

EVALUATION DES IMPACTS D'AVALANCHES DE NEIGE COMME DONNEE D'ENTREE DES CALCULS DE VAGUES DE SUBMERSION POTENTIELLES DANS LE CADRE DES EDD

Evaluation of the impact of snow avalanches as an input to potential flood wave calculations for EDD (dam risks study)

Philippe BERTHET-RAMBAUD, Fanny BOURJAILLAT

Engineerisk, 690 route de la Motte Servolex 73160 St Sulpice France
pbr@engk.fr, fb@engk.fr

Cécile GAJAN

Société Hydro-Electrique du Midi, Dept. Sûreté, 1 rue Louis Renault BP13383 31133 Balma cedex, France
celine.gajan@shem.engie.com

Thomas VIARD, Anthony MORETO

EDF Hydro – CIH, Savoie Technolac, 4 All. du Lac de Tignes, 73290 La Motte-Servolex, France
thomas.viard@edf.fr, anthony.moreto@edf.fr

Akim SALMI, Romain THURIOT

ISL Ingénierie, 65 Av. Clément Ader, 34170 Castelnaud-le-Lez, France
salmi@isl.fr, thuriot@isl.fr

MOTS CLEFS

Etude de danger (EDD), avalanche de neige, impact, vague de submersion

KEY WORDS

Dam risk analysis, snow-avalanche, impact, submersion wave

RÉSUMÉ

Pour les retenues de barrages d'altitude, les avalanches sont un des phénomènes naturels qui peuvent générer un impact, lui-même créateur d'une possible vague de submersion. Un protocole d'évaluation a ainsi été développé pour différents sites alpins et pyrénéens, qui combine les piliers d'une expertise avalanche pour aboutir aux paramètres nécessaires à un calcul de vague (selon [1]) et s'inscrire dans le cadre d'une analyse de risque.

Ce protocole doit souvent compenser des données historiques parcellaires quand en plus, l'infrastructure a noyé le terrain des trajectoires passées. Faute de couverture par les inventaires habituels et a fortiori pour les altitudes au-dessus de la forêt, les sites peuvent s'avérer vierges d'indices. Alors, les quelques observations de dépôts lors des visites de terrain ou sur quelques photos diverses ne permettent pas d'assurer la fiabilité suffisante des évaluations.

Via une analyse fouillée de la topographie, des traitements statistiques nivométriques (à partir du maillage existant de postes de mesures) et bien sûr de l'expertise et des observations de terrain, il est possible d'alimenter de manière systématique des modélisations. Moyennant les interprétations expertes nécessaires, celles-ci permettent de qualifier et quantifier les avalanches par période de retour jusqu'au tri-centennal. Selon leurs caractéristiques, les points d'impacts potentiellement les plus préjudiciables sont sélectionnés et les paramètres nécessaires au calcul de vague définis. La criticité associée est appréciée au stade de l'analyse détaillée des risques en quantifiant d'une part la probabilité d'une vague générée par une avalanche ET impactant la sûreté du barrage et d'autre part la gravité de ce phénomène, liée au volume d'eau libéré à l'aval par surverse en crête.

Ce processus nécessite aussi un certain nombre d'hypothèses, forcément dans le sens de la sécurité (retenue à sa cote de référence, surface non gelée...) mais qui, par cumul, peuvent majorer la période de retour

effectivement représentée. Par exemple, quelle est la probabilité réelle d'une avalanche majeure sur la seule période d'avant saison lorsque la cote est maximale ? De même, les gammes des paramètres intervenant dans le calcul [1] (et qui couvre d'abord d'autres types d'impacts comme les glissements de terrain) peuvent montrer une application hors des limites du modèle, dans le sens conservatif. En ce sens, l'approche est plutôt et positivement enveloppe et confirme la nécessité d'une étude à la croisée des regards entre expert avalanche, analyste des risques et exploitant Maître d'Ouvrage.

ABSTRACT

For high-altitude dam reservoirs, avalanches are one of the natural phenomena that can generate an impact, itself creating a possible submersion wave. An evaluation protocol has thus been developed for different Alpine and Pyrenean sites, which combines the pillars of avalanche expertise to arrive at the parameters necessary for a wave calculation (according to [1]) and is part of the framework of a dam risk analysis.

This protocol must often compensate fragmented historical data when, in addition, the infrastructure has drowned out the terrain of past trajectories. Due to lack of coverage by the usual inventories and especially for the altitudes above the forest, the sites may turn out to be devoid of clues. So, the few observations of deposits during field visits or on a few various photos do not ensure sufficient reliability of the evaluations.

Via a detailed analysis of the topography, statistical snow-metric processing (based on the existing network of measuring stations) and of course expertise and field observations, it is possible to systematically feed into the models. With the necessary expert interpretations, these make it possible to qualify and quantify avalanches by return period up to the three-centennial. Depending on their characteristics, the potentially most damaging impact points are selected and the parameters necessary for wave calculation defined. The associated criticality is assessed at the detailed risk analysis stage by quantifying on the one hand the probability of a wave generated by an avalanche AND impacting the safety of the dam and on the other hand the severity of this phenomenon, linked to the volume of water released downstream by overflow at the crest.

This process also requires a certain number of hypotheses, necessarily in the sense of safety (lake at its reference level, unfrozen surface, etc.) but which, cumulatively, can increase the return period represented. For example, what is the real probability of a major avalanche during the pre-season period when the water level is maximum? Likewise, the ranges of parameters involved in the calculation [1] (and which first covers other types of impacts such as landslides) can show an application outside the limits of the model, in the conservative way. In this sense, the approach is rather and positively inclusive and confirms the need for a study at the crossroads between avalanche expert, risk analyst and project owner operator.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la réalisation d'une Etude De Danger (EDD) de barrage en site montagneux, les avalanches peuvent faire partie des aléas à intégrer à l'analyse. Ces avalanches peuvent éventuellement constituer une menace directe sur l'infrastructure elle-même et ses équipements mais sont surtout à l'origine de possibles vagues de submersion suite à leur impact dans la retenue d'eau.

