



Note technique pour aider à la réalisation des études d'aléa relatives aux cours d'eau torrentiels (état de l'art 2025)

Mai 2025



Historique de la diffusion

Version	Date	Commentaires
V0	15/05/2025	Version initiale

Rédacteurs et relecteurs

Rédacteurs du rapport	Relecteurs (liste non exhaustive)
Clément Misset (Département Risques Naturels, pôle RTM) Guillaume Piton (INRAE) Yann Queffélec (Département Risques Naturels, pôle RTM) Jacques Bouffier (DGPR)	Alexandre Badoux (WSL, Suisse) Pascale Biron (Univ. Concordia, Canada) Philippe Bouvet (ONF-RTM) Marc Peruzetto (BRGM) Lionel Berthet (DGPR)

Avant-propos

Ce travail a été financé par le ministère chargé de l'écologie, DGPR/SRN/SDAOH/BRIL (direction générale de la prévention des risques, service des risques naturels, sous-direction des aléas et des ouvrages hydrauliques, bureau des risques d'inondation et littoraux), dans le cadre du programme de travail 2024.



Ce document est publié sous Licence Creative Commons CC BY 4.0. À ce titre, ce document peut être librement partagé (copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats pour toute utilisation, y compris commerciale), adapté (remixé, transformé et créé à partir de ce dernier pour toute utilisation, y compris commerciale) à condition de citer ce document original et d'indiquer si des modifications ont été effectuées. Les extraits ou adaptations de ce document doivent par ailleurs appliquer les mêmes conditions de distributions selon les règles de la licence CC BY 4.0.

Citation

Misset, C., Piton, G., Queffélec, Y. & Bouffier, J. 2025. *Note technique pour aider à la réalisation des études d'aléa relatives aux cours d'eau torrentiels (état de l'art 2025)*. ONF-RTM, INRAE, DGPR, 24p. <https://hal.inrae.fr/hal-05072708>

Photo en couverture : Engravement et affouillement du funiculaire reliant le Plateau-des-Petites-Roches à Lumbin (Isère) suite à la crue du 30 décembre 2021 (Photographe : MOCEAN – Olivier Lefebvre).

Table des matières

Table des matières.....	3
1 Contexte et objectif du document	4
2 Contexte général d'analyse des aléas torrentiels	4
3 Les recherches historiques.....	5
4 Les approches géomorphologiques.....	6
4.1 Analyse du bassin versant.....	7
4.1.1 Hydrographie	7
4.1.2 Potentiel sédimentaire et types d'écoulement à considérer	7
4.1.3 Estimation des volumes d'apport solide	8
4.1.4 Analyse du profil en long	9
4.1.5 Production de flottants.....	10
4.2 Analyse de la zone exposée.....	11
4.2.1 Cônes de déjection	11
4.2.2 Fonds de vallée et plaines alluviales	12
4.2.3 Divagations du chenal et érosions latérales	12
5 Les approches calculatoires	14
5.1 Préambule sur les outils de modélisation	14
5.2 Conditions d'écoulement en présence de transport par charriage	14
5.2.1 Évolution systématique des fonds	14
5.2.2 Respirations torrentielles.....	16
5.2.3 Niveau d'eau : cas des lits contraints.....	16
5.2.4 Niveau d'eau : cas des lits divagants.....	17
5.2.5 Évaluation des conditions d'écoulement au droit des verrous hydrauliques.....	19
5.3 Conditions d'écoulement des laves torrentielles	21
5.3.1 Écoulement, propagation, et étalement des laves torrentielles	21
5.3.2 Interactions entre verrous hydraulique et laves torrentielles	23
6 Synthèse sur les méthodes	24

1 Contexte et objectif du document

Ce document est une note apportant des compléments techniques au guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels (PPR Ricet) de 2023. Il développe des éléments non détaillés dans le corps du guide PPR Ricet, afin de proposer des solutions pour la réalisation des cartes d'aléas torrentiels telles que définies dans le guide. Il propose un état des lieux des connaissances et outils applicables aux cours d'eau torrentiels. Il synthétise les points importants, et renvoie le lecteur vers des documents de référence plus détaillés, qui développent notamment les aspects relatifs à la mise en œuvre opérationnelle des approches proposées. **Ce document n'a aucun caractère prescriptif et a seulement vocation à apporter un appui technique aux acteurs impliqués dans l'élaboration de ces cartes.**

Ce document est ainsi principalement à destination :

- des DDT(M), afin de les aider à appréhender pleinement et porter les grands choix techniques à faire lors du pilotage de l'élaboration de cartes d'aléa ;
- des bureaux d'étude, afin de les aider à identifier les outils et méthodes pouvant être mises en œuvre aux différentes étapes de l'élaboration d'une carte, et trouver la documentation associée.

2 Contexte général d'analyse des aléas torrentiels

Le guide PPR Ricet souligne, au regard des fortes incertitudes sur la quantification des processus et du manque fréquent de données sur les cours d'eau torrentiels, que l'étude des aléas en contexte torrentiel nécessite **une approche multidisciplinaire**, combinant (Figure 1) : une **analyse des informations historiques**, une **étude de la géomorphologie** du site et des **approches calculatoires**¹. Chacune de ces approches a ses qualités et ses faiblesses. En particulier, l'analyse historique est souvent lacunaire (et peut se révéler trompeuse du fait du changement climatique), l'étude hydrogéomorphologique peut être faussée par les modifications anthropiques du terrain (pas toujours détectées) ou des traces trop anciennes, les modélisations peuvent donner une impression trompeuse de précision alors que leurs résultats peuvent avoir des incertitudes significatives qui dépendent de multiples facteurs : outils parfois mis en œuvre en dehors de leur domaine de validité, données d'entrée incertaines, sensibilité des équations aux valeurs des paramètres, etc. Toute modélisation nécessite ainsi une phase d'interprétation experte des résultats pour être utile. La combinaison éclairée de ces trois approches permet d'affiner les analyses en bâtissant des faisceaux d'indices concordants, d'écarter les incohérences par des approches croisées et finalement de retirer le meilleur de chaque méthode.

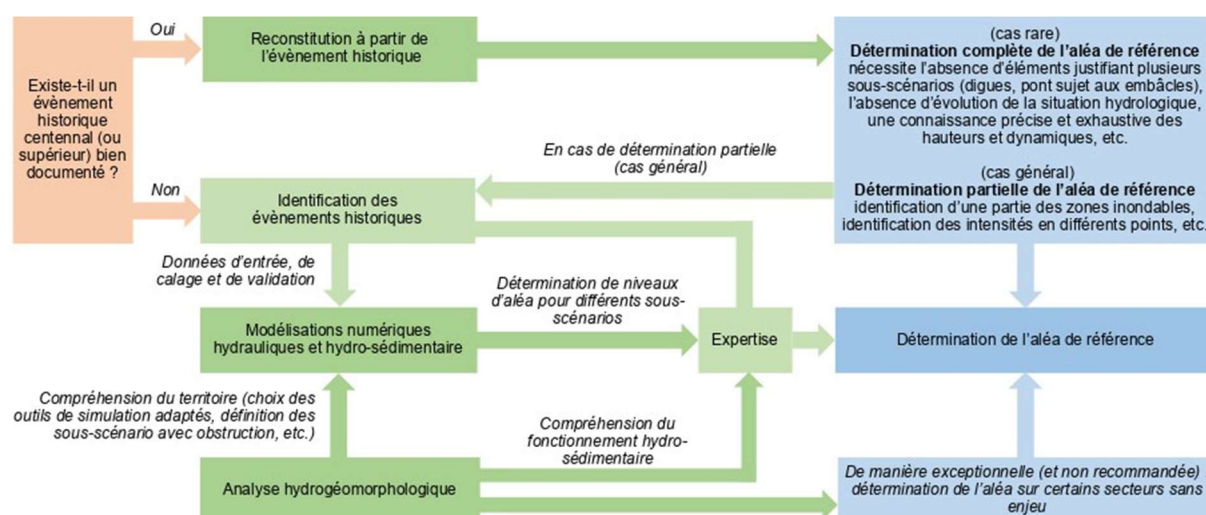


Figure 1 : illustration de la complémentarité entre les différents volets disciplinaires d'une étude d'aléa en contexte torrentiel. Source : schéma DGPR/SRNH, INRAE et RTM

¹ le terme « calculatoire » englobe dans le présent document l'ensemble des analyses impliquant des calculs tel que les modélisations hydrauliques 1D et 2D, les calculs de hauteur d'écoulement dans une section, mais aussi différents types d'analyses : probabilité d'embâcle de pont, ou d'obstruction de dalot par des blocs, analyse statistique de la variabilité du niveau du lit, analyse géométrique du profil en long du lit, etc.

Les principaux outils, données et méthodes disponibles pour ces trois volets sont présentés dans cette note. **Le niveau de détail des analyses**, en particulier celui des approches calculatoires (quantification fine de la magnitude du scénario de référence, utilisation ou non de modélisations complexes, etc.) **doit être adapté selon le contexte**. Dans tous les cas, les approches historiques et géomorphologiques ne doivent pas être négligées.

3 Les recherches historiques

Plusieurs sources de données peuvent apporter des informations sur les événements historiques et aider à la définition du scénario de référence (magnitude, etc.) puis à la cartographie de l'aléa de référence (notamment identification des sous-scénarios, de leur probabilité et des emprises inondables associées). Le Tableau 1 propose une liste non exhaustive de ces sources de données. Le guide « Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel » (Givry et Peteuil 2011, pp. 13-34) fournit de nombreux exemples d'éléments historiques éclairant des événements torrentiels plus ou moins anciens (compte-rendu de conseils municipaux, notes personnelles d'instituteurs ou notables locaux, courriers de l'administration des eaux et forêts ou des ponts et chaussées, livres historiques d'auteurs locaux ou en visite, procès-verbal de gendarmerie, articles de journaux et bulletins municipaux, cartes postales et photos anciennes, inscriptions latines, etc.).

L'analyse des événements historiques vise à extraire des informations sur **le type d'écoulement** (lave torrentielle ou charriage), **les paramètres définissant la magnitude des événements** (volume déposé, hauteurs de passage dans une section connue), **ainsi que leur intensité** (niveau d'érosion ou engravement en différents endroits, durée de la crue, taille des flottants et gros blocs, etc.), **les emprises touchées** (systématiquement ou plus rarement) et **les points de débordement préférentiels** (associés à des circonstances particulières éventuelles : embâcle, obstruction par des blocs, etc.). Il convient de prendre en compte les évolutions possibles du site au cours du temps (création d'ouvrages de protection, modification de ponts, modification des enjeux, etc.) pour analyser les données historiques. Les événements historiques de bassins versants voisins à la géomorphologie similaire peuvent être des sources d'information complémentaires.

L'absence ou la rareté de traces dans les archives est aussi une information en soit si le bassin versant est grand et/ou qu'une présence humaine suggère que d'éventuels événements auraient été observés. Des exemples d'analyses historiques pour définir des probabilités de sous-scénarios sont disponibles dans le guide de Piton *et al.* (2022). Celles-ci peuvent être complétées par les **données caractérisant les ouvrages de protection** (études de dimensionnement, plans et comptes rendus des travaux, etc.), afin notamment de prendre en compte au mieux **les défaillances d'ouvrages**. La production d'une carte des événements historiques et des ouvrages de protection peut être utile comme base de travail ultérieure.

Tableau 1 : sources de données historiques.

Type de données	Sources
événements historiques	RTM (base de données d'événements, rapports d'événements, études), DDT(M) et DREAL (archives « risques naturels »), archives départementales (série W, série O, anciens cadastres, etc.), archives communales, monographies d'historiens, note de présentation de PPR préexistant, arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle
Pluies, débits	http://pluiesextremes.meteo.fr/ , Hydroportail (https://www.hydro.eaufrance.fr/), études hydrologiques historiques
Propriétés rhéologiques et granulométriques	Rapports d'événements, études
Données sur les ouvrages	Archives communales, archives du service RTM, archives des gestionnaires d'infrastructures (barrages, ponts et routes, électricité, etc.)
Cartes et photos aériennes	Orthophotographies, carte topographiques, carte d'état-major disponibles sur le site « Remonter le temps » de l'IGN, flux IGN, cartes géologiques disponibles Infoterre
Cartographie de l'aléa	Ancienne carte de PPR, études hydrauliques/géomorphologiques, atlas de zones inondables (AZI), etc.

