ou de dommages standards. En Suisse, des valeurs sont par contre standardisées et utilisées dans l'outil EconoMe. Ces courbes dépendent du mode d'endommagement propre au processus (submersion, engrèvement, affouillement, impacts), du critère d'intensité (hauteur d'écoulement, débit unitaire, profondeur d'affouillement, hauteur de dépôt, force d'impact) et du type d'enjeu.

- **Enjeux** : Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés directement ou indirectement par un phénomène naturel (MATETL, 1999).
- **Évènement** : Expression du phénomène naturel en un lieu et à un moment donné.
- **Exposition** : Présence (temporaire ou permanente) quantifiée d'un enjeu dans une zone susceptible d'être affectée, directement ou indirectement, par un évènement torrentiel. On distingue l'exposition directe quand l'enjeu considéré se situe physiquement en un point spatial où l'évènement entraîne une intensité non nulle (Corominas *et al.*, 2014) et l'exposition indirecte quand l'enjeu considéré est potentiellement affecté à distance (exposition d'un hôpital pour lequel l'accès serait coupé par l'évènement).

Pour l'exposition directe, lorsqu'il s'agit d'un bâtiment, son exposition est nulle (=0) s'il n'est pas atteint et est totale (=1) s'il est potentiellement atteint. L'exposition relative au bâti du territoire correspond alors au nombre de bâtiments atteints. Lorsqu'il s'agit d'enjeux mobiles, des véhicules par exemple, cela dépend du nombre de véhicules potentiellement présents et de leur probabilité de présence annuelle dans la zone exposée. Par exemple, sur un tronçon de route où le trafic est de l'ordre de 500 véhicule / jour et le temps de parcours de 10 minutes, l'exposition moyenne est de $500 * 10 * 365 / (60 * 24 * 365) = 3.5$ véhicules.

L'exposition est en général implicite dans l'approche actuelle des AMC PAPI (la notion n'est pas considérée dans un tel détail² dans le guide CGDD, 2018, certains indicateurs visent plus simplement à estimer le nombre d'habitants et d'emplois dans les zones exposés). Ce terme n'apparaît ainsi pas dans la plupart des études PAPI.

- **Fréquence d'apparition** : Nombre de fois où un niveau de magnitude M est atteint ou dépassé sur un nombre d'évènements total constaté. On parle alors de la fréquence d'apparition du scénario de crue de magnitude M qui est généralement rapportée à la probabilité annuelle de dépassement de ce niveau de crue. On calcule la fréquence d'apparition de l'évènement F_M en fonction de sa période de retour

$$T_M : F_M = \frac{1}{T_M} ;$$

- **Intensité** : Paramètre physique local utilisé pour décrire la virulence du processus torrentiel et les conséquences de la crue (hauteur d'eau, hauteur de dépôt, profondeur d'affouillement). Sa valeur étant locale, il est spatialisé et doit être représenté sous forme cartographique. La valeur maximale locale est généralement considérée puisque cette intensité varie aussi au cours du temps. L'intensité est souvent cartographiée sous forme d'une information synthétique – le niveau d'intensité – traduisant l'intensité de différents paramètres physiques.

Dans le cadre des ACB, on sélectionne le ou les paramètres d'intensité pour leur corrélation avec l'endommagement (courbe d'endommagement) ou, plus directement, les dommages monétaires (courbe de dommage).

- **Magnitude** : Ampleur globale, puissance du phénomène évaluée au moyen d'un paramètre physique mesurable. Au contraire de l'intensité qui est locale, la magnitude est décrite par une valeur numérique

² Même si ce n'est pas explicite, les indicateurs présentiels correspondent à une analyse simplifiée, car ne considèrent pas la probabilité de présence annuelle, de l'exposition humaine sur le territoire (P1 : Nombre de personnes habitants en zone inondable, P2 : Part des personnes habitant des logements de plain-pied en zone inondable, P3 : Capacité d'accueil des établissements sensibles en zone inondable, P5 : Trafic journalier des réseaux de transport en zone inondable, P7 : Nombre d'emplois en zone inondable).

Les indicateurs P10-P11 (Nombre de sites dangereux en zone inondable et Nombre de bâtiments patrimoniaux et de sites remarquables en zone inondable) sont des indicateurs de l'exposition directe de ces bâtis.

Les indicateurs de dommages M1-M4 (dommages aux habitations, entreprises, activités agricoles, établissement publics) intègrent l'exposition des bâtis (nombre de bâtis exposés) pour leurs calculs.

unique à l'échelle de la crue (par exemple : débit de pointe ou volume d'apport solide). C'est sur ce paramètre que sont définis les scénarios de crues auxquels une probabilité de dépassement et une période de retour sont affectées. Dans le cas fluvial, il s'agit en règle générale du débit liquide de pointe. Dans le cas torrentiel, il s'agit souvent du volume d'apport solide (crue de charriage ou lave torrentielle). Il s'agit parfois du débit de pointe liquide d'une crue, en particulier pour les rivières torrentielles et les bassins versants de montagne ayant peu de sources sédimentaires. Pour qu'il soit utile, ce paramètre doit être celui qui a une importance prépondérante sur les conséquences de la crue.

- **Période de retour** : Intervalle de temps moyen entre deux événements pour lesquels un seuil de magnitude prédéterminé est atteint ou dépassé. Une période de retour est donc très généralement associée à un seul paramètre (pic de crue ou volume solide), sauf application de méthodes scientifiques sophistiquées (Brunner, Seibert et Favre, 2016). On calcule la période de retour T_M d'un événement de magnitude M comme étant l'inverse de la fréquence de son apparition : $T_M = \frac{1}{F_M}$
- **Phénomène** : Fait naturel constaté qui s'exprime dans l'espace par une magnitude, une intensité, un impact et une fréquence. Dans le domaine torrentiel, on distinguera notamment lave torrentielle, crue de charriage, crue chargée de flottants, crue éclair (l'un n'excluant pas les autres). Les phénomènes engendrent des processus (érosion, dépôt, impact) générateurs de dommages.
- **Probabilité** (sous-entendu "de dépassement") : quand on qualifie la magnitude d'une crue, on cherche à déterminer la probabilité annuelle que la valeur donnée M à la magnitude m ne soit pas atteinte ou dépassée (i.e. soit inférieure ou égale à une valeur donnée M) : il s'agit de la probabilité annuelle ou fréquence de non-dépassement de M , notée $\overline{F}_M = P(m < M)$, avec m une variable aléatoire. On en déduit directement la probabilité annuelle ou fréquence de dépassement, correspondant à la fréquence d'apparition de l'événement, et à la probabilité d'occurrence du scénario de crue de magnitude M :

$$P(M) = P(m \geq M) = 1 - P(m < M) = 1 - \overline{F}_M = F_M = \frac{1}{T_M} ;$$

- **Probabilité conditionnelle** (des sous-scénarios) : Probabilité que le sous-scénario S_i étudié ait lieu, sachant que le scénario de crue a lieu, i.e., sachant qu'une crue de magnitude M a lieu. Elle est notée $P(S_i|M)$ dans la suite de ce rapport.
- **Résiduel** (aléa ou risque) : Aléa ou risque qui subsiste lorsque des mesures de sécurité (protection par exemple) ont été prises.
- **Risque** : Événement dommageable, doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa survenant dans un milieu vulnérable. Le risque résulte donc de la conjonction de l'aléa et d'un enjeu, la vulnérabilité étant la mesure des dommages prévisibles de toutes sortes rapportés à l'intensité de l'aléa. D'un point de vue calculatoire, la définition du risque établie en Suisse correspond à la définition des dommages moyens annualisés établie en France pour mettre en œuvre les ACB. À cette définition technique du risque, doit être associée la notion d'acceptabilité pour y intégrer sa composante sociale (MATETL, 1999). Ce dernier aspect n'est toutefois pas traité dans le présent rapport.
- **Singularité** : D'après la définition de Singularité hydraulique proposée par le Wikhydro (2021) : "*Particularité localisée d'un système hydraulique dans lequel les caractéristiques géométriques varient rapidement ou imposent des changements rapides de la direction ou de la configuration générale de l'écoulement*". On utilise ce terme pour désigner des ouvrages ou formations naturelles induisant une variation très localisée des conditions d'écoulement (et sans présomption sur l'étendue de la propagation des effets en amont comme en aval vis-à-vis des remous liquides ou solides). Le réseau hydrographique d'un site donné est donc décomposé en tronçons et singularités.
- **Stratégie** : Combinaison de mesures visant à réduire le risque. On parle de stratégie de gestion du risque lorsque cela combine des mesures de prévention, d'alerte et de gestion de crise ; on parle de stratégie de prévention lorsque cela combine des mesures structurales³ de protection et des mesures non structurales de réduction de la vulnérabilité (maîtrise de l'urbanisme, affichage du risque,

³ Le terme de mesures "structurelles" est aussi utilisé. Ce dernier étant toutefois utilisé en sciences sociales pour désigner les mesures d'organisation structurelles, mesures justement non-structurelles, le terme "structurelles" est préféré par les auteurs pour éviter la confusion.

sensibilisation, etc.) ; on parle de stratégie de protection lorsque cela implique la mise en œuvre d'un ou plusieurs dispositifs de protection. Nous déconseillons d'utiliser le terme de "scénario" pour éviter la confusion avec le scénario de crue.

- **Torrentiel** : Dans le présent travail, un cours d'eau est considéré torrentiel si *les dommages associés à ses crues sont principalement le fait du transport solide (dépôts, érosions) plutôt que de la submersion (inondation par les eaux)*. Il s'agit des torrents et rivières torrentielles. Le caractère torrentiel n'implique donc pas nécessairement de caractère soudain dans l'occurrence et la montée de la crue. Ce second type de crue est désigné sous le terme de "crue éclair".
- **Tronçon** : Secteur homogène du lit d'un cours d'eau en termes de géométrie (section, pente), rugosité et surface drainée. Les tronçons ont une certaine étendue spatiale tandis que les singularités sont très localisées.
- **Vulnérabilité** : D'après le guide général pour la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles (MATETL, 1999, p. 154), la vulnérabilité « *au sens le plus large, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux. On peut distinguer la vulnérabilité économique et la vulnérabilité humaine. La première traduit généralement le degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposées à l'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité donnée. [...] Elle désigne aussi quelquefois la valeur de l'endommagement. La vulnérabilité humaine évalue d'abord les préjudices potentiels aux personnes, dans leur intégrité physique et morale. Elle s'élargit également à d'autres composantes de la société (sociales, psychologiques, culturelles, etc.) et tente de mesurer sa capacité de réponse à des crises.* »

1.2 Contexte et objectif du présent rapport

Dans le domaine des inondations, les programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) ont pour objectif de mettre en œuvre une politique de prévention globale pensée à l'échelle du bassin de risques. Les actions retenues dans ces programmes peuvent être subventionnées au titre du Fond de Prévention des Risques Naturels Majeurs, dit "fonds Barnier". Depuis 2011, le cahier des charges PAPI demande une évaluation socio-économique des projets les plus coûteux (>2 M€HT). Des méthodes d'analyse coûts bénéfiques (ACB) puis d'analyse multicritères (AMC ou ACB étendue) ont été mises en place pour répondre à cette demande (CGDD, 2018).

Les crues torrentielles étant un type particulier d'inondation, les mesures de prévention des crues torrentielles peuvent faire l'objet d'un PAPI et ainsi être subventionnées par le fonds Barnier. Cependant, la méthode d'évaluation socio-économique actuellement proposée présente des difficultés d'application (Piton *et al.*, 2018 ; Favier *et al.*, 2019). Parmi les verrous techniques à cette application, Favier *et al.* (2019) soulignent des difficultés associées à plusieurs des sous-étapes aboutissant aux calcul d'indicateurs de dommages moyens annualisés (DMA) : établissement des scénarios de crue avec carte d'intensité associée, affectation d'une période de retour associée, évaluation des dommages pour cette carte d'intensité, basée sur la (mé)connaissance des dommages selon le niveau d'intensité, prise en compte des effets des mesures de protection sur la carte d'intensité.

Dans le cas d'inondation fluviale, les dommages sont principalement liés à l'envahissement des enjeux par l'eau, phénomène qu'on appellera "submersion". La caractérisation de la répartition spatiale de l'intensité pour chaque scénario de crue (débit liquide de pointe de valeur M) est donc principalement basée sur la hauteur d'eau estimée. Cette intensité permet d'estimer un dommage élémentaire au droit de chaque enjeu à l'aide d'une courbe de dommages monétaires spécifique au type d'enjeu concerné. La somme des dommages associés aux enjeux exposés pour le scénario donné permet d'estimer les dommages monétaires qui lui sont associés. Après avoir établi une période de retour (inverse de la probabilité annuelle de dépassement de la valeur M) associée à chaque scénario de crue, le DMA est calculé comme la valeur espérée des dommages.

Pour rappel, nous synthétisons ci-dessous les spécificités relatives au contexte torrentiel (Piton, Recking et Tacnet, 2018 ; Favier *et al.*, 2019) par rapport à celui de l'inondation fluviale.

1. La répartition spatiale du niveau d'intensité est imprécise ou incertaine pour un scénario de crue donné (voir Tacnet, 2009 pour une définition des différents types d'imperfection des données) :
 - a. *A cause du caractère multivarié des crues.* Les scénarios de crues sont définis par une magnitude donnée M associée à une période de retour. La définition mathématique de la période de retour est univoque quand la magnitude de la crue est univariée, c'est-à-dire qu'elle est décrite par un seul paramètre (en général le débit de pointe ou le volume solide). Ce paramètre principal est choisi par le chargé d'étude au titre que sa valeur est prépondérante sur la répartition spatiale des intensités de crue, devant les autres paramètres descripteurs de l'évènement. Dans les faits, plusieurs caractéristiques d'une crue vont influencer la répartition spatiale de l'intensité, telles que par exemple le débit liquide de pointe, la forme de l'hydrogramme liquide, le volume solide, la concentration solide et la rhéologie des écoulements (que l'on englobera sous le terme plus simple de viscosité dans le présent rapport), la taille et le flux des flottants et blocs transportés. Il est donc difficile de définir la période de retour car elle dépend de plusieurs paramètres.
Des méthodes existent pour mener à bien des analyses statistiques dans un cadre multivarié, c'est-à-dire décrivant la magnitude de la crue selon plusieurs paramètres (voir notamment la synthèse de Brunner, Seibert et Favre, 2016). Elles restent toutefois relativement compliquées à utiliser et plusieurs définitions de la période de retour existent, ce qui ne facilite pas l'utilisation (voir le rapport d'étude de Evin et Piton, 2020).
Rester dans un cadre univarié et utiliser un nombre approprié de sous-scénarios semble donc une alternative raisonnable pour maintenir un niveau de complexité aussi limité que possible, tout en capturant de façon satisfaisante la variabilité de la répartition spatiale associée à l'effet des paramètres secondaires descripteurs de la magnitude des crues.
 - b. *A cause de processus aléatoires qui influencent de façon macroscopique la répartition spatiale* (Mazzorana *et al.*, 2011). Les interactions entre le phénomène de crue et certains points critiques peuvent générer des bifurcations dans les directions d'écoulements et des changements majeurs dans la répartition spatiale du niveau d'intensité (par exemple, l'obstruction d'un pont ou du chenal, des divagations du lit associées à des dépôts sédimentaire ou l'apparition d'une brèche dans une digue). Le caractère incertain du mode de fonctionnement de ces points critiques est souvent associé à certains paramètres secondaires de la magnitude de la crue (par exemple, la taille et le nombre de grands flottants – Quiniou et Piton, 2022).
On dispose parfois d'éléments pour assigner des probabilités conditionnelles des sous-scénarios associés à ces processus aléatoires (nombre suffisant d'occurrences documentées dans les archives ; existence d'études paramétriques généralistes du phénomène en jeux, par exemple sur modèle physique). Dans la majorité des cas, les archives sont au contraire lacunaires et les situations de terrain sont complexes et peu comparables aux situations idéalisées des études paramétriques généralistes. Les avis d'experts sont alors convoqués pour croiser toutes les sources d'information disponibles afin d'assigner des probabilités conditionnelles subjectives aux sous-scénarios (et idéalement une imprécision associée).
2. La caractérisation du niveau d'intensité est souvent imprécise et incertaine :
 - a. Les dommages sont le fruit de plusieurs processus d'endommagements (submersion, engravement, affouillement, impact). Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs paramètres descripteurs de l'intensité (par exemples : hauteur d'écoulement, hauteur de dépôt, profondeur d'affouillement).
 - b. Les processus de crues étant violents et encore mal connus, de nombreuses incertitudes⁴ sur les données existent et se propagent lors de l'utilisation de modèles numériques. Les approches transdisciplinaire croisant l'analyse des archives, la géomorphologie et l'hydraulique torrentielle

⁴ A la fois épistémiques, c'est à dire en lien avec le manque de connaissance dans la physique des processus, mais aussi aléatoires puisque de nombreux phénomènes stochastiques ont lieu pendant une crue torrentielle.

s'avèrent indispensables (Newinger et Robert, 2021), mais ne permettent souvent pas de quantifier précisément – et selon une échelle numérique continue – les intensités des phénomènes. Ceci justifie l'utilisation de classes d'intensité qualitatives (faible, moyenne, forte) telles que proposées dans le cadre de la théorie des ensembles flous pour lier des grandeurs quantitatives et qualitatives⁵. Des liens entre les différents paramètres descripteurs des phénomènes torrentiels et les classes d'intensité sont par exemples décrits dans Givry et Peteuil (2011). D'autres échelles de références existent.

Le second point (caractérisation et cartographie du niveau d'intensité) fait l'objet d'autres travaux en cours⁶ et ne sera pas détaillé dans la suite de ce rapport. Nous désignerons par "cartographie du niveau d'intensité", l'utilisation des méthodes appropriées au cas d'étude (qu'elles soient principalement basées sur des approches naturalistes ou intégrant aussi des outils de modélisation numériques plus ou moins sophistiqués, que la cartographie résultante représente les intensités par une approche univariée ou multivariée et de façon continue ou par classes d'intensité).

Le présent rapport se focalise sur le premier point correspondant à l'identification des sous-scénarios multivariés et/ou aléatoires et l'estimation des probabilités conditionnelles associées. Deux chapitres méthodologiques sont présentés :

- Le Chapitre 2 vise à aider à identifier les sous-scénarios à étudier.
- Le Chapitre 3 propose un protocole pour leur assigner des probabilités conditionnelles.

Ces chapitres contiennent chacun des éléments introductifs en début et une section de synthèse en fin. Ces chapitres sont assez denses en contenu parce qu'ils abordent un sujet compliqué qui a été très peu traité dans la littérature technique francophone. Nous avons essayé d'y présenter avec assez de détails des approches et outils utiles aux chargés d'études. Des remarques et avertissements tirés de la littérature scientifique parsèment aussi le rapport afin que les chargés d'études puissent éventuellement utiliser les méthodes de façon éclairée.

Le Chapitre 4 fournit deux exemples d'application de l'approche. Ce sont des cas d'études particuliers qui nous ont toutefois permis de tester et d'éprouver l'approche proposée sur deux cas d'étude de complexité intermédiaire. Ces derniers ont été intégrés au rapport à des fins d'illustration de l'approche et du degré de détail dans lequel nous sommes rentrés dans les justifications des différentes étapes. Des sites plus simples existent comme des sites plus compliqués. La justification des différentes étapes devra être adaptée aux enjeux et à la complexité du site.

⁵ Voir l'utilisation des nouvelles théories de l'information dont la théorie des ensembles flous, des possibilités, des fonctions de croyance synthétisée dans Tacnet (2009)

⁶ Notamment dans le cadre de la finalisation du guide PPR Cours d'Eau Torrentiels : Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels, MTECT, 2023

2 Inventorier les sous-scénarios

L'approche retenue dans le présent rapport est largement inspirée des travaux de Prof. Bruno Mazzorana qui a mené de nombreuses réflexions sur l'analyse du risque torrentiel en Italie, en Autriche et au Chili (Mazzorana *et al.*, 2011 ; Mazzorana, Comiti et Fuchs, 2011 ; Mazzorana *et al.*, 2012 ; Mazzorana *et al.*, 2017 ; Mazzorana et Fuchs, 2010 ; Simoni, Vignoli et Mazzorana, 2017 ; Gschnitzer *et al.*, 2017).

Nous verrons dans ce rapport que la question des sous-scénarios n'est pas limitée au cas torrentiel. Elle se pose en réalité dans la plupart des analyses de risque portant sur des systèmes complexes technologiques et naturels (par exemple les estuaires, les zones littorales, les systèmes d'endiguements dont certains ouvrages ont des modes de fonctionnement incertains). Le protocole développé dans le présent rapport se veut donc aussi générique que possible. Dans le Chapitre 4, la démonstration de son application se cantonnera toutefois à deux cas d'études de sites torrentiels pour lesquels une certaine documentation était disponible sur les scénarios et sous-scénarios.

On désigne comme système à risque torrentiel un secteur géographique comprenant des enjeux vulnérables et potentiellement exposés à des aléas torrentiels (voir §1.1 pour les définitions). Dans l'approche présentée dans ce rapport – rappelons que d'autres approches sont possibles – nous proposons de procéder à l'identification des sous-scénarios à travers une analyse fonctionnelle. L'analyse fonctionnelle est une approche issue du domaine de la sûreté de fonctionnement. Elle structure l'analyse du fonctionnement d'un système complexe en le décomposant en composants élémentaires dont on va étudier le comportement et les défaillances (Mortureux, 2001). Elle est majoritairement utilisée dans le domaine de la sûreté de systèmes industriels et technologiques. Quelques applications ont cependant vu le jour dans le domaine des ouvrages de protection contre les risques torrentiels (Tacnet *et al.*, 2011). Dans le contexte des risques d'inondation, **une "défaillance" d'un dispositif hydraulique est définie comme un fonctionnement non satisfaisant amenant à des conséquences indésirables** (débordement d'un chenal, surverse par-dessus une digue et rupture éventuelle, érosion d'une berge, obstruction d'une section du chenal). Dans cette partie, nous proposons une approche systémique qui consiste à :

- a) Identifier le système à risque torrentiel au sein duquel on cherche à caractériser les aléas auxquels les enjeux sont exposés et à bien préciser ses limites et ses composants principaux (§ 2.1) ;
- b) Identifier des scénarios de défaillance potentielles, appelés "modes de défaillances" dans le rapport (§2.2), ce qui implique de :
 - i. Identifier les conditions et flux de matière aux limites du système (eau, sédiments, flottants) pour le scénario étudié (événement de magnitude donnée) :
 - Identifier de manière explicite les apports issus du (ou des) bassin(s) versant(s) amont au système (§ 2.2.1) ;
 - Etablir les conditions aux limites aval du système (§ 2.2.2) ;
 - ii. Réaliser une analyse fonctionnelle du système (§ 2.2.3) pour :
 - Identifier les modes de défaillance associés aux frontières du système ;
 - Décomposer le système selon ses différents composants qui ont leur propre fonction et modes de défaillances associés.

Cette étape permet de clarifier les modes de fonctionnement et de dysfonctionnement du système, ceux qui sont quasi-certains et ceux qui sont incertains.

- c) Simplifier le problème par une étape de tri des sous-scénarios à étudier dans l'objectif de réduire leur nombre en explicitant les hypothèses, les simplifications éventuelles et les incertitudes associées (§ 2.3) ;
- d) Lister clairement les sous-scénarios retenus et les modes de fonctionnement associés (§ 2.4).
- e) Définir la répartition spatiale du niveau d'intensité associé à chaque sous-scénario et aussi éventuellement la carte de probabilité d'atteinte de la zone exposée (§ 2.5).

Les paragraphes qui suivent détaillent chaque étape de l'application ce protocole au contexte des scénarios torrentiels. La Figure 5 rappelle et schématise ces étapes sur un cas simplifié.

2.1 Inventaire des tronçons, verrous et enjeux : le système à risques torrentiels

Cette première étape vise à bien identifier le système étudié (Figure 1). Il est alors utile de procéder à la délimitation de la zone d'étude et à l'inventaire des enjeux qui y sont situés. Les tronçons homogènes du réseau hydrographique (pente, gabarit hydraulique, présence de digue, surface drainée) et les singularités et verrous qui l'équipent (ponts, dalots, seuils, mais aussi les ouvrages de protection : plage de dépôt, piège à flottant) sont identifiés et clairement décrits lors de cette étape.

a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux

Objectif: identification des tronçons homogènes (section hydraulique, pente, surface drainée), des verrous (ponts, dalots, seuils), et des enjeux potentiellement menacés.

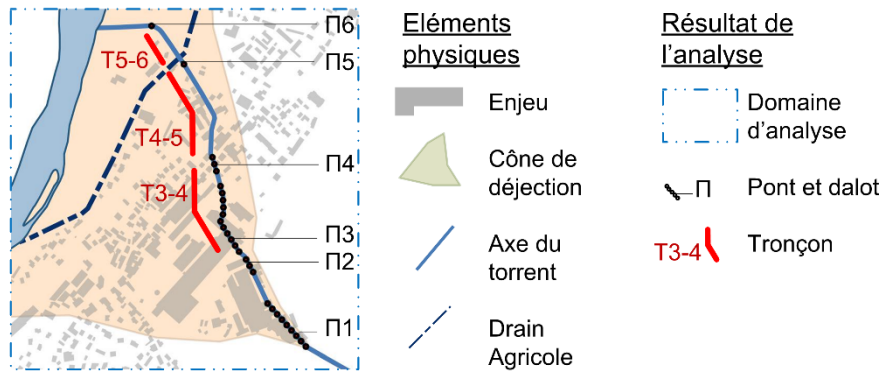


Figure 1 : Synthèse graphique de l'étape a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux

2.2 Identification des modes de défaillances

2.2.1 Caractérisation des apports issus de l'amont du système étudié

Il est indispensable de disposer d'une connaissance suffisante du fonctionnement torrentiel des bassins versants amont pour mener une analyse des sous-scénarios. Le cas échéant, les incertitudes sont trop nombreuses et amènent d'une part à la multiplication des sous-scénarios et, d'autre part, à l'impossibilité de leur associer des probabilités conditionnelles, même très imprécises (Mériaux *et al.*, 2013). A ce titre, les études hydrauliques et géomorphologiques amont forment le socle de l'analyse des scénarios et sous-scénarios. Elles doivent être suffisamment abouties et utiliser des approches appropriées à la complexité du cas d'étude et aux enjeux qu'il comprend.

L'objectif de l'étape d'analyse des apports issus de l'amont du système étudié est d'identifier les caractéristiques des volumes liquides et solides qui influenceront significativement la répartition spatiale des écoulements torrentiels. En considérant la magnitude de la crue comme une donnée d'entrée, il faut caractériser l'ensemble des paramètres secondaires décrivant la crue parmi une liste établie de manière aussi exhaustive que possible dans un premier temps. La liste suivante ne prétend pas être exhaustive mais peut servir de base de travail pour les cas les plus classiques :

- Type de processus⁷ (lave torrentielle, crue de charriage et / ou crue de flottants) ;
- Volume d'apport solide (s'il n'aurait pas déjà été retenu comme paramètre principal de la magnitude) ;
- Débit liquide de pointe (s'il n'aurait pas déjà été retenu comme paramètre principal de la magnitude) ;
- Hydrogramme (durée, un pic / plusieurs pics) ;
- Granulométrie des apports sédimentaires (taille médiane, quantile intermédiaire et taille des gros blocs) ;
- Concentration solide (ou pente représentative du transport solide) pour le charriage ou rhéologie pour les laves torrentielles (type et paramètres descripteurs) ;
- Caractéristiques et quantités de bois flottants (origine naturelle ou anthropique comme un dépôt de grumes, dimensions caractéristiques, nombre, volume, débit) ;
- Autres facteurs aggravants, débris et objets divers (e.g., voiture, citerne).

⁷ Ce premier paramètre ayant souvent une importance significative sur la magnitude de la crue, il a en général déjà été traité au moment de la définition des scénarios de crues.

Dans un second temps, le chargé d'étude sélectionnera les paramètres secondaires les plus pertinents sur la base d'arguments tirés de l'étude hydraulique associée et éventuellement de l'analyse fonctionnelle présentée dans les paragraphes qui suivent.

2.2.2 Caractérisation des conditions aux limites aval du système

Des hypothèses explicites doivent être formulées quant à l'état du milieu récepteur aval qui définit et impose des conditions aux limites aval du système. Dans les cours d'eau torrentiels, l'état du système récepteur influence peu l'hydraulique (dont le régime est souvent proche du régime critique, voir super-critique) mais peut influencer les zones de dépôts et générer des remous solides.

La limite aval du système étudié est souvent prise au niveau d'une section particulière, au niveau d'une confluence avec un autre cours d'eau ou à l'embouchure du cours d'eau avec la mer ou un lac. Les conditions aux limites peuvent être caractérisées par l'hydrologie de la rivière réceptrice (niveau d'eau ou débit), par la cote du lac ou de la mer (y compris la surcote de tempête) pour les torrents côtiers ou débouchant dans des lacs. Les états retenus pour le système récepteur aval (rivière, mer, lac) doivent prendre en compte les éventuelles corrélations entre l'état du système aval et la magnitude de la crue torrentielle. On pense par exemple à :

- La concomitance systématique, possible, probable ou improbable entre crue de la rivière réceptrice et crue du torrent ;
- La variation saisonnière de la cote du plan d'un lac qui peut être en phase ou non avec la saison des crues torrentielles majeures ;
- La surcote marine de tempête (élévation du niveau moyen associée à une dépression atmosphérique) et les conditions d'agitation dans l'embouchure associées à la tempête générant la crue torrentielle (Mazas, 2019).

Selon les sites, l'influence de l'état du système récepteur aval sur les processus torrentiels amont est variable :

- Il n'a pas d'influence prépondérante : ce constat est alors spécifié et un état unique et clairement défini du système récepteur aval est considéré ;
- Le système récepteur aval est, de façon quasi-systématique, dans un état donné quand des crues torrentielles ont lieu : cet état est alors clairement défini et pris comme conditions aux limites aval ;
- L'état du système récepteur aval varie et influence les processus torrentiels amont : un nombre raisonnable de sous-scénarios fera alors intervenir différentes conditions aux limites aval.

2.2.3 Identification des modes de défaillance élémentaires des tronçons et singularités

Quand l'état du système récepteur aval et les caractéristiques principales et secondaires des apports amont ont été clarifiés, il est nécessaire d'identifier les composants du système susceptibles d'avoir des effets macroscopiques sur la répartition spatiale du niveau d'intensité. Ces "points critiques" sont susceptibles de fonctionner de plusieurs manières drastiquement différentes. Chaque mode de défaillance envisagé générant des effets macroscopiques différents doit normalement correspondre à un sous-scénario. L'identification des points critiques peut avoir clairement émergé dès les études hydrauliques amont. Une analyse fonctionnelle du système torrentiel peut permettre de valider ou d'identifier ces points critiques : il s'agit d'identifier les modes de dysfonctionnement potentiels des composants du système (Figure 3), c'est-à-dire des différents tronçons homogènes du chenal et des différentes singularités et verrous qui le composent.