En effet, l'interaction d'un mouvement gravitaire rapide comme les avalanches avec le plan d'eau d'une retenue produit des effets hydrodynamiques complexes. Dans la zone d'impact, la pénétration plus ou moins rapide d'une quantité importante de matériau (ici, la neige) met brutalement en mouvement un volume d'eau bien plus grand que le volume de l'écoulement neigeux incident et va constituer une impulsion apte à créer une vague. Celle-ci va ensuite se propager dans le volume d'eau jusqu'à interagir avec les différentes berges : la crête du barrage constitue souvent le point le plus bas et le plus submersible. Sur la base principale de phénomènes comme les glissements de terrain, les processus correspondants sont largement décrits dans [1] qui constitue une référence pour structurer l'évaluation.

Or, les avalanches de neige, bien qu'également citées dans les phénomènes couverts, présentent comparativement des particularités qui peuvent placer certains paramètres à la limite voire hors des fourchettes d'application des différentes équations : vitesses d'impact possiblement importantes mais couplées aux densités de neige les moins impactantes, elles-mêmes toujours inférieures à celle de l'eau, matériau rapidement "imbibable" et présentant une certaine flottabilité, volumes en jeu plutôt faibles par rapport au volume de la retenue d'un barrage hydroélectrique.

Ainsi, s'il existe des événements tristement célèbres liés aux conséquences de telles vagues, ils ont surtout été initiés par des glissements de terrain comme pour le barrage de Vajont en 1963 en Italie (environ 2000 victimes). Peu de cas concernent directement les avalanches, principalement limités à des petites retenues collinaires utilisées sur les domaines skiables pour la production de neige de culture comme à Pelvoux-Vallouise en 2006 ou Saint-Michel de Chaillol en 2009 : Vu la dimension réduite de ce type de réservoir, l'eau y est même plutôt chassée qu'elle ne déborde réellement par submersion. Pour autant et au-delà des catastrophes, il convient de porter une attention aux situations simplement à risques comme le préconise le cadre des EDD.

Dans ce cadre, un protocole a donc été mis au point et appliqué sur différentes retenues des Alpes et des Pyrénées : il combine les différents piliers d'une expertise avalanche, elle-même systématisée grâce à la modélisation pour notamment compenser des données historiques souvent (très) lacunaires. Les résultats sont interprétés et confrontés au calcul de vague selon [1], le cas échéant reprecisé et affiné en fonction des conséquences possibles et de l'enjeu du site en question.

2. DONNEES D'ENTREE

2.1. Les inventaires avalanches et les données historiques

Parmi les premières sources d'information, la CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux – www.avalanches.fr) et l'EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches) permettent d'obtenir des informations historiques précieuses [2].

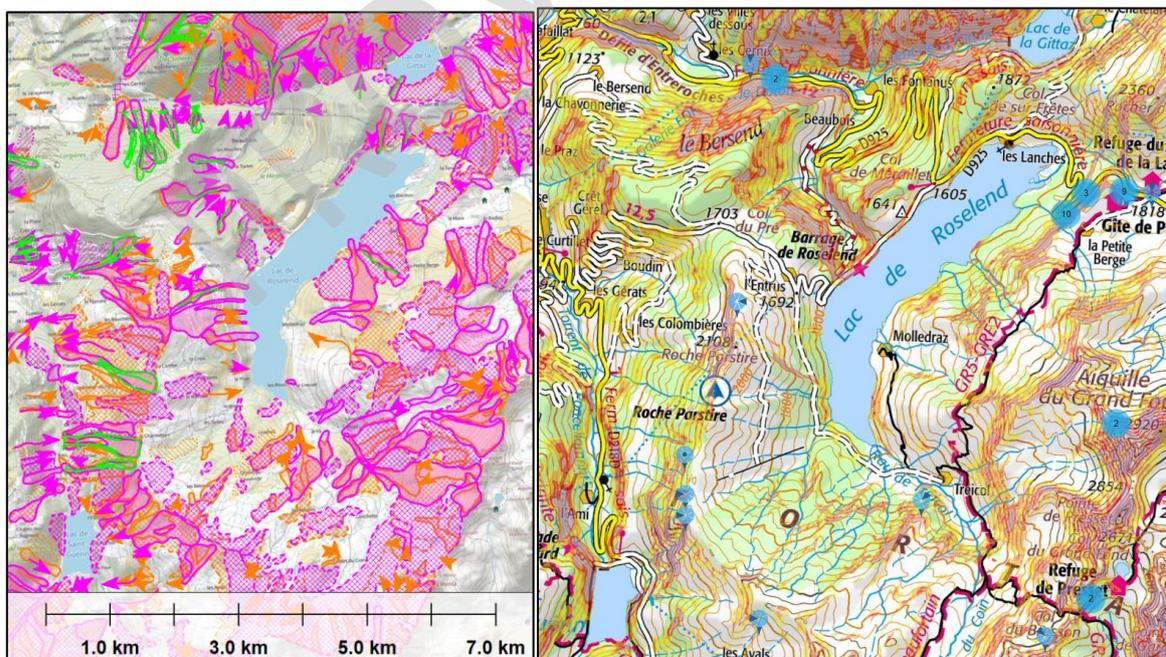


Figure 1 : A gauche, superposition des emprises CLPA de différents niveaux par témoignages (en magenta) ou photo interprétation (en orange) et des couloirs suivis dans le cadre de l'EPA (en vert) pour le secteur des barrages de Roselend, Saint Guérin et la Gittaz (73). A droite, (nombre d') événements recensés sur la plateforme participative data-avalanche.org

La première, initiée au début des années 1970 après la catastrophe de l'UCPA à Val d'Isère (39 morts, majoritairement jeunes le 10 février 1970), est un inventaire cartographique des plus grandes limites atteintes et cumule une approche par témoignage (en magenta – Figure 1) et une approche par photo-interprétation (en orange). Plus de 600 000 hectares ont été ainsi cartographiés dans les Alpes et les Pyrénées et sont régulièrement mis à jour (permettant de déceler les évolutions entre les différentes éditions pour identifier des événements remarquables particuliers) ainsi que les fiches signalétiques d'accompagnement (qui peuvent apporter des informations supplémentaires sur l'historique et le fonctionnement du couloir). La seconde est une chronique historique d'événements observés sur environ 5000 couloirs sélectionnés (et concernant plutôt des zones habitées à enjeu). Elle est alimentée par un réseau d'observateurs, principalement de l'ONF avec de premiers enregistrements datant de 1900 pour aboutir aujourd'hui à une base de données, unique au monde, de plus de 90 000 événements.