Parmi les données historiques permettant de caractériser les événements, il est aussi utile de rassembler des indices vis à vis des **données hydrologiques** (en fonction des saisons, pluies, débits, durées de crue, hydrogrammes, etc.) ainsi que des données sur les **propriétés rhéologiques ou granulométriques** (caractère boueux ou granulaire des laves torrentielles passées, présence et dimension des plus gros blocs, etc.). Celles-ci aident à **définir la magnitude de l'événement de référence**² (débit de pointe, volumes transportés, durée, rhéologie, etc.). Des données estimées (par exemple les données Shyreg accessibles sur <https://shyreg.recover.inrae.fr/>) peuvent également être utiles.

Références

Givry et 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). 115p. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/210183/construire-en-montagne-la-prise-en-compte-du-risque-torrentiel>

Lang et al. (2003). *Information historique et ingénierie des risques naturels : l'Isère et le torrent du Manival*. Editions Quae. Collection : Études Cemagref. 180p.

Vischer DL. 2003. *Histoire de la protection contre les crues en Suisse, Des origines jusqu'au 19^{ème} siècle*. OFEG, Série Eaux. 204p. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/publications-etudes/publications/histoire-de-la-protection-contre-les-crues-en-suisse.html>

Piton et al. 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*. CGDD (Commissariat général au développement durable- Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires). 2022, pp.67. <https://hal.inrae.fr/hal-03985981>

Synthèse

L'analyse des données historiques est une étape incontournable pour la compréhension du fonctionnement des cours d'eau torrentiels et de leurs bassins versants, ainsi que pour la définition du (ou des) scénario(s) de référence. Ces éléments doivent servir à préparer et compléter les approches calculatoires et géomorphologiques, lors desquelles on cherchera des traces dans le paysage des événements passés connus ou inconnus des archives.

4 Les approches géomorphologiques

La collecte de données historiques permet aussi de rassembler les **données cartographiques** constituant la base de **l'analyse géomorphologique** : modèles numériques de terrain, orthophotographies actuelles et anciennes, cartes géologiques, cartes topographiques anciennes, cartes d'état-major, etc. (voir l'exemple sur la Figure 2). Lorsque des cartes ou des études géomorphologiques existent déjà (dans un ancien PPR, un atlas des zones inondables (AZI), des plans d'indexation en Z (PIZ), une cartographie de la susceptibilité, etc.), il est utile de lister les zones couvertes par ces dernières, les sujets traités et les principales conclusions, en particulier celles intéressant les aléas. L'ensemble de ces informations est complété par des visites de terrain et des observations *in situ*.

Ces approches, indispensables en contexte torrentiel, permettent, en lien avec l'analyse historique et calculatoire :

- d'appréhender le fonctionnement général du cours d'eau torrentiel ;
- d'identifier les zones sources des matériaux solides ;
- de définir le type d'écoulement et le scénario d'apport en matériaux solides ;
- d'identifier les zones d'écoulements préférentiels, les zones d'érosion / dépôt / divagation, l'emprise du fond de vallée et/ou du cône de déjection.

² lorsque la carte d'aléa est associée à un événement de référence, ce qui est notamment le cas pour les cartes d'aléas élaborées dans le cadre de PPRI.



Figure 2 : orthophotographie actuelle, (gauche), post-crue (centre) et ombrage lidar avec pentes et courbes de niveau (droite) sur l'Arc amont.

4.1 Analyse du bassin versant

4.1.1 Hydrographie

L'analyse du réseau hydrographique permet d'identifier dans un premier temps les torrents et les rivières torrentielles. Lors de cette étape, les contours des bassins versants sont également définis, ce qui permet par la suite de réaliser des estimations de débits, durées caractéristiques de crues, volumes solides produits, etc. Le réseau hydrographique dense de l'IGN (BD TOPO) permet généralement de bien identifier la majorité des cours d'eau. Il peut être parfois intéressant de réaliser un calcul d'accumulation de flux avec un outil SIG en parallèle pour identifier des talwegs non visibles sur la couche IGN (Figure 3). Il peut également être envisagé une classification du réseau hydrographique afin de définir le niveau de détail des analyses à mener en fonction de la typologie du site, mais aussi du niveau d'enjeu.

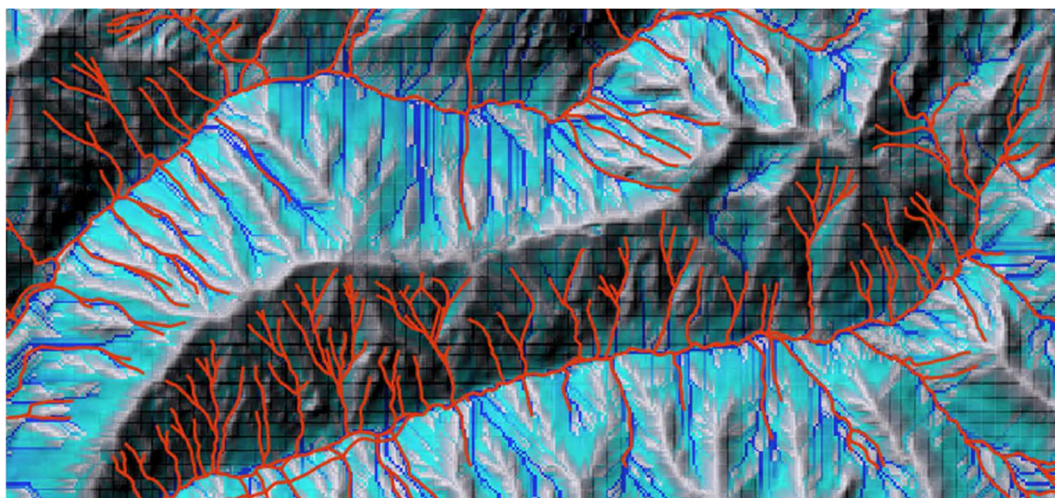


Figure 3 : réseau hydrographique dense de l'IGN (traits rouge) et calcul d'accumulation de flux (en dégradé de bleu).

4.1.2 Potentiel sédimentaire et types d'écoulement à considérer

L'analyse de la géomorphologie est centrale pour identifier les processus en jeu dans le bassin : **érosion et ravinement de surface, apports massifs via des éboulements ou des glissements de terrain, dépavage du lit**, etc. Les événements torrentiels majeurs sont associés à un transport solide intense. **Il est donc important de bien évaluer le « potentiel sédimentaire »** : cette étape doit permettre d'identifier les sources de matériaux et d'estimer les stocks mobilisables. Elle se base sur l'étude des données cartographiques précitées (exemple sur la Figure 4) et des observations de terrain, et peut intégrer des indicateurs de réactivation possible de stocks dormants.

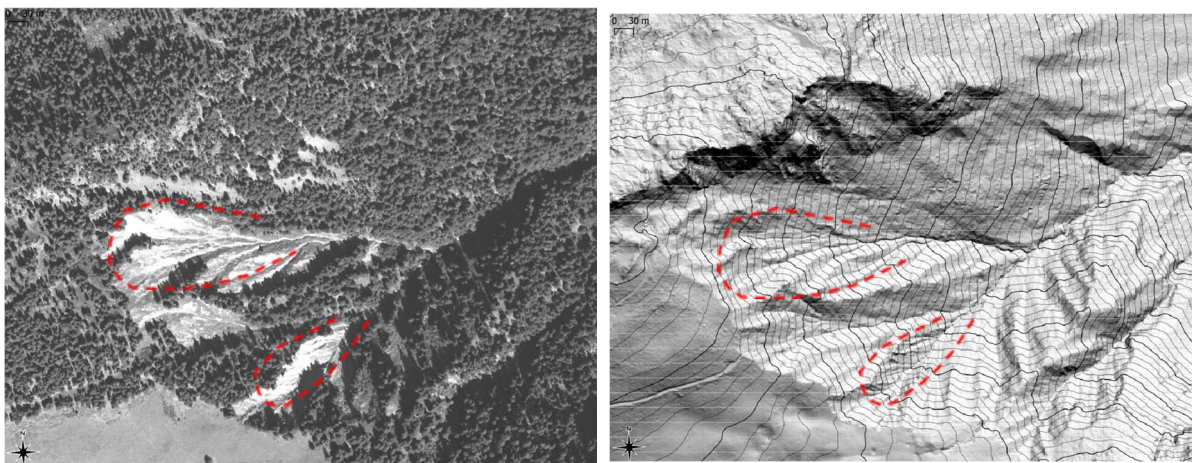


Figure 4 : exemple d'identification des zones sources de matériaux.

Les types d'écoulements potentiels (lave torrentielle, charriage hyper-concentré ou charriage) sont également importants à identifier, leur analyse et les aléas résultants étant très différents. Là encore, les analyses cartographiques et les observations sur le terrain permettent d'identifier les signes caractéristiques des différents types d'écoulement (lobes de dépôts, bourrelets latéraux, groupes de blocs, paléo-chenaux, etc.).

Références

Recking et al. 2013. *Torrents et rivières de montagne, Dynamique et aménagement*, Edition Quae.

Morel et al. 2022. *Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord : Action 3 : Caractériser la production sédimentaire*. INRAE. 2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03549827>

Kaitna Roland, Hübl Johannes. 2012. Chap. 7 - Silent Witnesses For Torrential Processes. In *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, Schnewly-Bollschweiler M, Stoffel M, and Rudolf-Miklau F (eds). Springer Netherlands; 111–130.

Baggio T, Martini M, Bettella F, D'Agostino V. 2024. Debris flow and debris flood hazard assessment in mountain catchments. *CATENA* 245 : 108338. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108338>

4.1.3 Estimation des volumes d'apport solide

Le volume solide transporté par charriage ou par lave torrentielle influence l'aléa au premier ordre. Il est souvent retenu comme indicateur de la magnitude du scénario de référence alternativement au débit liquide de pointe. En lien avec les approches historiques et calculatoires, diverses approches géomorphologiques sont applicables pour estimer le volume solide de l'événement de référence, selon le contexte :

- pour les crues de charriage et les laves torrentielles de torrents et de petits bassins versants :
 - approches empiriques et statistiques à partir des propriétés du bassin versant (lois empiriques présentées dans les références clés en fin de section, notamment issues du projet HydrodémO, de la méthode ECSTReM ou du retour d'expérience à la suite des crues de 2005 en Suisse ou Italie par exemple) ;
- pour les crues de charriage seulement :
 - approches par calcul hydraulique et formule de transport par charriage (voir Rickenmann et Koschni, 2010). Ces approches sont plus adaptées pour des rivières torrentielles et torrents dans les zones alluvionnaires. Les résultats sont très dépendants des données d'entrée, notamment la durée de la crue qui reste un paramètre difficile à apprécier. Les paramètres du calcul doivent être ajustés en cas d'absence de zone alluvionnaire (voir les ajustements possibles dans Morel et al. 2022) ;
- pour les laves torrentielles seulement :
 - approches par application de taux d'érosion linéiques sur les chenaux érodables selon leur caractéristiques (approche de Hungr et al. 1984) ;

- approche hydrologique consistant à évaluer un volume ruisselé puis à appliquer une (des) valeur(s) de concentrations volumiques (par exemple 50 %, 75 %, 80 %, etc.).

Ces méthodes ne donnent au mieux qu'un ordre de grandeur. Elles doivent être conçues, alimentées et analysées au regard des résultats des observations géomorphologiques, des approches historiques et calculatoires.