La Figure 2 schématise les types de modes de dysfonctionnement élémentaires les plus classiques rencontrés sur les torrents (Piton, Recking et Tacnet, 2018). D'autres modes de dysfonctionnement peuvent apparaître. Les modes de défaillance illustrés à la Figure 2 peuvent concerner des tronçons ou des singularités. Ces entités peuvent être naturelles (lit naturel du torrent, verrou rocheux) ou artificielles, c'est-à-dire correspondant à des ouvrages (Piton *et al.*, 2023). Les ouvrages visent en général à prévenir un dysfonctionnement au droit d'un point critique. L'effet des ouvrages pourra ainsi être pris en compte de deux façons dans la suite de l'analyse :

- par l'élimination d'un sous-scénario devenant improbable (par exemple, "le remplacement du pont par un nouvel ouvrage dépourvu de pile en rivière élimine le sous-scénario associé à l'embâclement de l'ouvrage actuel") et

- par la prise en compte de la présence de l'ouvrage dans la cartographie du niveau d'intensité (par exemple, "la divagation du torrent est prévenue sur ce secteur grâce aux nouvelles protections de berges").

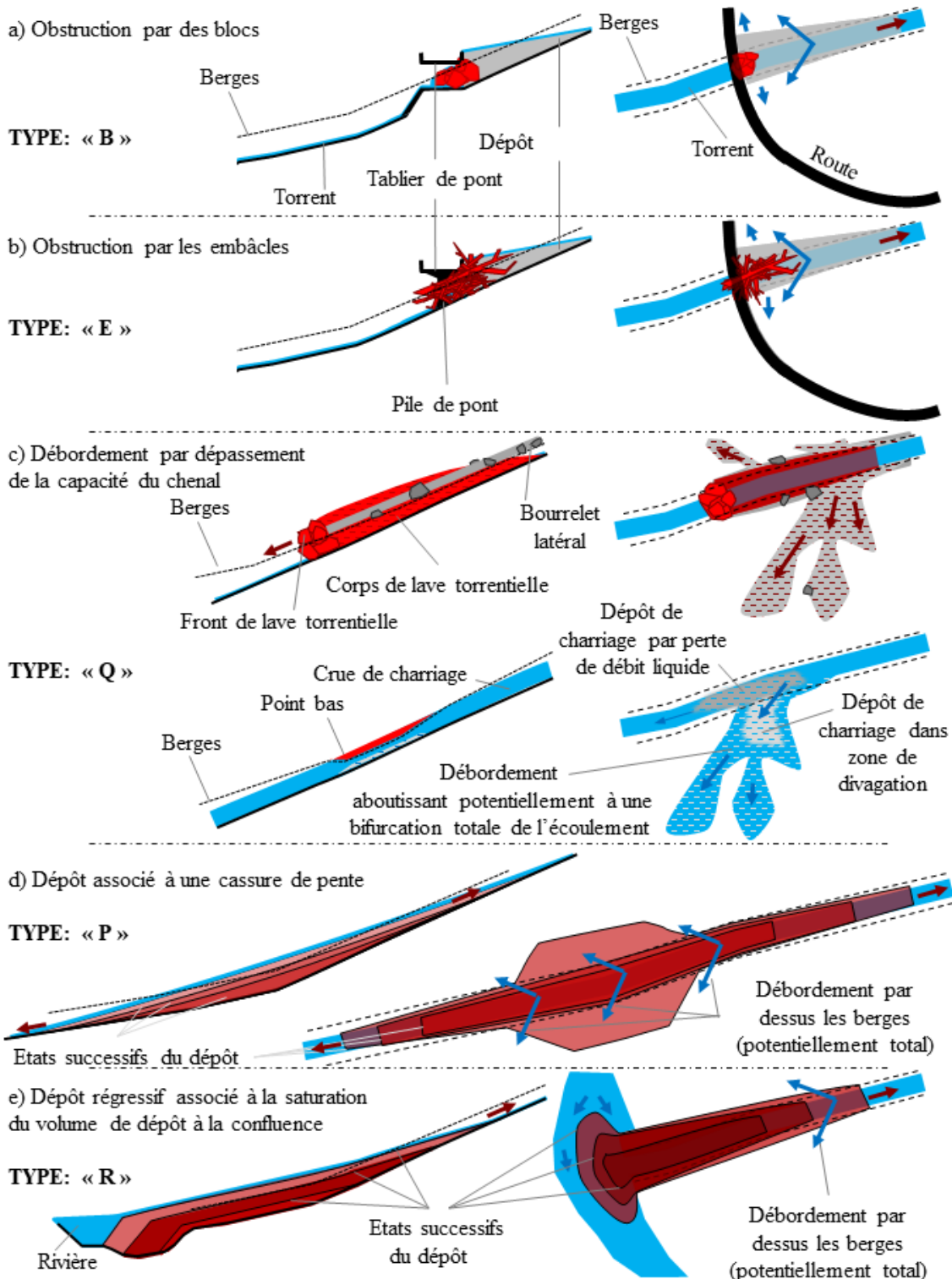


Figure 2 : Schémas synthétiques en vue de côté et vue en plan de cinq types principaux de dysfonctionnements caractéristiques des torrents et aboutissant à des dépôts et débordements. (a) obstruction par des blocs (type « B ») ; (b) obstruction par des embâcles de flottants (type « E ») ; (c) excès de débit par rapport à la capacité du chenal (type « Q »), cas des laves torrentielles et cas des crues de charriage ; (d) dépôts solides associés à une rupture de la capacité de transport au droit d'une cassure de pente (type « P ») ; (e) excès de volume solide par rapport à la capacité de tamponnage du système rivière-torrent entraînant la formation d'un remous solide (type « R »), adapté de Piton *et al.* (2023).

A la phase d'étude des stratégies de protection, cette étape est cruciale : elle vise à concevoir les aménagements et à justifier de leur effet sur la répartition spatiale du niveau d'intensité. Pour chacun des ouvrages, il est donc nécessaire d'identifier sa fonction (description qualitative de l'effet de l'ouvrage sur le processus de crue) et sa capacité (mesure quantitative de cet effet). Le Tableau 2 et le rapport de Favier et al. (2019) donnent des éléments sur cette étape.

Tableau 2 : Fonctions des principaux ouvrages de protection contre les risques torrentiels

OUVRAGE ET DESIGNATION (VARIANTE)	EFFETS ESCOMPTEES SUR LES CRUES	FONCTION	CAPACITE : MESURE (PHYSIQUE) DE L'EFFET LOCAL	MODE D'ESTIMATION DE L'EFFET SUR LE PROCESSUS DE CRUE
Entonnement de pont (radier de mise en vitesses, carénage)	Amélioration des conditions d'entonnement dans un ouvrage couvert	Faciliter l'écoulement et prévenir les obstructions	Accélération et stabilisation locale de l'écoulement	Diminution de la probabilité de dysfonctionnement, modification de la ligne d'eau
Digue (ouvrage de déviation, dérivation)	Diminution de la probabilité de débordement	Maintenir l'écoulement dans un cheminement donné, sans débordement	Niveau maximal d'écoulement (solide + liquide)	Par modification de la répartition des flux liquides et solides entre lit mineur et lit majeur
Protection de berges (ouvrage de chenalisation)	Diminution des érosions latérales	Éviter les divagations hors d'une zone donnée par érosion des berges	Longueur et profondeur de la zone protégée	Par suppression d'une zone de divagation probable
Plage de dépôts (piège à blocs, piège à flottants, filet pare-lave et pare-flottants, piège à graviers, zone de dépôt régulièrement curée, zone de régulation du transport solide)	Piégeage de la charge solide grossière : graviers, blocs et parfois flottants	Piéger des matériaux solide jusqu'au curage	Volume piégé par l'ouvrage	Par réduction du volume d'apport solide de l'évènement à l'aval de l'ouvrage
	Piégeage des gros blocs transportés dans les fronts granulaires et déstructuration de la bouffée de lave torrentielle	Piéger les blocs dépassant une taille critique, briser les fronts de lave torrentielle	Dimension des gros blocs piégés	Par diminution des probabilités d'obstruction d'ouvrages critiques en aval (ponts, section étroite)
	Piégeage des flottants grossiers	Piéger les gros flottants	Diminution en nombre et en taille des gros flottants transportés	Idem
	Diminution de l'intensité du pic de débit solide	Réguler le transport solide	Diminution des débits solides instantanés	Par modélisation de l'effet tampon lié à l'ouvrage
Barrages de correction torrentielle ⁸	Réduction de la fréquence des évènements de forte magnitude	Stabiliser et consolider le lit et les versants, réguler le transport solide	Multiples (voir Favier et al., 2019)	Complexe (voir Favier et al., 2019)
Génie forestier, génie biologique ⁸	Réduction de la fourniture sédimentaire et du ruissellement	Stabiliser les terrains, favoriser l'infiltration	Multiples (voir Favier et al., 2019)	Complexe (voir Favier et al., 2019)

⁸ Les fonctions, capacités et effets des ouvrages de correction torrentielle et des opérations de génie forestier et de génie biologique (traitement des ravines) implantés à forte distance des enjeux sont jugés trop complexes pour être évalués dans les AMC PAPI en l'absence de données scientifiques. Ces éléments ne sont donc pas détaillés dans le tableau mais peuvent être trouvés dans Favier et al., 2019.






Pour chaque scénario de crue étudié, cette étape consiste donc à identifier les modes de défaillance potentiels des tronçons et singularités. Afin de tracer le raisonnement et d'associer des spécificités des processus ou de l'état du système à certains dysfonctionnements, il est utile à cette étape de pointer si certains paramètres secondaires descripteurs de la magnitude des apports issus de l'amont et / ou états particuliers du système récepteur aval sont susceptibles d'influencer ces modes de défaillance.

Plusieurs modes de défaillance peuvent être concomitants et/ou des processus peuvent naturellement entraîner d'autres en cascade par "effet domino". L'idée est de tenter d'identifier les processus initiateurs afin de combattre les causes là où cela est possible.

Le nombre de modes de défaillance potentiels initialement identifiés peut-être très important sur des sites présentant un grand nombre de tronçons et de singularités. Comme indiqué précédemment, l'objectif *in fine* est de limiter le nombre de sous-scénarios au minimum, ces derniers étant différenciés par des cartes d'intensité significativement différentes. Après un travail aussi exhaustif que nécessaire d'inventaire des modes de défaillances possibles (voir section méthodologique), il est donc suggéré d'opérer une étape de tri des sous-scénarios pour simplifier le problème.

b) Identification des modes de défaillances

Objectif: Clarifier les processus les plus probables pouvant générer des débordements et dépôts directement ou par effets en cascade

	PROCESSUS	CODE
	Obstruction par des blocs	B
	Embâclement	E
	Capacité hydraulique insuffisante	Q
	Rupture de pente	P
	Remous solide	R

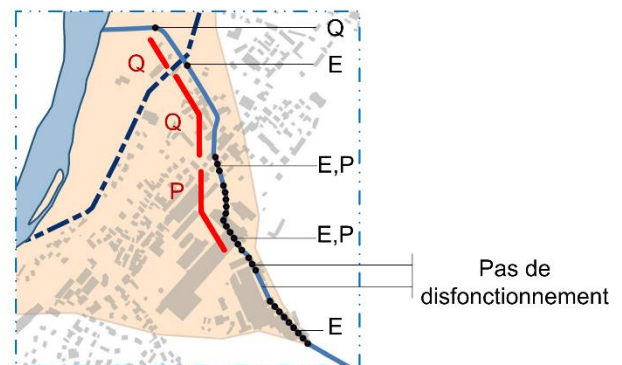


Figure 3 : Synthèse graphique de l'étape b) Identification des modes de défaillances (en noir ceux concernant les singularités et verrous, en rouge ceux concernant les tronçons)

2.3 Tri des sous-scénarios et simplification du problème

2.3.1 Elimination des modes de défaillance n'impactant pas les enjeux

Les modes de défaillance ou leurs combinaisons n'impactant pas les enjeux peuvent être écartés de l'analyse à cette étape (Figure 5c-i) étant donné que, pour une ACB ou AMC (ACB étendue), c'est l'analyse des dommages prévisibles ou de l'exposition des enjeux qui importe. Certains processus n'affectent, par exemple, que des zones locales en amont des enjeux étudiés par l'AMC (par exemple, l'embâclement d'un pont dans des gorges en amont d'un village) ou, au contraire, affectent des ouvrages situés suffisamment à distance en aval pour que leur influence sur les zones à enjeux soit considérée comme négligeable (il faut toutefois faire attention aux remous solides qui peuvent se propager assez loin en amont des ouvrages sur les zones de faible pente telles que les parties terminales des cônes de déjections).

Si le protocole est utilisé pour réaliser une carte d'affichage du risque, par exemple en préparation d'un Plan de Prévention des Risques Naturels, les défaillances ayant des effets macroscopiques sur la répartition des intensités, même dans les zones naturelles, doivent sans doute être intégrées à la réflexion puisqu'elles influencent la cartographie de la probabilité d'atteinte.

2.3.2 Identification des modes de défaillance quasi-certains⁹ et semi-aléatoires¹⁰

Dans la plupart des cas, le croisement de l'étude hydraulique avec l'analyse des modes de défaillances montre que plusieurs paramètres secondaires n'influencent pas le fonctionnement de l'ensemble des composants du système. Le système est alors "robuste" vis-à-vis de l'incertitude associée à ce paramètre secondaire (ou "systématiquement défaillant", voir l'exemple donné en dessous). Il sera ainsi possible de regrouper les sous-scénarios potentiellement associés :

- soit parce que le paramètre secondaire n'a pas d'effet (par exemple, "la variabilité dans la gamme de taille des graviers charriés par ce torrent n'a pas d'influence prépondérante sur la capacité hydraulique des tronçons du système") ;
- soit parce que le mode de défaillance est systématiquement le même dans la gamme de variation du paramètre secondaire en question. Par exemple, "Ce torrent transporte toujours une certaine quantité de flottants pendant ses crues majeures. Leur taille varie entre 2 m et 10 m (paramètre secondaire). L'expérience montre que les buses de ce passage à gué s'obstruent souvent. On fera donc l'hypothèse d'un passage à gué embâclé dans tous les sous-scénarios du scénario centennal".

Les deux cas aboutissent à une simplification de l'analyse. Le second cas pourrait toutefois passer inaperçu si l'étape de réflexion sur la variabilité des paramètres secondaires ("la présence systématique des flottants") et l'analyse fonctionnelle n'avait pas été menée.

Cette étape doit aboutir à la définition des modes de défaillance quasi-certains (qu'ils aient des conséquences positives ou négatives) dont la liste est établie et prise comme hypothèse de travail (Figure 5c-ii). A contrario, une incertitude sur le fonctionnement potentiel de certains points critiques au niveau de verrous ou tronçons particuliers pour certaines magnitudes données persiste souvent. Chacun de ces modes de défaillance incertains (dit semi-aléatoires) peut générer un changement macroscopique dans la répartition spatiale de l'intensité : cela doit donc normalement aboutir à un sous-scénario de crue.

2.3.3 Agrégation des modes de défaillance ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale de l'intensité

Cette étape vise à agréger les modes de défaillance semblables en termes d'effet sur la carte d'intensité (Figure 5c-iii). Il n'y a d'intérêt à agréger que les modes de défaillances incertains (ou semi-aléatoires) car ce sont eux qui augmentent le nombre de sous-scénarios possibles. Un cas typique est celui de plusieurs ponts situés à proximité les uns des autres et séparés de tronçons aux gabarits similaires et insuffisants. Il n'est potentiellement pas simple d'identifier où, précisément, les obstructions par embâcles et débordements auront lieu mais peu importe : pour la magnitude de crue étudiée, il est clair que si un débordement apparaît dans ce secteur, telle direction d'écoulement préférentielle est alimentée et la carte d'intensité est modifiée de façon homogène. Compte tenu des échelles de travail pour les cartes d'intensité, les défaillances concernant des ouvrages situés à proximité directe peuvent ainsi souvent être agrégées. Le sous-scénario fait alors spécifiquement mention que le dysfonctionnement concerne l'un (ou plusieurs) des ouvrages de tel secteur. Les secteurs ne seront pas agrégés si leurs dysfonctionnements respectifs n'ont pas les mêmes effets sur la répartition macroscopique du niveau d'intensité. Ceci revient donc à redéfinir localement la nature et l'échelle du système étudié en termes de composants (par exemple, une série de ponts plutôt que des ponts individuels) et d'étendue spatiale (une zone plus vaste).

⁹ Le terme de "quasi-certain" est utilisé plutôt que "certain" pour rappeler que l'analyse comprend des incertitudes. L'occurrence de sous-scénarios différents n'est pas impossible, mais elle est considérée assez improbable pour être écartée de l'analyse que l'on tente de garder aussi simple et rigoureuse que possible.

¹⁰ Le préfixe "semi-" est ajouté pour rappeler que certains paramètres secondaires ont une grande influence sur l'occurrence de ces modes de défaillances qui ne sont donc pas "purement" aléatoire. Afin de simplifier le discours, il est possible dans les études de ne parler que de phénomène "aléatoire".

La notion "de changement ou d'effet macroscopique"¹¹ reste relative et parfois difficile à évaluer *a priori*. Si certains modes de défaillances resteront plausibles, donc susceptibles de faire l'objet d'un sous-scénario, ils pourront être fusionnés après réflexion et précision dans l'étude, parce que les effets associés ne sont finalement pas significatifs à l'échelle de travail utilisée. Quand le doute persiste sur l'échelle à laquelle la défaillance d'un composant a un effet, des analyses intermédiaires peuvent être menées pour étudier ses effets sur la répartition spatiale de l'intensité. Dans tous les cas où les effets s'avèrent plus faibles que la précision des analyses, il n'est pas nécessaire de différencier les sous-scénarios en question. L'utilisation de gammes d'intensité (forte / moyenne / faible) permet de gérer l'imperfection de la connaissance à ce niveau et devrait permettre de limiter le nombre de sous-scénarios en absorbant une partie de ces situations intermédiaires.

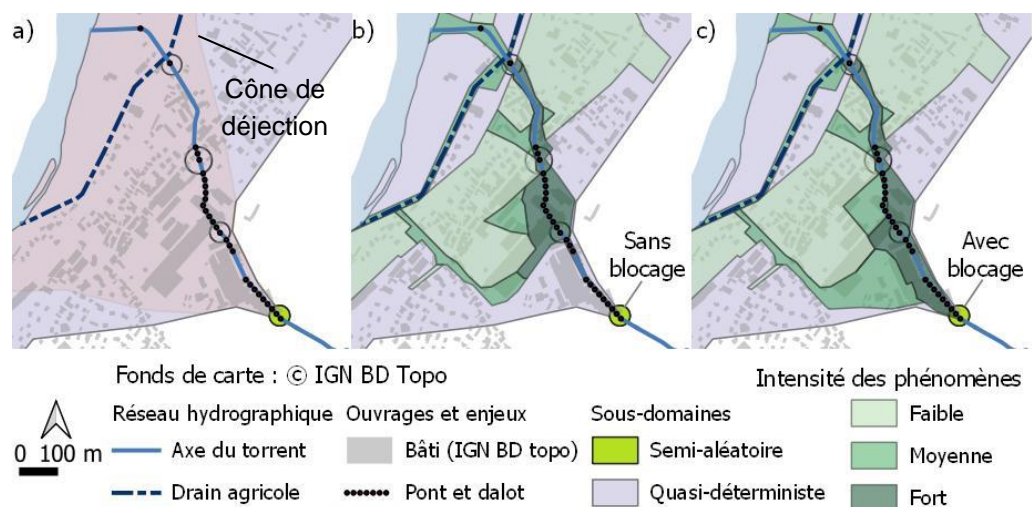
2.3.4 Elimination des modes de défaillances mutuellement exclusifs

Il est enfin réalisé une dernière étape de filtrage en retirant les modes de fonctionnement dont la coexistence est considérée suffisamment improbable pour que ces modes de fonctionnement soient considérés comme mutuellement exclusifs (c'est-à-dire qu'il est considéré hautement improbable qu'ils coexistent). Cette dernière étape permet de limiter le nombre de sous-scénarios retenus. Elle facilite le travail de comparaison par paire en limitant le nombre de paires et en respectant les recommandations d'éviter d'intégrer des sous-scénarios très peu probables dans les comparaisons (Hartford et Baecher, 2004, p. 159 ; Mazzorana *et al.*, 2011).

Certains modes de défaillance peuvent être naturellement mutuellement exclusifs : par exemple "*le pont n°1 est obstrué pendant toute la crue, ou il n'est pas obstrué du tout*". Ce point doit être soigneusement justifié dans l'analyse car ceci peut amener à diminuer les intensités d'écoulement en aval des points de débordement (Mazzorana *et al.*, 2011).

Dans de nombreux cas, en particulier pour les crues de charriage qui sont souvent des épisodes longs (Evin et Piton, 2020), les deux modes de fonctionnement peuvent être observés pendant la crue : "*au début, le pont n°1 n'était pas bouché, il y avait donc continuité du transport solide. Mais le pont n°1 a finalement été obstrué par des embâcles. La rehausse des lignes d'eau induite a généré des dépôts massifs et des débordements vers tel secteur*". Pour des modes de défaillance aussi aléatoires que les embâcles, il semble très incertain de déterminer précisément quand la défaillance d'obstruction aura lieu. Le sous-scénario intégrant l'obstruction de l'ouvrage inclue alors aussi les processus associés au fonctionnement le plus probable ("sans obstruction" dans notre exemple). Sa carte d'intensité sera ainsi assez semblable à celle du sous-scénario sans obstruction *dans la partie située en aval de l'obstruction* alors que les zones de débordement amont sont plus étendues du fait de l'obstruction (voir l'exemple de la Figure 4).

Figure 4 : Exemple simple d'un sous-domaine semi-aléatoire unique (a) générant deux sous-scénarios, (b) sans blocage et (c) avec blocage générant une extension amont de la zone exposée mais peu de changement en aval : le blocage peut avoir lieu tardivement pendant la crue qui aura fait déjà des dommages en aval



¹¹ Voir la définition fournie au glossaire §1.1, p. 6.

Des cas mutuellement exclusifs peuvent plus naturellement émerger dans des cas de laves torrentielles. Les processus sont alors souvent plus courts. Par ailleurs, les hydrogrammes des laves torrentielles ne présentent souvent pas de montée de crue progressives. Le débit au pic, souvent observé au front des laves torrentielles, est atteint très rapidement. Les phénomènes d'obstructions peuvent alors être quasi-immédiats. Si l'obstruction a lieu au droit d'une zone de bifurcation potentielle du chenal, l'axe naturel du chenal et les zones aval exposées autour de ce dernier peuvent alors éventuellement être épargnées. L'étude hydraulique et l'analyse des modes de défaillance justifient alors cette hypothèse de travail.

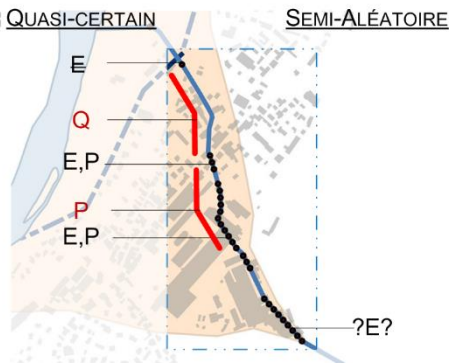
La Figure 5 synthétise graphiquement les quatre étapes de tri et de simplification du problème.

c) Tri et simplification du problème

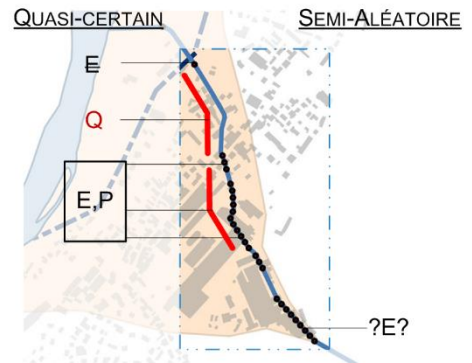
C-i) Elimination des modes de défaillance n'affectant pas les enjeux



C-ii) Identification des modes de défaillance quasi-certains et des modes de défaillance semi-aléatoires



C-iii) Agrégation des modes de défaillance ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale des intensités



C-iv) Elimination des modes de défaillances mutuellement exclusifs (pas d'illustration sur l'exemple présenté)

Figure 5 : Synthèse graphique de l'étape c) Tri des sous-scénarios et simplification du problème (en noir les modes de défaillances concernant les singularités et verrous, en rouge ceux concernant les tronçons)

2.4 Inventaire final des sous-scénarios

2.4.1 Domaines aléatoires et domaine quasi-déterministe

Mazzorana et al. (2011) propose un mode de raisonnement pour établir les sous-scénarios. Le système à risque torrentiel est décomposé en deux types de composants (Figure 6) :

1. Les *composants semi-aléatoires* identifient les singularités ou tronçons où un processus aléatoire peut amener à un changement macroscopique dans la répartition spatiale du niveau d'intensité. Ces composants (ils peuvent être plusieurs) correspondent aux défaillances qui restent incertaines dans l'analyse présentée plus haut ;
2. Les *composants quasi-déterministes* sont rassemblés dans le *sous-système quasi-déterministe* (il est unique). Il désigne la zone dans laquelle la cartographie du niveau d'intensité est menée de façon standard, selon les règles de l'art et les spécificités du cas d'étude. Cette cartographie intègre les modes de défaillance quasi-certains identifiés précédemment. Des processus aléatoires et mal connus y ont lieu, ce qui génère des incertitudes et imprécisions associées aux phénomènes (d'où la désignation de *quasi-déterministe*), mais leur influence reste assez limitée pour qu'ils ne génèrent pas de changements macroscopiques.

Au droit de chaque sous-domaine semi-aléatoire, c'est-à-dire secteur où le mode de défaillance reste incertain, il est ainsi nécessaire de spécifier les modes de défaillance possibles. En règle générale, les incertitudes sont telles qu'il n'est pas envisageable de décrire une multitude de modes de défaillance (par exemple "*le pont est obstrué entre 0 et 5%, entre 5% et 10%, entre 10% et 15%, etc.*"). Des exceptions peuvent exister mais on se limitera en général à identifier deux modes de fonctionnement générant des changements macroscopiques différents dans la répartition spatiale du niveau d'intensité. Par exemple :

- Mode de fonctionnement 1 : l'entonnement dans le pont se déroule globalement normalement et l'effet des flottants est marginal ;
- Mode de fonctionnement 2 : de grands flottants se coincent au droit du pont, obstruent ce dernier assez largement et déclenchent un remous liquide ainsi que des dépôts et débordements en amont".

Un travail de combinatoire est ensuite nécessaire pour associer ces différents modes de fonctionnement élémentaires des composants aléatoires pour construire les sous-scénarios retenus (Figure 7d).

2.4.2 Effet de la magnitude sur l'émergence et la disparition des sous-scénarios

Pour les différents scénarios étudiés (reliés à des périodes de retour), le paramètre de magnitude principal et les paramètres secondaires varient tout autant. Comme illustré dans la Figure 6, certains sous-scénarios peuvent donc être absents pour de faibles périodes de retour (faible magnitude) et émerger pour les fortes magnitudes (fortes période de retour). C'est typiquement le cas des problèmes associés aux flottants dont la production reste relativement rare (Quiniou et Piton, 2022).

Inversement, des modes de défaillance incertains pour des faibles magnitudes peuvent devenir certains pour des magnitudes suffisamment fortes (voir l'exemple ci-dessus sur les flottants ou cet autre exemple : "la rupture de pente au droit de tel tronçon réduit drastiquement la capacité de transport du torrent. En cas d'apport solide centennal, un dépôt massif est certain. Ce dernier entraîne naturellement l'obstruction des ponts du secteur et le débordement généralisé autour du tronçon").

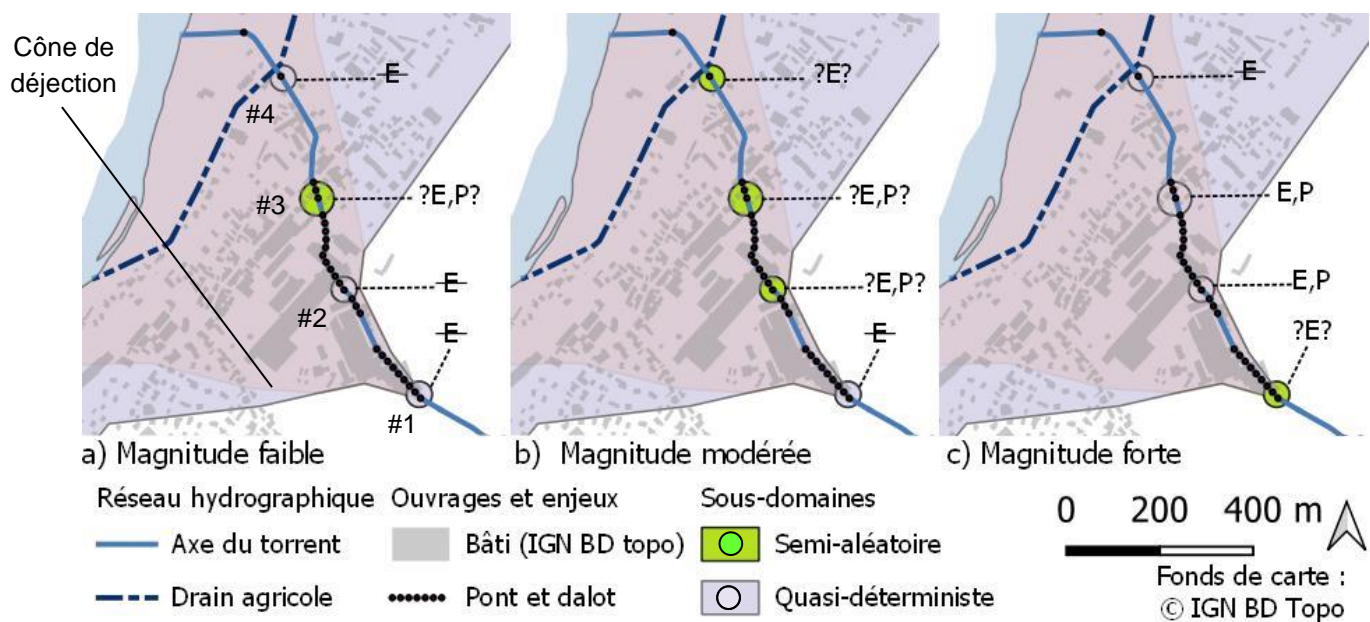


Figure 6 : Décomposition en sous-domaines aléatoires et quasi-déterministe pour différentes magnitudes, c'est-à-dire scénarios : (a) magnitude faible (par exemple scénario décennal) : pas d'embâclement sauf potentiellement au sous-domaine #3 qui est donc semi-aléatoire ; (b) magnitude modérée (par exemple scénario trentennal) : les trois sous-domaines #2, #3 et #4 sont susceptibles d'être embâclés en complément du dépôt au sous-domaines #2 et #3, ils sont donc tous aléatoires, par contre, il est estimé que l'embâclement du sous-domaine #1 est trop peu probable pour être considéré ; (c) magnitude forte (par exemple scénario centennal) : dépôts massifs et embâclements aux sous-domaines #2 et #3 qui sont donc quasi-déterministes, ces débordements épargnent le sous-domaine #4 (pas d'embâclement) qui ainsi lui aussi quasi-déterministe mais un doute subsiste quant à l'embâclement potentiel du sous-domaine #1 qui est donc semi-aléatoire

2.5 Cartographie du niveau d'intensité du processus torrentiel par chaque sous-scénario

L'objet de ce rapport n'est pas de préciser comment mener une cartographie du niveau d'intensité pour les processus torrentiels. Les étapes décrites plus haut doivent significativement faciliter cette étape dans la mesure où chaque sous-scénario a des caractéristiques contrôlant la répartition spatiale de l'intensité qui sont spécifiques et clairement établies. Une approche par sous-scénarios analogue à la présente approche est d'ailleurs proposée dans le guide PPR Cours d'Eau Torrentiels (A paraitre)¹²:

Le mode de fonctionnement de chaque tronçon et ouvrage clé a été préalablement clarifié. La cartographie détaillée du niveau d'intensité n'est toutefois pas triviale. Elle doit faire appel à un niveau d'expertise et à des outils adaptés au cas d'étude (voir notamment Favier et al., 2019).