Cependant, ces sources ne sont d'une part pas exemptes d'erreurs ou de lacunes, nécessitant une lecture critique et certains recoupements. Et surtout, la construction des barrages et leur mise en eau a pu aussi noyer les extrémités des trajectoires historiques et donc éliminer une partie de l'information pour caractériser complètement les événements les plus importants qui se sont produits (et souvent "définis" par leur extension longitudinale).

Enfin, la couverture des massifs montagneux n'est pas complète et les barrages les plus reculés, en l'absence d'autres enjeux, peuvent aussi être dans les zones "blanches" de ces inventaires. Il s'agit alors d'explorer d'autres sources, notamment auprès de l'exploitant avec des situations très variables : avant la prise de conscience des années 1970, le sujet s'avère peu abordé dans les différents projets d'infrastructures nationaux, y compris donc pour la majorité des barrages qui datent du grand programme d'hydroélectricité de la période 1945-1960. En revanche, un grand barrage plus récent comme Grand Maison dans les années 1980 a pu bénéficier d'un véritable service avalanche au sein du "collège Inter-entreprises d'hygiène et de sécurité" (CIEHS) du groupement en charge de la construction. Ce service était en collaboration directe avec les instituts "nouvellement" en charge de ces questions (CTGREF devenu CEMAGREF, ANENA) y compris pour en faire des objets d'études et d'expérimentations [3] [4], notamment déjà sur la problématique des vagues et de leur évaluation numérique [5].

En l'absence de ce support, il faut alors se tourner vers d'autres informations à l'échelle du massif ou de la vallée via les différents acteurs qui peuvent documenter ce genre d'événements : associations historiques, bases de données participatives en ligne comme data-avalanche.org (Figure 1), clubs de montagne ... Pour autant et si la retenue n'a pas noyé un ancien village, une zone d'alpage ou se situe en dehors des itinéraires de (ski de) randonnée les plus fréquentées, la quête peut être vierge.

Reste alors les anciens clichés de l'IGN désormais disponibles sur le Géoportail et dont les plus anciens datent des années 1930-1940. Sur cette base, deux possibilités ... et un peu de chance : si le site d'étude est en-dessous de la limite de la forêt, il est possible d'"identifier" des limites (au moins latérales) de trajectoires avalancheuses dans le couvert forestier (Figure 2). Sinon, il faut espérer des prises de vue (pour lesquelles la finalité topographique induit des dates sont souvent estivales/automnales justement pour éviter une couverture neigeuse gênante) pour lesquelles il subsiste des traces de dépôts plus ou moins anciens. Enfin et avec les couvertures satellites récentes qui se multiplient avec des passages réguliers toutes saisons, il est aussi possible de récupérer des vues hivernales montrant les restes et conséquences d'un événement particulier pour peu d'avoir pu en identifier la date (Figure 2) ou au moins des exemples de distributions neigeuses influencées par le vent (zones de congères ou au contraire érodées...)

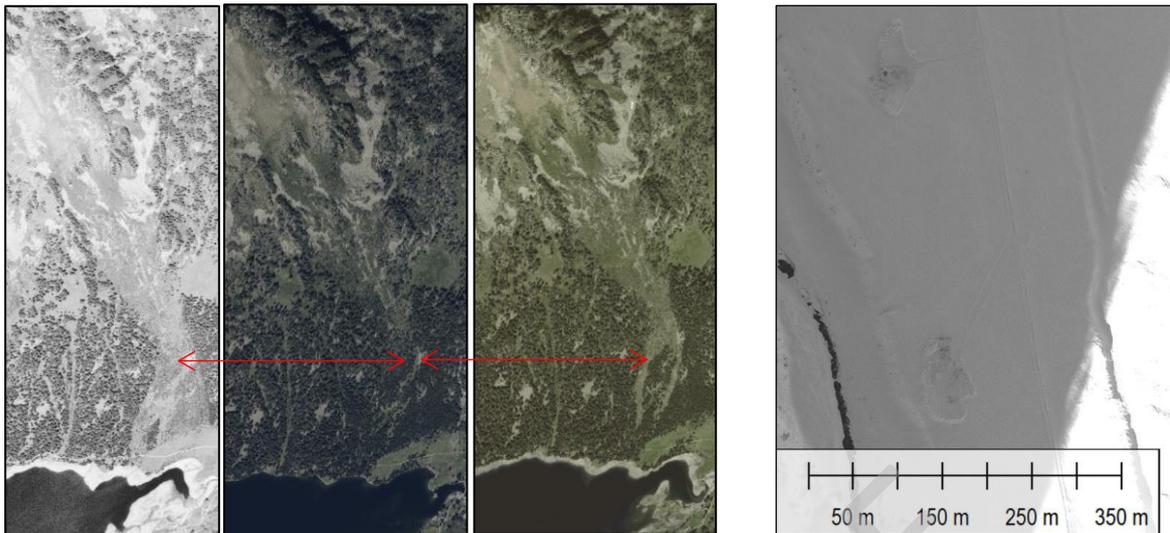


Figure 2 : A gauche, comparaison du couvert forestier à l'extrémité du barrage de l'Oule (65) à partir des clichés IGN de 1989, 2013, 2019. A droite, image WorldView1 de Digitalglobe des travaux de déblaiement de pylônes électrique quelques jours après une avalanche aérosol au Kamchatka

2.2. La situation topographique et les observations de terrain

Si l'objectif de la recherche précédente est de récolter un maximum d'éléments historiques quant à des avalanches passées, le fait d'avoir à se projeter dans des scénarios potentiels plus importants (et donc non observables car éventuellement non encore existants) nécessite aussi d'étudier en détail le terrain. Pour cela, les observations expertes sur site sont inévitables, notamment au travers d'au moins une mission photo hélicoptérée pour multiplier les points de vue (de face, en plongée...).