Références

Hungr et al. 1984, Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures, *Canadian Geotechnical Journal*, 21: 663–677. <https://doi.org/10.1139/t84-073>

Morel et al. 2022. *Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord : Action 3 : Caractériser la production sédimentaire*. INRAE. 2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03549827>

Morel et al. 2023. Statistical modeling of sediment supply in torrent catchments of the northern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23 : 1769–1787. <https://doi.org/10.1139/t84-07310.5194/nhess-23-1769-2023>

Peteuil et Liébault. ECSTReM, une méthode pratique pour prédire la production sédimentaire annuelle et événementielle des torrents à partir d'observations originales spécifiques aux Alpes françaises. *Colloque Eaux en Montagne de la Société Hydrotechnique de France*, Mar 2011, Lyon, France. 6 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00615485>

Outil de calcul en ligne de l'hydraulique et du transport par charriage BedloadWeb: <https://www.bedloadweb.com/>

Rickenmann & Koschni. 2010. Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. *Hydrological Processes* 24 : 993–1007. <https://doi.org/10.1002/hyp.7536>

4.1.4 Analyse du profil en long

L'analyse du profil en long des cours d'eau est un élément essentiel de toute étude hydraulique en contexte torrentiel. Autrement dit, toute étude doit intégrer obligatoirement le tracé et l'interprétation du (des) profil(s) en long. Son analyse permet une compréhension intégratrice du bassin en lien avec la géomorphologie du lit et des versants. Le profil en long d'un torrent porte l'empreinte des phénomènes de versant qui l'influence (apports latéraux, gorges pavées, verrous rocheux, etc.). Il permet aussi d'identifier les replats alluvionnaires correspondants à des zones de régulation du charriage (Figure 6), secteurs pour lesquels il est possible d'estimer la capacité de transport. Le profil en long peut aussi être utilisé pour évaluer les zones de départ et d'arrêt des laves torrentielles et pour préparer et enrichir des modélisations (notamment 1D, cf. paragraphe 5.2.1). Il donne également une indication de l'équilibre alluvionnaire du système et porte souvent la marque d'affluents très actifs.

Les tendances aux dépôts au niveau des cassures de pente et les incisions potentielles au niveau de tronçons raides soumis à un dépavage du lit sont aussi décelables sur les profils en long. La pente des chenaux contrôlant très fortement la capacité de transport solide, il est utile d'indiquer sur les profils en long les évolutions de la pente des différents tronçons (Figure 6). En dehors de l'analyse du profil en long et des variations de pente du fond du lit, il est recommandé d'analyser également les pentes des dépôts latéraux qui sont parfois plus représentatives des événements anciens.

L'analyse du profil en long doit être menée sur un linéaire suffisamment grand pour bien déceler toutes les singularités et comprendre toutes les influences amont et aval (diminution de pente, présence d'un verrou, d'un obstacle à l'écoulement, etc.). Pour l'étude d'un torrent par exemple, le profil en long doit être analysé sur tout son linéaire, en intégrant par ailleurs une analyse du profil en long de la rivière torrentielle réceptrice pour bien comprendre le fonctionnement de la zone de confluence selon les différents scénarios de crue des deux cours d'eau.

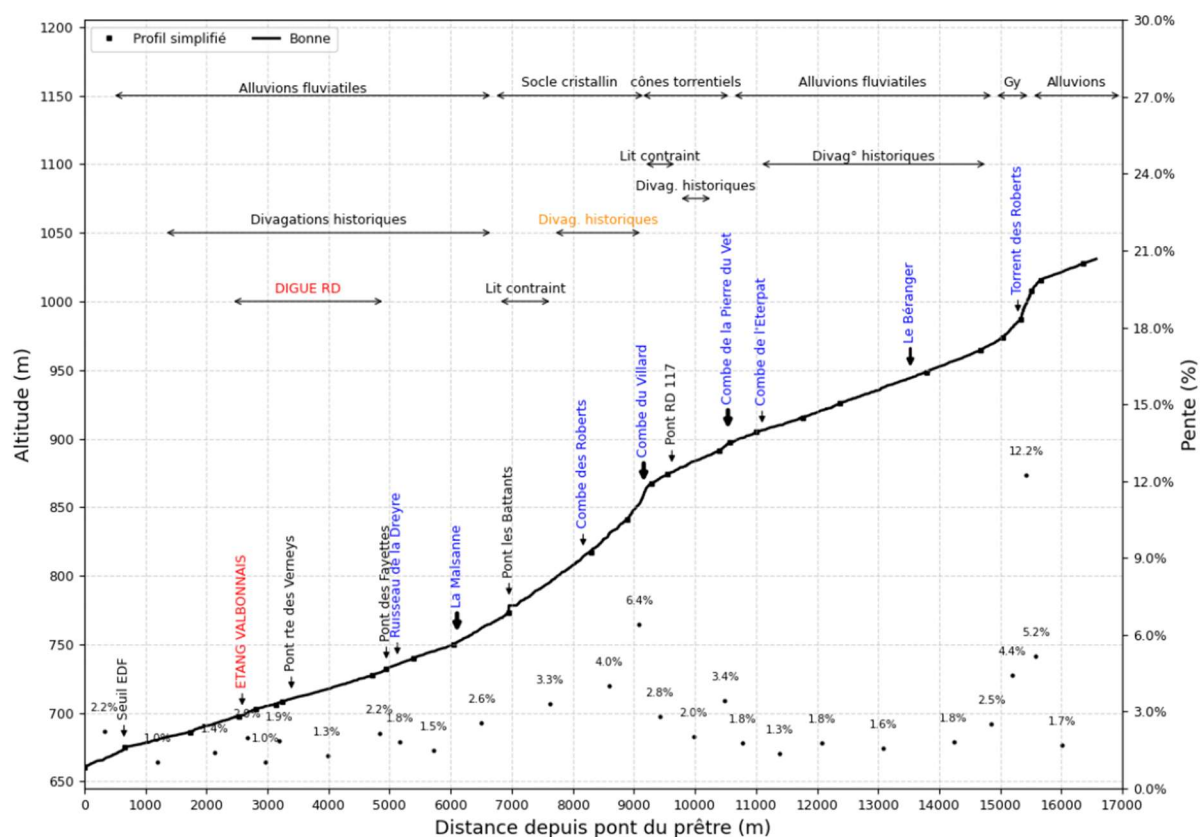


Figure 5 : exemple de profil en long de rivière torrentielle (La Bonne, 38) enrichi de descriptions géomorphologiques et d'une analyse des pentes des tronçons principaux.

Références

Pylong, outil d'analyse de profil en long développé par l'ONF-RTM : <https://pylong-doc.readthedocs.io/fr/latest/index.html>

4.1.5 Production de flottants

L'aléa torrentiel est fortement dépendant du transport de matières solides, mais également du transport de flottants qui peuvent en particulier obstruer les ouvrages de franchissement et augmenter les probabilités de débordements et d'érosion des terrains avoisinants. Ainsi, il est important d'identifier les **sources potentielles de flottants** (recrutement par érosion latérale, glissement de terrain, apports par les affluents et reprise dans le lit) et les **points de blocage potentiels** (ponts, dalots, busages, contractions du lit, etc.). Des méthodes empiriques simples existent pour estimer le potentiel de production d'un bassin versant (exemple d'analyse sur la Figure 5). Des analyses cartographiques peuvent être utiles pour affiner les volumes de bois flottant considérés dans le scénario de référence. Ces éléments servent ensuite à mener des analyses expertes et des approches calculatoires simples (cf. paragraphe 5.2.5), par exemple pour qualifier les probabilités d'obstruction des différents ouvrages.

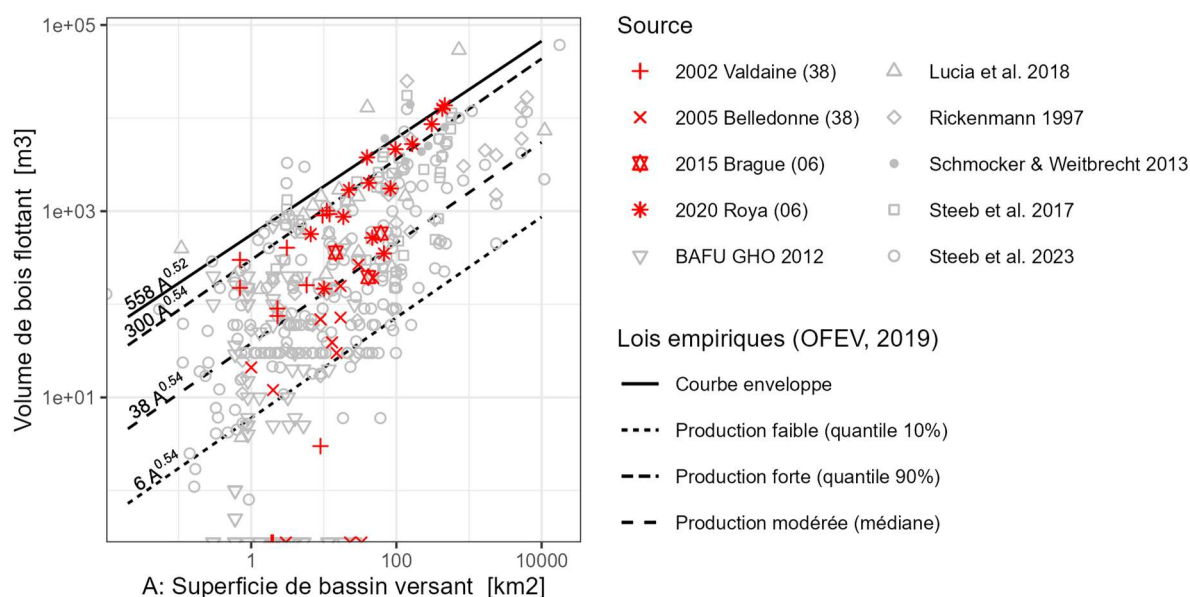


Figure 6 : exemple de lois empiriques reliant volume de flottant produit et superficie du bassin versant. Les données associées à des crues torrentielles ayant eu lieu en France (points rouges) sont cohérentes avec les ordres de grandeurs fournis, y compris pour les événements extrêmes comme la tempête Alex (2020 Roya) dont la production peut s'approcher des valeurs prédites par les lois empiriques forte et enveloppe

Références

Quiniou et Piton 2022, *Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations*. ISL Ingénierie ; INRAE. 2022, pp.135. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03621373v1>

OFEV 2019 : *Bois flottant dans les cours d'eau. Un projet de recherche à vocation pratique*. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1910 : 100 p. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20(002).pdf)

Steeb et al. 2023: Geospatial modelling of large-wood supply to rivers: a state-of-the-art model comparison in Swiss mountain river catchments, *Earth Surf. Dynam.*, 11, 487–509, <https://doi.org/10.5194/esurf-11-487-2023>

4.2 Analyse de la zone exposée

Cette analyse de la géomorphologie (ombrages lidar, courbes de niveau, orthophotographies, etc.) permet en particulier d'ajuster les probabilités d'atteinte en identifiant les points de débordement et les cheminements préférentiels des écoulements (cf. partie 3.2.6 du guide méthodologique PPRicet).

4.2.1 Cônes de déjection

L'analyse de la géomorphologie d'un cône de déjection inclut de manière non exhaustive (exemples de gauche sur la Figure 7) l'identification :

- de l'emprise globale du cône et la position de son apex (point sommital du cône) ;
- des traces d'anciens chenaux ;
- des traces d'anciens dépôts torrentiels incluant des dépôts de laves torrentielles (gros blocs) ;
- des traces de divagations historiques ;
- de points préférentiels de débordement ;
- des éventuelles ruptures de pente en lien avec l'analyse du profil en long ;
- des secteurs avec un potentiel de recul de berge et d'érosion latérale ;
- des éventuelles traces d'anciens ouvrages de gestion du transport solide : merlons de curages anciens, barrages, seuils et épis, etc.

4.2.2 Fonds de vallée et plaines alluviales

L'analyse de la géomorphologie d'un fond de vallée et/ou d'une plaine alluviale inclut de manière non exhaustive (exemples de droite sur la Figure 7) :

- l'identification de l'emprise du fond de vallée ;
- les zones de replats alluvionnaire et les secteurs de gorges, en lien avec le profil en long ;
- la localisation et l'altimétrie des différentes terrasses alluviales ;
- la localisation de points de débordements préférentiels ;
- l'identification d'anciens chenaux et anciennes zones de divagation ;
- les verrous hydrauliques et autres contraintes latérales (verrous géologiques, cônes de déjection repoussant le cours d'eau principal, verrous anthropiques, etc.) ;
- l'identification des secteurs avec un potentiel de recul de berge et d'érosion latérale.