Il est aussi important de noter que les classes et critères d'intensités doivent pouvoir alimenter les calculs de dommages. Différents critères d'intensité des phénomènes torrentiels sont proposés dans la littérature et les pratiques varient selon les pays et les régions (Favier et al., 2019). S'il est décidé d'utiliser un grille de critère d'intensité selon une pratique faisant consensus localement, il sera important de bien indiquer comment ont été adaptés les liens entre intensité et dommages. Par exemple, si on veut utiliser les taux de dommages retenus en Suisse et que la définition locale d'une intensité modérée diffère de la définition Suisse, il faudra indiquer à quelle classe d'intensité locale correspond chaque classe d'intensité Suisse. On disposera alors d'une fonction de dommage Ad-Hoc reliant les classes d'intensité utilisées localement avec des taux de dommages.

2.6 En synthèse

La Figure 7 agrège les figures de synthèse des différentes étapes et illustre l'ensemble de ces dernières. Pour chaque scénario et chacun des sous-scénarios associés, l'étude tracera de façon explicite :

- La liste des tronçons, verrous et enjeux qui constitue le système étudié,
- Les modes de défaillance potentiels du système impliquant de bien décrire :
 - Les caractéristiques des apports liquides et solides provenant de l'amont,
 - Les états du système récepteur aval,
 - Les modes de défaillance élémentaires des différents tronçons et verrous,
- L'analyse fonctionnelle du système à risque torrentiel en pointant :
 - Les modes de fonctionnement quasi-certains avec défaillances ou fonctionnements satisfaisants,
 - Ainsi que le mode de fonctionnement des composants aléatoires dans chaque sous-scénario retenu.
- Chaque sous-scénario retenu est ainsi clairement décrit en terme de conditions aux limites et de mode de fonctionnement des composants du système.
- Ces éléments sont ensuite utilisés pour cartographier la répartition spatiale du niveau d'intensité pour chaque sous-scénario.

Il sera évidemment indiqué les raisons de l'élimination de l'analyse de modes de défaillances par agrégation avec d'autres ou pour des raisons d'absence d'enjeux ou du caractère virtuellement impossible de leur concomitance avec un autre mode de défaillance.

¹² Guide PPR Cours d'Eau Torrentiels : Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels, MTECT, 2023

a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux

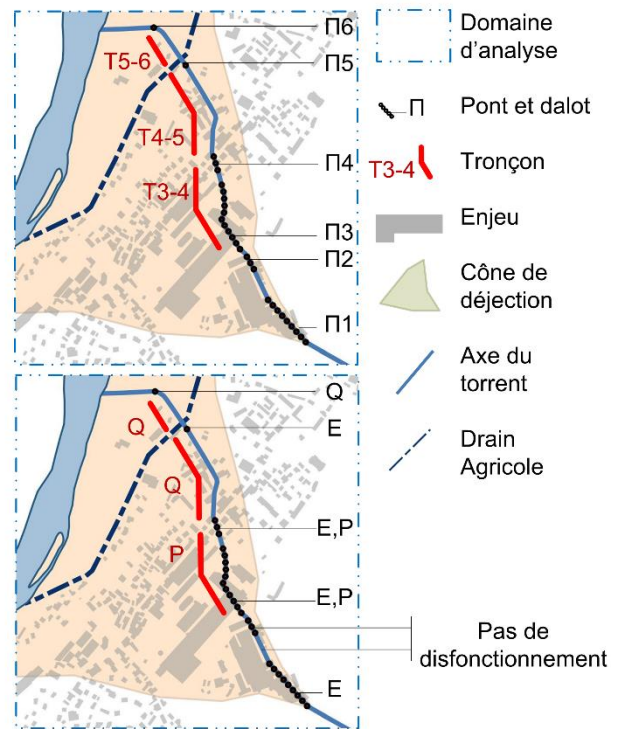
Objectif: identification des tronçons homogènes (section hydraulique, pente, surface drainée), des verrous (ponts, dalots, seuils), et des enjeux potentiellement menacés.

Puis, pour chaque scénario de magnitude donnée:

b) Identification des modes de défaillances

Objectif: Clarifier les processus les plus probables pouvant générer des débordements et dépôts directement ou par effets en cascade

PROCESSUS	CODE
Obstruction par des blocs	B
Embâclement	E
Capacité hydraulique insuffisante	Q
Rupture de pente	P
Remous solide	R

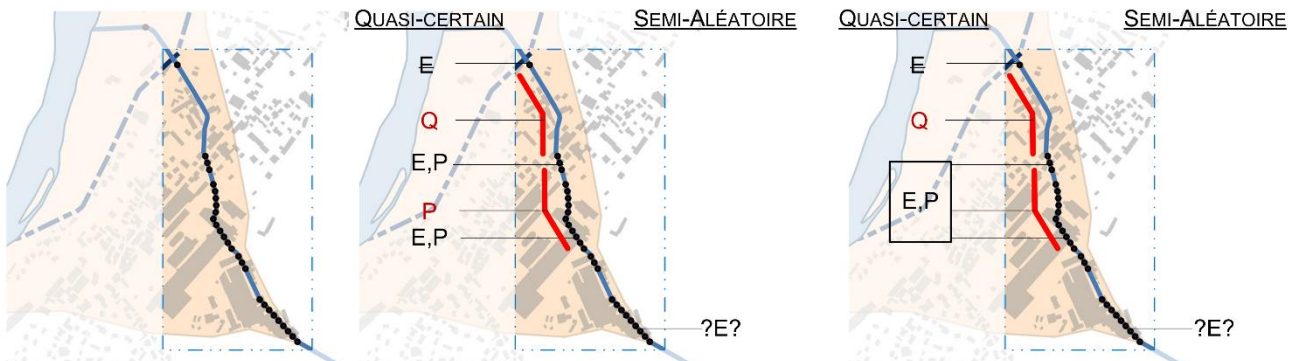


c) Tri et simplification du problème

C-i) Elimination des modes de défaillance n'affectant pas les enjeux

C-ii) Identification des modes de défaillance quasi-certains et des modes de défaillance semi-aléatoires

C-iii) Agrégation des modes de défaillance ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale des intensités



C-iv) Elimination des modes de défaillances mutuellement exclusifs (pas d'illustration sur l'exemple présenté)

d) Liste finale des sous-scénarios

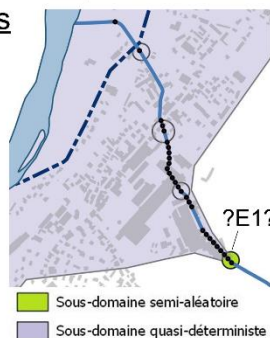
Un sous-domaine aléatoire
→ 2 sous scénarios

-S_A : E1 & E-P(3-4) & Q4-5 & E5

"Pas d'embâcle au Π1, dépôts et embâcle dans le secteur 3-4, débordement dans le secteur 4-5 et pas d'embâcle au Π5"

-S_B : E1 & E-P(3-4) & Q4-5 & E5

"Embâclement au Π1,..."



e) Cartographie du niveau d'intensité

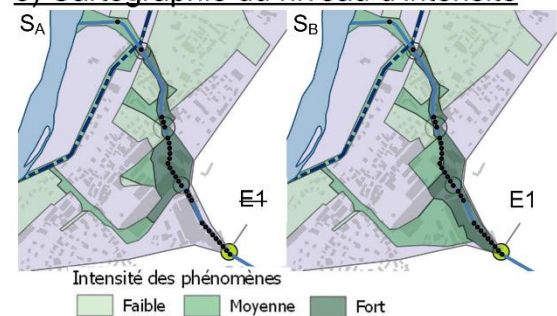


Figure 7 : Synthèse des étapes d'analyse proposées pour éliciter et cartographier les sous-scénarios de crues torrentielles

3 Estimer une probabilité conditionnelle d'occurrence de chaque sous-scénario : proposition d'un protocole

A cette étape, on considère les sous-scénarios comme identifiés et précisément décrits. Il s'agit ensuite de leur associer des probabilités conditionnelles. Par exemple, sur un torrent donné, faisons l'hypothèse d'un scénario S d'occurrence d'une lave torrentielle de volume $M = 50\,000\text{ m}^3$, associé à une période de retour donnée. Après analyse, l'étude hydraulique, menée sur la base de ce scénario, identifie et retient trois sous-scénarios :

- S_A : "le pont n°1 se bouche déclenchant des débordements aux alentours et un transfert négligeable en aval",
- S_B : "la lave torrentielle passe le pont mais déborde en aval en rive droite", et
- S_C : "la lave torrentielle continue entre les berges sans déborder".

On cherche à déterminer avec quelle probabilité chacun de ces sous-scénarios peut apparaître, ceci étant conditionné à l'hypothèse d'une magnitude M de $50\,000\text{ m}^3$: c'est pourquoi il s'agit de probabilités *conditionnelles*. En voulant qualifier la probabilité conditionnelle de S_A , on cherche à répondre à la question : "Sachant que la lave torrentielle fait $50\,000\text{ m}^3$, quelle est la probabilité d'obturation du pont n°1 ?"

3.1 Différents modes d'évaluation des probabilités

L'affectation d'un niveau de probabilité à un sous-scénario représente une mesure de l'incertitude qu'il y a sur l'hypothèse "le sous-scénario se produit". Cette évaluation s'appuie nécessairement sur la connaissance que l'expert a de ces sous-scénarios. Or, dans le domaine des risques naturels et plus particulièrement dans celui des risques torrentiels, cette connaissance ne peut que rarement se baser sur des données abondantes relatives à des événements passés. L'expert doit alors rechercher et combiner un ensemble de connaissances provenant de sources variables qui lui permettent de fournir cette évaluation. Ce rapport n'aborde pas le vieux débat sur les différentes approches de la notion de probabilité, le lecteur intéressé est invité à se référer à la littérature dédiée au sujet (par exemple Vick, 2002).

Ainsi, selon l'accessibilité à des données d'événements passés ou non, leur qualité et leur nombre, l'évaluation va différer. Pour des cas analogues à des études sur modèles physiques ayant servi à mener des études rigoureuses à travers des expériences répétées, l'analyse porte sur l'incertitude aléatoire représentée par une probabilité objective, qui est alors absolue et quantitative. Dans la plupart des cas en torrentiel, le manque de connaissances sur la physique des phénomènes est tel qu'on est en présence d'une incertitude épistémique ne pouvant être représentée, dans le cadre de la théorie des probabilités, que par une probabilité subjective. L'expert peut alors l'estimer soit de manière absolue, soit en s'appuyant sur une comparaison relative entre sous-scénarios. Cette estimation est généralement qualitative au regard de l'imprécision avec laquelle il mène cette évaluation.

3.1.1 Probabilité subjective et objective

La probabilité objective, qui représente l'incertitude aléatoire avec laquelle le sous-scénario va apparaître, est établie selon des données ou des expériences répétées (approche fréquentiste). Dans le cas d'exemple des trois sous-scénarios S_A , S_B et S_C conditionnés à l'occurrence d'un scénario S d'une lave de $50\,000\text{ m}^3$ dans le torrent étudié, cela signifie qu'on a connaissance d'un nombre répété de laves d'au moins $50\,000\text{ m}^3$ à analyser : l'analyse du risque s'intéressant aux phénomènes rares, ce n'est que très rarement le cas en pratique.

Malgré ce constat d'un manque de connaissances intrinsèque à l'estimation du potentiel d'occurrence de ce type de phénomènes dans chacun des sites (cas d'un contexte d'incertitude épistémique), les experts doivent tout de même se prononcer. Plusieurs cadres théoriques existent (possibilités, probabilités imprécises, fonctions de croyance, Tacnet, 2009) mais le cadre de la théorie probabiliste reste celui qui est le plus largement utilisé.

Sur la base de leurs propres connaissances, les experts peuvent alors proposer une évaluation subjective de la probabilité conditionnelle de survenue de chacun de ces sous-scénarios S_A , S_B et S_C . Cela signifie qu'ils ne

se sont pas appuyés sur un large échantillon de données pour établir cette probabilité, mais bien sur leur expérience. L'évaluation est alors donnée "à dire d'expert", les bonnes pratiques consistant à fournir les éléments étayant le jugement. La probabilité exprime ici en quelque sorte le niveau de confiance que l'on a dans l'assertion "Le phénomène X va se produire".

Deux points sont à garder en tête, en parallèle du déroulé qui suit :

- Il existe de nombreuses méthodes d'aide à l'élicitation des probabilités subjectives pour tracer le raisonnement qui a conduit l'expert à établir telle ou telle probabilité ;
- Il existe d'autres cadres théoriques que les probabilités pour représenter l'incertitude épistémique (par exemple, théorie des fonctions de croyance) mais nous ne les aborderons pas ici pour ne pas complexifier le protocole proposé.

3.1.2 Probabilité qualitative et quantitative, précise et imprécise

L'évaluation d'une probabilité est forcément comprise entre 0 (probabilité la plus faible, correspondant à un événement impossible) et 1 (probabilité la plus forte, correspondant à un événement certain) : attribuer un chiffre dans cet intervalle [0 ; 1] est donc une évaluation quantitative. Cette attribution peut être établie de manière objective sur la base d'une analyse de données suffisantes en nombre ou de manière subjective en l'absence de données suffisantes.

Cependant, en pratique, il s'avère souvent difficile d'affecter un nombre de manière précise : parce que les données sont souvent insuffisantes et qu'il est difficile pour l'expert de se prononcer de manière précise même de façon subjective. Dans ce cas, seul un intervalle de valeurs quantitatives peut, en fait, être affecté à chaque probabilité (cf Tableau 3). En pratique, c'est généralement un terme linguistique qui est alors associé à l'évaluation de cette probabilité, représentant l'imprécision avec laquelle chaque probabilité est évaluée.

Tableau 3 : Exemple simple des différents modes d'évaluation des probabilités, sur la base de l'hypothèse de la survenue de trois sous-scénarios exclusifs (S_A, S_B et S_C) pour une lave torrentielle de 50 000 m³ sur un site donné.

SOUS-SCENARIOS	S _A	S _B	S _C
Probabilité quantitative précise	0,6	0,3	0,1
Probabilité quantitative imprécise (sous forme d'intervalle)	[0,4 ; 0,8]	[0,2 ; 0,4]	[0,01 ; 0,2]
Probabilité qualitative (forcément imprécise)	Probable	Improbable	Très improbable

3.1.3 Probabilité absolue et relative

Pour éliciter chacune des probabilités conditionnelles, il est par ailleurs possible d'aborder le problème sous deux angles différents et complémentaires :

- Celui des probabilités conditionnelles *absolues* : la probabilité du sous-scénario est élicitée en absolu. Par exemple, "*pour la magnitude étudiée, le sous-scénario associé à l'obstruction du pont n°1 a 75% d'être observé*";
- Celui des probabilités conditionnelles *relatives* : la probabilité d'un sous-scénario est comparée à celle d'un autre sous-scénario. Par exemple, "*pour la magnitude étudiée, le sous-scénario associé à l'obstruction du pont n°1 a trois fois plus de chance d'être observé que celui où il ne se bouche pas*"¹³.

Dans cet exemple simple où seulement deux sous-scénarios sont intégrés (le pont se bouche, ou non), les deux types d'analyse aboutissent aux mêmes probabilités conditionnelles pour chaque sous-scénario : 0,75 pour l'obstruction du pont n°1 ; 0,25 pour la non-obstruction du pont n°1.

¹³ Le calcul des probabilités conditionnelles des deux branches se fait ensuite par l'opération suivante : "Si S_A a X fois plus de chance d'être observé que S_B" ($P(S_A|M) = X \cdot P(S_B|M)$) et que l'ensemble des possibles est couvert par S_A et S_B ($P(S_A|M) + P(S_B|M) = 1$), alors $P(S_A|M) = X / (X + 1)$ et $P(S_B|M) = 1 / (X + 1)$

Par contre, si le nombre de sous-scénarios est plus important, il peut être utile de décomposer le problème en arbres de probabilité (voir exemple simple dans la Figure 8). Cette approche permet d'intégrer à la fois des probabilités relatives au droit de certaines branches et des probabilités absolues au droit d'autres branches.

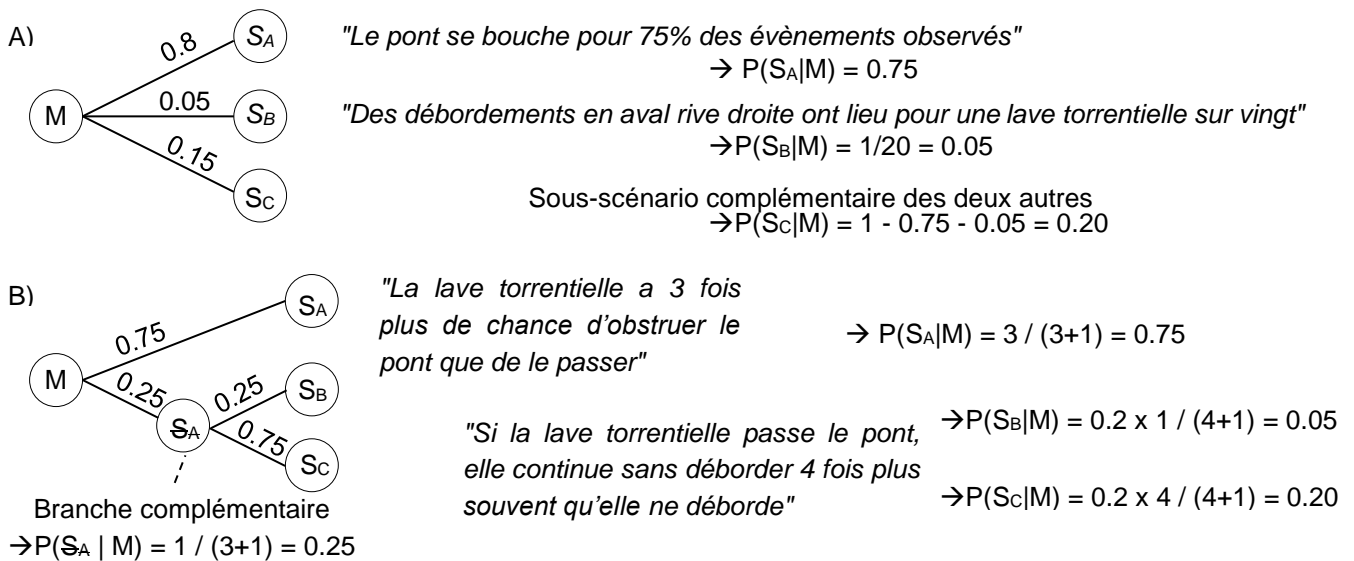


Figure 8 : Arbres de probabilité illustrant les estimations des probabilités conditionnelles des sous-scénarios du scénario de magnitude M (volume de lave torrentielle $> 50\,000\text{ m}^3$) : A) sans nœud intermédiaire et estimé par des probabilités absolues et B) avec nœud intermédiaire et estimé avec des probabilités relatives.

Certains processus, modes de défaillances et sites se prêtent éventuellement plus à une approche absolue, d'autres plus à une approche relative. En effet, dans des cas simples impliquant des processus ayant été étudiés en détails, il peut être plus aisé d'utiliser les probabilités absolues. Au contraire, sur des sites complexes où les comparaisons entre sous-scénarios impliquent des faisceaux d'indices issus de méthodes complémentaires interprétés à dire d'expert, il peut être plus commode ou simplement nécessaire d'adopter une approche relative.

L'objet du présent rapport n'est pas de dresser un état de l'art des méthodes utilisables pour éliciter les probabilités absolues de sous-scénarios car :

- Comme des travaux scientifiques portant sur la thématique des interactions entre ouvrages et crues sont publiés chaque année, notre état de l'art serait rapidement dépassé. Nous encourageons donc les chargés d'étude à mener une recherche rapide sur les publications récentes impliquant les processus qui les intéressent : on trouve parfois des travaux très utiles dont certains sont présentés plus loin ;
- Comme chaque cas est unique, il serait péremptoire de prétendre proposer une méthode à la fois simple et universelle. Les chargés d'études doivent adopter une approche pragmatique et se reposer à la fois sur leur connaissance du cas d'étude et sur leur expertise pour mener l'analyse la plus pertinente possible avec les moyens dont ils disposent (archives, connaissance experte, cas similaires, modèles plus ou moins sophistiqués, littérature scientifique et technique, etc.).

Différentes approches d'élicitation des probabilités ont été proposées dans la littérature pour aider les experts dans cette étape. Si quelques approches sont listées dans les paragraphes qui suivent, leur présentation se veut surtout illustratrice et la liste n'est *en aucun cas* exhaustive.

Au vu de la classification proposée dans le paragraphe précédent, on distingue ces approches selon le mode d'évaluation des probabilités conditionnelles auxquelles elles permettent d'aboutir (absolues ou relatives, objectives ou subjectives, quantitatives ou qualitatives).

3.2 Probabilités absolues objectives, quantitatives précises

La méthode *théoriquement* la plus simple et rigoureuse serait d'assigner directement une probabilité absolue objective, quantitative, précise, basée sur des observations assez nombreuses d'un échantillon comparable au cas d'étude (approche fréquentiste). Les observations de crues de forte magnitude étant naturellement rares sur un site donné, les données des archives ne contiennent généralement pas assez d'observations pour établir ce type de probabilité. Si l'échantillon est suffisamment grand, il couvre soit une période si longue qu'il peut être pertinent de douter du caractère stationnaire de la distribution (effets des changements climatiques par exemple) ou alors agrège des observations de sites multiples et c'est alors la pertinence du caractère de similarité entre les sites dont on peut douter.

Les approches aboutissant à des probabilités absolues précises repose donc plutôt sur des modèles numériques ou physiques ayant servi à mener des études paramétriques (exploration du comportement du système dans une large gamme de variation des paramètres contrôlant son fonctionnement).

3.2.1 Exemple de l'estimation de la probabilité d'obstruction des ponts par des embâcles

A titre d'exemple, on peut mentionner les formules proposées par Lange et Bezzola (2006, p.26) pour estimer la probabilité de blocage de flottants au droit d'un pont (voir plus de détails dans Quiniou et Piton, 2022). L'étude portait sur le blocage de flottants transportés individuellement (régime non-saturé selon la terminologie du guide OFEV, 2019) dans des chenaux et ponts à section rectangulaire ou trapézoïdale (Figure 9). Les essais ayant mené à ces résultats ont été réalisés dans des conditions de nombre de Froude $Fr = [0.3 ; 1.1]$.

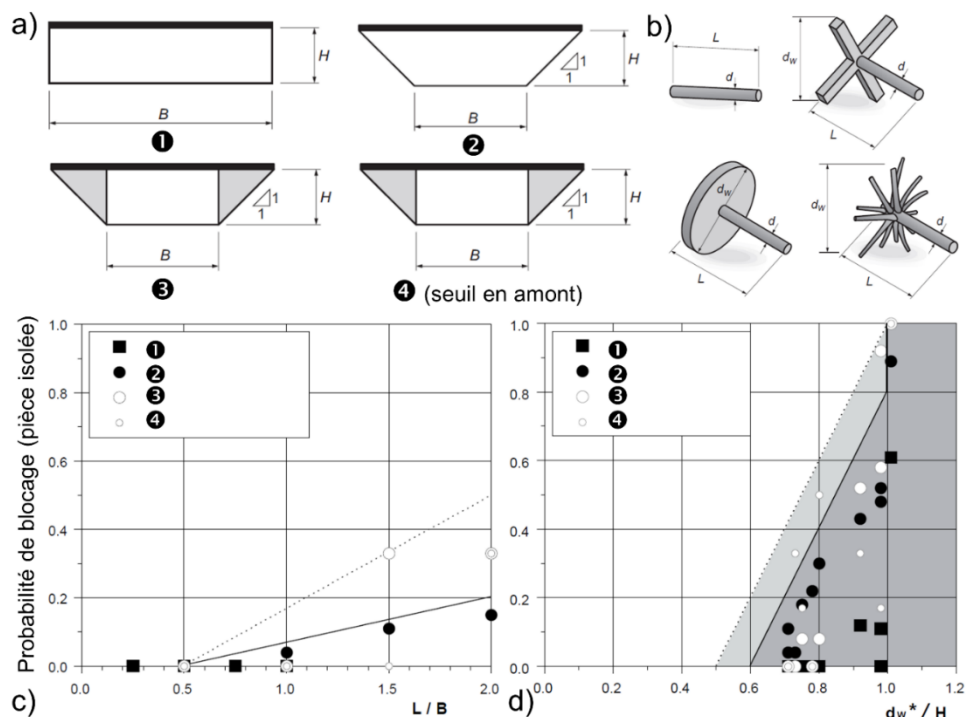
Les probabilités de blocage sont exprimées en fonction des nombres adimensionnels de longueur relative L/B et de diamètre de flottants adimensionnel $d_w^* = (d_{w,min} \times d_{w,max} \times L)^{1/3}$ (voir Figure 9b). Lange et Bezzola (2006, p.26) proposent ainsi des formules empiriques de prédiction de la probabilité de blocage au niveau de ponts P_{blockage} :

- pour $L/B < 0.5$: $P_{\text{blockage}} = 0$
- pour $L/B \geq 0.5$: $P_{\text{blockage}} = 0.133 L/B - 0.066$

avec B la largeur de la section d'écoulement et L la longueur des flottants. Un critère équivalent peut être déduit de la Figure 9d avec le paramètre d_w^*/H , H étant la hauteur de sous-poutre :

- pour $d_w^*/H < 0.6$: $P_{\text{blockage}} = 0$
- pour $d_w^*/H \geq 0.6$: $P_{\text{blockage}} = 2 d_w^*/H - 1.2$

Figure 9 : Probabilité de blocage de troncs transportés individuellement d'après (Lange et Bezzola, 2006):
 a) configurations testées, les zones grisées dans les configurations (3) et (4) représentent des culées, la configuration (4) est équipée d'une chute en amont du pont; b) éléments utilisés pour représenter les embâcles; c) probabilité de blocage en fonction du rapport largeur d'ouverture B / longueur des flottants L ; d) probabilité de blocage en fonction du rapport diamètre de flottant adimensionnel d_w^* / hauteur de sous poutre H



En réalité, la sélection de l'équation retenue et la rigueur du caractère transférable des résultats de modélisation aux cas de terrains rendent l'approche subjective. Le caractère "objectif" ou "subjectif" d'une approche est donc sujet à discussion. Les formules simplifiées de ce type doivent donc être utilisées avec prudence pour l'évaluation de la probabilité de blocage : leur domaine d'application est conditionné à une grande similarité avec les conditions dans lesquelles elles ont été établies. Elles ont toutefois le mérite de donner des tendances et des ordres de grandeurs.

Schmocker et Hager (2011) ont aussi établi des formules permettant de déterminer la probabilité de blocage de bois flottant pour différents types de ponts, de conditions d'écoulement et de caractéristiques de bois. Eux aussi n'ont étudié cette probabilité que pour des éléments individuels (régime non-saturé).

Les travaux de Gschnitzer et al. (2017) se sont intéressés aux probabilités d'embâcle des ponts sur des cours d'eau de pente intermédiaire (0.1 – 0.8 %) et sont parmi les plus complets et les plus transférables aux cours d'eaux torrentiels (voir la description plus détaillée de leur travail au § 3.4). Ils aussi proposent des coefficients permettant de reconstruire des probabilités absolues à travers des régressions logistiques (voir Quiniou et Piton, 2022, p. 67).

3.2.2 Exemple de l'estimation de la probabilité d'obstruction des ponts par les laves torrentielles

Le critère d'ouverture relative (largeur ou hauteur de la section / diamètre des blocs) est utilisé classiquement pour approcher l'estimation de la probabilité d'obstruction des ouvrages par les blocs (voir explications plus détaillées au § 3.3). Ce critère est plutôt utilisé pour estimer des probabilités subjectives qualitatives plutôt que pour déterminer des probabilités objectives quantitatives (voir la Figure 10 et les explications associées). Piton, Goodwin, *et al.* (2022) ont toutefois développé une approche statistique simple de modélisation de la présence et de l'obstruction progressive d'ouvrages par des laves torrentielles chargées de blocs (données d'entrées : géométrie du système, hydrogramme de lave torrentielle, nombre de blocs de différentes classes de taille que l'on rencontre dans un volume donné de lave torrentielle). Le code peut être utilisé à de multiples reprises pour tester virtuellement un grand nombre d'événements et en tirer des probabilités objectives, par exemple dans l'esprit de l'étude menée par Chahrour *et al.* (2022) pour modéliser le fonctionnement d'une plage de dépôt.

3.3 Probabilités absolues subjectives, qualitatives et quantitatives

En réalité, n'importe quel modèle ou analyse, en particulier en ingénierie, implique une part de subjectivité (Vick, 2002, p. 17). C'est l'importance croissante de la phase de réinterprétation par les experts, en comparaison avec l'importance décroissante d'analyse probabiliste de données objectives, qui nous amène à classer certaines méthodes comme plus "subjectives" qu'"objectives". Ces probabilités absolues subjectives peuvent par exemple être issues d'observations de terrain réinterprétées par des experts afin d'en tirer des règles de fonctionnement empiriques. L'interprétation d'archives peut, dans des cas bien documentés, permettre d'élucider des probabilités absolues que certains qualifieront "d'objectives" et que d'autres qualifieront de "subjectives". Malgré les nombreuses incertitudes sur la magnitude et l'état du système, des observations de la propension de tel secteur à subir des dépôts ou de tel pont à être obstrué par des embâcles peuvent guider les experts dans la qualification d'une probabilité assez robuste mais qui reste toutefois subjective dans la mesure où elle n'est pas basée sur un large échantillon d'observations rigoureusement similaires et indépendants.