En complément, l'émergence récente du LidarHD de l'IGN (<https://geoservices.ign.fr/lidarhd>) pour l'instant sous forme de nuages de points classés pour toutes les Alpes et les Pyrénées, permet de disposer d'un véritable "jumeau numérique" du site, très précis (résolution inférieure au mètre alors que les supports photogrammétriques pouvait fournir un résultat assez émoussé dans les zones de relief) et peu lacunaire pour garantir la fiabilité de la représentation et pouvoir multiplier les requêtes et les traitements géomatiques au cours de l'analyse. Ainsi, chaque étude est supportée par un outil de type SIG pour compiler toutes les données mais aussi disposer de cartes de pentes, d'orientation, de concavité et déjà procéder à des analyses de sous-bassins versant.

La réalisation des relevés LidarHD à des périodes où la retenue peut être à un niveau inférieur à sa cote de référence permet aussi d'avoir souvent la couverture des premiers mètres immergés (vision complétée le cas échéant par des relevés bathymétriques quand la retenue en dispose) : cette zone est importante pour qualifier au mieux les conditions de première interaction entre l'avalanche incidente et la retenue.

2.3. Les données nivo-météorologiques

Bien que d'autres facteurs puissent en être à l'origine (très fort redoux par exemple), les précipitations sont le principal facteur météorologique qui ait un lien (relativement) direct avec les grandes crues avalanches. Les épaisseurs de neige mobilisables sont donc classiquement estimées à partir de l'analyse statistique correspondante sous l'hypothèse qu'une avalanche d'une période de retour donnée est elle-même issue de l'épaisseur mobilisable correspondante [6]. Il faut cependant signaler l'aspect délicat de ce genre d'estimations :

- Les séries de données disponibles sont courtes (quelques décennies au mieux) et il est donc hasardeux de faire des extrapolations à (trop) long terme. Les valeurs erronées ou manquantes ne sont pas non plus rares dans les séries de données brutes (défaillance des appareils de mesure, impossibilité d'accéder).
- Les méthodes statistiques comportent toutes leurs biais et les valeurs des précipitations extrêmes sont définies avec une certaine imprécision.
- D'autres influences (transport de neige par le vent) peuvent contribuer de manière non négligeable aux épaisseurs présentes mais sans nécessairement disposer d'informations tangibles pour les sites en question.

Avec l'attitude prudente nécessaire, le document suisse [7] fait toujours référence pour structurer la démarche et définir l'épaisseur d_0 mobilisable dans une zone de départ d'avalanche donnée : s'agissant d'avalanches naturelles (et non déclenchées volontairement ou accidentellement par des skieurs par exemple), le paramètre "source" prépondérant est celui du cumul de neige récente, considéré classiquement sur une période de 3 jours et donc à lier aux périodes de retour.

En pratique, le CEMAGREF (désormais renommé Inrae) a réalisé en 2006-2007 une étude [8] ayant permis d'établir les temps de retour des précipitations pour de nombreux postes du réseau pluviométrique de Météo-France et de disposer de données "officielles" pour les points de mesures correspondants. La variable analysée dans cette étude est la hauteur des précipitations hivernales exprimée en millimètres d'eau jusqu'à 3 jours et un temps de retour jusqu'à 100 ans. L'échantillon sur lequel s'effectue l'ajustement de la loi de probabilité est constitué de l'ensemble des maxima hivernaux. Cette base de données très complète nécessite "juste" de convertir la lame d'eau en épaisseur de neige équivalente : pour cela une valeur de densité de 125 kg/m³ pendant la chute est communément admise. Cependant, les précipitations pluri-centennales ne sont pas évaluées.

En parallèle, les stations de ski mesurent normalement très régulièrement un certain nombre de données d'observations météorologiques pour la surveillance du manteau neigeux en période hivernale : idéalement il s'agit de la hauteur quotidienne de neige fraîche transmise de manière conventionnée à Météo-France pour compilation et centralisation et désormais disponibles sous forme de données publiques depuis 1996 (<https://donneespubliques.meteofrance.fr/> Licence ouverte d'Etalab). Ce type de chronique est également parfois disponible à proximité même du barrage étudié. Pour ces statistiques spécifiques, est également privilégiée la méthode des maxima hivernaux, en l'occurrence des plus forts cumuls saisonniers sur 3 jours. Ces valeurs permettent ensuite de déterminer le gradex des chutes de neige (le gradex donne le taux d'accroissement de la variable en fonction du temps de retour) ainsi que le mode (plus grande valeur systématiquement dépassée) pour appliquer la méthode des moments en vue de l'ajustement de la loi statistique (type Gumbel [9] – Figure 3).

Spécifiquement pour les périodes de retour pluri-centennales (300 ans habituellement), une alternative raisonnable est de lier les cumuls tri-centennaux aux cumuls trentennaux en observant qu'ils sont normalement très bien corrélés (ratio entre 1.3 et 1.45, en moyenne de 1.4). Une fois ces valeurs liées aux périodes de retour obtenus, il convient donc de les corriger pour obtenir l'épaisseur mobilisable cette fois sur la pente de la zone de départ, en intégrant le tassement, la différence d'altitude (gradients nivométriques entre 1 et 2cm/jour/100m [10]) et en tenant compte de la déclivité : jusqu'à 28° (valeur limite en-deçà de laquelle la stabilité du manteau est considérée comme acquise sauf exception), la conversion hauteur / épaisseur est triviale par application du cosinus. Au-delà, la stabilité décroît avec une augmentation de la pente. Autrement dit, les accumulations mobilisables vont avoir de plus en plus de difficultés à se "construire" au cours de

l'épisode de chute jusqu'à être considérées comme régulièrement purgées au-delà de 50-55°. [7] évalue ainsi un facteur de pente par analogie avec le critère de Mohr-Coulomb.