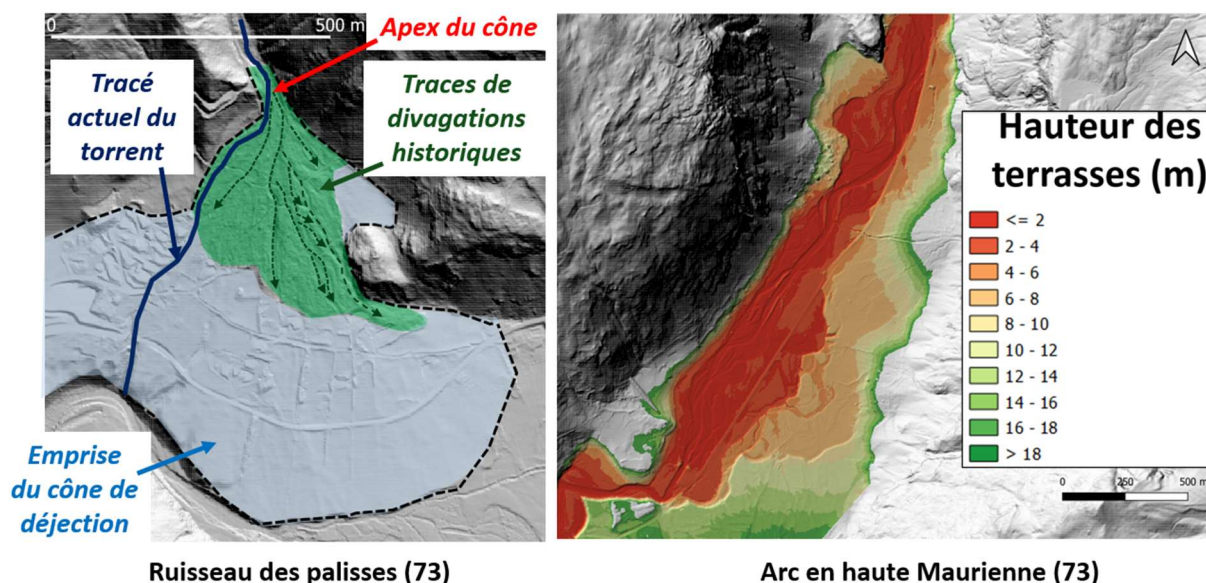


Figure 7 : exemples de cartographies géomorphologique du cône de déjection d'un torrent et de la plaine alluviale d'une rivière torrentielle.

4.2.3 Divagations du chenal et érosions latérales

Lors des crues torrentielles avec fort transport par charriage, des processus d'érosion latérale et d'élargissement de lit sont observés, sans que des débordements généralisés aient nécessairement lieu (exemples de gauche sur la Figure 8). De nombreux paramètres entrent en compte : contraintes hydrauliques, charge sédimentaire, niveau et résistance des terrains, etc. L'évaluation des érosions latérales est généralement critique vis-à-vis de la cartographie de l'aléa. Étant donné la complexité des processus, un panel d'approches peut être considéré :

- cartographier les zones de divagation, identifier le fond de vallée alluviale et les différents niveaux de terrasses, identifier les secteurs confinés et ceux non-confinés, identifier les courbes et le renvoi des écoulements par des points fixes ;
- identifier les terrains et berges érodables et ceux non érodables (roche mère, blocs rocheux, protections de berges adaptées, voir le guide de Hunzinger et al. 2020) ;
- évaluer les niveaux d'écoulement et d'évolution des fonds (cf. paragraphe 5.2) ;
- évaluer les vitesses et contraintes hydrauliques et les comparer à des valeurs critiques caractérisant la résistance des terrains ;
- appliquer des relations empiriques liant paramètres hydrauliques (puissance hydraulique) et géomorphologiques (taux de confinement) avec des taux d'élargissement (exemple de relation de la Figure 8a ou synthèse par Ruiz-Villanueva, et al. 2023). Les probabilités d'atteinte peuvent être pondérées selon le type de relation utilisé (courbe enveloppe ou relation moyenne) ;
- en cas de lit actif contraint et/ou relativement profond, appliquer des méthodes d'élargissement du chenal selon un rapport d'aspect (largeur / hauteur d'écoulement) ou en considérant un chenal à l'équilibre (cf. paragraphe 5.2.4). Les probabilités d'atteinte peuvent être évaluées selon les seuils considérés pour les taux d'élargissement du

chenal (largeur après crue / largeur avant crue), les rapports d'aspect ou les ratios de contraintes adimensionnelles : des valeurs aboutissant à des élargissements plus ou moins forts peuvent être étudiées, les valeurs les plus fortes étant les moins fréquentes. Des croisements avec des éléments historiques ou par analogie avec des événements ayant eu lieu dans des bassins versants similaires peuvent guider le choix de valeurs et les probabilités d'atteinte associées ;

- selon les cas, considérer un retrait des têtes de talus suivant une pente d'équilibre du fait de glissement de berges potentiels.

Les informations obtenues par ces différentes méthodes doivent être agrégées par le chargé d'études pour définir l'emprise probable des érosions latérales. Les approches à privilégier pour caractériser les divagations potentielles et les érosions latérales sont les approches historiques (divagation et élargissement lors des fortes crues passées) et géomorphologiques (traces d'événements plus anciens) sur ce site ou sur des sites présentant des configurations similaires.

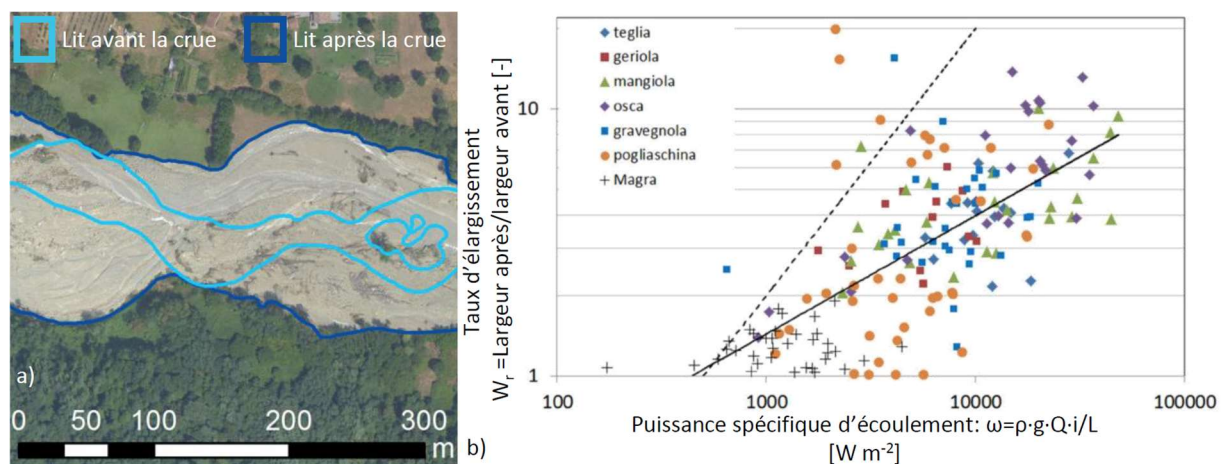


Figure 8 : a) exemple d'élargissement du lit à la suite d'une crue torrentielle et b) relation empirique reliant le taux d'élargissement (ou width ratio) « W_r » et la puissance spécifique hydraulique (ou « unit stream power » « ω » (avec ρ masse volume de l'eau [kg/m^3], g accélération de la gravité [m/s^2], Q débit de pointe [m^3/s] et L largeur de l'écoulement [m]). Source Comiti et al. (2016).

Références

Hunzinger et al. (2020), *Recommandations pour l'évaluation des dangers d'érosion des berges des cours d'eau. Spécialistes des dangers naturels FAN Commission pour la protection contre les crues CIPC de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux.* 41p. https://www.svv.ch/fileadmin/user_upload/site/PDF/FR/Recommendation-erosion-des-berges_F.pdf

Comiti et al. (2016), *Channel widening during extreme floods: how to integrate it within river corridor planning? INTERPRAEVENT 2016 – Conference Proceedings.* 477-488. http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2016_1_477.pdf

Ruiz-Villanueva et al. (2023), *River widening in mountain and foothill areas during floods: Insights from a meta-analysis of 51 European Rivers, Science of The Total Environment.* 903: 166103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166103>

Jakob et al. (2022). *Debris-Flood Hazard Assessments in Steep Streams. Water Resources Research.* 58. <https://doi.org/10.1029/2021WR030907>.

Synthèse

L'analyse de la géomorphologie permet, en combinant cette approche avec l'approche historique et l'approche calculatoire, de définir le scénario de référence et de cartographier l'emprise des aléas torrentiels. Cette analyse se base sur des données cartographiques mais également sur des observations sur le terrain.

5 Les approches calculatoires³

5.1 Préambule sur les outils de modélisation

En fonction de l'outil utilisé, une modélisation peut permettre d'estimer les hauteurs et vitesses des écoulements, ainsi que les capacités de transport solide et les hauteurs de dépôt et d'érosion pour les modèles hydro-sédimentaire. Un modèle est toujours une représentation simplifiée de la réalité. En cours d'eau torrentiel, les résultats de simulation, qu'ils soient issus de modèles simples (lois d'écoulement, formules de transport, etc.) ou plus complexes (modèle 1D d'évolution du lit, modèle 2D d'écoulement et de propagation de laves torrentielles, etc.), sont associés à des incertitudes plus ou moins fortes selon le contexte (comme les résultats issus d'autres approches). Une modélisation à fond fixe 2D en eau claire sur un cône de déjection soumis à des processus intenses de charriage, ou une approche simplifiée telle que Exzeco ou Cartino2D (voir des exemples dans Massé et al. 2020, Pons et al. 2021), ne permet par exemple pas d'évaluer directement les niveaux d'aléa. Ce genre de calcul peut permettre de simuler les premiers axes d'écoulements avant que les érosions et dépôts n'aient lieu. Les modèles 2D hydro-sédimentaires à fond mobile permettent de calculer les érosions et dépôts mais restent très sensibles à leur paramétrisation et ne peuvent donc être utilisés sans une calibration fine et des études de sensibilités appropriées. Même dans les cas d'utilisation appropriés de ce type de modèle, les résultats doivent faire l'objet d'une analyse experte intégrant notamment les processus non-décrits par le modèle (embâcles, transport de véhicule, bouffées de charriage, blocs rocheux, etc.) et les variations aléatoires qui apparaissent naturellement dans les processus et peuvent faire l'objet de sous-scénarios.

Le Tableau 2 fourni en dernière page de la présente note liste succinctement les paramètres qu'il est possible d'estimer suivant le type d'approche ou de modèle utilisé. Les sections qui suivent synthétisent les principales méthodes calculatoires, qu'elles fassent appel à de simples formules ou à des modèles plus sophistiqués.

5.2 Conditions d'écoulement en présence de transport par charriage

5.2.1 Évolution systématique des fonds

Du fait du transport par charriage, des évolutions significatives du niveau du lit (engravements, incisions) sont observées lors des crues torrentielles (cf. paragraphe 4.1.3). Il est nécessaire de les évaluer lors de l'analyse de l'aléa torrentiel car elles influencent directement les aléas. Comme vu précédemment, les analyses calculatoires sont à alimenter et confronter aux approches historiques et géomorphologiques et notamment l'analyse du profil en long afin d'identifier les ruptures de pentes et les secteurs alluvionnaires (cf. paragraphe 4.1.4). Ces analyses peuvent être menées *via* des modélisations 1D de l'évolution des fonds (Figure 9a) ou *via* l'interprétation du profil en long (Figure 9b). Elles permettent d'évaluer les niveaux atteints en crue après l'ajout des hauteurs d'écoulement et les fluctuations instantanées du lit (cf. paragraphes suivants). Il est ainsi possible d'identifier des points de débordements le long de l'axe du cours d'eau puis de cartographier « à dire d'expert », éventuellement avec l'aide d'un modèle hydraulique 2D sur fond engravé (si pertinent, leur domaine d'application précis n'étant pas clair en l'état des connaissances actuelles), l'emprise des zones atteintes par les écoulements. Notons que les débordements massifs ou les lits larges divagants ou à morphologie en tresse sont hors du domaine de validité des modélisations 1D.