3.3.1 Probabilités absolues subjectives : d'une assignation verbale à une évaluation quantitative

Dans les nombreux cas où un simple dénombrement n'est pas possible, des probabilités absolues subjectives peuvent être assignées à dire d'expert. En pratique, cette assignation n'est pas directement quantitative mais elle consiste à assigner une forme verbale qualitative (par exemple "*l'obstruction du pont est très probable*") qui est par ailleurs associée à une valeur numérique précise, ou à un intervalle de valeurs, de probabilité selon une convention qu'il convient de fixer. Idéalement, il est même préférable de fournir à la fois la forme verbale et la valeur numérique associée (Visschers *et al.*, 2009) mais ceci alourdit significativement le texte.

La terminologie et les valeurs proposées par Vick (1997) ont été largement reprise dans le milieu de l'hydraulique (Hartford et Baecher, 2004, p. 159 ; Vuillet *et al.*, 2013 ; Talon et Curt, 2017 ; USBR et USACE, 2019). C'est d'ailleurs cette convention qui a été adoptée dans les exemples fournis dans le Chapitre 4. Cette terminologie a toutefois la spécificité de ne pas être parfaitement symétrique. Cette caractéristique était issue des résultats de Reagan *et al.* (1989) qui ont précisément étudié en psychologie les associations que les gens font entre forme verbale et valeur quantitative. Ils ont par exemple démontré qu'en général, qualifier qu'un événement est "probable" équivalait à une probabilité de 0.70 (gamme d'incertitude : [0.60 ; 0.75]), tandis qu'un événement "improbable" équivalait à une probabilité de 0.15 (gamme d'incertitude : [0.05 ; 0.20]), assez différente de la valeur de $1 - 0.7 = 0.3$ qu'on aurait obtenu en considérant le complémentaire du premier événement. On note même que les intervalles d'incertitudes des complémentaires ne se recouvrent pas ($[0.60 ; 0.75] \neq 1 - [0.05 ; 0.20]$). Cela peut être perçu comme un avantage : cette caractéristique pourrait être utilisée en choisissant d'évaluer le caractère "probable" d'un événement ou le caractère "improbable" de son complémentaire afin d'aboutir à des valeurs de probabilité assez précises.

Ceci étant, les données disponibles permettent rarement de qualifier précisément les probabilités et une terminologie dissymétrique peut poser quelques complications mathématiques dans les analyses : dans la plupart des cas, considérer qu'un sous-scénario S_A de probabilité $P(S_A|M)$ est "probable" a sensiblement la même signification pour un chargé d'étude que de considéré que le sous-scénario complémentaire \bar{S}_A de probabilité $P(\bar{S}_A|M) = 1 - P(S_A|M)$ est "improbable". L'utilisation de la terminologie de Vick (1997), fournie au Chapitre 4, aboutit pourtant à des résultats différents : $P(S_A|M) = 0.7$ & $P(\bar{S}_A|M) = 0.3$ dans le premier cas, $P(S_A|M) = 0.85$ & $P(\bar{S}_A|M) = 0.15$ dans le second. Il est donc conseillé d'utiliser avec prudence la terminologie de Vick (1997), elle pourra toutefois être utile pour les cas où il est nécessaire de mobilisé ce caractère dissymétrique.

Une autre convention du même type qui ne présente pas ce genre de problème est très utilisée dans les géosciences depuis une décennie : celle définie pour le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat). Elle est fournie dans le Tableau 4. Elle est rappelée dans plusieurs rapports et décrite dans l'article de Mastrandrea *et al.* (2011). Cette dernière est symétrique et relativement simple, nous suggérons donc de l'utiliser dans les cas les plus classiques. Les probabilités d'occurrence associées à une forme verbale sont fournies par Mastrandrea *et al.* (2011) sous forme d'intervalle. Un événement qualifié de "probable" aurait donc une probabilité, mal connue, considérée comme variant dans la gamme $0.66 - 1$.

Tableau 4 : Association de l'évaluation sous forme verbale (qualitative) à l'évaluation quantitative des probabilités subjectives selon l'approche retenue dans les rapports du GIEC (Mastrandrea *et al.*, 2011)

FORMULATION ANGLAISE	FORME VERBALE FRANÇAISE	PROBABILITE D'OCCURRENCE
Exceptionally unlikely	Exceptionnellement improbable	0 - 0,01
Extremely unlikely	Extrêmement improbable	0 - 0,05
Very unlikely	Très improbable	0 - 0,1
Unlikely	Improbable	0 - 0,33
About as likely as not	Aussi probable qu'improbable	0,33 - 0,66
Likely	Probable	0,66 - 1
Very likely	Très probable	0,9 - 1
Extremely likely	Extrêmement probable	0,95 - 1
Virtually certain	Quasiment certain	0,99 - 1

Il est souvent souligné dans la littérature que l'estimation verbale de probabilités très faibles ou très fortes est difficile (Hartford et Baecher, 2004, p. 159 ; USBR et USACE, 2019) : si le vocabulaire manque ainsi entre des phénomènes "Extrêmement improbable" et ceux "Exceptionnellement improbable", que dire des phénomènes encore plus rares que ceux "Exceptionnellement improbable" ? L'esprit humain a par ailleurs du mal à conceptualiser les nombres très petits et très grands. Il faut donc éviter autant que possible d'avoir à assigner des probabilités <0.01 ou >0.99 . Ainsi, dans la mesure du possible et pour aider à tracer le raisonnement, il est

conseillé de décomposer le problème, par exemple sous forme d'un arbre de probabilités (cf § 3.1.3), de manière à ne devoir assigner que des probabilités dans la gamme 0.1 – 0.9, exceptionnellement 0.05 – 0.95.

Notons que d'autres terminologies existent encore, avec parfois des différences assez marquées dont l'origine n'est pas très bien documentée (USBR et USACE, 2019) et semble en conflit avec la terminologie la plus communément utilisée telle que décrite par Reagan *et al.* (1989). Le point critique étant toujours de définir quelle convention terminologique est utilisée et de s'y tenir rigoureusement.

L'utilisation de ce genre d'approche repose sur le jugement d'expert. Afin de tracer le raisonnement suivi, il est important d'accompagner chaque probabilité élicitée par un texte de justification (voir des exemples dans le Chapitre 4). La taille et le degré de précision de cette justification est à adapter au caractère plus ou moins central de la probabilité dans l'ensemble de l'étude et à la quantité de données disponibles pour étayer le jugement. Même si très peu d'éléments sont disponibles (comme dans beaucoup de cas), un avis doit néanmoins être fourni : l'important est alors de signaler cette absence d'éléments et que l'avis de l'expert repose principalement sur ses connaissances propres acquises par son expérience.

En toute rigueur, il serait ainsi nécessaire d'ajouter à ces formes verbales de probabilité un *degré de confiance* à l'assertion portant sur la probabilité. Dans les rapports du GIEC, chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de la concordance s'y rapportant. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer ce degré de confiance : "*très faible*", "*faible*", "*moyen*", "*élevé*" et "*très élevé*" (Mastrandrea *et al.*, 2011). Afin de ne pas compliquer et alourdir les études, nous pensons que ces qualificatifs ne doivent pas être utilisés systématiquement : la justification associée aux probabilités élicités est censée jouer ce rôle. Il serait par contre utile que de tels qualificatifs soient occasionnellement utilisés dans des documents de synthèses, par exemple les résumés non-techniques et les synthèses pour les décideurs, où les justifications détaillées ne trouvent pas leur place.

3.3.2 Assignation absolue par décomposition en sous-scénarios : plusieurs approches

Quand on cherche à estimer une probabilité absolue subjective, il est important d'une part de bien décrire l'évènement associé à un phénomène dont on tente d'estimer la probabilité, mais aussi, d'autre part, de dire quel est le phénomène complémentaire. En effet, le cadre théorique des probabilités implique un ensemble d'évènements mutuellement exclusifs.

Si on reprend l'exemple simple des trois sous-scénarios indiqué en début du Chapitre 3, les étapes de la démarche sont les suivantes, avec plusieurs options possibles pour certaines de ces étapes :

1. Identification du scénario : pour rappel, dans cet exemple, une lave torrentielle d'au moins 50 000 m³.
2. Identification des sous-scénarios : pour rappel, dans cet exemple :
 - S_A : le pont n°1 se bouche et les transferts en aval sont négligeables ;
 - S_B : le pont n°1 ne se bouche pas mais la lave torrentielle déborde en rive droite plus loin en aval ;
 - S_C : le pont n°1 ne se bouche pas et la lave torrentielle ne déborde pas.
3. Notation : les probabilités conditionnelles des trois sous-scénarios conditionnées à la magnitude *M* (lave torrentielle de 50 000 m³ dans notre exemple) sont notées P(S_A|*M*), P(S_B|*M*) et P(S_C|*M*).
4. Assignation d'une probabilité conditionnelle absolue à un des sous-scénarios, le mieux documenté : si les éléments permettent d'indiquer que "*le pont se bouche pour 75% des évènements de lave torrentielle d'au moins 50 000 m³ observés*", c'est-à-dire¹⁴ que P(S_A|*M*) = 0.75. On en déduit que P(S_B|*M*) + P(S_C|*M*) = 1 - P(S_A|*M*) = 0.25.
5. Assignation d'une probabilité conditionnelle absolue aux autres sous-scénarios : l'étape suivante est d'estimer les probabilités conditionnelles P(S_B|*M*) et de P(S_C|*M*).

¹⁴ Notons qu'on fait ici l'hypothèse, qui serait à justifier, que l'analyse des données sur toutes les laves torrentielles de magnitude $m > M = 50\,000\text{ m}^3$ est représentative des évènements de magnitude *M*.

- Elle peut être menée directement sur une des probabilités conditionnelles $P(S_B|M)$ ou $P(S_C|M)$, l'autre étant alors déduite.
Par exemple, "les archives montrent que des débordements en rive droite ont lieu pour une lave torrentielle sur vingt"¹⁵, c'est-à-dire $P(S_B|M) = 0.05$ et donc $P(S_C|M) = 1 - 0.75 - 0.05 = 0.15$.
- Elle peut aussi être menée en considérant la magnitude M et la non occurrence de S_A , notée \bar{S}_A : $P(S_B | M \cap \bar{S}_A)$ et $P(S_C | M \cap \bar{S}_A)$.
Par exemple, "Si la lave torrentielle passe le pont, elle a 20% de chance de déborder en rive droite", c'est-à-dire $P(S_B | M \cap \bar{S}_A) = 0.2$ et $P(S_C | M \cap \bar{S}_A) = 0.8$.
Comme $P(S_C | M) = P(S_C | M \cap \bar{S}_A) \times P(\bar{S}_A|M)$, alors $P(S_C | M) = 0.8 \times (1 - 0.75) = 0.2$
Comme $P(S_B | M) = P(S_B | M \cap \bar{S}_A) \times P(\bar{S}_A|M)$, alors $P(S_B | M) = 0.2 \times (1 - 0.75) = 0.05$.

La construction d'un arbre de probabilité permet de représenter graphiquement ces analyses. Les deux approches sont par exemple représentées dans la Figure 8. Selon les complémentarités et exclusions entre scénarios, il est plus ou moins aisé de construire un tel arbre.

En complément des analyses d'archives ou de dire d'expert sur la probabilité d'occurrence d'un phénomène donné au droit d'un point particulier du système, on peut trouver dans la littérature des publications proposant des estimations empiriques simples de probabilités absolues subjectives dont certains exemples sont fournis ci-dessous.

3.3.3 Exemple de l'estimation de la probabilité d'obstruction des ponts par des embâcles

On peut par exemple mentionner l'approche d'élicitation des probabilités absolues d'embâchement des ponts de Mazzorana *et al.* (2011). Les valeurs de probabilité sont proposées à partir d'une ré-analyse de crues ayant eu lieu dans la province italienne du Sud-Tyrol. Les sites supports ont les caractéristiques suivantes :

- largeur des ponts ≈ 20 m ;
- hauteur de sous-poutre : 4–5 m ;
- longueur des flottants : 15–20 m ;
- diamètre des éléments y compris racines et branches: 1–1.5 m ;
- nombre de Froude des écoulements : 0.8–1.

Le Tableau 5 fournit une évaluation absolue quantitative de la probabilité d'embâchement des ponts selon le ratio h/H (avec h la hauteur d'eau et H la hauteur de sous-poutre) au pic de crue et selon le mode de transport des flottants (terminologie reprise du guide OFEV, 2019) :

- régime non saturé : peu d'interactions entre chaque flottant ;
- régime semi-saturé : les flottants se déplacent pour certains individuellement et pour d'autres par paquets ;
- régime saturé : les flottants sont transportés quasi-exclusivement en paquets.

Tableau 5 : Probabilité d'embâchement des ponts retenue par Mazzorana et al. (2011) selon la hauteur relative d'écoulement et le régime de transport de flottants

Hauteur d'eau relative h/H	Régime non saturé	Régime semi-saturé	Régime saturé
<0.6	0	0	0
0.6-0.8	0.01	0.1	0.2
0.8-1.2	0.4	0.8	0.99
>1.2	0.6	0.9	0.99

Cette approche permet de qualifier le risque de formation d'un embâcle au droit d'un pont. Sur les rivières étudiées, les embâcles ne forment pas des obstructions complètes des ouvrages mais génèrent simplement

¹⁵ Dans cette seconde analyse d'un sous-scénario rarement observé, on peut imaginer élargir l'échantillon d'observations à l'ensemble des événements de lave torrentielle observés, quelles que soient leurs magnitudes. L'hypothèse que le comportement est équivalent quelle que soit la magnitude serait aussi à justifier.

une rehausse locale des lignes d'eau. En cas d'embâchement, les auteurs suggèrent de considérer une obstruction de 50% de la section d'écoulement dans le modèle numérique hydraulique du système.

Notons que cette approche n'intègre pas directement les éventuels érosions ou dépôts sédimentaires au droit des ouvrages. Si pour une quelconque raison, il peut être anticipé que le niveau du fond du lit doit vraisemblablement changer, il est possible de corriger les termes de hauteur d'écoulement h et de hauteur de sous-poutre H de la hauteur de dépôt ou d'érosion estimée.

3.3.4 Exemple de l'estimation de la probabilité d'obstruction des ponts par les laves torrentielles

Comme illustré dans la Figure 10, la problématique de l'obstruction des ponts et étroitures par les blocs transportés par les laves torrentielles est traditionnellement approchée par le ratio d'ouverture relative (largeur ou hauteur de la section / diamètre des blocs - Piton et Recking, 2016). Ces critères fournissent des classes qualitatives de probabilité de blocage ("probable", "très probable") plutôt que des probabilités quantitatives précises. Il est toutefois possible de relier les probabilités qualitatives avec des probabilités quantitatives (précises ou imprécises) en utilisant la terminologie du GIEC fournie dans le Tableau 4.

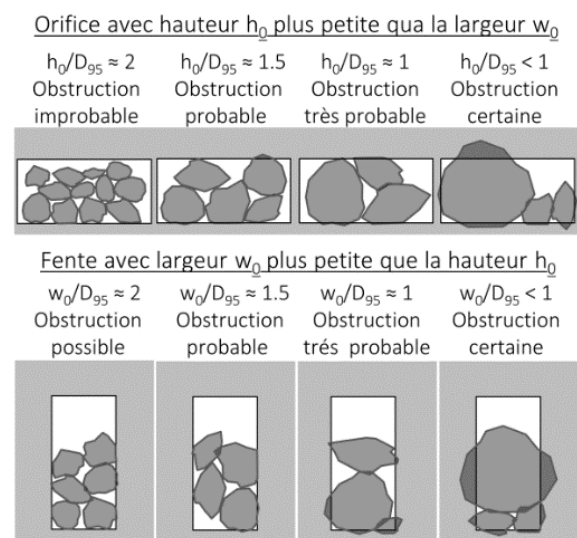


Figure 10 : Effet de l'augmentation de la taille des blocs sur la probabilité d'obstruction des orifices (panneau supérieur) et des fentes (panneau inférieur). L'obstruction devient probable pour une taille d'ouverture de l'ordre de 1,5-2,0 fois le D_{95} (quantile 95% de la courbe granulométrique). L'obstruction apparaît dans les fentes pour les grains légèrement plus petits que les orifices parce que des arches entre les grains émergent plus facilement horizontalement que verticalement (Piton *et al.*, 2020).

Comme déjà indiqué précédemment, que ce soit pour l'obstruction des ponts par des embâcles ou les blocs transportés par des laves torrentielles, les exemples d'approche présentés illustrent la difficulté à cerner la différence entre une évaluation objective ou subjective. La justification d'une évaluation absolue de la probabilité de survenue d'un sous-scénario s'appuie en effet souvent sur des études déjà existantes qui peuvent elles-mêmes reposer sur une analyse experte de chacun des critères amenant à l'évaluation (la hauteur d'eau h , le mode de transport des flottants, la dimension D_{95} des blocs transportés). C'est en ce sens que l'évaluation devient alors subjective : l'exigence fondamentale est que le raisonnement ayant permis d'aboutir à l'évaluation ait été tracé (évaluation des critères, méthodes d'estimation utilisée).

3.4 Probabilités relatives objectives

Comme indiqué au §3.1.3, les liens entre probabilités absolues et probabilités relatives sont simples à établir quand les arbres de probabilités présentent des branches organisées par paires. Certains sites, processus ou méthodes d'analyses se prêtent toutefois plus à une comparaison d'un sous-scénario par rapport à un autre (S_A vs. S_B) qu'à une comparaison par rapport au sous-scénario complémentaire (S_A vs. \bar{S}_A).

Exemple de l'estimation de la probabilité d'obstruction des ponts par des embâcles

Un travail très intéressant a été publié par Gschnitzer *et al.* (2017) qui ont testé plusieurs configurations de ponts (avec et sans pile centrale, ainsi qu'avec déflecteur, Figure 11) avec :

- Différentes conditions d'écoulement : pente 0.1%, 0.4% et 0.8% ; nombre de Froude = 0.6, 0.8 et 1.2 ;
- Des hauteurs d'eau variables : entre 58% et 125% de la hauteur sous poutre ;

- Des longueurs de flottants variables : entre 40% et 120% de la largeur du chenal, avec et sans branche et apport non-saturé ou sous forme de paquets de dix flottants en régime saturé.

Les auteurs proposent ensuite des coefficients de régression logistique (modèle *logit*) qui permettent de reconstruire des équations paramétriques de probabilité (Quiniou et Piton, 2022, p. 67). Ces coefficients prennent en compte la hauteur relative de l'écoulement (h/H), la pente du chenal, la présence de pile en rivière et de déflecteur sous le pont, la longueur relative des flottants (L/B), la présence de branches ou souches et le mode de transport des flottants. Cette approche permet d'estimer des probabilités absolues de blocage mais aussi de déduire directement des probabilités relatives en fonction de certains paramètres (Tableau 6).

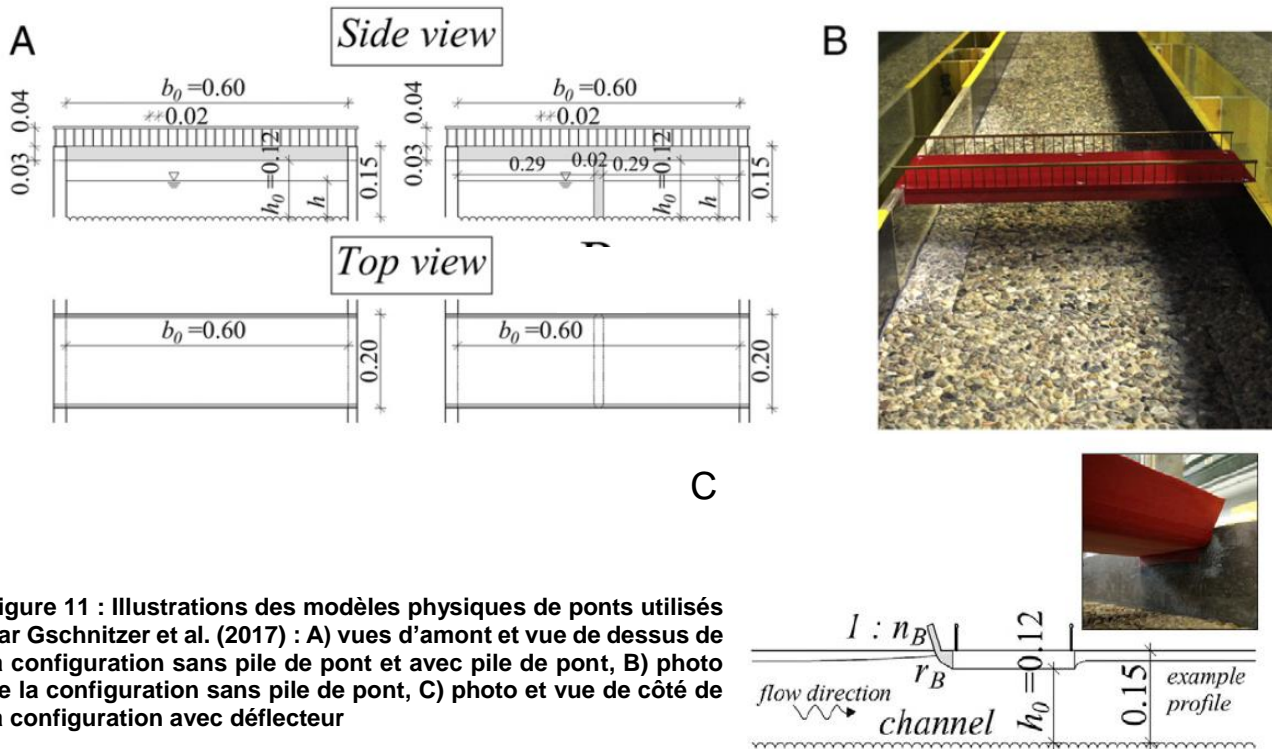


Figure 11 : Illustrations des modèles physiques de ponts utilisés par Gschnitzer et al. (2017) : A) vues d'amont et vue de dessus de la configuration sans pile de pont et avec pile de pont, B) photo de la configuration sans pile de pont, C) photo et vue de côté de la configuration avec déflecteur

Tableau 6 : Changement relatif de la probabilité de blocage de flottants au droit d'un pont en fonction de variation des paramètres principaux descripteurs du système selon Gschnitzer et al. (2017)

#	PARAMETRES ETUDIES	MODIFICATION	CHANGEMENT RELATIF DE LA PROBABILITE DE BLOCAGE
1	Pile en rivière	Présence	+224%
2	Déflecteur sur le pont	Présence	-90%*
3	Pente	+ 1 % de pente	-22%
4	Hauteur d'eau relative h/H (hauteur écoulement / hauteur de sous poutre)	+25% de h/H	+205%
5	Longueur relative des flottants L/B (longueur des flottants / largeur du chenal)	+25% de L/B	+72%
6	Présence de branches et racines générant un diamètre 6 fois supérieur au diamètre des troncs	Présence	+810%
7	Mode de transport du bois flottant	Saturé plutôt que non-saturé	+905%

* Efficacité du déflecteur à considérer en comparaison avec la configuration de référence, c'est-à-dire sans pile de pont.

Les effets de la modification de la pente, du rapport h/H ou du rapport L/B sont proportionnels. Ainsi, une augmentation de 50% de L/B (paramètre #5 du Tableau 6) induit aussi une augmentation de 142% de la probabilité relative de blocage.

Les changements relatifs de probabilité de blocage indiqués au Tableau 6 peuvent, par exemple, être utilisés pour comparer des sous-scénarios impliquant des différences d'apport de flottants (paramètre #5, #6 et/ou #7), ou l'occurrence de dépôts ou érosion au droit de l'ouvrage (paramètre #4). Ces données sont aussi utiles pour justifier de l'efficacité d'un aménagement via une modification de la probabilité des sous-scénarios impliquant la formation d'un embâcle : retrait d'une pile de pont (paramètre #1), l'ajout d'un déflecteur sur un pont (paramètre #2) ou encore la surélévation de la cote de sous-poutre d'un pont (paramètre #4).

3.5 Extension de l'approche du GIEC aux probabilités relatives subjectives

La terminologie utilisée par le GIEC (Mastrandrea *et al.*, 2011) permet une correspondance entre évaluation qualitative et quantitative pour des probabilités absolues : cette simple convention terminologique n'a pas été établie pour des analyses comparatives entre des événements. L'expert fournit ainsi une indication de la probabilité conditionnelle d'un sous-scénario S_A notée $P(S_A|M)$. Nous proposons dans la suite une extension de cette terminologie aux cas où on voudrait comparer des paires de sous-scénarios (nos recherches bibliographiques n'ayant pas identifié de telle convention dans la littérature).

Justification de l'approche : Considérons que la probabilité conditionnelle $P(S_A|M)$ est définie relativement à l'évènement complémentaire " S_A ne se réalise pas" noté \bar{S}_A avec $P(\bar{S}_A|M) = 1 - P(S_A|M)$. Au fond, en élicitant la probabilité conditionnelle absolue de S_A , l'expert porte un jugement sur la paire de sous-scénarios S_A et \bar{S}_A et indique lequel des deux est le plus probable.

L'idée est de proposer des formes verbales comparatives pour les mêmes classes de probabilités que celles existantes pour les probabilités absolues. Elle s'appuie sur l'affectation d'une probabilité conditionnelle $P(S_A|M)$ au sous-scénario S_A , connaissant le scénario de magnitude M . Le Tableau 7 repose sur les étapes suivantes :

- $P(S_A|M)$ définit¹⁶ via la probabilité quantitative de Mastrandrea *et al.* (2011)
- $P(\bar{S}_A|M) = 1 - P(S_A|M)$
- Ratio de probabilité relative entre deux scénarios : $P(S_A|M) / P(\bar{S}_A|M) = P(S_A|M) / (1 - P(S_A|M))$
- Forme verbale comparative : établie en adaptant la forme verbale absolue de Mastrandrea *et al.* (2011) à une forme comparative.

Ainsi, le ratio de probabilité entre les deux scénarios comparés est égal à $P/(1-P)$ si P était la probabilité de la classe associée. L'utilisation d'une approche absolue est parfaitement équivalente à celle de cette approche relative si on compare un scénario S_A et son complémentaire \bar{S}_A . **Sur cette base, nous proposons d'étendre les formes verbales comparatives établies dans le Tableau 4 à des comparaisons de paires de sous-scénarios qui ne sont pas strictement complémentaires : en d'autres mots on propose de comparer selon les mêmes termes et les mêmes ratio de probabilité deux sous-scénarios S_A et S_B comme on peut comparer S_A et son complémentaire \bar{S}_A . Cette convention terminologique est simple et pratique à utiliser, mais reconnaissons qu'elle n'est pas parfaitement rigoureuse mathématiquement puisqu'on s'autorise à comparer des sous-scénarios non complémentaires avec une terminologie et de ratio de probabilité tirés de sous-scénarios complémentaires.**

En sélectionnant des paires de sous-scénarios, il est ainsi possible de formuler des jeux d'équations reliant les probabilités conditionnelles. Pour notre exemple simple à 3 sous-scénarios introduit au début du §3, on pourrait ainsi considérer que :

- S_A est beaucoup plus probable que S_C → $P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_C|M)$
- S_B est plutôt plus probable que S_C → $P(S_B|M) = 2 \cdot P(S_C|M)$

¹⁶ Les valeurs proposées par Mastrandrea *et al.* (2011), étant fournies sous forme d'intervalles (voir Tableau 4), il a fallu choisir une valeur précise pour mener les calculs :

- Pour les valeurs comprises entre 0 et X (événements de probabilité < 0.5) ou entre X et 1 (événements de probabilité > 0.5), la valeur X a été retenue (par exemple 0.66 pour les événements qualifiés de "probables" qui sont censés avoir une probabilité comprise entre 0.66 et 1),
- Pour un événement qualifié d' "Aussi probable qu'improbable" censé être de probabilité comprise entre 0.33 et 0.66, la valeur précise de probabilité de 0.5 a été intuitivement retenue.

Tableau 7 : Extension (proposée dans le présent rapport) de la convention utilisée par le GIEC (Mastrandrea *et al.*, 2011) à une approche comparatives par paires de sous-scénarios

APPROCHE DU GIEC POUR LES PROBABILITE ABSOLUES		EXTENSION DE L'APPROCHE DU GIEC A UNE APPROCHE COMPARATIVES ET A DES PROBABILITES RELATIVES			
Forme verbale absolue	P(SA M) retenue	Forme verbale comparative	Ratio de probabilité	P(SA M)	P(SA M)
Exceptionnellement improbable	0,01	*	0,01	1%	99%
Extrêmement improbable	0,05	Extrêmement moins probable	0,05	5%	95%
Très improbable	0,1	Beaucoup moins probable	0,1	10%	90%
Improbable	0,33	Moins probable	0,5	33%	67%
Aussi probable qu'improbable	0,5	Equiprobable	1	50%	50%
Probable	0,66	Plus probable	2	66%	34%
Très probable	0,9	Beaucoup plus probable	9	90%	10%
Extrêmement probable	0,95	Extrêmement plus probable	19	95%	5%
Quasiment certain	0,99	*	99	99%	1%

* Il n'est pas proposé de forme verbale pour les cas extrêmes car de telles configuration doivent être évitées comme expliqué §3.3.1 p. 29 et soulignés par Hartford et Baecher (2004, p. 159) ; USBR et USACE (2019)

Notons qu'il est possible d'ajouter une formulation intermédiaire, par exemple entre "Probable" et "Très probable", si le besoin s'en fait sentir, voir notamment celles proposées dans Tableau 9.

Une équation complémentaire est généralement à mobiliser : dans les cas où les sous-scénarios auront été construits de manière à (i) ce qu'ils couvrent l'ensemble des possibles et (ii) soient mutuellement exclusifs, la somme des probabilités conditionnelles de tous les sous-scénarios est égale à 1 : $\sum_{i=A}^C P(S_i|M) = 1$.