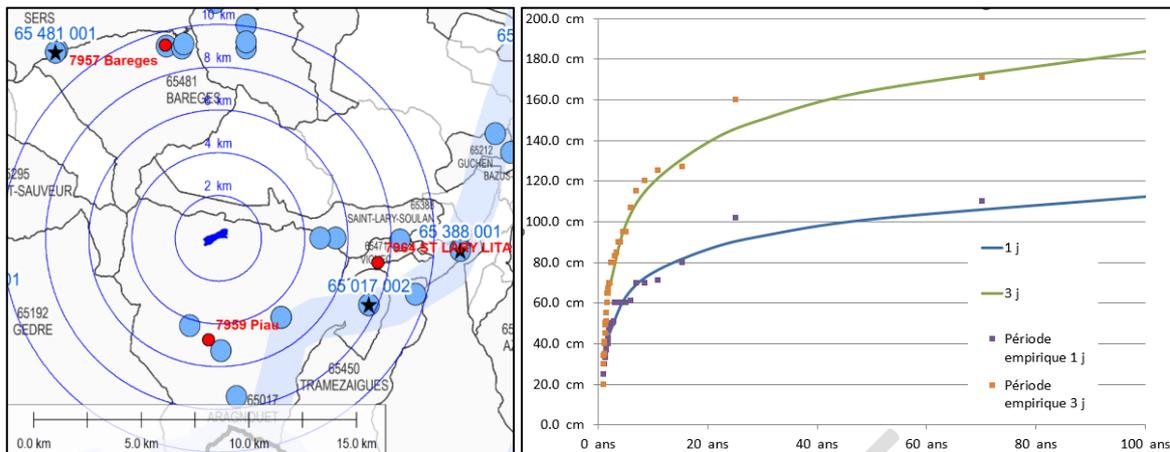


Figure 3 : A gauche, répartition des postes de mesures Météo-France (en bleu dont ceux, étoilés, ayant fait l'objet de prédéterminations par le Cemagref [8]) et des postes "stations de ski" (en rouge) autour de la retenue de l'Orédon (65). A droite, ajustement d'une loi statistique de type Gumbel pour les données du poste de Barèges

Finalement et à partir de chaque source sélectionnée (Figure 3), on peut donc obtenir par période de retour l'épaisseur mobilisable en moyenne sur toute la surface potentielle de déclenchement (en notant qu'elle ne correspond pas à l'épaisseur mesurée le long de la ligne de rupture et qui peut être localement bien plus importante/spectaculaire). En général, le résultat est assez homogène et/ou représentatif de répartition bien connues dans certains massifs (par exemple gradation ouest-est marquée pour le massif de l'Oisans) mais aussi déjà influencé par les conséquences du changement climatique encore plus à l'œuvre dans les montagnes [11]. Il s'agit donc de combiner/moyenner les valeurs issues des différentes sources permettant à la fois une approche conservative mais aussi représentative des conditions étudiées.

3. METHODOLOGIE

3.1. Généralités

L'analyse des phénomènes avalancheux à des fins quantitatives (en l'occurrence ici leur influence quant à la génération d'une possible vague de submersion) doit répondre aux objectifs fixés dans l'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages et qui stipule expressément la situation accidentelle d'avalanche. Cet exercice s'approche des exigences pour les retenues d'altitude utilisées pour la production de neige de culture [12] et qui consiste à définir spatialement les avalanches capables d'atteindre la retenue, évaluer quantitativement les différents paramètres de "l'impact" et appliquer les équations de [1] pour obtenir la vague possiblement induite.

Concernant les périodes de retour, les occurrences "ordinaires" (période de retour trentennale), "plus rares" (centennale) et "exceptionnelles" (tri-centennale) habituelles en ingénierie paravalanche sont évaluées de manière exhaustive. Au-delà des épaisseurs mobilisables correspondantes, ces périodes de retour sont également connectées à des scénarios de déclenchements plus ou moins étendus et coordonnés. A noter que par rapport à des problématiques hydrologiques, ces périodes de retour couvrent une gamme beaucoup plus faible, à la fois limitée par la calibration des outils disponibles mais aussi par les caractéristiques de la neige qui ne peut s'accumuler indéfiniment sur une pente.

3.2. En pratique

Les données historiques sont complétées de modélisations systématiques : le logiciel de référence RAMMS (<https://ramms.ch/>) de l'Institut Fédéral Suisse d'Etudes des Avalanches à Davos est utilisé avec sa loi d'écoulement basée sur des équations hydrauliques classiques d'un milieu continu moyenné sur l'épaisseur. La masse de l'avalanche est entraînée par la gravité tout en subissant la résistance au sol d'un frottement combiné de type Coulomb et visqueux associé au carré de la vitesse d'écoulement. Il s'agit de ne modéliser que la partie dense de l'écoulement mais qui est la seule préjudiciable, l'éventuel aérosol étant considéré comme une phase trop aérienne et trop peu dense pour générer une véritable vague (Figure 7).

Pour réaliser ces modélisations, la première étape consiste à définir l'ensemble des zones de départ potentielles : pour cela, une analyse compilant observations de terrain et analyse des pentes, des orientations et des courbures est menée. Vu des éléments historiques souvent lacunaires, l'approche se veut volontairement la plus exhaustive possible pour couvrir des événements potentiels bien au-delà des seuls cas avérés. Selon l'évolution historique du couvert forestier, des zones de départ supplémentaires peuvent ainsi également être intégrées dans les secteurs concernés. Chacune de ces zones de départ est définie par sa surface au sol, sa pente et son altitude moyennes ce qui permet de calculer l'épaisseur mobilisable correspondante selon le processus précité. Un des paramètres prépondérants pour une modélisation donnée est alors le choix de la catégorie de volume qui va gouverner le comportement de l'avalanche.