Chaque modèle a ses spécificités, ses possibilités et ses limites. Les références clés identifiées ci-après développent la diversité des modèles existants.

³ Pour rappel, le terme « calculatoire » englobe dans le présent document l'ensemble des analyses impliquant des calculs : modélisations hydrauliques, calculs de hauteur, différents types d'analyses, etc.

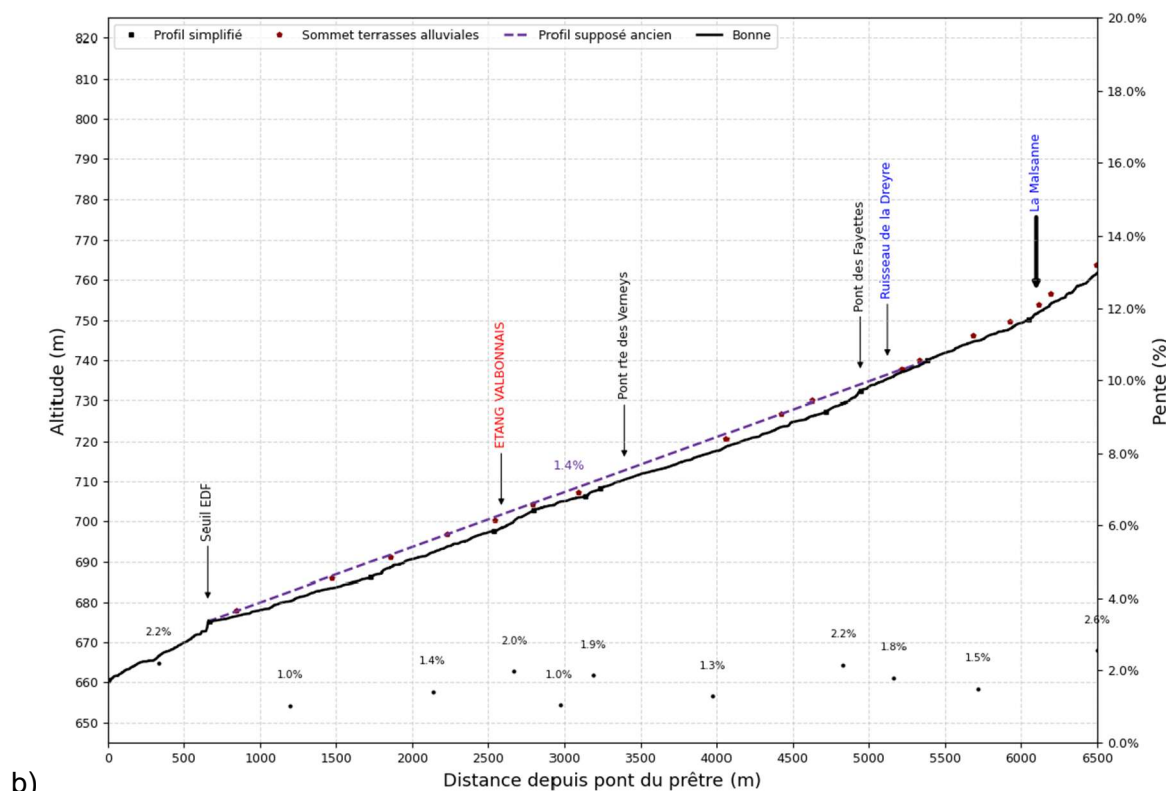
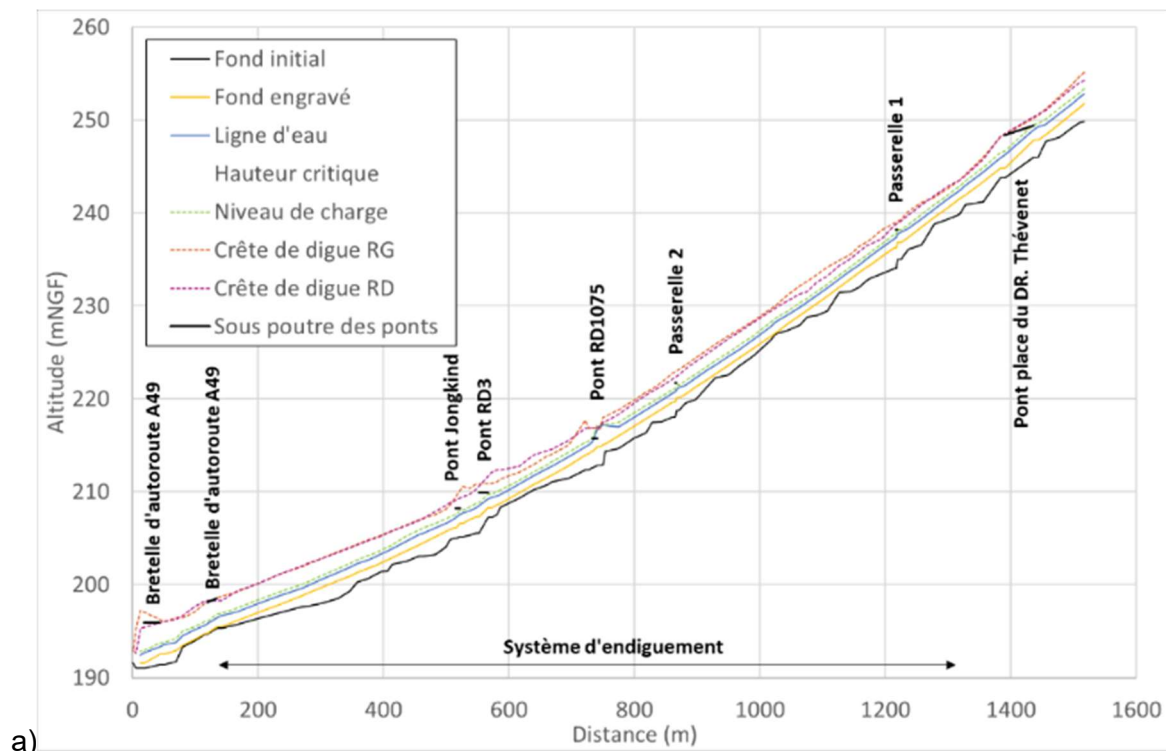


Figure 9 : a) exemple de modélisation 1D de l'évolution du lit au cours d'une crue via EVOFOND, b) analyse experte du profil en long pour évaluer son évolution en cas d'apport massifs en matériaux.

Références

Kuss et al. Modélisation unidimensionnelle d'évolution de fond de lit lors de crues torrentielles avec transport solide par charriage, rapport technique 2022 ONF-RTM pour le compte de la DGPR. 135p. <https://hal.science/hal-04558327>

Heimann et al. 2015. Calculation of bedload transport in Swiss mountain rivers using the model sedFlow: proof of concept, *Earth Surface Dynamics.*, 3, 35–54, <https://doi.org/10.5194/esurf-3-35-2015>

EVOFOND, outil de modélisation 1D de l'évolution du profil en long lors de crues à charriage développé par l'ONF-RTM : <https://sourceforge.net/projects/evofond/files/>

Environnement de calcul hydro-sédimentaire PamHyr : <https://riverhydraulics.inrae.fr/outils/modelisation-numerique/envIRONNEMENTS-de-modelisation/>

Massé et al. 2020. Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: Lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada), *River Research and Applications*, 36, 947-959 <https://doi.org/10.1002/rra.3567>

Pons et al. 2021. Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée. *LHB*, 107(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912968>

Suite logicielle TELEMAT-MASCARET : <http://www.opentelemat.org/>

5.2.2 Respirations torrentielles

Aux évolutions continues du lit liées au charriage, s'ajoutent des fluctuations aléatoires rapides (bouffées de charriage ayant lieu pendant la crue) et une variabilité latérale dans la section (Figure 10a et b). Celles-ci doivent être considérées afin d'évaluer une « enveloppe » des niveaux pouvant être atteints. L'analyse de la variabilité des sections en travers (élévation du niveau du lit par rapport à son niveau minimal dans chaque section en travers) est probablement la meilleure méthode pour évaluer l'ordre de grandeur à considérer (exemple en Figure 10c et d). Celui-ci dépend du référentiel utilisé pour l'analyse du profil en long : une variabilité « moyenne » peut par exemple être retenue lorsque le profil en long est construit à partir des fonds moyens tandis qu'une variabilité maximale est considérée lorsque le profil en long est évalué depuis les fonds minimums.

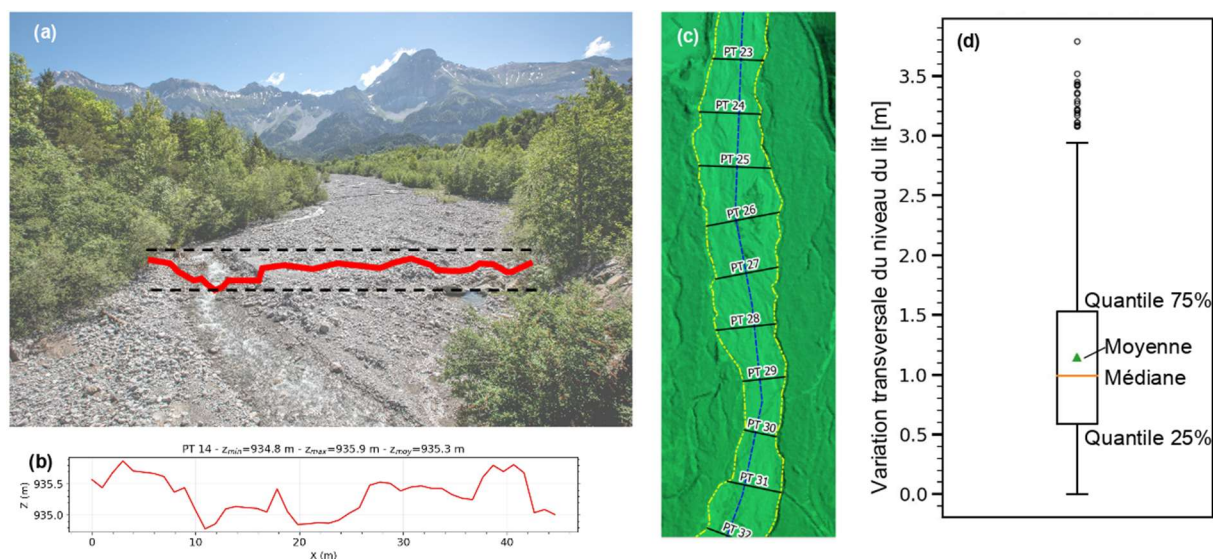


Figure 10 : variabilité de la géométrie des lits torrentiels et exemple d'analyse. (a) Exemple d'une section réelle et (b) de la variabilité transversale de l'altitude du lit par rapport à son niveau minimal. (c) Analyse de cette variabilité sur plusieurs sections en travers et (d) de la répartition statistique de cette variabilité : l'intensité des respirations est typiquement de 0.5 - 1.5 m et peut dépasser parfois 2 m de haut.

Références

Kuss et al.. 2023. Evaluation semi-automatisée des respirations torrentielles à l'aide de modèles numériques de terrain lidar. Dans *Actes du Colloque SHF Apports des nouvelles technologies à l'étude du transport sédimentaire et de la morphodynamique*. Grenoble, France. 458047. <https://shf2023morpho.sciencesconf.org/458047>

5.2.3 Niveau d'eau : cas des lits contraints

Un lit contraint est une section de cours d'eau dont les mouvements latéraux sont restreints (par des obstacles naturels ou artificiels). Différentes approches calculatoires permettent d'estimer les hauteurs d'eau en crue. En contexte torrentiel, les lois de frottement issues du domaine fluvial (en particulier celle de Manning-Strickler) ne sont pas toujours valables, en particulier en cas de faible submersion relative

(hauteur d'eau / hauteur de rugosité < 7). Il est alors conseillé d'utiliser des lois plus adaptées : relations de Ferguson (2007) ou de Rickenmann et Recking (2011). Il est aussi possible dans certains cas (gamme de rugosité intermédiaire) de considérer un écoulement proche du régime critique pour évaluer les hauteurs d'eau. Cette hypothèse n'est plus valable dans les zones de remous hydraulique influencées par un ouvrage aval (seuil, pont).