Ce type de systèmes d'équations linéaires est relativement facile à résoudre et permet de déterminer chaque terme. Dans notre exemple simple :

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) + P(S_B|M) + P(S_C|M) = 1 \\ P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_C|M) \\ P(S_B|M) = 2 \cdot P(S_C|M) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P(S_C|M) = 1 - P(S_A|M) - P(S_B|M) = 1 - 9 \cdot P(S_C|M) - 2 \cdot P(S_C|M) \\ P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_C|M) \\ P(S_B|M) = 2 \cdot P(S_C|M) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) = \frac{9}{12} = 0.75 \\ P(S_B|M) = \frac{2}{12} = 0.17 \\ P(S_C|M) = \frac{1}{1+9+2} = \frac{1}{12} = 0.08 \end{pmatrix}$$

Ainsi, pour n sous-scénarios, $n - 1$ comparaisons suffisent pour résoudre les équations (e.g., 3 comparaisons pour 4 sous-scénarios). Si un plus grand nombre de comparaison est produit, le système d'équation a de fortes chances d'être incohérent. Des méthodes faisant appel à des matrices de cohérences, aussi utilisées dans les analyses des préférences dans le cadre de méthode multicritères, peuvent alors être mobilisées (Philippe *et al.*, 2018).

Notons que le nombre de paires distinctes de sous-scénarios qu'il serait possible de comparer est très supérieur à $n - 1$. Il est de $n(n - 1) / 2$. La résolution du système d'équations peut permettre ensuite d'étudier les paires de sous-scénarios non utilisées et de vérifier que leurs rapports de probabilités sont cohérents avec les éléments

disponibles. Il reste donc $n(n-1)/2 - (n-1)$ comparaisons possibles pour contrôler la cohérence générale de l'évaluation (e.g., 1 cas pour 3 sous-scénarios, 3 cas pour 4 sous-scénarios, 6 cas pour 5 sous-scénarios).

Dans l'exemple simple fourni ci-dessus on peut ainsi comparer les résultats obtenus : $P(S_A|M)$ est 4.4 fois plus probable que $P(S_B|M)$. Le ratio $P(S_A|M) / P(S_B|M)$ ne correspond ainsi pas exactement à ratio présenté dans le Tableau 7 et ceci était normal et attendu : les ratios proposés ne permettent pas de reproduire toutes les variations de probabilités finales que l'on peut obtenir avec un nombre variable de sous-scénarios. **On en conclut que S_A est dans une position intermédiaire entre "plus probable" et "beaucoup plus probable" que S_B .** Il est alors du ressort des chargés d'étude de confirmer que ce résultat est cohérent avec les éléments disponibles. Si des incohérences apparaissent, il est vraisemblable que le choix des paires de sous-scénarios qui ont été comparées et les ratios de probabilités choisis soient entachés d'une erreur ou d'une incohérence. Il est alors nécessaire de corriger ce point ou de choisir d'autres paires à comparer pour écarter des couples posant des problèmes de cohérence ou de comprendre la source de l'incohérence et de l'expliquer.

Cet exemple met aussi en évidence que le choix des paires de sous-scénarios comparés a une influence marquée sur les probabilités estimées par cette méthode. D'autres choix de paires auraient pu être faits. Si on avait opté pour une comparaison entre $P(S_A|M)$ et $P(S_B|M)$, on aurait pu aboutir à un des résultats suivants :

- En considérant S_A "plus probable" que S_B ($P(S_A|M) / P(S_B|M) = 2$) :

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) + P(S_B|M) + P(S_C|M) = 1 \\ P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_C|M) \\ P(S_A|M) = 2 \cdot P(S_B|M) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) = \frac{18}{18+9+2} = 0.62 \\ P(S_B|M) = \frac{9}{29} = 0.32 \\ P(S_C|M) = \frac{2}{29} = 0.07 \end{pmatrix}$$

- En considérant S_A "beaucoup plus probable" que S_B ($P(S_A|M) / P(S_B|M) = 9$) :

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) + P(S_B|M) + P(S_C|M) = 1 \\ P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_C|M) \\ P(S_A|M) = 9 \cdot P(S_B|M) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P(S_A|M) = \frac{9}{9+1+1} = 0.81 \\ P(S_B|M) = \frac{1}{11} = 0.09 \\ P(S_C|M) = \frac{1}{11} = 0.09 \end{pmatrix}$$

On constate bien dans cet exemple particulier l'influence potentielle du choix des paires de scénarios sur les estimations des probabilités conditionnelles des sous-scénarios. Par ailleurs, en comparant les deux options ci-dessus, on mesure aussi la sensibilité de cet exemple au choix d'un classement "plus probable" ou "beaucoup plus probable" entre S_A et S_B : les probabilités conditionnelles varient dans une gamme l'ordre de 10% selon la paire de sous-scénarios étudiée et selon le jugement entre S_A et S_B . Cet exemple particulier met en lumière qu'il faut rester prudent dans l'interprétation des valeurs obtenues via cette approche : **ce sont des ordres de grandeurs qui peuvent varier si de nouveaux éléments sont apportés à l'étude et permettent de reprendre l'analyse en comparant les sous-scénarios dans un autre ordre et/ou selon un autre classement.**

3.6 Lien entre sous-scénarios et probabilité d'atteinte

Il est intéressant de noter que les probabilités conditionnelles des différents sous-scénarios peuvent permettre de créer des cartes analogues à des cartes de probabilité d'atteinte. Pour estimer une première approximation des probabilités d'atteinte, il est possible de superposer les différentes cartes d'intensité des sous-scénarios et de multiplier chacune par la probabilité conditionnelle associée. Ainsi, par exemple, si un enjeu donné est exposé à une intensité non nulle pour deux des trois sous-scénarios retenus et que la somme des probabilités conditionnelles de ces deux sous-scénarios est de 0.37, la probabilité d'atteinte de l'enjeu est a priori estimée à 0.37. Une étape complémentaire peut être nécessaire afin d'intégrer des éventuelles divagations : il est possible que certaines zones soumises à un phénomène d'une certaine intensité soient situés plus dans l'axe naturel des écoulements que d'autres zones. Nous invitons les lecteurs intéressés à consulter le guide PPR Cours d'Eau Torrentiels (A paraître) qui détaille cette analyse.

3.7 Modalités de prise en compte des incertitudes

Selon le guide méthodologique du CGDD (2018, p.142), il est recommandé de mener à bien une analyse des incertitudes des résultats des ACB. Un outil, développé par Grelot et al. (2013), est d'ailleurs mis à disposition des chargés d'études sur demande au groupe des experts du GT AMC. Cet outil, codé dans le langage R, permet de mener une analyse des incertitudes par tirage aléatoire (approche de Monte Carlo). Ce type d'approche nécessite de définir la distribution statistique précise des paramètres d'entrées. Dans l'approche décrite par Grelot et al. (2013), des distributions uniformes, triangulaires ou normales sont utilisées.

L'approche introduite dans le présent rapport fait appel à des cadres d'analyses assez peu compatibles avec les approches de Monte Carlo et la nécessité de fixer les distributions statistiques des paramètres d'entrées. Par contre, elle est compatible avec les approches hybrides mêlant le cadre probabiliste classique avec les approches possibilistes (cadre alternatif aux probabilités) qui sont adaptées aux mêmes contextes que celui où les probabilités subjectives doivent être mobilisées (Guyonnet *et al.*, 2003 ; Baudrit, Dubois et Guyonnet, 2006 ; Rohmer *et al.*, 2018). Il serait ainsi possible d'amender l'outil de Grelot et al. (2013), par exemple via la librairie R HYRISK (Rohmer *et al.*, 2018) avec une approche hybride permettant d'ajouter des probabilités subjectives. La principale difficulté est que l'interprétation des résultats est plus complexe que dans un cadre probabiliste (voir des pistes dans Piton *et al.*, 2022). Il est donc vraisemblable que le cadre probabiliste continue d'être utilisé en compléments d'analyse simples de sensibilité portant notamment sur les probabilités conditionnelles des sous-scénarios si les dommages varient fortement entre ces derniers.

3.8 En synthèse

La démarche proposée dans le présent chapitre s'appuie sur :

- La définition préalable des sous-scénarios et leur organisation qui peut s'appuyer sur :
 - Dans les cas simples : une description de chaque sous-scénario ;
 - Dans les cas plus compliqués : un arbre de probabilités.
- L'affectation des probabilités conditionnelles à chacun des sous-scénarios. Plusieurs niveaux d'approches pouvant être utilisés selon les données disponibles :
 - Si des données d'observations sont assez nombreuses, les chargés d'études pourront utiliser des probabilités absolues objectives (il faut reconnaître que ce ne sera que très rarement le cas) ;
 - Si les chargés d'études maîtrisent suffisamment le contexte et les phénomènes, que le type de défaillance en jeu a été suffisamment étudié dans la littérature et que les moyens d'études sont suffisants, il est possible d'utiliser des probabilités absolues subjectives en s'appuyant sur des éléments de la littérature qui permettent de justifier les affectations de probabilités faites ;
 - Si les modes de défaillances sont compliqués ou insuffisamment documentés dans la littérature, une estimation absolue est difficile et les chargés d'études peuvent utiliser une approche d'estimation comparative qui s'appuie sur les étapes suivantes :
 - Si un arbre de probabilité a été construit, il est possible de mener une analyse pour chaque branche de l'arbre par une approche comparative ou non.
 - le cas échéant, l'approche proposée est d'affecter directement une forme verbale à la comparaison de paires de sous-scénarios permettant d'établir directement une évaluation quantitative (forme verbale → valeur numérique, cf Tableau 9).
Les paires de sous-scénarios non-utilisées pour aboutir aux probabilités conditionnelles sont utilisées dans un second temps pour valider la cohérence des résultats obtenus (valeur numérique → forme verbale cohérente ?).

Certains sites d'études mobiliseront différentes approches en fonction des modes de défaillances en jeu au droit des différents sous-domaines semi-aléatoires.

4 Illustration sur deux cas d'études

Deux cas d'étude ont été sélectionnés pour illustrer l'application de la méthode :

1. le ruisseau de la Combe de Lancey est un torrent à charriage affluent de l'Isère ;
2. le torrent d'Arcelle, affluent de l'Arc, est sujet à des épisodes de laves torrentielles.

Les études hydrauliques de ces deux cas d'études sont simplement synthétisées dans le présent rapport. Seuls les éléments clés sont fournis : ils permettant de cerner le contexte et d'alimenter le protocole d'analyse.

Ces exemples ont été élaborés en 2021, avant relecture du présent rapport par des relecteurs externes et l'adoption de la terminologie utilisée par le GIEC plutôt que celle de Vick (1997). Cette dernière est donc fournie ci-dessous sous forme absolue (Tableau 8) et relative (Tableau 9) de façon analogue à la terminologie du GIEC fournie précédemment (Tableau 4 et Tableau 7).

Comme indiqué dans le rapport, après réflexion nous pensons plus approprié d'utilisée la terminologie du GIEC pour les cas simples, mais celle de Vick (1997) peut aussi être utilisée et d'autres terminologies existent avec parfois des différences assez marquées (voir par exemple USBR et USACE, 2019). Le point clé est de définir clairement quelle terminologie est choisie dans une étude et de rigoureusement la respecter.

Tableau 8 : Association de l'évaluation sous forme verbale (qualitative) à l'évaluation quantitative (précise et sous forme d'intervalle) des probabilités subjectives, d'après Vick (1997)

FORME VERBALE ANGLAISE	FORME VERBALE FRANÇAISE	PROBABILITE EQUIVALENTE	VALEUR BASSE	VALEUR HAUTE
Practically impossible	Virtuellement impossible	0.01	0	0.05
Very improbable	Très improbable	0.1	0.02	0.15
Improbable	Improbable	0.15	0.04	0.45
Rather improbable	Plutôt improbable	0.25	0.02	0.75
Averagely probable	Pile ou face	0.5	0.25	0.85
Probable	Probable	0.75	0.25	0.95
Quite probable	Assez probable	0.8	0.3	0.99
Very probable	Très probable	0.9	0.75	0.99
Practically certain	Virtuellement certain	0.99	0.9	1

Tableau 9 : Extension des probabilités de Vick (1997) au cas des probabilités relatives établies par paires de scénarios

APPROCHE DE VICK (1997) POUR LES PROBABILITE ABSOLUES		EXTENSION DE L'APPROCHE DE VICK (1997) AUX PROBABILITES RELATIVES			
Forme verbale absolue	P(SA M)	Forme verbale comparative	Ratio de probabilité relative	P(SA M)	P(SA M)
Virtuellement impossible	0.01	Extrêmement moins probable	0.01	1%	99%
Très improbable	0.1	Beaucoup moins probable	0.11	10%	90%
Improbable	0.15	Moins probable	0.18	15%	85%
Assez improbable	0.25	Plutôt moins probable	0.33	25%	75%
Moyennement probable	0.5	Equiprobable	1	50%	50%
Probable	0.75	Plutôt plus probable	3	75%	25%
Assez probable	0.8	Plus probable	4	80%	20%
Très probable	0.9	Beaucoup plus probable	9	90%	10%
Virtuellement certain	0.99	Extrêmement plus probable	99	99%	1%

4.1 Les crues de charriage du ruisseau de la Combe de Lancey à Villard-Bonnot (38)

4.1.1 Présentation synthétique

A Bibliographie

En complément de visites de site, les références suivantes ont été utilisés pour mener à bien cette analyse :

1. ONF-RTM38. 2005. *Compte rendus des visites réalisés sur les torrents de Belledonne à la suite des crues d'Août 2005*. Archives du service de Restauration des terrains de montagne de l'Isère: Grenoble, France
2. SOGREAH. 2006. *Etude de Diagnostic et d'aménagement Hydraulique du Bassin Versant du Ruisseau de la Combe De Lancey*. Commune de Villard-Bonnot. Rapport n°4 11 0792 R2. 52 p.
3. Alp'Géorisques. 2007. *Etude d'un schéma de réhabilitation et de sécurisation des torrents de Belledonne suite aux crues des 22 et 23 août 2005: torrent de Laval, Vorz, Combe de Lancey, Domeynon, Prémol*. Rapport de synthèse + Cdrom de photographies. Communauté de communes du Balcon de Belledonne - Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt. 96 p + annexes
4. SOGREAH, 2007. *Memo 4 12 0792_ Etude de la combe de Lancey, précisions*. Commune de Villard-Bonnot. MEMO B3E/EAM/4120792/Memo/Précisions. 7 p.
5. SOGREAH. 2010. *Plage de dépôt sur le torrent de la combe de Lancey - sur le site des papeteries – étude de faisabilité*. Commune de Villard-Bonnot. Rapport n°1 36 0651. 26 p.
6. Gomet S, Institut des Risques MAjeurs. 2010. *Tout le monde le prenait pour un fou - événements et catastrophes naturelles en Isère - mars 2001 - décembre 2008*. IRMA [online] [lien web](#) 84 p.
7. IRSTEA. 2017. *Etude De L'aménagement D'une Plage De Dépôt Sur Le Torrent De La Combe De Lancey - Site Des Anciennes Papeteries De Villard-bonnot - Avis Préalable À La Modélisation Physique*. Ville de Villard Bonnot. 39 p.
8. Piton G, Mano V, Richard D, Evin G, Laigle D, Tacnet JM, Rielland PA. 2019. *Design of a debris retention basin enabling sediment continuity for small events: the Combe de Lancey case study (France)*. Presented at the International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Golden, Colorado, USA. 1019–1026 pp. 13/06
9. ARTELIA – AMETEN, 2020. *Etude de l'aménagement hydraulique du torrent de la Combe de Lancey à Villard-Bonnot (38) - Site des anciennes papeteries – mission complémentaire*. Rapport de Phase 2. SYMBHI. 57 p.
10. ETRM, 2021, *Étude des apports liquides et solides du torrent de la Combe de Lancey*. SYMBHI. (Avril 2021). 100 p.
11. SUEZ Consulting, 2021, *Schéma d'aménagement intégré du bassin versant du torrent de la Combe de Lancey pour la protection de Villard-Bonnot avec mission AVP et dossiers réglementaires - Rapport d'étude hydraulique (version provisoire - 15/04/2021)*. SYMBHI. 39 p.

B Localisation et paramètres généraux

Le bassin versant du ruisseau de la Combe de Lancey (18 km²) est situé sur le versant nord-ouest du massif de Belledonne à l'aplomb de la commune de Villard-Bonnot (Figure 12b). Affluent de l'Isère, son bassin versant de forme allongée connecte la crête du massif à la vallée du Grésivaudan (Figure 12a). En aval d'un haut bassin versant raide, la partie intermédiaire du torrent a une pente régulière à 12% avant de plonger dans des gorges abruptes (cascades sur substratum rocheux et gros blocs) situées à l'amont direct du cône de déjection. Ce dernier est entièrement urbanisé par le quartier de Lancey, en particulier par la friche industrielle des anciennes papeteries. L'axe du torrent est coupé par plusieurs axes routiers, notamment la RD523 qui passe ce dernier au niveau de la Place de la Pologne, mais aussi la voie ferrée Grenoble-Chambéry ainsi qu'un drain agricole. En aval de ce dernier, le lit majeur du torrent, moins urbanisé, correspond à la rencontre entre la partie terminale du cône de déjection et le lit majeur de l'Isère (Figure 12c).

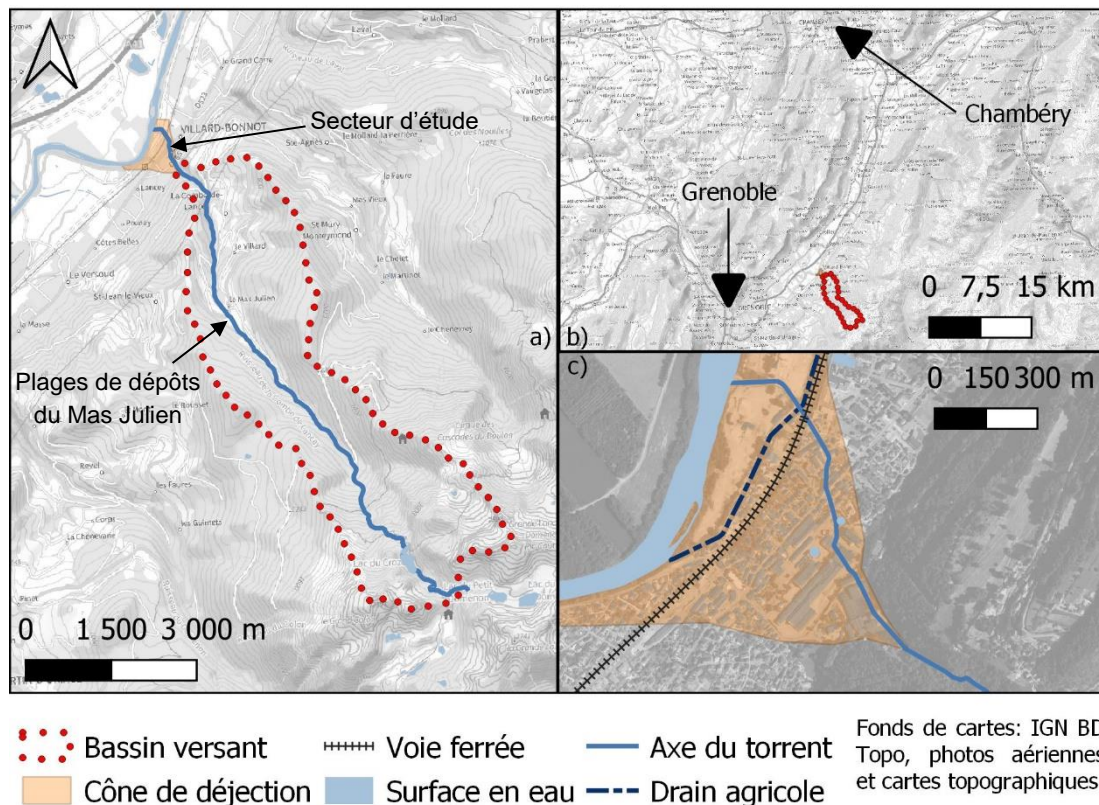


Figure 12 : Carte de localisation du site d'étude de Lancey : a) vue d'ensemble du bassin versant, b) localisation entre Grenoble et Chambéry et c) zoom sur le cône de déjection

C Éléments historiques

L'étude ETRM (2021) compile les éléments historiques disponibles, ci-dessous ceux intéressant le cône de déjection :

- **"1867** : Aristide Bergès installe une râperie de bois à Lancey.
- **2/07/1939** : une crue torrentielle s'est déclenchée sur le ruisseau de la Combe de Lancey, provoquant des inondations importantes à LANCEY. Inondation des papeteries de LANCEY, du quartier de la Place de la Pologne et coupure de la route nationale. La pluviométrie enregistrée ce jour est de 39,5 mm à REVEL et 36 mm au VERSOUD. L'origine des perturbations dans le village semble imputable à la formation d'un « bouchon » constitué d'arbres et de rochers, à l'amont et sous le pont de la Place de la Pologne. « Des milliers de mètres cubes de rochers et de terre accumulés sur 200 mètres de long par le torrent. »
- **1958** : Crue causant des inondations aux papeteries à LANCEY.
- **16/08/1999** : Crue du torrent, la capacité du pont de la Pologne est atteinte.
- **22/08/2005** : Crue importante avec obstruction au niveau des papeteries.

L'historique des crues est étonnant : alors que les aménagements potentiellement menacés par le torrent étaient déjà présents à milieu du XIX^{ème} siècle, la première crue répertoriée est celle de 1939 ! Les deux crues réellement importantes sont celles de 1939 qui a mis en évidence l'inadaptation du Pont de la Pologne et celle de 2005 qui a connue aussi la formation d'un bouchon par les matériaux et les flottants".

Les pages du rapport ETRM (2021) qui suivent ces éléments fournissent une analyse détaillée du fonctionnement du bassin versant ainsi que de la zone du cône de déjection pendant la crue de 2005 (très complète et trop longue pour être reprise dans le présent rapport).

En synthèse, les archives démontrent que le pont de la place de la Pologne (Π4 sur la Figure 20 et par la suite) est un secteur qui subit régulièrement des problèmes de dépôts et d'obstruction. L'évènement de 2005, le plus fort en termes d'apport solide, a aussi généré sa quasi-obstruction, mais aussi des dépôts en aval ainsi que l'obstruction complète du secteur des papeteries (Π3 sur la Figure 20).

D Hydrologie et activité torrentielle

I Débits liquide de pointe et volumes totaux des hydrogrammes

L'hydrologie considérée est celle retenue par SOGREAH (2006), récemment confirmée par ETRM (2021) :

- Crue décennale : $Q_{10} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_{10} = 0.4 \text{ Mm}^3$
- Crue trentennale : $Q_{30} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_{30} = 0.9 \text{ Mm}^3$
- Crue centennale : $Q_{100} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_{100} = 1.4 \text{ Mm}^3$

II Apports sédimentaires

La géologie du bassin versant, principalement granitique, limite fortement la fourniture solide. Le lit du torrent est pavé de gros blocs et le substratum rocheux affleure régulièrement. Le transport solide est donc marginal en temps normal. Les calculs de transport solide, aussi bien ceux réalisés par IRSTEA (2017) que ceux réalisés par ETRM (2021), intègrent ce déficit sédimentaire via une correction de la pente de transport. Les calculs réalisés par ETRM amènent aux apports en volumes solides suivants :

- Crue décennale : $V_{s,10} = 6\,000 \text{ m}^3$
- Crue centennale : $V_{s,100} = 28\,000 \text{ m}^3$

III Production de flottants

Une large part du cours d'eau en amont du cône de déjection est boisée. Le lit étant pavé de gros blocs, les processus d'érosion de berge, bien qu'existant, sont globalement peu actifs et localisés. Lors de la crue de 2005, des érosions de berges plus développées ont toutefois été observées (voir l'atlas de Alp'Géorisques 2006) engendrant le recrutement de 600 m^3 de gros flottants (rapport ONF-RTM38 2005). Le lit du torrent n'occupant généralement pas tout le fond de vallée (existence d'un paléo-lit plus large formé à une époque antérieure de plus forte activité torrentielle), des divagations des écoulements peuvent s'exprimer en cas de formation d'embâcle dans le secteur des balcons de Belledonne. Le transfert du bois flottant est ainsi possible, mais de nombreux dépôts intermédiaires doivent se former et l'ensemble des éléments recrutés n'est probablement pas transporté jusqu'au cône de déjection. Des éléments de bois flottants étaient présents en 2017 dans les cascades en amont direct du cône de déjection (rapport IRSTEA 2017).

Il y a donc légitimité de s'interroger sur le potentiel de production de flottants par le bassin versant. L'application des formules de la littérature pour la prédiction des volumes de production de bois flottant fournit les ordres de grandeurs suivant (détail des formules et des résultats fournis en Annexe A) :

- Production de flottant faible : $V_{BF} = 10 - 30 \text{ m}^3$
- Production de flottant moyenne : $V_{BF} = 100 - 200 \text{ m}^3$
- Production de flottant forte : $V_{BF} = 1000 - 2000 \text{ m}^3$

On note que les volumes moyens à fort encadrent les observations de la crue de 2005 (600 m^3). Des embâcles sont donc à prévoir lors des crues majeures. Leur quantité peut vraisemblablement beaucoup varier en fonction des conditions de dépôts et reprises dans la partie terminale des balcons de Belledonne, entre les plages de dépôt du Mas Julien et le cône de déjection (Figure 12A).

Durant leur chute et transport, les arbres recrutés par les écoulements cassent naturellement. Les cascades et chutes situées en amont des gorges et la violence du transport solide dans ces vasques augmentent vraisemblablement significativement le taux de réduction des flottants (taille des flottants / taille des arbres sur pied) générant un transfert à travers Lancey de pièces très majoritairement courtes (typiquement 1-3 m, notamment d'après les photos des crues de 2005 et de 1939). De manière générale, les plus grands éléments de bois flottant dépassent rarement la largeur du chenal : au-delà de cette taille, ils sont peu mobiles. Il suffirait toutefois d'une poignée d'entre eux pour former un embâcle sur n'importe lequel des ouvrages de ce torrent. Le phénomène est donc très aléatoire et peu prédictible.

IV Conditions aux limites aval

Le ruisseau de la Combe de Lancey conflue avec l'Isère à l'aval de la zone d'étude. Le profil en long y forme une marche de plusieurs mètres rendant les conditions d'écoulement du torrent relativement indépendantes de l'état hydrologique de l'Isère (phénomène de coupure hydraulique). L'état de crue de l'Isère est donc ignoré dans la suite de l'analyse.

4.1.2 Inventaire des verrous, tronçons et enjeux

Les ouvrages de couverture sont inventoriés dans la Figure 13 et illustrés dans Figure 14. Le torrent est couvert sur de longs linéaires, ceci dès l'apex de son cône de déjection. La partie supérieure est occupée par les anciennes papèteries. En aval de la Place de la Pologne (Π4), le torrent est endigué dans la traversée d'une zone pavillonnaire, puis traverse une zone plus industrielle en aval de la voie SCNF (Π5). L'ensemble de cette étape est synthétisé dans la Figure 15.

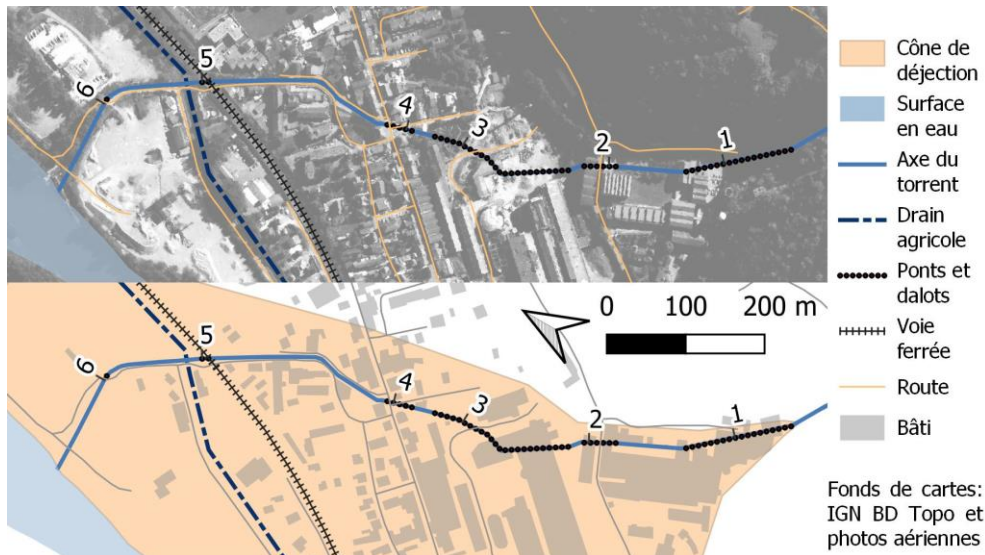


Figure 13 : Localisation des enjeux et ouvrages de couverture du torrent sur le cône de déjection



Figure 14 : Photos des ouvrages de couvertures

a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux

Verrous: les ponts et sections couvertes sont notés П#. Il n'est pas relevé d'autre verrou particulier (convergent ou divergent brusque, etc.)

Tronçons homogènes: Les ponts et dalots constituent des délimitations pertinentes des tronçons homogènes. Le tronçon entre П2 et П3 est très court et très raide, il n'est pas analysé dans la suite.

Enjeux: deux zones se dégagent: forte urbanisation en amont de П5, plus faible en aval.

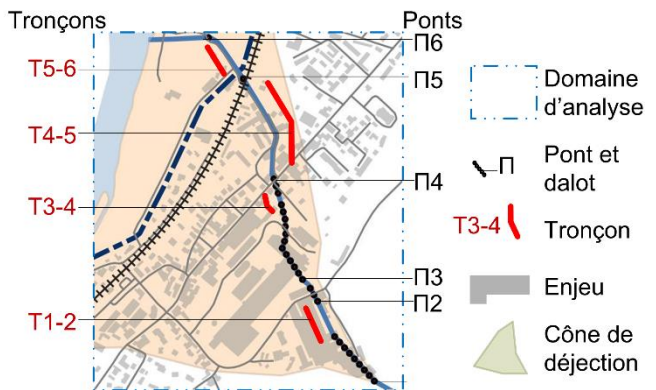


Figure 15 : Synthèse graphique de l'étape a) inventaire des tronçons, verrous et enjeux appliquée au cas d'étude du Ruisseau de la Combe de Lancey

4.1.3 Analyse fonctionnelle du site

Les pages qui suivent détaillent l'analyse fonctionnelle du site.