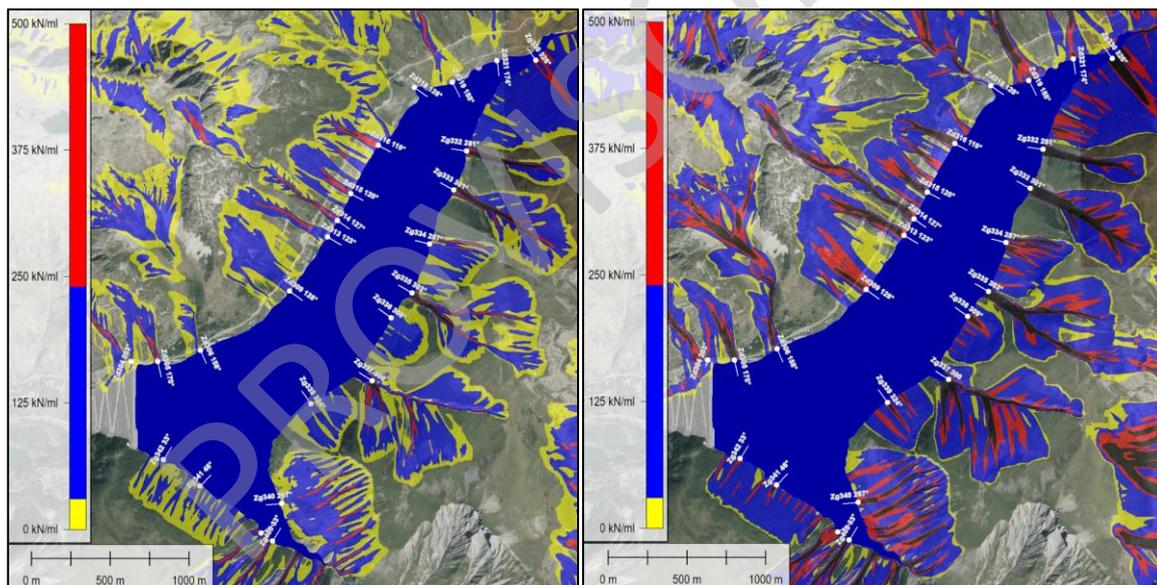


Figure 4 : Modélisations exhaustives restituées sous forme de l'intensité potentielle (obtenue par multiplication des hauteurs et pressions maximales) des avalanches autour de la retenue du barrage de Grand Maison à l'occurrence trentennale (à gauche) et tri-centennale (à droite). Chaque point blanc correspond à un exutoire avec indication de l'azimut de l'impact

In fine, c'est bien l'interprétation de l'ensemble des informations - historique, observations de terrain, modélisations le cas échéant selon une approche paramétrique - qui permet de définir les valeurs "d'impact" nécessaires et pas seulement la restitution brute des résultats des calculs numériques. L'absence d'une occupation hivernale continue des sites étudiés reste le cas échéant une limite importante quant à de possibles phénomènes passés inaperçus/loin de tout témoin et compensée au mieux par la multiplication des situations envisagées. A ce titre, la plus préjudiciable reste celle de conditions nivologiques majeures dès le début de saison hivernale : dans ce cas, l'avalanche rencontrera une retenue encore (au plus) haut et dégelé ce qui constituerait le cocktail le plus défavorable quant aux conséquences possibles de la vague induite. Le cas échéant, des

investigations complémentaires notamment basées sur des analyses raffinées des événements passés [13] peuvent permettre d'en relativiser (partiellement) la portée (Figure 5).

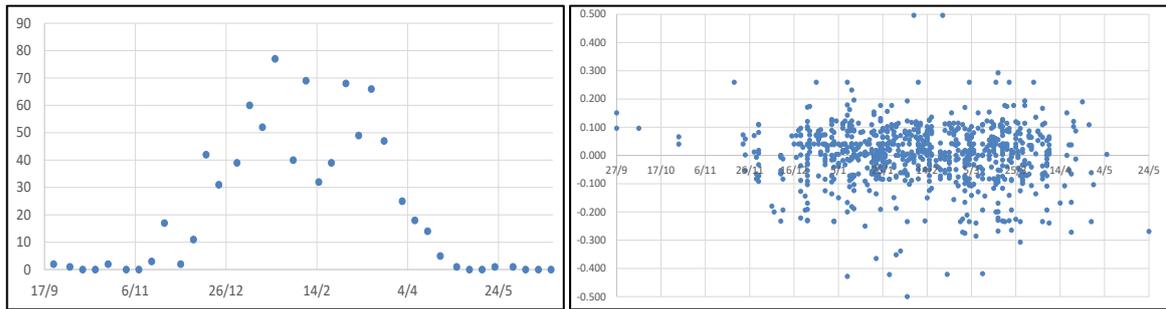


Figure 5 : Traitements [13] de tous les enregistrements EPA disponibles pour la commune de Beaufort (73) : à gauche répartition du nombre d'avalanches hebdomadaires. A droite, répartition saisonnière selon l'indice I1 de la différence d'altitude d'arrivée par rapport à la moyenne de cette altitude (valeur positive = avalanche plus longue que sa moyenne et inversement)

De même et faute de mieux, les valeurs interprétées pour l'impact considèrent l'approche conservatrice d'une pénétration "maximale" du corps de l'avalanche avec les valeurs qu'aurait un "impacteur" plus ou moins monolithique sans diffusion, ni humidification progressive, ni freinage sur le fond ni influence de sa flottabilité : dans ces conditions, le corps de l'avalanche pénètre le lac sans obstruction/interaction selon la trajectoire (direction, vitesse) et les caractéristiques (épaisseur, largeur) qu'il a à l'altitude de retenue considérée. Mais ceci peut dépendre d'une bathymétrie défavorable (très faible fond et/ou diminution importante de la pente) qui pourra fortement empêcher la pénétration de tout le volume avalancheux et/ou générer un fort ralentissement avec étalement.