Il peut dans certains cas être pertinent de considérer non pas la hauteur d'eau mais la charge hydraulique, c'est-à-dire la hauteur d'eau à laquelle s'ajoute un terme d'énergie cinétique⁴. Cette grandeur intègre l'ensemble de l'énergie de l'écoulement, et est un bon indicateur du niveau maximal atteint par les instationnarités de la surface libre (vagues, remous). Notons que cette approche ne doit pas être systématiquement retenue et doit être justifiée par la présence de singularités : fortes courbures, présence d'obstacles à l'écoulement, etc.

Références

Recking et al. 2013. *Torrents et rivières de montagne, Dynamique et aménagement*, Edition Quae.

Ferguson, R. (2007), *Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams*, *Water Resources Research*, 43, W05427, <https://doi.org/10.1029/2006WR005422>

Rickenmann and Recking (2011), *Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set*, *Water Resources Research*, 47, W07538, <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>

Outil de calcul en ligne de l'hydraulique et du transport par charriage BedloadWeb: <https://www.bedloadweb.com/>

Piton & Recking. (2019). *Steep bedload-laden flows: Near critical?* *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(8)2160–2175. <https://doi.org/10.1029/2019JF005021>

5.2.4 Niveau d'eau : cas des lits divagants

Lorsque les lits ne sont pas contraints latéralement, ils ont tendance lors de crues rares à s'élargir et adapter leurs gabarits aux apports solides et liquides provenant de l'amont. Contrairement aux lits endigués ou contraints (paragraphe précédent) la largeur réelle du lit actif en crue n'est pas connue, celui-ci n'occupant pas l'ensemble de la section à un instant donné (Figure 11a-b). Dans ces conditions, les écoulements ont tendance à se concentrer dans un ou plusieurs chenaux relativement étroits par rapport à l'enveloppe des divagations mais pouvant tout de même faire plusieurs dizaines de mètres de large dans les rivières torrentielles. Les vitesses et hauteurs d'écoulement dans ces chenaux sont significativement supérieures à celles d'un écoulement réparti de manière homogène sur l'ensemble de la section disponible. Ceci est par exemple valable pour les morphologies en tresses ou en cas de divagations du cours d'eau à la suite de débordements.

Le calcul des conditions d'écoulement est relativement incertain dans ce contexte. Il est toutefois possible d'estimer des ordres de grandeurs de hauteurs d'eau (h) et de vitesses d'écoulement (V) à partir des hypothèses suivantes :

1. Hypothèse sur le rapport d'aspect du chenal actif : le ratio L/h (où L est la largeur moyenne du chenal actif [m] et h la hauteur d'eau moyenne dans le chenal actif [m]) évolue généralement dans une gamme comprise entre 15 et 40. Le choix de plusieurs valeurs dans cet intervalle permet d'évaluer la sensibilité à cette hypothèse et d'estimer une enveloppe de valeurs probables de hauteurs et de vitesses d'écoulement (voir pages 250-256 du rapport ONF-RTM - INRAE 2022 relatif au retour d'expérience sur la Vésubie à la suite de la tempête Alex) ;
2. Hypothèse d'écoulement critique, qui se justifie dans le cas de chenaux divagants : $Fr = V/(g \cdot h)^{0.5} = 1$, où Fr est le nombre de Froude, V la vitesse d'écoulement moyenne [m/s] et g l'accélération de la pesanteur [9.81 m/s²] ;
3. Hypothèse que l'intégralité du débit s'écoule dans le nouveau chenal actif : $Q = V \cdot L \cdot h$ (où Q est le débit de pointe [m³/s] déterminé lors de la caractérisation de l'événement de référence, V la vitesse d'écoulement moyenne dans le chenal actif).

⁴ Le terme d'inertie est usuellement estimé par la formule $V^2/2g$ avec V la vitesse d'écoulement [m/s] et g l'accélération de la gravité [9.81 m/s²].

Ces trois hypothèses fournissent trois équations à trois inconnues (V , L et h) dont la résolution⁵ permet d'estimer les hauteurs d'eau et les vitesses dans le chenal actif (voir Figure 11). On considère ensuite que ce chenal peut balayer l'ensemble de la zone de divagation disponible (éventuellement de manière plus ou moins probable selon les secteurs) avec les mêmes conditions d'écoulement (hauteurs/vitesses) que celles estimées dans ce chenal.

a) Bastan à Luz-Saint-Sauveur, Juin 2013, pendant la crue c)



b) Bastan à Luz-Saint-Sauveur, Juin 2013, après la crue

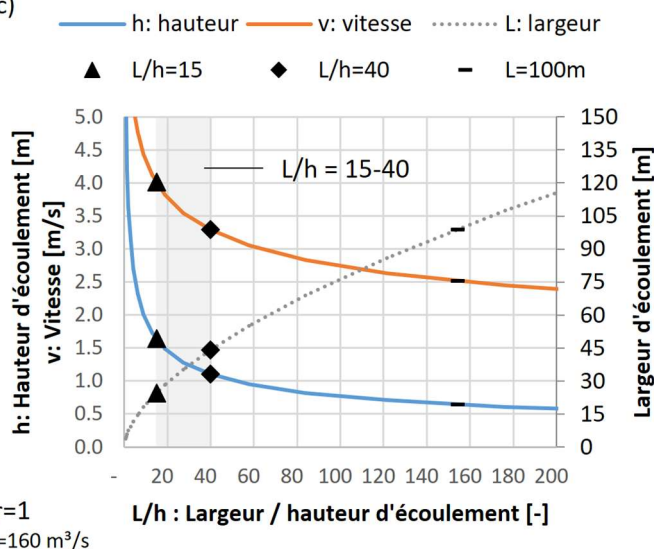


Figure 11 : illustration de la différence entre largeur d'écoulement et largeur totale de lit. a) photo aérienne d'une crue de charriage (largeur d'écoulement ~ 20-30 m) ; b) photo aérienne du même site après la crue (largeur de la zone de divagation ~ 100 m) ; c) exemple d'estimation des conditions d'écoulement (vitesses, hauteurs et largeurs) dans un lit divagant en fonction du rapport d'aspect (ratio largeur / hauteur du chenal actif), pour un débit de 160 m³/s. Le secteur grisé identifie les gammes de valeurs usuelles pour le rapport d'aspect (entre 15 et 40). On en déduit que les hauteurs d'eau évoluent probablement entre 1.1 et 1.6 m (évolution de la ligne bleue dans la partie grise au regard de l'axe de gauche), les vitesses entre 3.3 et 4 m/s (évolution de la ligne orange dans la partie grise au regard de l'axe de gauche) et les largeurs du lit actif entre 24 et 44 m (évolution de la ligne pointillée dans la partie grise au regard de l'axe de droite). Ces estimations sont cohérentes avec les observations de terrain de la photo a). À titre illustratif, si ce même débit s'écoulait sur une largeur de 100 mètres (axe de droite), le rapport L/H serait de l'ordre de 150 (abscisse), les hauteurs de 0.6 m (axe de gauche) et les vitesses de 2.5 m/s (axe de gauche). Mais ce large étalement est très improbable au regard de la valeur de L/H, hors des intervalles usuellement observés.

Cette approche s'applique lorsque les lits sont très mobiles latéralement et que leur largeur s'adapte en temps réel pendant la crue. Elle est généralement raisonnablement applicable sur les torrents dans leurs zones de divagation (élargissement de vallée, cône de déjection). L'approche perd potentiellement en pertinence sur les rivières torrentielles à mesure que les pentes s'atténuent, mais il n'est pas possible dans l'état des connaissances actuelles d'indiquer une valeur seuil de pente, de débit ou d'un quelconque paramètre hydraulique ou morphologique marquant cette frontière. Comme toujours, son croisement avec des éléments historiques et géomorphologiques (photos prises pendant les crues historiques, gabarits de chenaux visibles sur les lidar ou sur les photos aériennes, etc.) permet d'éclairer son utilisation.

L'évaluation des conditions d'écoulement de chenaux divagants peut être consolidée avec l'hypothèse de « chenal à l'équilibre ». Cette approche issue de la géomorphologie fluviale consiste à considérer qu'un chenal s'élargit tant que celui-ci est en capacité d'éroder ses berges. Cela peut se traduire par un ratio τ^*/τ_c^* compris entre 1 (ce qui correspond aux valeurs maximales probables de largeur de l'écoulement) et 3 (ce qui correspond aux valeurs maximales probables pour les hauteurs d'eau), avec :

- $\tau^* = h \cdot i / ((s - 1) \cdot D)$, le nombre de Shields [-], i la pente [m/m], s la densité des sédiments [-] et D [m] leur diamètre caractéristique (souvent pris égal au quantile 84% de la courbe granulométrique) ;
- τ_c^* correspondant à la valeur seuil du nombre de Shields au-dessus de laquelle les sédiments sont transportés. Recking (2009) propose $\tau_c^* = 0.56 i + 0.021$ sur la base de

⁵ Exprimé en fonction de Q et $L^*=L/h$: $V = (Q \cdot g^2/L^*)^{0.2}$; $L = L^* \cdot 0.6(Q/g^{0.5})^{0.4}$ et $h = (Q/(L^* \cdot g^{0.5}))^{0.4}$

données incluant du tri granulométrique et une gamme de pente ($i = 0.1 \text{ \%} - 10 \text{ \%}$ avec l'essentiel des données entre $0.1 \text{ \%}$ et $2 \text{ \%}$). Notons que d'autres formules pour estimer cette valeur seuil existent avec des écarts pouvant atteindre $\pm 50 \text{ \%}$ à l'équation fournie ci-dessus. Comme les autres approches calculatoires, cette approche permet de fournir des gammes indicatives et non des valeurs précises.

Le cas des torrents pavés de gros blocs n'entre à priori pas dans le cadre d'application de cette approche qui fait l'hypothèse que le cours d'eau s'élargit en érodant des matériaux alluvionnaires, c'est à dire qu'il a lui-même apporté et déposé sur place. Dans les torrents de montagne, les dynamiques des processus de versants (glissements de terrain, éboulements ou affleurement rocheux) et le couplage entre ces derniers et le torrent contribue à limiter les élargissements possibles.

Références

ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA. 2022. *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie - Volet torrentiel*. Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06): Nice (France). 299p. + 1540 annexes. <https://doi.org/10.57745/UGJZWT>

Church M, Jakob M. 2020. What Is a Debris Flood? *Water Resources Research* 56: e2020WR027144. <https://doi.org/10.1029/2020WR027144>

Jakob et al. 2022. Debris-Flood Hazard Assessments in Steep Streams. *Water Resources Research* 58: e2021WR030907. <https://doi.org/10.1029/2021WR030907>

Piton, G., & Recking, A. (2019). Steep bedload-laden flows: Near critical? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(8)2160–2175. <https://doi.org/10.1029/2019JF005021>

Recking, A. (2009), Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion, *Water Resour. Res.*, 45, W04401, <https://doi.org/10.1029/2008WR006826>

Johannot A, Recking A. 2024. Hydraulic geometry of Alpine streams channels. *Geomorphology* 467 : 109470. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109470>

5.2.5 Évaluation des conditions d'écoulement au droit des verrous hydrauliques

Les ouvrages de franchissement (ponts, dalots, passages à gué, etc.), ainsi que les ouvrages hydrauliques (barrages, seuils, prises d'eau, etc.) ou des verrous naturels constituent des verrous hydrauliques où les conditions d'écoulement sont guidées et limitées par le génie civil (ou les parois rocheuses) et où, jusqu'à leur éventuelle défaillance ou contournement, la mobilité naturelle du chenal est atténuée. Ces verrous hydrauliques génèrent des conditions d'écoulement particulières (changement brusque de section, mise en charge, chute et ressaut hydraulique, etc.). Ce sont souvent des points préférentiels d'obstruction par des embâcles et/ou de dépôt de charriage. Ce sont enfin aussi souvent des points bas dans le profil en long des berges. Les verrous hydrauliques sont en conséquence des points préférentiels de débordement et doivent être analysés consciencieusement.