I Observations de terrain

Les ouvrages de couvertures présentent les caractéristiques suivantes :

- П1, situé dans les ruines à l'apex du cône de déjection, présente une largeur relativement faible, propice au blocage des flottants, mais une hauteur plus confortable au niveau de sa tête amont (Figure 14A). Les murs et plafonds de la couverture sont irréguliers, anciens et parfois en mauvais état. La roche mère affleurante forme par contre une protection efficace contre les affouillements. Le profil en long, globalement raide, est irrégulier et une zone intermédiaire, où la pente plonge au niveau d'un accès vers l'extérieur, constitue un second point potentiel de débordement (Figure 14B). En visitant les lieux, on s'étonne que les 20 000 m³ de charriage et les flottants observés lors de la crue de 2005 soient passés à travers cette couverture sans qu'un blocage ou débordement n'ait été relevé. La forte pente doit participer au fonctionnement relativement satisfaisant de cet ouvrage.
- П2 est situé en aval du site Bergès (papèterie historique) et permet le passage de la RD165 (route d'accès aux balcons de Belledonne). L'ouvrage, plus moderne que le reste des ouvrages de couverture, a une section correcte et bien alignée avec le chenal situé en amont (Figure 14C).
- П3 correspond à l'ensemble du passage couvert sous la friche industrielle de la papèterie moderne. La tête amont est alimentée par un ouvrage de chute. Le torrent pénètre ensuite sous l'ancienne usine dans un dalot sous-dimensionné (Figure 14D) et à la pente très faible (pente de l'ordre de 1-2% contre 13-16% en amont). Son éventuelle mise en charge permet peut-être d'en améliorer la capacité de transit sédimentaire. Lors de la crue de 2005, cela n'a toutefois pas suffi et ce secteur a subi la majorité des dépôts (bien qu'il ne se soit pas immédiatement bouché, voir la description dans le rapport ETRM).
- П4 correspond au pont de la place de la Pologne. Plus large que l'ouvrage des papèteries à son débouché aval (Figure 14E), cet ouvrage a une faible hauteur de sous-poutre. Les archives montrent qu'il a plusieurs fois subi des mises en charges et débordements.
- П5 correspond au pont SNCF. Le lit est perché dans le secteur (Figure 14F). La largeur et le tirant d'air, bien que probablement insuffisants, sont meilleurs qu'au droit des ponts situés directement en amont et en aval.
- Entre П5 et П6, le torrent passe sur le pont canal permettant de traverser le drain agricole (pont canal de la chantourne). Le chenal a une capacité très limitée dans le secteur.
- П6 correspond au pont de la cimenterie. Cet ouvrage est très sous-dimensionné (Figure 14G). Il est mis en charge dès les hautes eaux du torrent.

II Modélisation hydraulique (eau claire)

Plusieurs modélisations 1D ou 2D ont été menées sur le torrent. Les modélisations 1D CAPRIS de SOGREAH 2006 et 2007 présentent l'intérêt d'être focalisées sur le lit mineur, de représenter les mises en charge des ouvrages, les pertes de charges singulières (élargissement et convergent brusques) et les passages trans-critique (ressauts et chutes). Elles présentent par contre l'important inconvénient d'ignorer le transport solide et la présence des embâcles. Ce sont donc des résultats virtuels, à la représentativité très limitée et dont l'intérêt est surtout d'identifier les verrous hydrauliques les plus prégnants.

La Figure 16 illustre la ligne d'eau pour le débit de pointe centennal ($Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$) sur la partie raide amont : secteur $\Pi 1 - \Pi 4$ (apex du cône – Pont de la place de la Pologne). La Figure 17 illustre la ligne d'eau en aval pour un débit de pointe très inférieur ($Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$) sur le secteur $\Pi 4 - \text{Isère}$ (Pont de la place de la Pologne – confluence avec l'Isère). Ces résultats permettent de mettre en évidence que :

- Dans le secteur amont, la capacité hydraulique en eau claire est globalement bonne à l'exception de passages courts (entre $\Pi 1$ et $\Pi 2$) et au débouché de $\Pi 2$ où la surface libre approche éventuellement le niveau de la berge (la ligne de charge étant clairement au-dessus) pour $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Dans le secteur aval, la capacité hydraulique en eau claire est au contraire très faible.
 - Le $\Pi 6$, au niveau des cimenteries, est déjà significativement en charge pour un débit de seulement $Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$. Le régime d'écoulement, sub-critique (Froude < 1 sur le secteur d'après les résultats de calculs détaillés dans les annexes du Mémo SOGREAH de 2007), permet le développement d'un remous liquide et la rehausse des lignes d'eau dans la zone amont.
 - Ceci génère un débordement par-dessus les berges au droit du pont canal de la Chantourne ; les débits ainsi perdus suivent l'axe du drain agricole et quittent définitivement le torrent.
 - Les modélisations en état aménagé dans le secteur aval à $\Pi 6$ montrent que, relativement loin en amont, le pont de la Pologne est mis en charge pour un débit $> 8 \text{ m}^3/\text{s}$ et $< 15 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Le tronçon $\Pi 4 - \Pi 6$ (pont de la Pologne – Pont SCNF) a une capacité de l'ordre de $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Le pont de la SNCF $\Pi 5$ est légèrement en charge pour $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$.

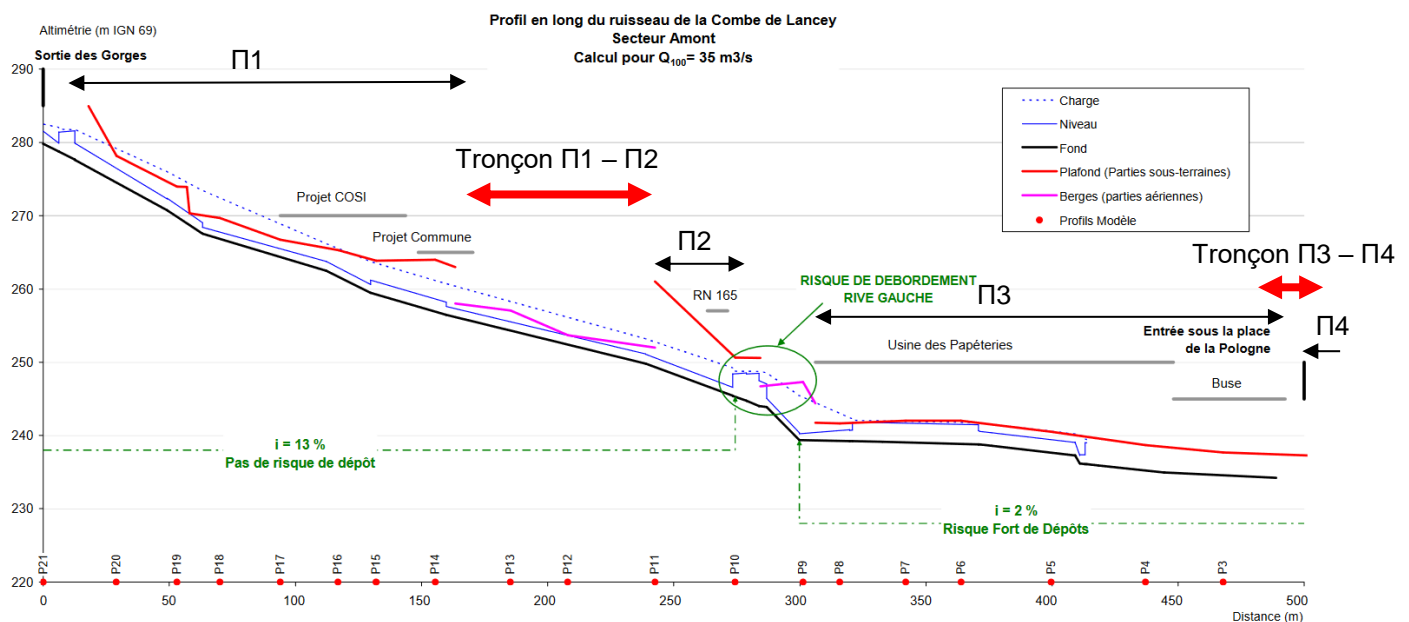


Figure 16 : Profil en long des lignes d'eau calculées par SOGREAH 2007 sur le secteur $\Pi 1 - \Pi 4$ pour $Q=35 \text{ m}^3/\text{s}$

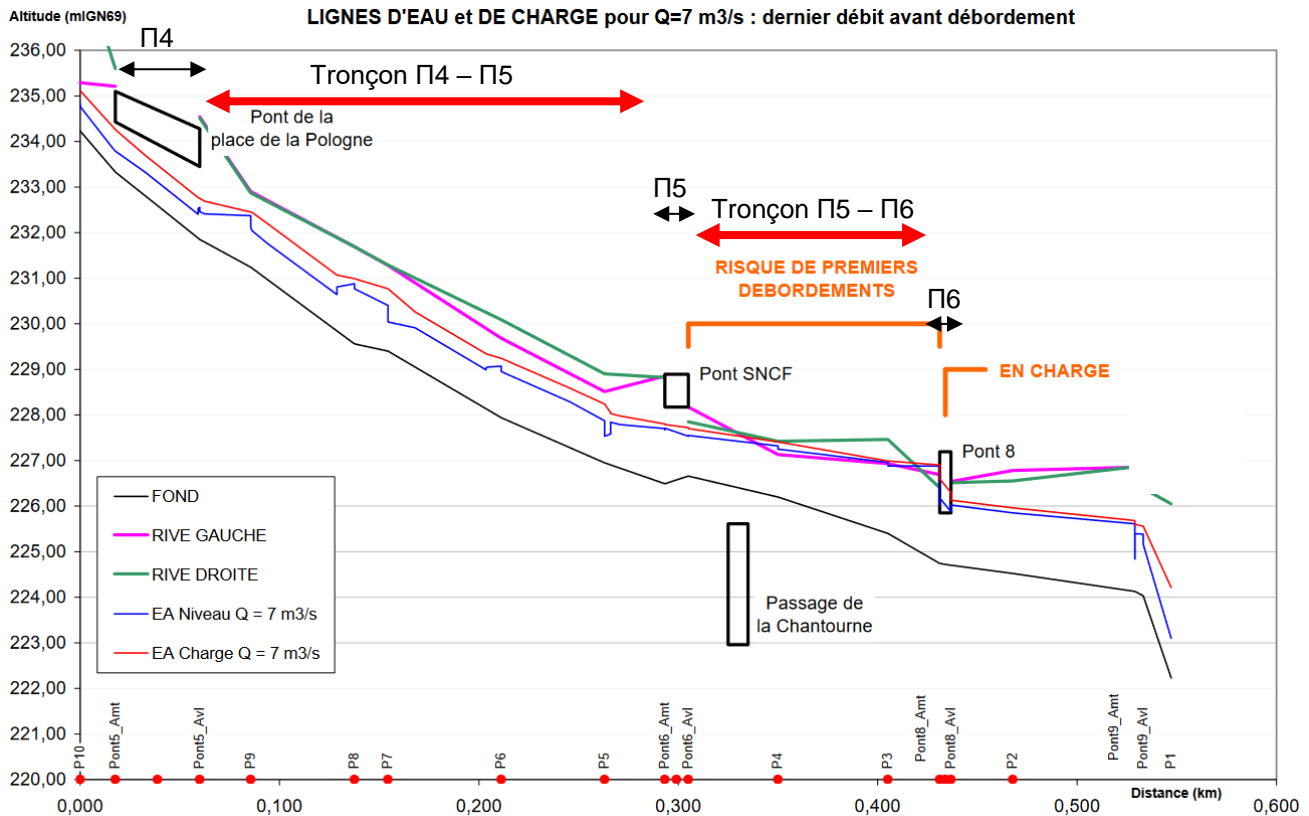


Figure 17 : Profil en long des lignes d'eau calculées par SOGREAH 2006 sur le secteur P4 – Isère pour Q=7 m³/s

III Interprétation des résultats intégrant le transport solide

Rappelons que toutes ces modélisations négligent le transport solide. L'interprétation de ces résultats d'hydraulique pure doit donc être menée prudemment et en essayant d'anticiper l'évolution de ces tendances en prenant en compte les dépôts et érosions, ainsi que les obstructions dues au embâcles.

- Dans la mesure où les pentes du chenal sont plutôt raides en amont du P2, et qu'elles chutent brutalement au niveau du tronçon P3 - P4, il semble raisonnable de faire l'hypothèse qu'en cas d'apport de plusieurs milliers de m³ de sédiments charriés, des dépôts massifs vont nécessairement avoir lieu sur ce secteur, comme cela a été le cas en 2005 et en 1939.
- En parallèle, le transport solide résiduel traversant le secteur de faible pente du tronçon P3 - P4 a de très fortes chances de se déposer dans le remous liquide associé à la mise en charge de P6. Les débordements des débits liquides dans le tronçon P5 – P6 vers la Chantourne entraînent de plus un cercle vicieux (boucle positive de rétroaction) puisque les écoulements sortent du système et ne sont plus disponibles pour charrier les sédiments jusqu'à l'Isère. C'est d'autant plus dommage que la confluence avec l'Isère aurait une très forte capacité d'absorption du volume charrié grâce à la présence de la chute de plusieurs mètres située à la confluence (Figure 17).

B Identification des modes de défaillances

Les modes de défaillances évoluent éventuellement avec la magnitude de l'évènement : deux scénarios (décennal et centennal) sont traités dans l'exemple pour illustrer les différences qui émergent (Figure 18). Les AMC PAPI requièrent en général plus de scénarios. Notons que la façon dont nous présentons l'analyse peut être adaptée par les chargés d'étude et ne constitue pas un modèle à suivre systématiquement.

I Scénario décennal

Pour les crues fréquentes, le transport de bois est naturellement limité dans la plupart des cours d'eau (phénomène de purge régulière du lit mineur, intensité limitée d'érosion de berge). De plus, compte tenu de l'existence de deux plages de dépôts au Mas Julien (situé environ 3 km en amont du P1) et du relativement faible confinement du chenal dans la partie intermédiaire permettant des divagations en cas de formation

d'embâcle, on considère les apports de flottants pour le scénario décennal comme très probablement négligeables (1-20 m³) et très improbablement moyens (20-200 m³). Ce transport implique des éléments très probablement courts (1-3 m) et très improbablement longs (3-10 m). Compte tenu de l'absence de témoignage de la formation d'un embâcle au Π1 depuis la fin du XIX^{ème} siècle, on écarte l'hypothèse d'un embâcle de cet ouvrage pour le scénario décennal, de même que celui du Π2 situé en aval et dont le gabarit et la configuration sont meilleurs.

En aval du Π2, les résultats des modélisations, leur interprétation en intégrant le transport solide et les évidences historiques convergent pour laisser penser que des embâclements de tous les ponts sont possibles et que des dépôts et des débordements sont possibles sur tous les tronçons (le tronçon en aval du Π6, étant plus épargné que les autres, tous les dépôts et débordements ayant lieu en amont).

II Scénario centennal






Les apports de flottants pour le scénario centennal seront vraisemblablement moyens à significatifs. En effet, la mobilisation de 28 000 m³ de sédiment à travers des érosions de berges et des glissements de terrains implique nécessairement des zones boisées et donc le recrutement des arbres situés sur les zones érodées. Les volumes de flottants sont alors probablement moyens (50 - 200 m³) et assez improbablement fort (200 - 1000 m³). Ce transport implique des éléments probablement courts (1-3 m) et improbablement longs (3-10 m). La formation d'un embâcle au Π1 devient alors possible. La configuration du Π2 étant plus propice à éviter l'obstruction par des embâcles, son obstruction n'est pas considérée dans l'analyse.

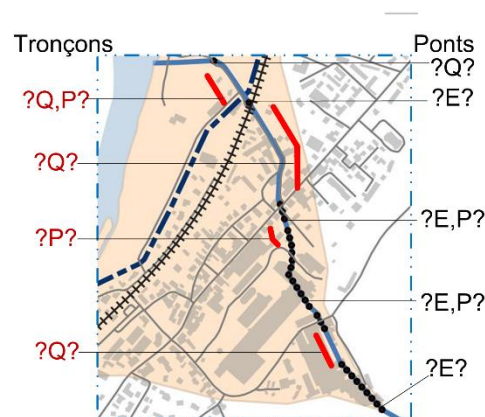
Les zones de dépôts, débordement et obstruction déjà possibles pour le scénario décennal, deviennent quasi-certaines pour le scénario centennal. La dispersion des écoulements sur le cône de déjection est alors telle que ces débordements déchargent en fait le chenal et que l'embâcle du pont de la SCNF (Π5) peut être considéré comme improbable. Son embâcle ne changerait de toute façon pas macroscopiquement la carte des intensités. On fait donc l'hypothèse que l'ouvrage n'est pas embâclé.

L'ensemble de cette étape d'analyse fonctionnelle est synthétisé dans la Figure 18.

b) Identification des modes de défaillances

Croisement des données historiques, de terrain, modélisations et analyse experte (voir texte)

PROCESSUS	CODE
 Obstruction par des blocs	B
 Embâclement	E
 Capacité hydraulique insuffisante	Q
 Rupture de pente	P
 Remous solide	R



SCÉNARIO	SCÉNARIO : MAGNITUDE DÉCENNALE	SCÉNARIO : MAGNITUDE CENTENNALE
Synthèse des paramètres clés pilotant le fonction du système	Q = 15 m ³ /s V _S = 6 000 m ³	Q = 35 m ³ /s V _S = 28 000 m ³
	Bois flottant: volume incertain (Probablement négligeable: ~1-20 m ³ , Assez improbablement moyen: 20-200 m ³)	Bois flottant: volume incertain (Probablement moyen: 50-200 m ³ , Assez improbablement fort: 200-1000 m ³)
	Longueurs des flottants: incertaines (Très probablement courtes: 1-3 m, Très improbablement longues: 3-10 m)	Longueurs des flottants: incertaines (Probablement courtes: 1-3 m, Assez improbablement longues 2-10 m)

Figure 18 : Synthèse graphique de l'étape b) Analyse fonctionnelle du site appliquée au cas d'étude du Ruisseau de la Combe de Lancey

C Tri et simplification du problème

Les modes de défaillances très nombreux (Figure 18) n'ont pas vocation à générer une multitude de sous-scénarios : une phase de tri et de simplification du problème est alors menée. Elle est détaillée dans les pages suivantes et synthétisées dans la Figure 20c.

I *Ecartement des modes de défaillance n'impactant pas les enjeux*

Compte tenu de l'absence relative d'enjeux aux abords de $\Pi 6$, de son sous-dimensionnement (en charge pour des débits très inférieurs à Q_{10}) et de la présence de la chantourne qui capture les écoulements débordant, la zone située en aval du pont canal de la chantourne, c'est-à-dire en aval direct de $\Pi 5$ est ignorée dans la suite de l'analyse et $\Pi 6$ est considéré systématiquement en charge, déclenchant des dépôts et débordement dans le tronçon amont (rupture de la continuité sédimentaire pour les magnitudes étudiées).

II *Identification des modes de fonctionnement quasi-certains et semi-aléatoires*

a Scénario décennal

Comme indiqué précédemment, les débordements et dépôts sont certains à l'extrémité aval du secteur d'étude dès la magnitude décennale. Le tronçon $\Pi 4 - \Pi 5$ situé en aval de la place de la Pologne déborde aussi par l'effet combiné d'une capacité hydraulique limitée et des dépôts sédimentaires. A contrario, des obstructions et débordements dans la partie raide située en amont du $\Pi 2$ sont considérés virtuellement impossibles pour cette magnitude.

Des incertitudes subsistent dans le secteur central de la papèterie à la place de la Pologne ($\Pi 3 - \Pi 4$) où les dépôts et obstructions sont très probables mais pas certains, ainsi qu'au niveau du pont SCNF ($\Pi 5$) dont l'embâcle est improbable (en raison des débordements amont qui pourraient décharger l'ouvrage) mais reste possible.

b Scénario centennal

Pour le scénario centennal, des débordements et dépôts dans l'ensemble des zones situées en aval du $\Pi 2$ sont quasi-certains. Des débordements marginaux de paquets d'eaux sont aussi considérés quasi-certains au niveau du tronçon $\Pi 1 - \Pi 3$ (niveau de charge supérieur à la crête des berges et instabilités en plans modélisée par ARTELIA – AMETEN 2020).

Une incertitude subsiste quant à l'obstruction du $\Pi 1$ à l'apex du cône par des embâcles.

III *Agrégation des fonctionnements ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale des intensités*

La proximité physique et les similarités des effets de certains modes de fonctionnement sur la carte des intensités permet de mener une étape de simplification par agrégation de certaines zones d'incertitudes (Figure 20c-iii).

a Scénario décennal

La proximité des ouvrages $\Pi 3$ (dalot des papèteries) et $\Pi 4$ (pont de la Pologne) et la similarité des processus (dépôts massifs à la cassure de pente forçant un débordement et des écoulements suivant de façon semi-aléatoire la pente qui les dirige globalement vers la place de la Pologne) nous poussent à agréger les dysfonctionnements du $\Pi 3$, du tronçon $\Pi 3 - \Pi 4$ et du pont $\Pi 4$ en un grand domaine semi-aléatoire.

On note que, en 2005, les écoulements ont plutôt pris la direction de la rue de la gare mais les bâtiments des papèteries, précédemment situés dans l'axe des écoulements et formant barrage, ont depuis été détruits. Dans la configuration actuelle, la direction d'écoulement vers le secteur de la gare reste possible mais serait vraisemblablement moins sollicité en cas d'évènement équivalent.

A contrario, l'embâclement du pont SCNF est situé trop loin en aval et il a des effets sur la répartition spatiale des intensités trop différents des blocages amont pour justifier son agrégation avec ces derniers.

b Scénario centennal

Il n'y pas d'agrégation possible dans le scénario centennal (un seul point au fonctionnement semi-aléatoire).

L'ensemble de l'analyse a permis de dégager les modes de fonctionnements des différents tronçons et verrous et d'identifier ceux étant quasi-certains et ceux restant incertains car (semi-)aléatoires. Pour chaque scénario, il peut être utile (mais n'est pas obligatoire) de représenter ce résultat en identifiant les sous-domaines aléatoires et quasi-déterministes (Figure 19).

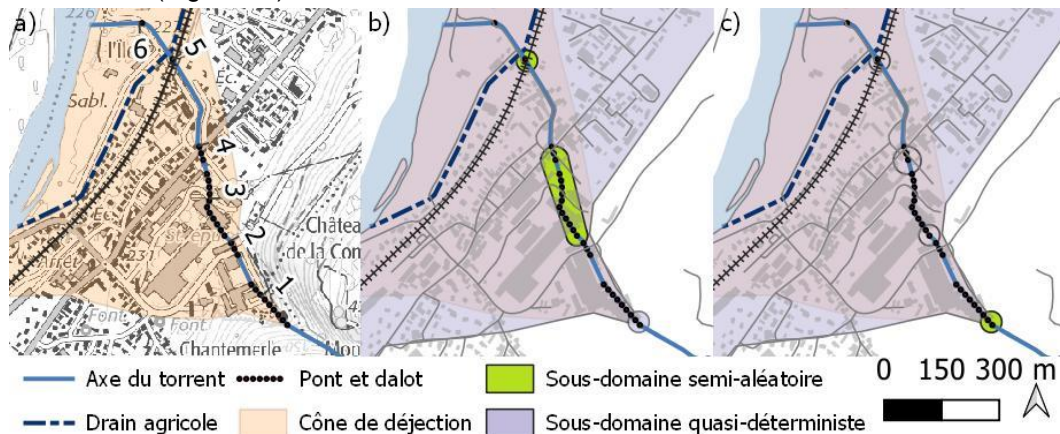


Figure 19 : Synthèse sur la localisation : a) des ouvrages et des sous-domaines semi-aléatoires retenus pour b) le scénario décennal et c) le scénario centennal

IV Elimination des scénarios mutuellement exclusifs

L'étape finale est d'éliminer les éventuels modes de fonctionnements considérés exclusifs.

a Scénario décennal

Dans un esprit de simplicité et compte tenu des très nombreuses incertitudes, seuls deux modes de fonctionnement seront envisagés au niveau des deux sous-domaines semi-aléatoires.

- Au niveau du sous-domaine semi-aléatoire $\Pi 3 - \Pi 4$:
 - $\neg E, P(\Pi 3 - \Pi 4)$: Un dépôt partiel dans le chenal d'ampleur toutefois limitée et sans embâclement des ouvrages ; les débordements sont simplement pilotés par la capacité hydraulique, sans aggravation associée au transport solide ;
 - $E, P(\Pi 3 - \Pi 4)$: Un dépôt massif accompagné d'un embâclement significatif des ouvrages $\Pi 3$ et $\Pi 4$, avec des débordements généralisés.
- Au niveau du sous-domaine semi-aléatoire $\Pi 5$:
 - $\neg E(\Pi 5)$: Un débordement du chenal sans embâclement de l'ouvrage ;
 - $E(\Pi 5)$: l'embâclement partiel de $\Pi 5$ aggravant le débordement.

Avant de mener le travail de combinatoire permettant de construire les sous-scénarios, il est réalisé la dernière étape de filtrage en retirant les modes de fonctionnement considérés comme mutuellement exclusifs. Les ouvrages $\Pi 3$ et $\Pi 4$ ayant des configurations plus propices à l'embâclement que $\Pi 5$ et étant situés en amont de ce dernier, l'hypothèse d'une absence d'embâclement en amont et d'une obstruction en aval est peu crédible. Le premier mode de fonctionnement du sous-domaine semi-aléatoire de $\Pi 3 - \Pi 4$ est donc considéré mutuellement exclusif avec le second mode de fonctionnement du sous-domaine semi-aléatoire de $\Pi 5$: autrement dit, le sous-scénario $\neg E, P(\Pi 3 - \Pi 4) \& E(\Pi 5)$ est écarté.

b Scénario centennal

Il n'y a qu'un seul sous-domaine semi-aléatoire dans le scénario centennal. L'étape d'élimination des modes de défaillance mutuellement exclusifs n'a donc pas lieu d'être.

La Figure 20 compile les deux figures de synthèse des deux étapes précédentes de l'analyse et ajoute une synthèse graphique de la partie c) Tir et simplification du problème.

a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux

Verrous: les ponts et sections couvertes sont notés П#. Il n'est pas relevé d'autre verrou particulier (convergent ou divergent brusque, etc.)

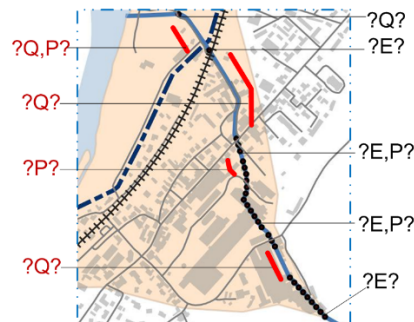
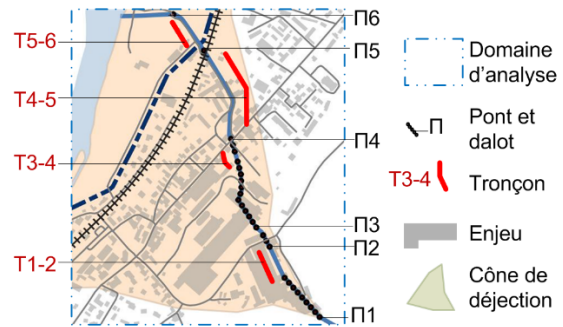
Tronçons homogènes: Les ponts et dalots constituent des délimitations pertinentes des tronçons homogènes. Le tronçon entre П2 et П3 est très court et très raide, il n'est pas analysé dans la suite.

Enjeux: deux zones se dégagent: forte urbanisation en amont de П5, plus faible en aval.

b) Identification des modes de défaillances

Croisement des données historiques, de terrain, modélisations et analyse experte (voir texte)

PROCESSUS	CODE
Obstruction par des blocs	B
Embâclement	E
Capacité hydraulique insuffisante	Q
Rupture de pente	P
Remous solide	R



SCÉNARIO | **SCÉNARIO: MAGNITUDE DÉCENNALE**
 Q = 15 m³/s | V_s = 6 000 m³
 Bois flottant: volume incertain
 (Probablement négligeable: ~1-20 m³,
 Assez improbablement moyen: 20-200 m³)
 Longueurs des flottants: incertaines
 (Très probablement courtes: 1-3 m,
 Très improbablement longues: 3-10 m)

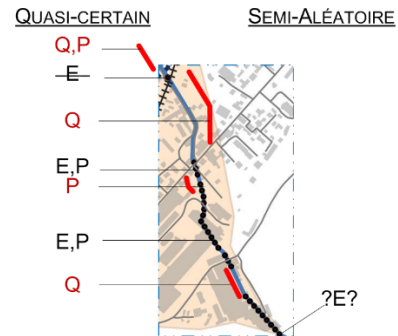
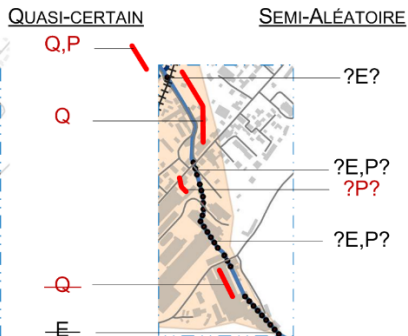
SCÉNARIO : MAGNITUDE CENTENNALE
 Q = 35 m³/s | V_s = 28 000 m³
 Bois flottant: volume incertain
 (Probablement moyen: 50-200 m³,
 Assez improbablement fort: 200-1000 m³)
 Longueurs des flottants: incertaines
 (Probablement courtes: 1-3 m,
 Assez improbablement longues 2-10 m)

c) Tri et simplification du problème

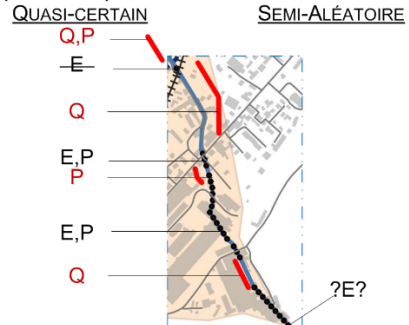
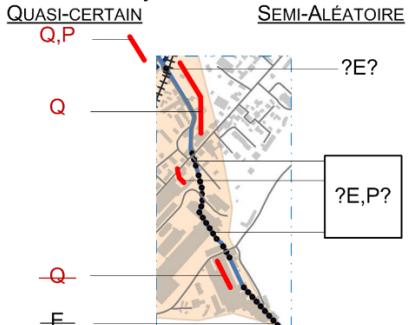
C-i) Zoom sur les modes de fonctionnement affectant les enjeux



C-ii) Identification des modes de fonctionnement quasi-certains et des modes de fonctionnement semi-aléatoires



C-iii) Agrégation des fonctionnements ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale des intensités



C-iv) Elimination des modes de défaillances mutuellement exclusifs: П3 & П4 beaucoup plus propices à l'obstruction par les embâcles que П5 → Élimination du sous-scénario -E,P- (П3 - П4) & E (П5)

Figure 20 : Synthèse de l'analyse du ruisseau de la Combe de Lancey

D Inventaire final des sous-scénarios

L'étape finale est d'identifier les sous-scénarios qui émergent.

I Scénario décennal

Il en ressort des analyses préalables que les sous-scénarios considérés pour le scénario décennal sont :

- sous-scénario décennal A (noté S_{10A}) : dépôt partiel sans embâcle sur les secteurs $\Pi_3 - \Pi_4$ et au droit ainsi qu'en amont de Π_5 (sous-scénario noté synthétiquement : $Q, P_{\Pi_3 - \Pi_4}$ & E_{Π_5}).
- sous-scénario décennal B (noté S_{10B}) : dépôt massif avec embâcle sur le secteur $\Pi_3 - \Pi_4$ mais absence d'embâcle de Π_5 ($Q, P_{\Pi_3 - \Pi_4}$ & E_{Π_5}).
- sous-scénario décennal C (noté S_{10C}) : dépôt massif avec embâcle sur le secteur $\Pi_3 - \Pi_4$ et embâcle de Π_5 avec dépôts aggravés associés ($Q, P_{\Pi_3 - \Pi_4}$ & E_{Π_5}).