Le point précédent sous-entend également une certaine durée de la pénétration de l'écoulement avalancheux dans le lac, à la vitesse d'impact supposée maintenue. Contrairement par exemple à une chute d'un bloc rocheux qu'on pourrait considérer globalement par son volume total avec un impact "immédiat", l'avalanche va certes impacter la retenue mais d'abord selon sa surface de front (largeur x épaisseur) et sans mobiliser le volume total. Selon la topographie notamment plus ou moins confinée, celui-ci pourra mettre plusieurs (dizaines de) secondes pour pénétrer dans le lac ce qui pourra amener à discuter le volume représentatif à retenir pour, le cas échéant, étayer le résultat du calcul de vague.

Enfin, il s'agit aussi de considérer le cas échéant des scénarios graduels selon la situation des différents sous-bassin versants. Il s'agit donc de bien structurer l'approche, en retenant :

- D'une part et prioritairement, une liste finie de points d'impacts "représentatifs".
- D'autre part, des cas d'impacts "génériques" qui peuvent toucher toute une partie du pourtour des lacs mais pour lesquels il serait vain d'entrer dans le détail. Il s'agit typiquement des possibles coulées de talus mais normalement non préjudiciable. A ce titre, un certain nombre de cas sont d'emblée filtrés par exemple parce que d'un volume et d'une vague potentielle négligeables.
- Ensuite, il s'agit de considérer une coordination possible entre zones de départ : à l'occurrence trentennale, l'indépendance est en général assez évidente mais se complexifie avec des périodes de retour plus élevées : à T=300ans, les scénarios correspondent le plus souvent à des déclenchements simultanés de versants entiers, recouvrant plusieurs voire de nombreuses lignes d'écoulement contigües : au niveau du lac, elles peuvent arriver en différents points ... et à des moments différés. Dans ce cas, les valeurs fournies pour un point d'impact donné correspondent à la partie d'écoulement cohérente avec ce point d'impact,

indépendamment des points d'impacts voisins pour lesquels les conditions préjudiciables peuvent aussi correspondre à un autre scénario.

4. CALCUL ANALYTIQUE DE VAGUE

En prolongement des analyses précédentes qui permettent de convertir prudemment chaque cas d'aléa avalanche considéré en un impactant de caractéristiques physiques définies (masse volumique, vitesse, dimensions géométriques : épaisseur, longueur, largeur), la phase ultime est de procéder au calcul de vague de sa génération initiale par l'impact, en passant par sa diffusion dans la retenue jusqu'à son interaction avec l'ouvrage.

4.1. Equations [1]

Pour cela, [1] fait référence et fournit un protocole complet d'équations pour aborder ce sujet y compris désormais selon une possible géométrie tridimensionnelle lorsque l'impact ne vise pas directement le barrage. L'objectif est d'obtenir l'amplitude de la crête de la vague lorsqu'elle atteindra le parement amont du barrage, c'est-à-dire une fois générée par l'impact puis diffusée jusqu'à l'ouvrage pour enfin interagir avec lui en termes de run-up [1].

Différentes étapes sont suivies sur la base du renseignement de différents paramètres, certains définissant la configuration de la retenue, d'autres l'impact de l'écoulement et enfin l'interaction de la vague avec le barrage. Le premier résultat est l'obtention de la géométrie maximale des 2 premières vagues générées (Figure 6), potentiellement les plus importantes, à la position où ce maximum se produit. Ce calcul [1] est notamment paramétré par la valeur de l'impulsion P :

$$P = FS^{1/2} M^{1/4} \{ \cos[(6/7)\alpha] \}^{1/2}$$

avec l'angle d'impact α (en ° Figure 6) et les nombres adimensionnels suivants : $F =$ Froude, $S =$ épaisseur relative du glissement = épaisseur réelle/profondeur d'eau h , $M =$ Masse relative.

Celle-ci permet ensuite d'obtenir l'emplacement de la génération maximale en définissant "l'ellipse" correspondante, puis les amplitudes maximales initiales dans l'axe principal avant de les propager jusqu'au point d'impact contre le barrage. Dans le cadre de l'interaction correspondante et si d'autres sources comme [14] proposent des formulations alternatives, [1] assume quelques lacunes notamment en cas d'angle d'incidence biaisé : le principe est alors de se ramener au schéma bidimensionnel, éventuellement conservatif pour définir le run-up R (ci-dessous avec $\varepsilon = a/h$) ce qui permet d'obtenir le cas échéant la valeur du volume \forall de débordement [1] par-dessus l'ouvrage.

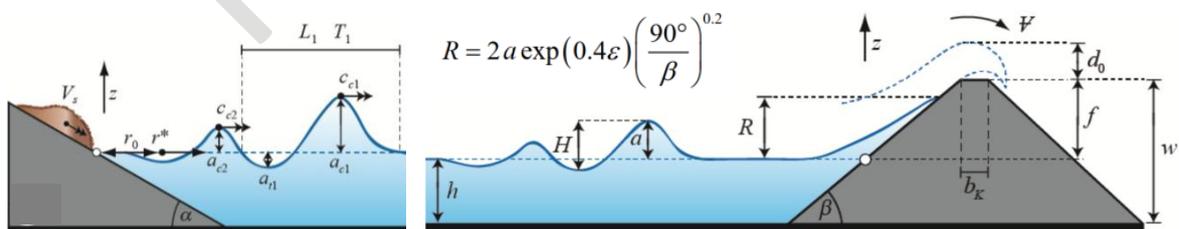


Figure 6 : à gauche, représentation schématique de la zone d'impact, à droite du Run-up R selon [1]

4.2. Champs d'application

En plus des aspects inhérents à l'évaluation proprement dite des avalanches, deux points d'attention sont à lister ici : le premier tient à l'évaluation même des caractéristiques de l'impact pour un phénomène dont les propriétés sont quand même différentes de celles d'un glissement de terrain. Ainsi, les conditions de dépôts et de refoulement sont modifiées et augmentées qui peuvent réduire

le volume de neige effectivement pénétrant dans la retenue. Ensuite, la différence de densité du milieu dans lequel se déplace l'avalanche peut favoriser une certaine flottaison, elle-même contrebalancée par l'imbibition et l'augmentation progressive de la teneur en eau de l'écoulement immergé dans la retenue (Figure 7). Enfin, l'interaction avec une possible couche de neige voire glace à la surface de la retenue, pourtant possible (Figure 7) et potentiellement influente n'est pas considérée.