En premier lieu, la vérification de la capacité de ces verrous à faire passer sans débordement le débit de pointe de l'événement de référence est une étape indispensable à l'élaboration de la cartographie des aléas. Elle est complétée dans un second temps par l'analyse des interactions entre ces verrous et le transport solide. Enfin, les éventuelles obstructions générées par des embâcles doivent être étudiées, cette dernière analyse pouvant aboutir à l'identification de nouveaux sous-scénarios.

Calcul de la capacité hydraulique

L'approche retenue pour estimer les hauteurs d'eau avant mise en charge des ponts et passerelles est à adapter au caractère confiné ou non du chenal (voir les deux sections précédentes), ainsi qu'à la complexité topographique de l'ouvrage et aux enjeux qui l'entourent. Les ouvrages les plus simples et dont l'obstruction menace peu d'enjeux peuvent être étudiés avec des calculs simples de hauteur d'eau en régime uniforme alors que des ouvrages complexes situés à proximité d'enjeux très stratégiques peuvent justifier de faire appel à des modélisations numériques sophistiquées, voire dans certains cas très particuliers à des études sur modèle physique à fond mobile. Des données topographiques indiquant les éventuelles contractions locales induites par les ouvrages et les cotes des sous-poutres sont utilisées pour estimer les hauteurs d'écoulement et niveaux de charge, les tirants d'air ou les éventuelles mises en charge. Si les ouvrages risquent d'être mis en charge, il est primordial de mener une analyse de l'effet de celle-ci sur l'engrèvement du lit en amont.

Interaction avec le transport solide

Les pertes de charges liées à une contraction latérale ou à la mise en charge d'un ouvrage peuvent générer un dépôt de matériaux en amont (en cas de fond fixe sous l'ouvrage), celui-ci ayant tendance à remonter vers l'amont et à générer de potentiels débordements (voir Figure 12). Cet effet peut être évalué soit par une analyse de la perte de charge au droit de l'ouvrage (l'évaluation de l'ordre de grandeur de la perte de charge donne un ordre de grandeur du dépôt) et une hypothèse de pente de dépôt, soit par une modélisation 1D adéquate (cf. paragraphe 5.2.1).

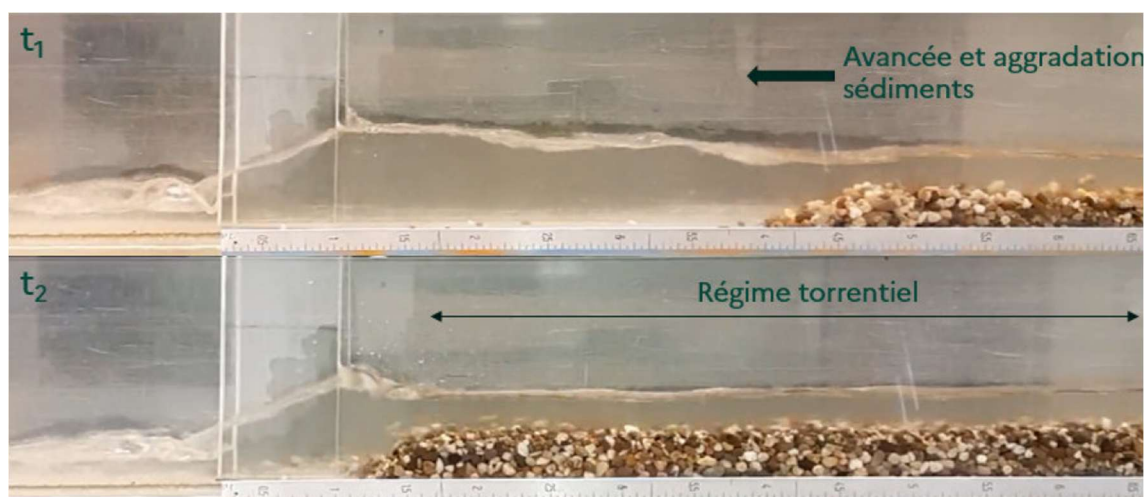


Figure 12 : expérience de laboratoire illustrant l'effet d'une perte de charge (ici par contraction) sur la formation d'un dépôt régressif en amont (expériences de Velten 2018). Le dépôt se forme sur une épaisseur sensiblement équivalente à celle de la perte de charge.

Notons également que dans les cours d'eau à forte charge sédimentaire, des débordements liquides significatifs vont générer un emballement des dépôts dans le chenal (boucle de rétro-action lors de laquelle la perte de débit liquide diminue la capacité de transport solide, générant du dépôt qui élève le niveau du fond et aggrave à nouveau la perte de débit liquide). Ce phénomène est à l'origine de certaines bifurcations soudaines du chenal appelées « avulsions » (abandon du chenal historique et débordement de l'ensemble du débit dans un nouveau chenal). Ainsi, les débordements au droit de verrous hydrauliques en contexte de fort transport solide sont souvent plus marqués en emprise et en débit débordant en comparaison d'une situation équivalente en eau claire.

Des informations doivent par ailleurs être rassemblées vis-à-vis du caractère affouillable ou non de l'ouvrage : au droit des ponts affouillables le fond aura tendance en crue à s'enfoncer localement du fait de la contraction imposée par les culées, puis de la mise en charge du tablier, ce qui limite les rehausses des niveaux d'eau et de sédiments en amont, contrairement aux ponts inaffouillables dont la perte de charge se répercute totalement en amont. Le caractère variable du niveau du fond doit être intégré dans les calculs. Bien que le caractère affouillable du fond du lit au droit du pont réduit l'exhaussement des niveaux en amont durant la crue, il faut vérifier que les culées du pont sont suffisamment profondes pour résister à l'incision du lit. À défaut il faudrait considérer un sous-scénario d'effondrement dudit pont.

De manière générale, la complémentarité entre le « regard » hydrogéomorphologique et les approches « calculatoires » est particulièrement utile pour analyser les interactions avec le transport solide.

Interaction avec les flottants

La probabilité de débordement au droit et en amont des verrous hydrauliques est souvent augmentée par la présence de flottants formant de potentiels embâcles (Figure 13, gauche). En lien avec les hypothèses faites lors de l'évaluation du scénario de référence concernant la production de flottants (cf. paragraphe 4.1.5), une analyse de la susceptibilité à la formation d'embâcle peut être menée. Celle-ci peut reposer sur des critères simples d'ouverture relative (largeur flottant / largeur du pont) ou de tirant d'eau relatif (hauteur d'écoulement / hauteur de la sous poutre) ou sur des relations empiriques donnant des probabilités de blocage selon différents paramètres (voir par exemple le chapitre 3.4 du guide INRAE/ISL sur les flottants, exemple de droite sur la Figure 13).

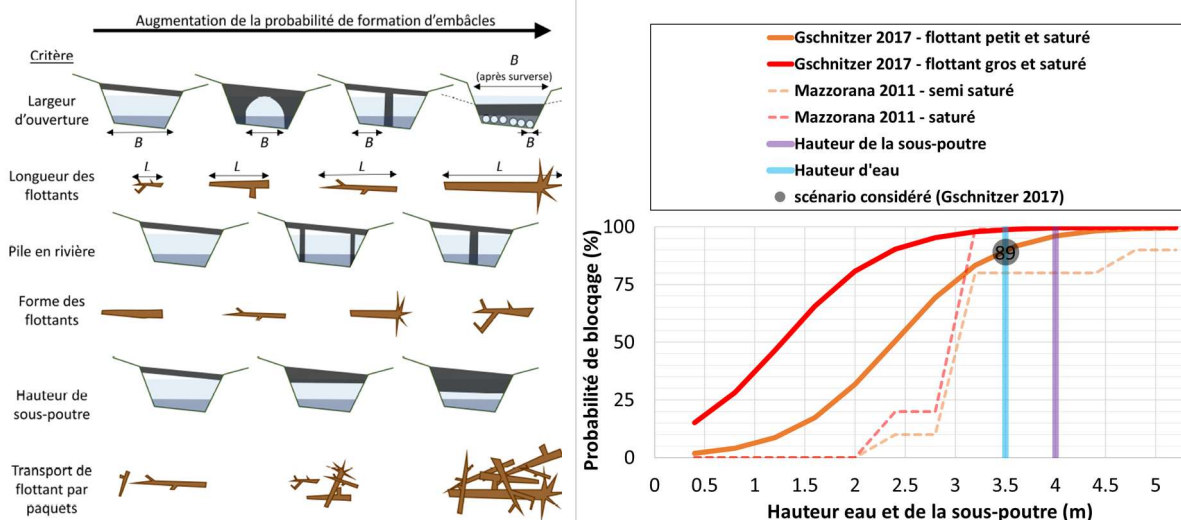


Figure 13 : paramètres influençant la probabilité d'obstruction des ouvrages par les flottants (Guide flottants et embâcles INRAE-ISL 2022, panneau gauche), exemple de calcul de probabilité de blocage au droit d'un pont (axe des ordonnées) en fonction de la hauteur d'eau (axe des abscisses) selon divers approches empiriques (panneau droite). Valeur utilisées : pente = 1%, longueur des flottants = 12 m ; largeur du pont = 12 m ; hauteur d'eau = 3.5 m ; hauteur de sous poutre = 4 m ; géométrie des flottants = troncs avec branches ; pas de pile centrale ; pas de déflecteur ; diamètre des flottants y compris les branches : min = 0.5 m, max = 1 m. Les probabilités de blocage sont estimées entre 80% et 99% selon les approches : le pont est considéré comme très susceptible d'être embâclé dans ces conditions hydraulique et d'apport de flottants.

Références

Quiniou et Piton 2022, *Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations*. ISL Ingénierie ; INRAE. 2022, pp.135. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03621373v1>

Kuss et al. *Modélisation unidimensionnelle d'évolution de fond de lit lors de crues torrentielles avec transport solide par charriage*, rapport technique 2022 ONF-RTM pour le compte de la DGPR. 135p. <https://hal.science/hal-04558327>

Couvert et Lefebvre. 1994. *Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel*. La Houille Blanche 3 : 81–90. <https://doi.org/10.1051/lhb/1994046>

Koulinski et Richard. 2008. *Apports des modèles réduits pour la gestion des sédiments et des flottants en torrents et rivières torrentielles*. Houille Blanche 4 : 90–97. <https://doi.org/10.1051/lhb/2008044>

Synthèse :

L'approche « calculatoire » de l'aléa torrentiel pour des scénarios avec transport par charriage nécessite d'évaluer les effets des évolutions morphologiques (en plan et dans la verticale), des ouvrages et des flottants sur les conditions d'écoulement. Un panel d'approches peut être employé, celles-ci devant être adaptées selon le contexte. Souvent, des approches simples sont suffisantes. Dans tous les cas, il est primordial d'alimenter et de confronter les calculs avec les informations historiques et les observations géomorphologiques et de garder du recul sur les résultats bruts de modélisation numériques. Ceux-ci doivent systématiquement être croisés avec une approche experte pour élaborer une carte d'intensité. La critique des outils utilisés et les tests de sensibilités aux hypothèses de calcul, toujours utiles pour interpréter les résultats, doivent être adaptés aux enjeux menacés.

5.3 Conditions d'écoulement des laves torrentielles

5.3.1 Écoulement, propagation, et étalement des laves torrentielles

Les laves torrentielles boueuses, fréquemment rencontrées dans les Alpes, peuvent être approchées par des lois rhéologiques de type Herschel-Bulkley et la loi d'écoulement de Coussot (1994) qui en est dérivée. Celle-ci peut être utilisée pour évaluer la hauteur de passage dans une section donnée, en fonction de paramètres géométriques, du débit et de paramètres rhéologiques (à définir grâce à des observations de hauteurs de passage et de hauteurs de dépôt). Des rehausses dans les coudes sont

aussi à anticiper en fonction des rayons de courbures de ces derniers (Scheidl et al. 2019). Cette approche peut être utile pour évaluer les points de débordement préférentiels sur le linéaire d'un torrent. Contrairement à l'eau, les laves torrentielles présentent un seuil de contrainte, ce qui signifie qu'elles peuvent s'arrêter sur des pentes non-nulles. C'est une propriété importante à considérer lors de la cartographie de l'aléa.