II Scénario centennal

Pour le scénario centennal, seuls deux modes de fonctionnement du sous-domaine semi-aléatoire Π_1 sont considérés. Dans la mesure où il n'y a qu'un seul sous-domaine semi-aléatoire, il n'y a pas de combinatoire entre sous-domaines aléatoires à prévoir et ses modes de fonctionnement correspondent directement aux sous-scénarios :

- sous-scénario centennal A (noté S_{100A}) : embâcle marginal de Π_1 , la majorité des flux traverse le secteur $\Pi_1 - \Pi_2$ avec seulement des débordements marginaux dans le tronçon intermédiaire (E_{Π_1}).
- sous-scénario centennal B (noté S_{100B}) : embâcle significatif de Π_1 , des débordements et dépôts massifs ont lieu dans le secteur $\Pi_1 - \Pi_2$ (E_{Π_1}).

E Cartographie des intensités de processus torrentiel

La cartographie des intensités est menée de manière experte et suivant les classes d'intensité permettant d'utiliser les données d'endommagement Suisse (Bründl *et al.*, 2009). Il a été considéré que les pentes sont assez fortes en amont de la RD523 et l'espace disponible entre les bâtiments assez restreint pour concentrer les écoulements et maintenir les intensités dans les gammes forte ou moyenne. Les éléments historiques laissent toutefois penser que, si des dépôts de charriage ont lieu, ces derniers restent à proximité du chenal et ne sont pas transportés à de fortes distances de ce dernier (intensité forte à proximité du chenal, moyenne plus loin).

Dans la partie aval, au droit de la RD523 et en aval, la pente est drastiquement moins raide et les écoulements sont guidés par la microtopographie urbaine et l'existence de zones de cuvettes formées par les remblais routiers et les bâtiments en place. Les modélisations numériques 2D d'ARTELIA - AMETEN et de SUEZ permettent d'identifier les zones potentiellement noyées. Ces zones se voient attribuées une intensité faible bien que les hauteurs puissent localement dépasser 0.5 m.

4.1.4 Estimation des probabilités conditionnelles

Des probabilités conditionnelles doivent être attribuées aux trois sous-scénarios décennaux et aux deux sous-scénarios centennaux. Le site étant sujet à des crues de charriage impliquant des embâcles avec des dépôts d'ampleur peu prédictibles, les critères objectifs existants ne sont pas directement applicables et on propose d'appliquer une approche subjective et relative (voir § 3.5). Il s'agit donc de rassembler quelques éléments techniques décrivant les faisceaux d'indices justifiant les avis d'experts vis-à-vis des probabilités relatives de paires de sous-scénarios.

A Scénario décennal

Trois sous-scénarios ayant été retenus, il est nécessaire de mener deux comparaisons (la somme des probabilités conditionnelles étant égale à 1 fermant ensuite le système d'équations).

- S_{10A} ($Q, P_{\Pi_3 - \Pi_4}$ & E_{Π_5}) est considéré *plutôt moins probable que* S_{10B} ($Q, P_{\Pi_3 - \Pi_4}$ & E_{Π_5}).

Justification : Le pont de la Pologne ne semble avoir subi de dysfonctionnement (mise en charge, dépôt) que trois fois depuis la fin du 19ème siècle. Il semble excessif de considérer une probabilité conditionnelle équivalente.

- $S_{10B} (Q, P_{\Pi3-\Pi4} \& \bar{E}_{\Pi5})$ est considéré *beaucoup plus probable que* $S_{10C} (Q, P_{\Pi3-\Pi4} \& E_{\Pi5})$.

Justification : En cas de dépôts massif au sous-domaine semi-aléatoire $\Pi3 - \Pi4$, les écoulements débordants ne transfèrent plus naturellement les flottants dans le chenal et l'embâclement du $\Pi5$ devient très peu probable. Il resterait possible qu'un embâclement précoce ait lieu, suivi plus tard par des dépôts en amont mais cela est peu probable puisque, comme indiqué précédemment, la configuration des ponts situés en amont est plus défavorable que celle aval du pont SNCF $\Pi5$ (mise en charge significative du pont de la Pologne $\Pi4$ avant celle de la SNCF $\Pi5$).

Le système d'équations associé est :

- $P(S_{10A}) = 0.33 P(S_{10B})$
- $P(S_{10B}) = 9 P(S_{10C})$
- $P(S_{10A}) + P(S_{10B}) + P(S_{10C}) = 1$

Il en suit que les probabilités conditionnelles sont estimées précisément puis arrondies pour rappeler l'aspect simplifié de l'approche :

- $P(S_{10A}) = P(S_A | Q_{10}) = 1/(0.33 + 1+1/9) \times 0.33 \approx 0.23 \approx 0.2$
- $P(S_{10B}) = P(S_B | Q_{10}) = 1/(0.33 + 1+1/9) \approx 0.69 \approx 0.7$
- $P(S_{10C}) = P(S_C | Q_{10}) = 1/(0.33 + 1+1/9) / 9 \approx 0.08 \approx 0.1$

B Scénario centennal

Pour le scénario centennal, une seule comparaison est nécessaire :

- $S_{100A} (\bar{E}_{\Pi1})$ est considéré *équiprobable à* $S_{100B} (E_{\Pi1})$.

Justification : On manque de recul historique sur ce type d'évènement de forte magnitude et le seul évènement éventuellement analogue pourrait être la crue de 2005. Lors de cet évènement, il n'y a pas eu d'embâclement au droit de $\Pi1$. La configuration reste tout de même propice à l'embâclement ainsi qu'aux dépôts en cas d'obstruction. La capacité structurale de l'ouvrage à résister à une crue centennale est de plus incertaine. Faute d'information complémentaire, il est considéré tout aussi probable que l'ouvrage se bouche ou qu'il ne se bouche pas.

Le système d'équations associé est :

- $P(S_{100A}) = P(S_{100B})$
- $P(S_{100A}) + P(S_{100B}) = 1$

Il en suit que les probabilités conditionnelles sont :

- $P(S_{100A}) = P(S_A | Q_{100}) = 0.5$
- $P(S_{100B}) = P(S_B | Q_{100}) = 0.5$

4.2 Les laves torrentielles du torrent de l'Arcelle à Lanslevillard (73)

4.2.1 Présentation synthétique

A Bibliographie

Les rapports et références suivantes ont été utilisés pour mener à bien cette analyse :

- ONF-RTM 73, 2015, Lave torrentielle de l'Arcelle - 14/08/2015, Commune de Lanslevillard, Version 1, 16 p.
- ONF-DRN, 2019, FOP RTM – Outils d'aide à la décision ACB, Analyse multicritères, AMC - Partie IV – Exemple d'application ACB et analyse multicritère (ACB étendue). Formation Professionnelle Interne de l'ONF-RTM, Valence – 11 décembre 2019, préparé par Simon CARLADOUS. 55 diapos.

Il faut noter que, depuis l'étude menée en 2015, la solution de chenalisation à l'aval a été retenue et mise en œuvre. L'analyse qui est faite ici à titre d'exemple se place dans la configuration de 2015, lorsque les différentes solutions ont été envisagées, avec présence d'une buse en partie aval. Cet exemple reprend alors les éléments d'analyse produits dans le rapport RTM et les replacent dans le cadre méthodologique développé dans ce rapport : ceci illustre ainsi l'applicabilité de cette méthode au profit de la traçabilité du raisonnement.

B Localisation et paramètres généraux

Le bassin versant du torrent d'Arcelle est situé en rive gauche de l'Arc sur la commune de Val-Cenis (Figure 21). La superficie totale du bassin versant est de 3,0 km².

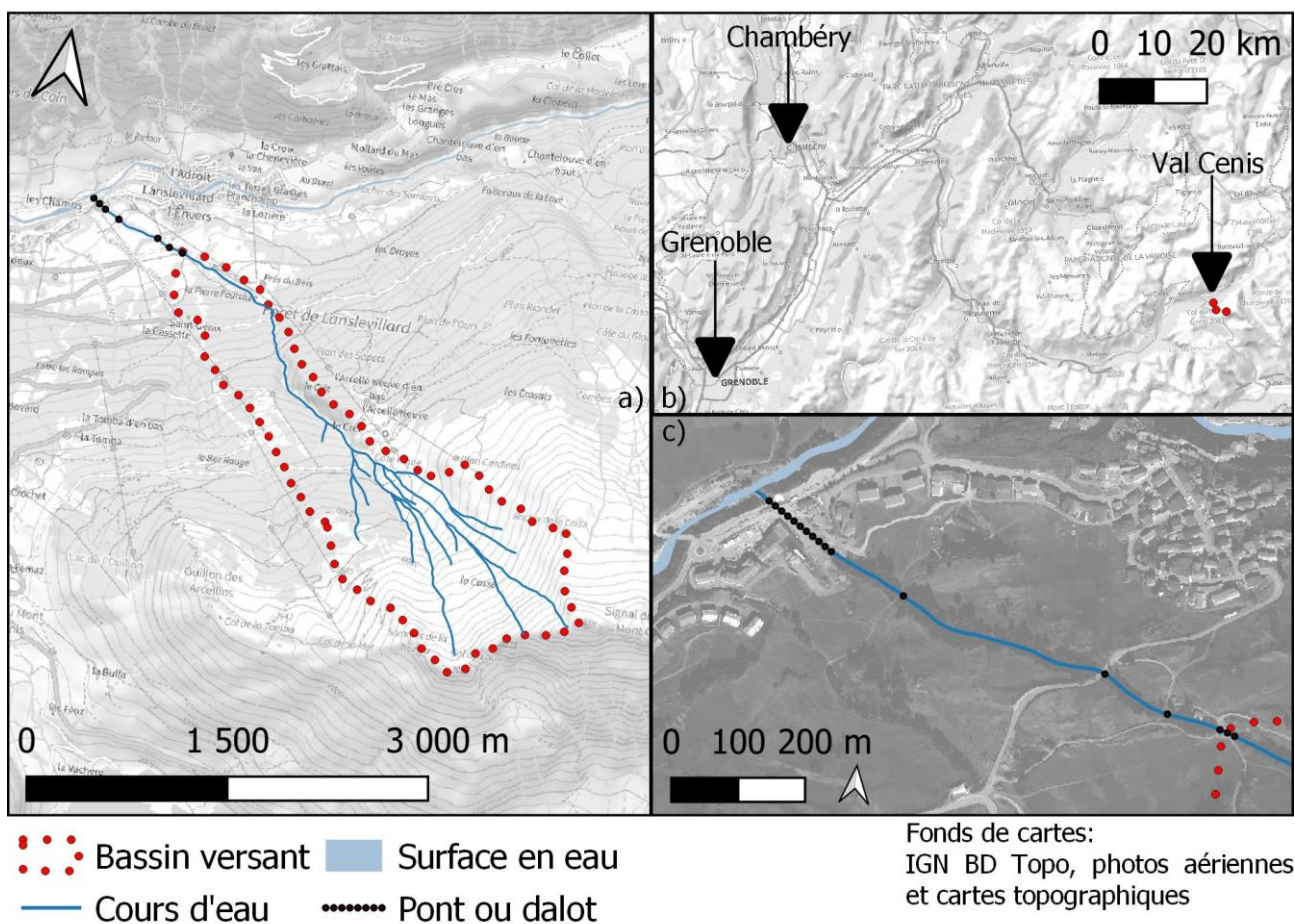


Figure 21 : Carte de localisation du site d'étude de Val Cenis : a) vue d'ensemble du bassin versant, b) localisation et c) zoom d'étude

Ce bassin versant se divise entre trois parties distinctes géomorphologiquement (rapport ONF-RTM73, 2015) :

- "Le bassin de réception - 3 377 m (Signal du Grand Montcenis) à 2 200 m : le bassin de réception est drainé par de nombreuses ravines qui confluent vers la cote 2 200 pour créer le Torrent de l'Arcelle. Les terrains du bassin de réception sont constitués pour moitié de terrains érodables : éboulis et moraine glaciaire. Il y a, entre la cote 2 700 et 2 800 m, un « plateau » qui est occupé par un glacier rocheux.
- Les Gorges de l'Arcelle – 2 200 m à 1 600 m : après la confluence des ravines, l'Arcelle s'écoule dans des gorges rocheuses fortement incisées (Calschistes). Les rives des gorges sont occupées par des forêts susceptibles d'alimenter le torrent en embâcles.
- Le chenal de transit – 1 600m à la confluence : Après la sortie des gorges, le torrent de l'Arcelle s'écoule dans une zone de moindre pente (environ 10%). Le lit est bien marqué avec une profondeur de l'ordre de 5 à 6 m et une largeur du fond du lit de 4 à 5 m. Depuis la confluence avec l'Arc et jusqu'à 150 m à l'amont, l'Arcelle est canalisée dans une buse béton de 2.0 m de diamètre. A l'amont de cette buse des barres IPN empêchent l'entrée des embâcles."

C Eléments historiques

Le rapport ONF-RTM73, réalisé pour analyser la lave torrentielle du 14/08/2015, rappelle que des événements torrentiels avait déjà été rapportés le 24/08/1987 (orage après un été humide) et le 24/09/1993 (fortes pluies continues) qui avaient entraîné des débordements similaires à ceux observés le 14 août 2015. On note que la buse béton sur le torrent de l'Arcelle a été installée vers 1985.

L'épisode de lave torrentielle du 14/08/2015 trouve son origine au front d'un glacier rocheux perché sur le « plateau » situé sous le Signal du Grand Montcenis. Deux volumes de matériaux se sont détachés du front du glacier, ont formé des laves torrentielles qui se sont propagées dans le système de ravines puis dans le lit du torrent jusqu'au cône de déjection en recrutant des embâcles sur son passage. Des bouffées ont été observées en l'espace de 15 à 30 min au niveau du bourg. La buse couvrant le torrent sur sa partie terminale a été bouchée et les laves torrentielles ont débordé, touchant lourdement des aménagements de la station de ski, coupant le RD1006 et touchant deux bâtis en rive droite après avoir traversé l'Arc via le pont (Figure 22).

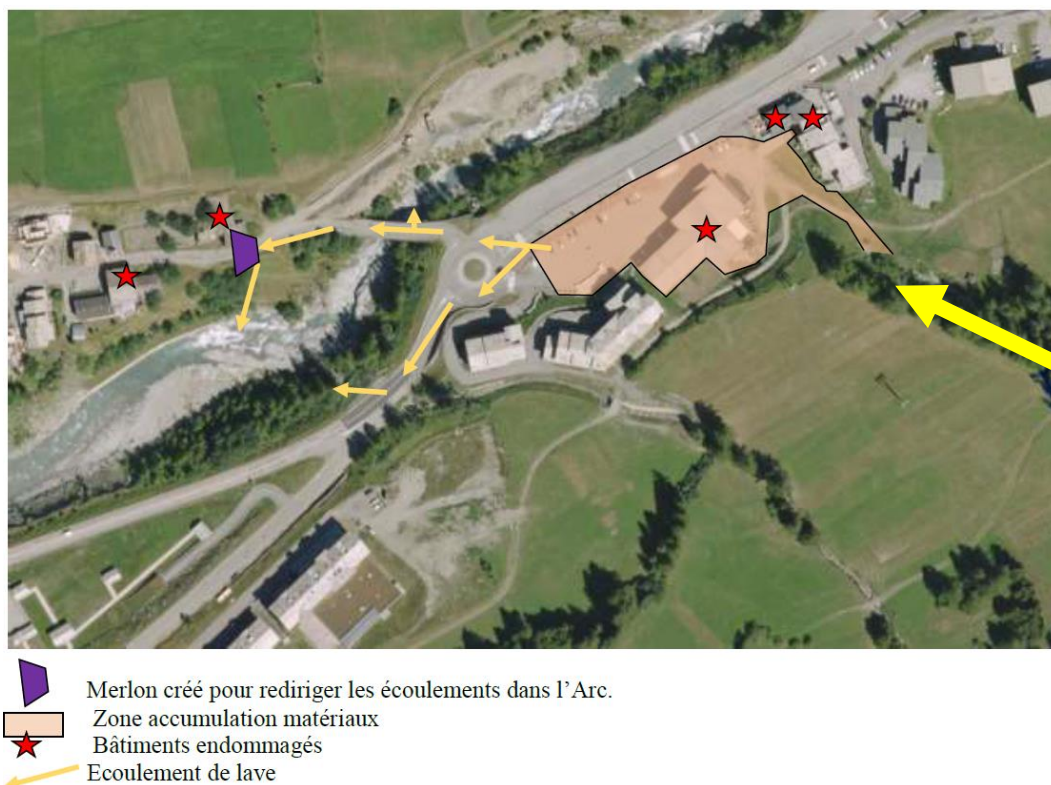


Figure 22 : Schéma de la zone touchée par la lave torrentielle d'août 2015

D Hydrologie et activité torrentielle

I Apports sédimentaires

La magnitude des événements est reprise des études RTM.

Pour les laves torrentielles :

- Évènement vingtennal : $V_{20} = 15\,000\text{ m}^3$
- Évènement centennal : $V_{100} = 25\,000\text{ m}^3$

Mais il peut également survenir des crues à charriage avec transport d'embâcles qu'on considère comme un autre événement vingtennal dans cette analyse (point qui mériterait d'être approfondi par une étude hydraulique et de potentiel de production des embâcles plus aboutie). L'assignation d'une probabilité conditionnelle au sous-scénario vingtennal de crue de charriage et à celui de lave torrentielle doit aussi être réfléchi.

II Conditions aux limites aval

Le ruisseau de l'Arcelle conflue avec l'Arc à l'aval de la zone d'étude. Comme tout au long de cette vallée, la capacité hydraulique de reprise des dépôts de lave par l'Arc peut être limitée au cours de la crue du torrent de l'Arcelle. Ceci peut être à l'origine d'un dépôt régressif qui, selon l'étude RTM, resterait cependant limité en termes de volume (de l'ordre de $2\,000\text{ m}^3$ pour un événement centennal). Dans ce contexte, l'état de crue de l'Arc, fortement conditionné par les aménagements hydro-électriques à l'amont, est ignoré dans la suite de l'analyse en considérant un potentiel dépôt régressif limité depuis la confluence.

4.2.2 Analyse fonctionnelle du torrent

Les pages qui suivent détaillent l'analyse fonctionnelle du site.

A Inventaire des verrous, tronçons et enjeux

Selon l'étude RTM, deux ouvrages de couvertures présentent les caractéristiques suivantes, d'amont en aval :

- $\Pi 1$ est un dalot rectangulaire (dimensions L. 3,8 m x H 2,0 m), dit dalot Saint-Pierre, qui permet le passage d'une piste de ski au-dessus. Lors de la crue du 14 août 2015 (V_{20}), « l'écoulement s'est fait à plein bord avec mise en charge du dalot. Les laisses de crue en témoignent. La non-obstruction du dalot par l'une des deux coulées reste surprenante ».
- $\Pi 2$ est l'entrée d'un passage busé situé au niveau du cône de déjection. La buse est de diamètre 2 m, avec une entrée en buse équipée d'une grille qui permet d'arrêter les flottants. Lors de la crue du 14 août 2015 (V_{20}), la grille a été détruite (avant d'être reconstruite ensuite) et le front de lave a directement obstrué l'entrée de la buse, occasionnant de débordements et un étalement de lave sur tout le cône de déjection.

Selon les éléments disponibles dans l'étude RTM, les tronçons amont à $\Pi 1$ et entre $\Pi 1$ et $\Pi 2$ sont suffisamment dimensionnés pour permettre le transit des laves torrentielles V_{20} et V_{100} et des crues avec charriage V_{20} . Cependant, en l'état de l'analyse, le profil en long de pente moyenne limitée à 10 % sur ce secteur n'est pas disponible en détail pour vérifier l'absence de zones préférentielles au dépôt en cas de crue avec charriage. Malgré tout, l'enfoncement du lit laisse supposer une capacité hydraulique suffisante.

Le tronçon en aval de $\Pi 2$ est constitué par la buse de 2 m de diamètre. Sa capacité de transit est très certainement limitée quel que soit le phénomène dès lors qu'il y a transport de matériaux. On peut noter à ce niveau que la solution qui a finalement été retenue a été de remplacer cette buse par un chenal ouvert de dimension et pente suffisante pour assurer le transit des événements V_{20} et V_{100} (mais ceci n'est pas considéré pour cette étude où on se place en conditions de site initiales de 2015).

B Identification des modes de défaillances

I Scénario vingtennal – lave torrentielle 15 000 m³

Au vu des éléments disponibles, les laves fréquentes sont plutôt fluides mais la constitution d'un front granulaire avec des blocs ne peut pas être écartée. Les éléments d'analyse de la crue de 2015 rapportant que le dalot Π1 n'a pas été obstrué indiquent d'ailleurs l'étonnement des rédacteurs de la note. L'ouverture relative très limitée de cet ouvrage laissait supposer qu'un tel phénomène ait lieu. Dans ce cadre, l'obstruction de Π1 par une lave V₂₀ ne peut pas être exclue.

Comme le démontre la crue de 2015, dès lors que la lave transite à travers Π1, elle obstruera de manière certaine l'entrée de buse Π2.

II Scénario vingtennal – crue avec charriage et embâcles

Au vu des éléments disponibles, même pour les crues fréquentes, le transport de bois est naturellement abondant. Au vu des éléments disponibles dans le rapport RTM, sans pour autant pouvoir le quantifier, on considère les apports de flottants pour le scénario vingtennal comme probablement importants. Compte tenu de cette analyse, on ne peut pas écarter la formation d'un embâcle au Π1 en cas de crue avec charriage. Dès lors qu'il y a obstruction, les écoulements sont déviés du lit naturel du torrent de l'Arcelle pour se diriger vers le centre bourg.

Si les embâcles, par exemples ceux de longueur modérée, ne sont pas arrêtés au niveau Π1, ils atteindront Π2 qui est protégé par un piège à flottants qui permet de limiter la probabilité d'embâclement. Cependant, l'embâclement ne peut pas être totalement écarté et, dans ce cas, les écoulements s'étaleront sur l'ensemble du cône de déjection.

III Scénario centennal – lave torrentielle 25 000 m³

Au vu des éléments disponibles, les laves rares, de magnitude centennale, obstrueront Π1 et Π2 (dès lors que tout ou partie de la lave transitera au-dessus de Π1).

C Tri et simplification du problème

I Ecartement des modes de défaillance n'impactant pas les enjeux

Les modes de défaillance décrits précédemment (obstruction de Π1, obstruction de Π2) affectent des enjeux : l'obstruction de Π1 favorise les écoulements vers le centre bourg ; l'obstruction de Π2 favorise les écoulements vers le front de neige.

II Identification des modes de fonctionnement quasi-certains et semi-aléatoires

Au vu des éléments précédents décrivant les modes de défaillance, le Tableau 10 peut être établi.

Tableau 10 : Domaine des modes de fonctionnement au niveau des verrous identifiés sur le torrent de l'Arcelle pour chacun des scénarios.

SCENARIOS	Obstruction Π1	Obstruction Π2
vingtennal – lave torrentielle 15 000 m ³	semi-aléatoire	quasi-certain
vingtennal – crue avec charriage et embâcles	semi-aléatoire	semi-aléatoire
centennal – lave torrentielle 25 000 m ³	quasi-certain	quasi-certain

III Agrégation des fonctionnements ayant les mêmes effets sur la répartition spatiale des intensités

Il n'y a pas d'agrégation possible selon cet aspect car les obstructions de Π1 et de Π2 n'impliquent pas des écoulements vers les mêmes zones d'enjeux. Elles génèrent donc une répartition spatiale des intensités différente selon les modes de fonctionnement

IV *Elimination des scénarios mutuellement exclusifs*

L'étape finale est d'éliminer les éventuels modes de fonctionnements considérés exclusifs.

a Scénario vingtennal – lave torrentielle 15 000 m³

Il n'y a qu'un seul sous-domaine semi-aléatoire dans ce scénario. L'étape d'élimination des modes de défaillance mutuellement exclusifs n'a donc pas lieu d'être.

b Scénario vingtennal – crue avec charriage et embâcles

Par souhait de simplification de l'analyse, seuls deux modes de fonctionnement seront envisagés au niveau des deux sous-domaines semi-aléatoires.

- Au niveau du sous-domaine semi-aléatoire $\Pi 1$:
 - $\neg E(\Pi 1)$: une absence d'obstruction du dalot avec écoulement transitant jusqu'à $\Pi 2$
 - $E(\Pi 1)$: obstruction du dalot avec écoulements débordants transitant jusqu'au centre bourg
- Au niveau du sous-domaine semi-aléatoire $\Pi 2$:
 - $\neg E(\Pi 2)$: une absence d'obstruction à l'entrée de la buse favorisant les écoulements mais un dépôt de charriage conduisant malgré tout à des débordements limités ;
 - $E(\Pi 2)$: obstruction de l'entrée de buse aggravant les débordements.

Avant de mener le travail de combinatoire permettant de construire les sous-scénarios, il est réalisé la dernière étape de filtrage en retirant les modes de fonctionnement considérés comme mutuellement exclusifs. L'ouvrage $\Pi 1$ situé en amont ayant une configuration moins propice à l'embâclement que $\Pi 2$, l'hypothèse d'une absence d'embâclement en amont et d'une obstruction en aval reste crédible. De fait, cette étape ne permet pas d'éliminer un des modes de défaillance du sous-domaine quasi-aléatoire identifié.

c Scénario centennal – lave torrentielle 25 000 m³

Il n'y a pas de sous-domaine semi-aléatoire dans ce scénario. L'étape d'élimination des modes de défaillance mutuellement exclusifs n'a donc pas lieu d'être.

D Inventaire final des sous-scénarios

L'étape finale consiste à identifier les sous-scénarios qui émergent

I *Scénario vingtennal – lave torrentielle 15 000 m³*

Il en ressort des analyses préalables que les sous-scénarios considérés pour ce scénario de lave vingtennale sont :

- sous-scénario A (noté S_{L20A}) : pas d'obstruction de $\Pi 1$ et obstruction de $\Pi 2$ ($\neg B_{\Pi 1}$ & $B_{\Pi 2}$)
- sous-scénario B (noté S_{L20B}) : obstruction de $\Pi 1$ et obstruction de $\Pi 2$ si une partie des écoulements transite jusqu'à $\Pi 2$ et ne sont pas tous dirigés vers le centre bourg ($B_{\Pi 1}$ & $B_{\Pi 2}$)

II *Scénario vingtennal – crue avec charriage et flottants*

Il en ressort des analyses préalables que les sous-scénarios considérés pour ce scénario vingtennal de crue avec charriage et flottants sont :

- sous-scénario A (noté S_{C20A}) : pas d'obstruction de $\Pi 1$ et pas d'obstruction de $\Pi 2$ ($\neg E_{\Pi 1}$ & $\neg E_{\Pi 2}$)
- sous-scénario B (noté S_{C20B}) : pas d'obstruction de $\Pi 1$ et obstruction de $\Pi 2$ ($\neg E_{\Pi 1}$ & $E_{\Pi 2}$)
- sous-scénario C (noté S_{C20C}) : obstruction de $\Pi 1$ et pas obstruction de $\Pi 2$ si une partie des écoulements transite jusqu'à $\Pi 2$ et ne sont pas tous dirigés vers le centre bourg ($E_{\Pi 1}$ & $\neg E_{\Pi 2}$)
- sous-scénario D (noté S_{C20D}) : obstruction de $\Pi 1$ et obstruction de $\Pi 2$ si une partie des écoulements transite jusqu'à $\Pi 2$ et ne sont pas tous dirigés vers le centre bourg ($E_{\Pi 1}$ & $E_{\Pi 2}$)

III *Scénario centennal – lave torrentielle 25 000 m³*

Pour le scénario centennal, un seul mode de fonctionnement quasi-certain est envisageable pour le scénario centennal de lave :

- scénario (noté S_{L100}) : obstruction de $\Pi 1$, avec des débordements vers le centre bourg mais préférentiellement une poursuite des écoulements dans le chenal principal vers $\Pi 2$ qui sera alors également obstrué ($B_{\Pi 1}$ & $B_{\Pi 2}$).

E Cartographie des intensités de processus torrentiel

Comme indiqué précédemment, la cartographie des aléas torrentiel ne fait pas l'objet de ce rapport. Des cartes d'intensité ont été proposées dans l'étude RTM selon les procédures utilisées en 2015 en discriminant un niveau d'intensité forte et un niveau d'intensité faible.

4.2.3 Analyse des probabilités conditionnelles

Ce type de configuration avec des verrous constitués par des ponts ou des buses pour lesquelles nous disposons des dimensions se prête bien à une approche d'évaluation absolue en se basant sur les références citées dans ce rapport à titre d'exemple. Cependant, cela nécessiterait de disposer d'éléments d'études hydrauliques plus aboutis en ce qui concerne les dimensions de blocs pouvant être transportés par les laves torrentielles ainsi que de flottants pouvant être transportés lors des événements de laves ou de crues avec charriage fréquents. Nous ne disposons pas de telles données pour mettre en œuvre cet exemple.

Ainsi, nous proposons d'appliquer l'approche subjective relative développée dans ce rapport et déjà appliquée dans l'exemple du ruisseau de la Combe de Lancey.

A Scénario vingtennal – lave torrentielle 15 000 m³

Deux sous-scénarios ayant été retenus, une seule comparaison est alors suffisante.

- S_{L20A} ($\neg B_{\Pi 1}$ & $B_{\Pi 2}$) est considéré *équiprobable à* S_{L20B} ($B_{\Pi 1}$ & $B_{\Pi 2}$).

Justification : Au vu des éléments du rapport RTM, même si $\Pi 1$ n'a pas été obstrué lors de la lave de 2015, tout laisse à penser que cela aurait dû être le cas et que la configuration est propice. A travers cet exemple, il apparaît difficile de favoriser un scénario par rapport à l'autre.

Le système d'équations associé est :

- $P(S_{L20A}) = P(S_{L20B})$
- $P(S_{L20A}) + P(S_{L20B}) = 1$

Il en suit que les probabilités conditionnelles sont :

- $P(S_{L20A}) = 0.5$
- $P(S_{L20B}) = 0.5$

B Scénario vingtennal – crue avec charriage et flottants

Quatre sous-scénarios ayant été retenus, trois comparaisons sont nécessaires.

- S_{C20A} ($E_{\neg \Pi 1}$ & $E_{\neg \Pi 2}$) est considéré *plus probable que* S_{C20B} ($E_{\neg \Pi 1}$ & $E_{\Pi 2}$).