Figure 7 : Différentes interactions entre une avalanche et une retenue d'eau : "survol" sans conséquence d'une avalanche aérosol à Stjernøy (Norvège) le 8 avril 2014 (www.nrk.com), submersion du dépôt d'une grosse avalanche coulante dans une rivière à Thompson Pass près de Valdez Alaska en janvier 2014 (Youtube) et Exemple de coulées d'avalanche sur un lac gelé au Canada (source web)

Le second point d'attention concerne les champs d'application restreints des équations tel que précisés dans [1]. Ainsi les avalanches peuvent s'avérer directement à la limite concernant par exemple la densité relative : sa valeur doit être supérieure à 0.59 (ce qui confirme la prise en compte des matériaux "flottables") alors qu'on considère régulièrement 0.3 pour la neige. [1] stipule cependant expressément que le protocole peut aussi être appliqué à ce matériau, au moins dans le cadre d'une évaluation préliminaire.

Un autre paramètre qui sort assez directement des critères du modèle est l'angle d'impact, que [1] a considéré à partir de 30° alors que les topographies en jeu peuvent induire des valeurs (bien) plus faibles. De même et parmi les autres grandeurs qui peuvent apparaître hors du cadre préconisé, elles le sont principalement par défaut notamment par rapport aux dimensions de la retenue : Or, des valeurs d'épaisseur ou volume inférieures conduisent à un Run-up d'autant plus faible. Au-delà du champ d'application du modèle [1] qui considère des événements "relativement" importants, les conséquences des avalanches sont donc plutôt surestimées. En soi, cela va dans le sens de la sécurité mais peut aussi ensuite poser problème si la submersion induite est en fait trop surévaluée et conduit à une évaluation en fait erronée. Il s'agit alors de tâcher d'ajuster au mieux les quelques cas qui peuvent se trouver dans cette situation soit en procédant à une analyse paramétrique supplémentaire pour caractériser le "comportement" du cas en question et/ou l'étayer de considérations annexes par exemple sur le niveau effectif de la retenue pour s'affranchir du problème, la capacité/rapidité opérationnelle à atteindre ce niveau ...

5. CONCLUSION

Même si les avalanches restent un phénomène naturel complexe, a fortiori pour des sites isolés bénéficiant de peu d'observations directes, leur étude peut être structurée via différents outils et références éprouvés. En parallèle, le comportement d'une vague dans une retenue de barrage bénéficie de la référence [1].

Les problématiques principales ici sont donc à la fois liées à la conjonction d'un niveau de retenue élevé avec les événements les plus rares et surtout à la définition fiable des paramètres de l'impact.

Si [1] confirme son applicabilité aux avalanches, celle-ci est quand même moins directe que pour les glissements de terrain qui présentent d'autres propriétés.

Positivement, les résultats obtenus vont normalement dans le sens de la sécurité mais ce qui peut aussi générer des incertitudes quand les conséquences de ces résultats s'avèrent par ailleurs préjudiciables (important débordement par-dessus le barrage par exemple)

Ainsi, une des perspectives dans ce domaine est sûrement de mener quelques recherches opérationnelles dédiées en commençant idéalement par quelques expérimentations à échelle réaliste pour mieux situer le niveau de "conservativité" des résultats analytiques avec la réalité.

RÉFÉRENCES

- [1] Evers, F.M., Heller, V., Fuchs, H., Hager, W.H., Boes, R.M. (2019). Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation. VAW-Mitteilungen 254, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), (R. M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.
- [2] Bourova E., Maldonado E., Leroy J-B., Alouani R., Eckert N., Bonnefoy-Demongeot M., Deschatres M. (2016), A new web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in France, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 1205–1216,
- [3] CTGREF (1978), Etude des risques d'avalanches, Aménagement hydroélectrique de Grandmaison, rapport
- [4] CEMAGREF (1987), Proposition d'expérience Grand Maison, rapport
- [5] Vila, J. P. (1987) La prevision des vagues produites par la chute d'une avalanche dans une retenue. In *Avalanche Formation, Movement and Effects* (ed. H. Gubler & B. Salm), pp. 509–518. Davos: IAHS, Wallingford, Oxfordshire, U. K
- [6] Meunier M, Ancey C, Richard D. (2005) Conceptual approach to the study of snow avalanches, Cemagref,
- [7] Burkard A., Salm B. (1992) Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit do zur Berechnung von Fließlawinen/Estimation de l'épaisseur moyenne de déclenchement do pour le calcul des avalanches coulantes, rapport interne n°668, IFENA, Davos
- [8] Cemagref-MEDD (2007) Guide technique de présentation et d'emploi de l'inventaire des postes et de la prédétermination des précipitations hivernales (pluies) pour les avalanches
- [9] Ancey, C. dir. et al. (2006). *Dynamique des avalanches*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 334p.
- [10] Witmer U, Erfassung (1986), Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in des Schweiz/ Acquisition, traitement et cartographie des données sur la neige en Suisse, Institut Géographique de l'Université de Berne, Berne
- [11] Erwan Le Roux (2022), Non-stationary modelling of snow-related extremes in the French Alps: analysis of past and future trends, Thèse de doctorat
- [12] Peyras L., P. Mériaux (coord) (2009) Retenues d'altitude, Editions Quae
- [13] Engineerisk pour le compte d'EDF (2022), Saisonnalité des avalanches, massif du Beaufortain
- [14] BAW Code of Practice, Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB), Issue 2010, Karlsruhe · March 2011 · ISSN 2192-9807