Au-delà d'approches calculatoires à l'échelle de la section en travers, plusieurs outils peuvent modéliser l'étalement 2D de laves torrentielles sur fond fixe et selon diverses rhéologies à choisir selon les typologies de laves torrentielles étudiées. On peut notamment citer, entre autres, l'outil LAVE2D développé par INRAE (Figure 14, centre), Flo2D un outil commercial très répandu ou encore HECRAS 2D et son module non-newtonien (Figure 14 gauche). Ces outils modélisent à chaque pas de temps l'écoulement (hauteurs et vitesses) et donnent des informations dynamiques pouvant aider à évaluer l'intensité et l'emprise de l'aléa. Bien qu'ils apportent un intérêt pour cette analyse après interprétation experte et qu'ils soient très convaincants en apparence, ces outils présentent des incertitudes et limites à maîtriser : non représentation du front de la bouffée (qui peut être bien plus haut que le corps de la lave en présence de gros blocs), non prise en compte de l'érosion (qui est tout de même bien moindre qu'en charriage en zone d'étalement), difficulté à bien représenter l'arrêt, non représentation d'écoulements 3D, non prise en compte de l'effet de l'auto-chenalisation par les bourrelets latéraux, absence de séparation de phases, interactions incertaines avec les ouvrages, incertitudes sur les paramètres rhéologiques, etc. Leurs résultats sont très sensibles à certains paramètres, et potentiellement au maillage, et les réanalyses de cas bien documentés sont encore trop peu nombreuses pour fournir des recommandations claires de calibration. Les incertitudes sur les résultats sont ainsi systématiquement fortes, rendant nécessaire une interprétation experte, fondée notamment sur des analyses de sensibilité adaptées aux enjeux exposés et à la précision des données disponibles.

D'autres approches simplifiées, basées sur le principe de « ligne d'énergie », peuvent apporter également des informations intéressantes lors de la cartographie préalable des zones d'étalement des laves torrentielles (outil libre Flow-R par exemple, Figure 14 droite). Celles-ci ne donnent pas d'informations dynamiques et sont basées sur une approche purement empirique, mais elles sont rapides et plus aisées à appliquer. Elles présentent, après interprétation experte, un intérêt pour évaluer les cheminements préférentiels et l'emprise des écoulements.

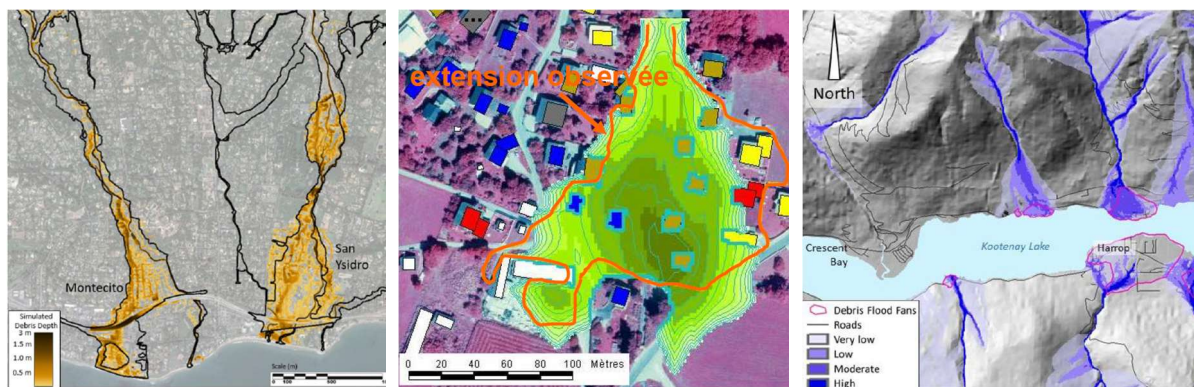


Figure 14 : exemple d'utilisation de modélisation 2D d'étalement de lave torrentielle. Gauche : module non-newtonien de HECRAS. Centre : modèle LAVE2D développé par INRAE. Droite : outil Flow-R basé sur une approche « ligne d'énergie ».

Références

Recking et al. 2013. *Torrents et rivières de montagne, Dynamique et aménagement*, Edition Quae.

Laigle et Peteuil 2011, *Analyse de l'aléa « lave torrentielle » sur le cône de déjection du Rioulong (Hautes-Pyrénées) : Une approche par scénarios*. *Science Eaux et Territoires*. 2 :152-153. <https://doi.org/10.3917/set.002.0152>

Jakob et al. 2012. *Debris-flow simulations on Cheekye River, British Columbia*. *Landslides* 10 : 685–699. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0365-1>

Horton et al. 2013. *Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 869–885, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>

5.3.2 Interactions entre verrous hydraulique et laves torrentielles

Les laves torrentielles transportent de gros blocs, en particulier au niveau de leur front. Ceux-ci peuvent, de manière aléatoire, obstruer des ouvrages et autres verrous du fait de leur taille trop élevée pour l'ouverture (Figure 15a-b). Il est donc important, en plus de l'analyse de la capacité hydraulique de l'ouvrage, d'évaluer sa probabilité d'obstruction mécanique par des gros blocs. Pour cela, il existe des approches simples donnant une probabilité d'obstruction selon l'ouverture relative de l'ouvrage (taille du bloc / taille de l'ouverture, Figure 15c). D'autres approches sont possibles, en particulier l'application d'un modèle stochastique simplifié permettant d'évaluer la probabilité de l'obstruction et le remplissage de plages de dépôt ou du chenal en amont de ponts par des laves torrentielles (Piton *et al.* (2022, 2024) et son implémentation en ligne dans l'outil MCB³).

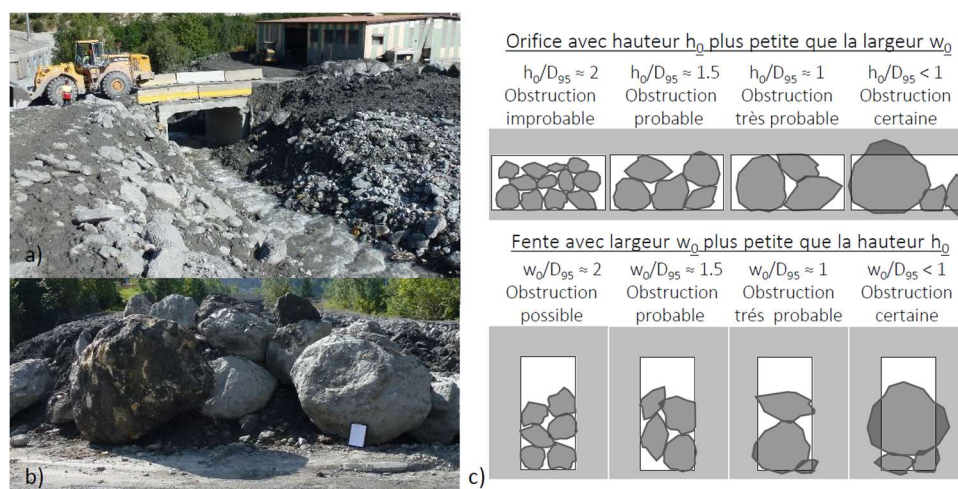


Figure 15 : a) Dépôt de la lave torrentielle du Saint-Antoine de Modane (73) en 2014 montrant un pont de faible section (3x5m) qui a été obstrué par des blocs de 2 - 4 m de diamètre ; b) exemple de blocs rocheux de 2 m de diamètre curés en amont du même pont ; c) classe de probabilité de blocage d'un pont ou dalot selon le ratio entre la taille des blocs (quantile 95% de la distribution granulométrique) et la hauteur de l'orifice (h_0) ou sa largeur (w_0) tiré de la note de Piton et al. (2020).

Références

Piton et al. 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) : 1–5. [en ligne] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02949612>

Piton et al. 2022. Debris flows, boulders and constrictions: A simple framework for modeling jamming, and its consequences on outflow. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2021JF006447. <https://doi.org/10.1029/2021JF006447>

Piton G. 2024. Prise en compte des blocs rocheux et du tri granulométrique pour une analyse plus réaliste des risques torrentiels. Actes du Colloque Torrents 2024: Modélisation des processus torrentiels. Rapperswil-Jona (CH). WSL Berichte 155. 41–47 pp. <https://doi.org/10.55419/wsl:37773>

Outil MCB³ de la plateforme de modélisation en ligne PlatRisk : <https://platrisk.ige.inrae.fr>

Synthèse

Les approches calculatoires de l'aléa torrentiel pour des scénarios avec lave torrentielle nécessitent d'évaluer le type de lave rencontré, les volumes en jeu, la propagation et l'étalement de l'écoulement, ainsi que leur interaction avec les ouvrages. Pour cela, en lien avec les approches historiques et géomorphologique, il est possible de mettre en œuvre un panel d'outils plus ou moins complexes, qu'il convient d'adapter au contexte.

6 Synthèse sur les méthodes

Le Tableau 2 donne des pistes pour identifier les méthodes (historique, géomorphologique et calculatoire) pertinentes en fonction des variables que l'on cherche à qualifier (voir Favier et al. 2019 pour une version plus complète qui spécifie aussi les contextes d'application). Si ces méthodes prises indépendamment sont généralement insuffisantes, des combinaisons de ces dernières éclairent utilement l'analyse. Des considérations géomorphologiques peuvent par exemple permettre d'anticiper l'évolution du profil en long, en complémentarité avec une simulation 1D à fond fixe sur ce profil corrigé qui peut aider à identifier les points de débordements. Si les approches historiques et géomorphologiques sont par nature incertaines, elles correspondent à des observations réelles et permettent de déduire une compréhension globale du fonctionnement probable futur du système étudié ; *a contrario*, les outils numériques peuvent donner l'illusion d'une certaine précision, mais ne caractérisent que les sous-scénarios considérés, avec des incertitudes croissantes à mesure que l'on s'écarte de l'événement de calage ou de leurs domaines de validité.

Tableau 2 : tableau identifiant les approches à privilégier pour évaluer les principales variables permettant de caractériser les aléas, mettant en évidence la complémentarité entre les méthodes (voir version plus détaillée dans Favier et al. 2019). ✓ = méthode adaptée, ? = méthode apportant potentiellement des éléments, !! = méthode inadaptée.

Méthode	Chenal		Zone de débordement			
	Obstruction des ponts	Points de débordement	Emprise	Axes de concentration des écoulements	Hauteur et vitesse d'écoulement	Hauteur de dépôt et d'affouillement
Approche historique*	✓	✓	✓	?	?	?
Approche géomorphologique*	?	✓	✓	✓	!!	✓
Calculs sommaires (section en travers)	✓	✓	!!	!!	?	!!
Modélisation hydraulique fond-fixe (1D)	!!	!!	!!	!!	!!	!!
Outils SIG approximant des conditions d'eau claire (par exemple Exzeco)	!!	?	!!	?	!!	!!
Modélisation hydraulique fond-fixe (2D)	!!	?	!!	?	!!	!!
Outils SIG approximant des écoulements très chargés (par exemple Flow-R)	!!	✓	?	✓	!!	!!
Modélisation lave torrentielle fond-fixe (2D)	?	✓	✓	✓	✓	✓
Mod. hydro-sédimentaire fond mobile (1D)	?	✓	!!	!!	!!	!!
Mod. hydro-sédimentaire fond mobile (2D)	?	✓	?	✓	?	✓
Modèle physique à fond fixe (eau + flottants)	?	?	!!	?	!!	!!
Modèle physique à fond mobile (eau + sédiment + flottants)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
*vérifier que la configuration du site ait été suffisamment stable dans le temps pour que les traces dans les archives ou le paysages soient représentatives de l'aléa actuel.						

Références

Favier et al. 2019, *Analyse comparative des méthodes dites "multicritère" dans le contexte torrentiel – méthodologie d'évaluation des dommages*. INRAE. 73p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02132546v1>