Justification : Dès lors que des flottants transiteront jusqu'à $\Pi 2$, l'obstruction de la buse est favorisée par ces dimensions limitées et ce malgré la présence d'un piège à flottants en amont. A ce niveau, une analyse objective devrait être menée en considérant des dimensions et un volume de flottants pouvant transiter.

- S_{C20A} ($E_{\neg \Pi 1}$ & $E_{\neg \Pi 2}$) est considéré *équiprobable avec* S_{C20C} ($E_{\Pi 1}$ & $E_{\neg \Pi 2}$).

Justification : Comme pour les laves torrentielles précédentes, aucun élément ne permet, dans les études disponibles, de favoriser la survenue du scénario d'obstruction de $\Pi 1$ par rapport à sa non obstruction.

- S_{C20B} ($E_{\neg \Pi 1}$ & $E_{\Pi 2}$) est considéré *équiprobable avec* S_{C20D} ($E_{\Pi 1}$ & $E_{\Pi 2}$).

Justification : Comme pour les laves torrentielles précédentes et le cas de comparaison précédent, aucun élément ne permet, dans les études disponibles, de favoriser la survenue du scénario d'obstruction de $\Pi 1$ par rapport à sa non obstruction.

Le système d'équations associé est (voir le ²Tableau 9 p. 38 pour la convention utilisé des liens entre forme verbale comparative et valeur numérique des ratios de probabilités) :

- $P(S_{C20A}) = 4 P(S_{C20B})$
- $P(S_{C20A}) = P(S_{C20C})$
- $P(S_{C20B}) = P(S_{C20D})$
- $P(S_{C20A}) + P(S_{C20B}) + P(S_{C20C}) + P(S_{C20D}) = 1$

Soit :

- $P(S_{C20A}) + \frac{1}{4} P(S_{C20A}) + P(S_{C20A}) + \frac{1}{4} P(S_{C20A}) = 1$
- $P(S_{C20B}) = P(S_{C20A}) / 4$
- $P(S_{C20A}) = P(S_{C20C})$
- $P(S_{C20B}) = P(S_{C20D})$

Il en suit que les probabilités conditionnelles sont :

- $P(S_{C20A}) = 0.4$
- $P(S_{C20B}) = 0.1$
- $P(S_{C20C}) = 0.4$
- $P(S_{C20D}) = 0.1$

C Scénario centennial

Pour le scénario centennial, aucune comparaison n'est nécessaire : $P(S_{L100}) = 1$

5 Conclusion et perspectives

Dans ce rapport, nous avons rappelé le contexte et pourquoi la problématique des sous-scénarios de crues est particulièrement prégnante dans l'étude des crues torrentielles (§1). Un nouveau protocole d'identification des sous-scénarios est ensuite proposée (§2). L'approche ainsi présentée est inspirée de la sûreté de fonctionnement. Elle se base sur une analyse fonctionnelle des différents tronçons et ouvrages équipant le cours d'eau et vise à clarifier les modes de fonctionnement possibles de ces derniers pour chaque magnitude de crue. Plusieurs étapes sont ensuite proposées afin de simplifier les phases suivantes d'analyses. L'étape suivante consiste en l'assignation de probabilités conditionnelles aux sous-scénarios retenus (§3). Des approches objectives et subjectives d'élicitation de probabilités conditionnelles absolues ou comparatives sont proposées, notamment sur la base de la relation entre probabilités qualitatives et quantitatives établie par le GIEC pour aider l'élicitation des probabilités subjectives. Deux cas d'étude bien documentés sont finalement présentés pour illustrer l'application de la méthode (§4).

Bien que testé sur deux cas d'études, il est probable que ce protocole présente des limites ou soit difficilement applicable à certains sites particuliers et/ou compliqués. Il ne faut pas le voir comme un carcan mais plus simplement comme une façon d'aborder un problème complexe en le segmentant en une série de petites tâches de moindre complexité. L'ambition première est d'aider à tracer le raisonnement qui conduit les chargés d'études à proposer leur évaluation des probabilités conditionnelles et à le soumettre au regard critique du commanditaire de l'étude.

Une approche alternative aurait été la création d'arbres de défaillance complets, associés à des arbres de probabilités comme cela peut être pratiqué dans les analyses des modes de défaillance. Cette approche est aussi valable et certains chargés d'études préféreront l'adopter. La présente approche permet probablement d'aboutir à moins de sous-scénarios qu'une approche de modes de défaillance standard. D'autres approches que celle proposées dans le présent rapport verront encore sans aucun doute le jour : nous avons déjà réfléchi à des approches plus systématiques, plus rigoureuses, mais aussi plus compliquées à mettre en œuvre et que nous avons fait le choix de ne pas inclure dans le présent document.

Comme indiqué dans le texte, des travaux scientifiques portant sur les questions des sous-scénarios et des modes de défaillance des ouvrages hydrauliques paraissent régulièrement. S'ils décident de l'utiliser, les chargés d'études et services instructeurs sont donc invités à adapter la présente approche à l'état de l'art et aux spécificités des cas d'études.

Quelle que soit l'approche retenue, nous insistons une dernière fois sur l'importance de tracer le raisonnement et d'explicité les hypothèses de travail et d'analyse.

Bibliographie

- Baudrit, C., D. Dubois et D. Guyonnet. 2006. « Joint Propagation and Exploitation of Probabilistic and Possibilistic Information in Risk Assessment ». *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 14, n° 5, p. 593-608. <<https://doi.org/10.1109/tfuzz.2006.876720>>.
- Bründl, M., H. E. Romang, N. Bischof et C. M. Rheinberger. 2009. « The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 9, n° 3, p. 801-813. <<https://doi.org/10.5194/nhess-9-801-2009>>.
- Brunner, M. I., Jan Seibert et A.-C. Favre. 2016. « Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation: Bivariate return periods ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 3, n° 6, p. 819-833. <<https://doi.org/10.1002/wat2.1173>>.
- Carladous, S. et J.-M. Tacnet. 2019. *Efficacité des dispositifs de protection contre les risques naturels en montagne – Glossaire*. MTES (Ministère de la transition écologique et solidaire) - Direction Générale de la Prévention des Risques - Services des risques naturels et de l'hydraulique.
- CGDD. 2018. *Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018*. Commissariat général au développement durable. <<https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Analyse%20multicrit%C3%A8re%20des%20projets%20de%20pr%C3%A9vention%20des%20inondations%20-%20Guide.pdf>>. Consulté le 22 mars 2021.
- Chahrour, N., G. Piton, C Bérénguer et JM. Tacnet. 2022. « Designing Protection Systems in Mountains for Reduced Maintenance Costs: Claret's Retention Dam Case Study ». In *ESREL 2022 - 32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022)*. (Dublin, Ireland, 2022), p. 2797-2804. European Safety and Reliability Association. Trinity College Dublin. <<https://hal.inrae.fr/hal-03767911v2>>.
- Corominas, J., C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J.-P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M. G. Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervás et J. T. Smith. 2014. « Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk ». *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 73, p. 209-263. <<https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>>.
- Evin, G. et G. Piton. 2020. *Analyse bivariable des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne*. hal-02509705. INRAE; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), 57 p. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509705/>>. Consulté le 15 décembre 2020.
- Favier, P., Piton G., I. Ousset et J.M. Tacnet. 2019. *Méthodes d'aide à la décision pour les plans d'action et de prévention - analyse comparative des méthodes dites « multicritères » dans le contexte du risque torrentiel - rapport de phase 2 : méthodologie d'évaluation des dommages*. Commissariat général au développement durable (CGDD). <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132546v1>>.
- Givry, M. et C. Peteuil. 2011. *Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel*. MEDDTL (Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement) DGPR. <<https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/210183/construire-en-montagne-la-prise-en-compte-du-risque-torrentiel>>. Consulté le 11 janvier 2021.
- Grelot, F., Jean-Stéphane Bailly, Nathalie Saint Geours et T. Länger. 2013. *Incertitudes dans les études ACB-DE : guide méthodologique*. IRSTEA, 51 p. <<https://hal.inrae.fr/hal-02609404>>. Consulté le 4 novembre 2021.
- Gschnitzer, T., B. Gems, B. Mazzorana et M. Aufleger. 2017. « Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management ». *Geomorphology*, vol. 279, p. 128-140. <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.002>>.
- Guyonnet, D., B. Bourguine, D. Dubois, H. Fargier, B. Cozme et J.-P. Chilès. 2003. « Hybrid Approach for Addressing Uncertainty in Risk Assessments ». *Journal of Environmental Engineering*, vol. 129, n° 1, p. 68-78. <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2003\)129:1\(68\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2003)129:1(68))>.

- Hartford, Desmond N. D. et Gregory B. Baecher. 2004. *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. Thomas Telford, 468 p.
- Kean, J.W., D.M. Staley, J.T. Lancaster, F.K. Rengers, B.J. Swanson, J.A. Coe, J.L. Hernandez, A.J. Sigman, K.E. Allstadt et D.N. Lindsay. 2019. « Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California, USA: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment ». *Geosphere*, vol. 15, n° 4, p. 1140-1163. <<https://doi.org/10.1130/GES02048.1>>. Consulté le 19 octobre 2020.
- Lange, D. et G. Bezzola. 2006. *Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze [Driftwood - Problems and solutions]*. 188. Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (VAW) Zürich, 125 p. <<https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/188.pdf>>. Consulté le 30 décembre 2020.
- Mastrandrea, M., K. J. Mach, G.-K. Plattner, O. Edenhofer, T. F. Stocker, C. B. Field, K. L. Ebi et P. R. Matschoss. 2011. « The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups ». *Climatic Change*, vol. 108, n° 4, p. 675-691. <<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0178-6>>.
- MATETL. 1999. *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) - Guide général*. <<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/guide-pprn.pdf>>. Consulté le 28 décembre 2020.
- Mazas, F. 2019. « Extreme events: a framework for assessing natural hazards ». *Natural Hazards*. <<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03581-9>>.
- Mazzorana, B., F. Comiti et S. Fuchs. 2011. « A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams ». *Natural Hazards*, vol. 67, n° 3, p. 991-1009. <<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9811-y>>.
- Mazzorana, B., F. Comiti, C. Scherer et S. Fuchs. 2012. « Developing consistent scenarios to assess flood hazards in mountain streams ». *Journal of Environmental Management*, vol. 94, n° 1, p. 112-124. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.030>>.
- Mazzorana, B., F. Comiti, C. Volcan et C. Scherer. 2011. « Determining flood hazard patterns through a combined stochastic-deterministic approach ». *Natural Hazards*, vol. 59, n° 1, p. 301-316. <<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9755-2>>.
- Mazzorana, B. et S. Fuchs. 2010. « Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents ». *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 10, p. 1208-1224. <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.030>>.
- Mazzorana, B., V. Ruiz-Villanueva, L. Marchi, M. Cavalli, B. Gems, T. Gschnitzer, L. Mao, A. Iroumé et G. Valdebenito. 2017. « Assessing and mitigating large wood-related hazards in mountain streams: recent approaches ». *Journal of Flood Risk Management*. <<https://doi.org/10.1111/jfr3.12316>>.
- Mériaux, P, D Richard, H Félix, D Laigle, M Bon, G Astier, I Boncompain et Y Quefféléan. 2013. « Etude de dangers des digues de protection contre les crues torrentielles: présentation du cas de l'EDD des digues du torrent de La Salle, recommandations et perspectives ». In *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions-2e colloque national-Digues 2013*. (2013), p. 164-175. Lavoisier. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01551766>>.
- Mortureux, Y. 2001. « La sûreté de fonctionnement: méthodes pour maîtriser les risques ». In *Méthodes d'analyse des risques*. Coll. « Techniques de l'ingénieur », vol. TIB155DUO, vol. ag4670. Editions T.I. <<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/qualite-et-securite-des-systemes-industriels-42153210/la-surete-de-fonctionnement-methodes-pour-maitriser-les-risques-ag4670/>>. Consulté le 28 décembre 2020.
- Newinger, O. et Y. Robert. 2021. « Cartographie de l'aléa de ruissellement : la modélisation va-t-elle remplacer l'expertise de terrain ? » *La Houille Blanche*, vol. 107, n° 1, p. 1-9. <<https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1914457>>. Consulté le 23 septembre 2021.

- OFEV. 2019. *Bois flottant dans les cours d'eau*. Connaissance de l'environnement num 1910. Office fédéral de l'environnement, Berne, 100 p. <[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-flieessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-flieessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20(002).pdf)>. Consulté le 25 mai 2020.
- Philippe, F., G. Piton, J.-M. Tacnet et A. Gourhand. 2018. « Focus - Aide à la décision par l'application de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) à l'analyse multicritère des stratégies d'aménagement du Grand Bûech à la Faurie ». *Science Eaux & Territoires*, vol. 26, p. 54-57. <<https://doi.org/10.14758/set-revue.2018.26.10>>.
- Piton, G., V. D'Agostino, T. Horiguchi, A. Ikeda et J Hübl. 2023. « Functional Design of Mitigation Measures: From Design Event Definition to Targeted Process Modifications ». In *Advances in Debris-Flow Science and Practice*, sous la dir. de Jakob, M., S. McDougall et P. M. Santi, Springer Verlag.
- Piton, G., S. R. Goodwin, E. Mark et A. Strouth. 2022. « Debris Flows, Boulders and Constrictions: A Simple Framework for Modeling Jamming, and Its Consequences on Outflow ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 127, n° 5. <<https://doi.org/10.1029/2021JF006447>>.
- Piton, G., Philippe F., D. Richard et J.M. Tacnet. 2018. *Méthodes d'aide à la décision pour les plans d'action et de prévention - analyse comparative des méthodes dites « multicritères » dans le contexte du risque torrentiel - rapport de phase 1 : caractérisation des phénomènes torrentiels*. Commissariat général au développement durable (CGDD). <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132339v1>>.
- Piton, G. et A. Recking. 2016. « Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes ». *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 142, n° 2, p. 1-23. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048)>.
- Piton, G., A. Recking et JM. Tacnet. 2018. « An attempt to classify malfunctions of steep channel flows justifying building of open check dams or other torrent control works ». In *Proc. of the 5th IAHR Europe Congress*. (2018), p. 377-378. <https://doi.org/10.3850/978-981-11-2731-1_230-cd>.
- Piton, Guillaume, Gilles Charvet, Damien Kuss et Simon Carlados. 2020. « Mettre Une Grille (Ou Non) Dans Les Barrages A Fentes Des Pieges A Laves Torrentielles ? Retour D'experience Français. » *AGHP Technical Notes (Traduction Française)*, n° 1, p. 1-5. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02949612>>.
- Quiniou, M. et G. Piton. 2022. *Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations*. Rapport de synthèse ISL Ingénierie - INRAE : MTE-DGPR, PLVG et de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, 135 p. <<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14047.12962>>.
- Reagan, R. T., F. Mosteller et C. Youtz. 1989. « Quantitative meanings of verbal probability expressions. » *Journal of Applied Psychology*, vol. 74, n° 3, p. 433-442. <<https://doi.org/10.1037/0021-9010.74.3.433>>.
- Rohmer, Jeremy, Manceau J.C, D. Guyonnet, F. Boulahya et D. Dubois. 2018. « HYRISK: An R package for hybrid uncertainty analysis using probability, imprecise probability and possibility distributions ». *EarthArXiv*. <<https://doi.org/10.31223/osf.io/j67cy>>.
- Schmocker, L. et W.H. Hager. 2011. « Probability of Drift Blockage at Bridge Decks ». *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 137, n° 4, p. 470-479. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000319)>.
- Simoni, S., G. Vignoli et B. Mazzorana. 2017. « Enhancing sediment flux control and natural hazard risk mitigation through a structured conceptual planning approach ». *Geomorphology*. <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.026>>.
- Tacnet, J.-M. 2009. « Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information ». PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. <<http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00771692/>>.
- Tacnet, J.-M., B. Rey, C. Curt et D. Richard. 2011. « Efficacité des ouvrages de correction torrentielle : indicateurs basés sur la sûreté de fonctionnement ». (Tlemcen, Algérie, 2011), p. 12. <<https://hal.inrae.fr/hal-02596433>>.

- Talon, A. et C. Curt. 2017. « Selection of appropriate defuzzification methods: Application to the assessment of dam performance ». *Expert Systems with Applications*, vol. 70, p. 160-174. <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.09.004>>. Consulté le 29 septembre 2021.
- USBR et USACE. 2019. « Chapter A-6 Subjective Probability and Expert Elicitation ». In *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation&U.S. Army Corps of Engineers, p. A-6-1-13.
- Vick, S. G. 1997. « Dam safety risk assessment: new directions ». *Water Power and Dam Construction*, vol. 49, n° 6, p. 40-42.
- Vick, S. G. 2002. *Degrees of belief: Subjective probability and engineering judgment*. Reston, VA : ASCE Publications, 472 p.
- Visschers, Vivianne H. M., Ree M. Meertens, Wim W. F. Passchier et Nanne N. K. de Vries. 2009. « Probability Information in Risk Communication: A Review of the Research Literature ». *Risk Analysis*, vol. 29, n° 2, p. 267-287. <<https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01137.x>>.
- Vuillet, M., L. Peyras, C. Carvajal, D. Serre et Y. Diab. 2013. « Levee performance evaluation based on subjective probabilities ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 17, n° 5, p. 329-349. <<https://doi.org/10.1080/19648189.2013.785723>>.
- Wikhydro. 2021. « Singularité hydraulique (HU) - Wikhydro ». <[http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Singularit%C3%A9_hydraulique_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Singularit%C3%A9_hydraulique_(HU))>. Consulté le 29 septembre 2021.

Annexes

A : Formules empiriques d'estimation des volumes d'apports de flottants

Estimation du volume de bois flottant selon les formules empiriques proposées par le Guide OFEV (2019)

Source: OFEV. 2019. Bois flottant dans les cours d'eau. Office fédéral de l'environnement, Berne, Suisse.

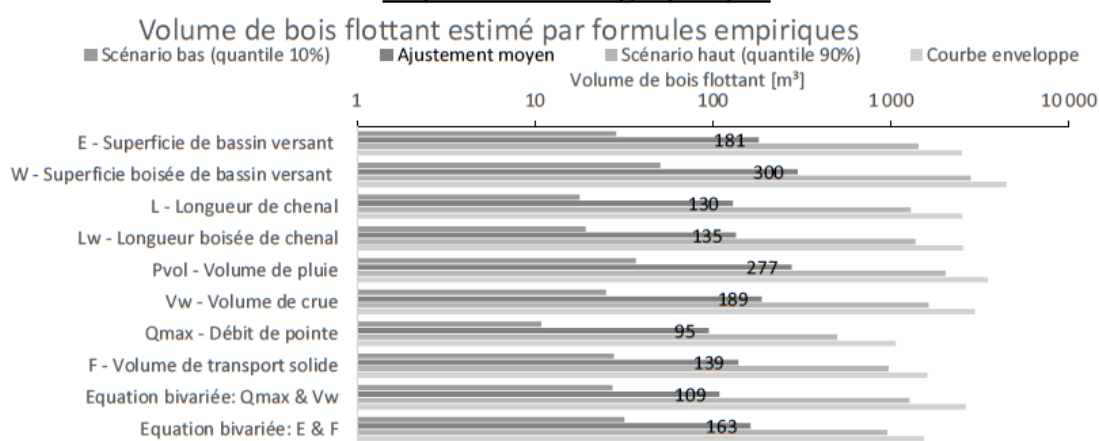
Equations

Paramètre	Scénario bas (quantile 10%)	Ajustement moyen	Scénario haut (quantile 90%)	Courbe enveloppe haute	n	[/3;*3]	Qualité
E	$6 E^{0.54}$	$38 E^{0.54}$	$300 E^{0.54}$	$558 E^{0.52}$	209	50%	***
W	$13 W^{0.56}$	$77 W^{0.56}$	$720 W^{0.56}$	$1460 W^{0.46}$	179	52%	**
L	$5.5 L^{0.48}$	$40 L^{0.48}$	$400 L^{0.48}$	$860 L^{0.44}$	177	41%	*
L _w	$7 L_w^{0.5}$	$49 L_w^{0.5}$	$500 L_w^{0.5}$	$925 L_w^{0.5}$	175	44%	*
P _{vol}	$0.04 P_{vol}^{0.46}$	$0.3 P_{vol}^{0.46}$	$2.2 P_{vol}^{0.46}$	$8 P_{vol}^{0.41}$	164	51%	**
V _w	$0.04 V_w^{0.47}$	$0.3 V_w^{0.47}$	$2.6 V_w^{0.47}$	$6.2 V_w^{0.45}$	167	50%	*
Q _{max}	$0.65 Q_{max}^{0.91}$	$5.7 Q_{max}^{0.91}$	$30 Q_{max}^{0.91}$	$115 Q_{max}^{0.72}$	77	58%	***
F	$0.04 F^{0.65}$	$0.2 F^{0.65}$	$1.4 F^{0.65}$	$1.4 F^{0.7}$	196	56%	***
Q _{max} , V _w	$0.3 Q_{max}^{0.35} V_w^{0.25}$	$0.4 Q_{max}^{0.46} V_w^{0.33}$	$14 Q_{max}^{0.35} V_w^{0.25}$	$87 Q_{max}^{0.26} V_w^{0.19}$	166	51%	**
E, F	$0.06 E^{0.22} F^{0.56}$	$0.2 E^{0.23} F^{0.6}$	$1.8 E^{0.22} F^{0.56}$	$1.7 E^{0.23} F^{0.61}$	196	56%	***

Application

Paramètre	Valeur	Unité	Scénario bas (quantile 10%)	Ajustement moyen	Scénario haut (quantile 90%)	Courbe enveloppe
E - Superficie de bassin versant	18	km ²	29	181	1 429	2 508
W - Superficie boisée de bassin versant	11,32	km ²	51	300	2 802	4 458
L - Longueur de chenal	11,56	km	18	130	1 295	2 525
L _w - Longueur boisée de chenal	7,57	km	19	135	1 376	2 545
P _{vol} - Volume de pluie	2 790 000	m ³	37	277	2 030	3 514
V _w - Volume de crue	900 000	m ³	25	189	1 635	2 963
Q _{max} - Débit de pointe	22	m ³ /s	11	95	500	1 065
F - Volume de transport solide	23 500	m ³	28	139	971	1 606
Equation bivariée: Q _{max} & V _w			27	109	1 272	2 629
Equation bivariée: E & F			32	163	953	1 533

Représentation graphique



Source valeurs paramètres

E - Superficie de bassin versant	Cartographie automatique via https://reseau.eaufrance.fr/geotraitements
W - Superficie boisée de bassin versant	Croisement emprise bassin versant et BD Forêt V2 IGN.
L - Longueur de chenal	Tronçons BD Topo
L _w - Longueur boisée de chenal	Croisement tronçon BD Topo et BD Forêt V2 IGN.
P _{vol} - Volume de pluie	Lame d'eau moyenne de 155 mm: hypothèse haute de ETRM 2021
V _w - Volume de crue	Lame d'eau ruissellée de 50 mm: hypothèse trentennale de ETRM 2021
Q _{max} - Débit de pointe	Pic de crue 2005 selon Alp'Géorisque 2007
F - Volume de transport solide	Volume total transporté en 2005 selon Alp'Géorisque 2007

Table des figures et tableaux

Tableau 1 : Suivi des versions	Erreur ! Signet non défini.
Figure 1 : Synthèse graphique de l'étape a) Inventaire des tronçons, verrous et enjeux.....	13
Figure 2 : Schémas synthétiques en vue de côté et vue en plan de cinq types principaux de dysfonctionnements caractéristiques des torrents et aboutissant à des dépôts et débordements. (a) obstruction par des blocs (type « B ») ; (b) obstruction par des embâcles de flottants (type « E ») ; (c) excès de débit par rapport à la capacité du chenal (type « Q »), cas des laves torrentielles et cas des crues de charriage ; (d) dépôts solides associés à une rupture de la capacité de transport au droit d'une cassure de pente (type « P ») ; (e) excès de volume solide par rapport à la capacité de tamponnage du système rivière-torrent entraînant la formation d'un remous solide (type « R »), adapté de Piton <i>et al.</i> (2023).....	15
Tableau 2 : Fonctions des principaux ouvrages de protection contre les risques torrentiels	16
Figure 3 : Synthèse graphique de l'étape b) Identification des modes de défaillances (en noir ceux concernant les singularités et verrous, en rouge ceux concernant les tronçons).....	17
Figure 4 : Exemple simple d'un sous-domaine semi-aléatoire unique (a) générant deux sous-scénarios, (b) sans blocage et (c) avec blocage générant une extension amont de la zone exposée mais peu de changement en aval : le blocage peut avoir lieu tardivement pendant la crue qui aura fait déjà des dommages en aval.....	19
Figure 5 : Synthèse graphique de l'étape c) Tri des sous-scénarios et simplification du problème (en noir les modes de défaillances concernant les singularités et verrous, en rouge ceux concernant les tronçons).....	20
Figure 6 : Décomposition en sous-domaines aléatoires et quasi-déterministe pour différentes magnitudes, c'est-à-dire scénarios : (a) magnitude faible (par exemple scénario décennal) : pas d'embâclement sauf potentiellement au sous-domaine #3 qui est donc semi-aléatoire ; (b) magnitude modérée (par exemple scénario trentennal) : les trois sous-domaines #2, #3 et #4 sont susceptibles d'être embâclés en complément du dépôt au sous-domaines #2 et #3, ils sont donc tous aléatoires, par contre, il est estimé que l'embâclement du sous-domaine #1 est trop peu probable pour être considéré ; (c) magnitude forte (par exemple scénario centennal) : dépôts massifs et embâclements aux sous-domaines #2 et #3 qui sont donc quasi-déterministes, ces débordements épargnent le sous-domaine #4 (pas d'embâclement) qui ainsi lui aussi quasi-déterministe mais un doute subsiste quant à l'embâclement potentiel du sous-domaine #1 qui est donc semi-aléatoire.....	21
Figure 7 : Synthèse des étapes d'analyse proposées pour éliciter et cartographier les sous-scénarios de crues torrentielles.....	23
Tableau 3 : Exemple simple des différents modes d'évaluation des probabilités, sur la base de l'hypothèse de la survenue de trois sous-scénarios exclusifs (S_A , S_B et S_C) pour une lave torrentielle de 50 000 m ³ sur un site donné.	25
Figure 8 : Arbres de probabilité illustrant les estimations des probabilités conditionnelles des sous-scénarios du scénario de magnitude M (volume de lave torrentielle > 50 000 m ³) : A) sans nœud intermédiaire et estimé par des probabilités absolues et B) avec nœud intermédiaire et estimé avec des probabilités relatives.....	26
Figure 9 : Probabilité de blocage de troncs transportés individuellement d'après (Lange et Bezzola, 2006): a) configurations testées, les zones grisées dans les configurations (3) et (4) représentent des culées, la configuration (4) est équipée d'une chute en amont du pont; b) éléments utilisés pour représenter les embâcles; c) probabilité de blocage en fonction du rapport largeur d'ouverture B / longueur des flottants L ; d) probabilité de blocage en fonction du rapport diamètre de flottant adimensionnel d_w^* / hauteur de sous poutre H	27
Tableau 4 : Association de l'évaluation sous forme verbale (qualitative) à l'évaluation quantitative des probabilités subjectives selon l'approche retenue dans les rapports du GIEC (Mastrandrea <i>et al.</i> , 2011)	29
Tableau 5 : Probabilité d'embâclement des ponts retenue par Mazzorana et al. (2011) selon la hauteur relative d'écoulement et le régime de transport de flottants	31
Figure 10 : Effet de l'augmentation de la taille des blocs sur la probabilité d'obstruction des orifices (panneau supérieur) et des fentes (panneau inférieur). L'obstruction devient probable pour une taille d'ouverture de l'ordre	

de 1,5-2,0 fois le D_{95} (quantile 95% de la courbe granulométrique). L'obstruction apparaît dans les fentes pour les grains légèrement plus petits que les orifices parce que des arches entre les grains émergent plus facilement horizontalement que verticalement (Piton <i>et al.</i> , 2020).....	32
Figure 11 : Illustrations des modèles physiques de ponts utilisés par Gschnitzer et al. (2017) : A) vues d'amont et vue de dessus de la configuration sans pile de pont et avec pile de pont, B) photo de la configuration sans pile de pont, C) photo et vue de côté de la configuration avec déflecteur	33
Tableau 6 : Changement relatif de la probabilité de blocage de flottants au droit d'un pont en fonction de variation des paramètres principaux descripteurs du système selon Gschnitzer et al. (2017)	33
Tableau 7 : Extension (proposée dans le présent rapport) de la convention utilisée par le GIEC (Mastrandrea <i>et al.</i> , 2011) à une approche comparatives par paires de sous-scénarios	35
* Il n'est pas proposé de forme verbale pour les cas extrêmes car de telles configuration doivent être évitées comme expliqué §3.3.1 p. 29 et soulignés par Hartford et Baecher (2004, p. 159) ; USBR et USACE (2019)	35
Tableau 8 : Association de l'évaluation sous forme verbale (qualitative) à l'évaluation quantitative (précise et sous forme d'intervalle) des probabilités subjectives, d'après Vick (1997).....	38
Tableau 9 : Extension des probabilités de Vick (1997) au cas des probabilités relatives établies par paires de scénarios	38
Figure 12 : Carte de localisation du site d'étude de Lancey : a) vue d'ensemble du bassin versant, b) localisation entre Grenoble et Chambéry et c) zoom sur le cône de déjection	40
Figure 13 : Localisation des enjeux et ouvrages de couverture du torrent sur le cône de déjection.....	42
Figure 14 : Photos des ouvrages de couvertures	42
Figure 15 : Synthèse graphique de l'étape a) inventaire des tronçons, verrous et enjeux appliquée au cas d'étude du Ruisseau de la Combe de Lancey	43
Figure 16 : Profil en long des lignes d'eau calculées par SOGREAH 2007 sur le secteur П1 – П4 pour $Q=35 \text{ m}^3/\text{s}$	44
Figure 17 : Profil en long des lignes d'eau calculées par SOGREAH 2006 sur le secteur П4 – Isère pour $Q=7 \text{ m}^3/\text{s}$	45
Figure 18 : Synthèse graphique de l'étape b) Analyse fonctionnelle du site appliquée au cas d'étude du Ruisseau de la Combe de Lancey	46
Figure 19 : Synthèse sur la localisation : a) des ouvrages et des sous-domaines semi-aléatoires retenus pour b) le scénario décennal et c) le scénario centennal.....	48
Figure 20 : Synthèse de l'analyse du ruisseau de la Combe de Lancey	49
Figure 21 : Carte de localisation du site d'étude de Val Cenis : a) vue d'ensemble du bassin versant, b) localisation et c) zoom d'étude.....	52
Figure 22 : Schéma de la zone touchée par la lave torrentielle d'août 2015.....	53
Tableau 10 : Domaine des modes de fonctionnement au niveau des verrous identifiés sur le torrent de l'Arcelle pour chacun des scénarios.	55



Centre Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

