

MODELISATION 2D D'UNE AVALANCHE HISTORIQUE EXCEPTIONNELLE, POUR LE DIMENSIONNEMENT DE TOURNES CAS DE L'AVALANCHE DE LA SACHE AUX BREVIERES DE TIGNES (SAVOIE)

Stéphane Roudnitska¹ and Mohamed Naaim²

RÉSUMÉ

En 2008, la commune de Tignes a confié au service RTM de l'ONF le soin de dimensionner une protection permanente contre une avalanche analogue à celle qui avait dévasté une douzaine de maisons aux Brévières et fait 9 victimes en 1881. Cette demande a fait suite au classement en zone inconstructible d'une partie du hameau dans le Plan de Prévention des Risques. Etant donnée la complexité du site, il a été décidé de recourir à une modélisation 2D de cette avalanche de référence, avec l'appui du Cemagref et après avoir entrepris une reconstitution historique de l'événement. Les résultats nous ont orienté vers un couple de tournes très volumineuses, qui ont ensuite été testées en les intégrant au MNT utilisé pour la modélisation. Ce procédé nous a permis d'améliorer le dispositif mais de souligner aussi les limites de la modélisation. Au final, les travaux, qui ne sont pas encore programmés, réduiraient sensiblement l'exposition de la partie sud du hameau.

Mots-clés : avalanche, dense, exceptionnelle, modélisation numérique, tournes, zonage réglementaire

ABSTRACT

In 2008, Tignes municipality asked the RTM service to design a permanent passive protection system in Brévières hamlet, taking as a reference event the large avalanche that devastated a dozen of houses and killed 9 people in 1881. This technical request is mainly motivated by the new legal risk mapping that rendered the area of Brévières hamlet unbuildable. After compilation of the historical data, and given the complexity of the site, we resorted to an intensive use of 2D numerical modeling in order to reproduce the reference event. A first step consisted in using a large-scale model to determine the friction parameters and the characteristic of the flow at the entry of the run-out zone, in particular the evolution of discharge over time. A refined model of the run-out zone was then used to study the interaction between the flow and several combinations of protective structures. Different shapes and dimensions of dams were introduced in the digital terrain model. The best solution, in terms of protection, was obtained by a combination of two large dams. Besides allowing to design a system that reduces the exposure of the southern part of the hamlet, this collaboration between a technical service (RTM) and a research institute (Cemagref) also allowed to test new modelling tools in operational conditions.

Keywords: snow avalanche, dense, extreme event, numerical modeling, deflecting dams, risk mapping.

¹ Stéphane Roudnitska. Office National des Forêts - Restauration des Terrains en Montagne, service départemental de la Savoie, 42, quai Charles Roissard 73 026 Chambéry Cedex, France.

Tel : +33 (0)4 79 69 96 05 ; fax : +33 (0)4 79 96 31 73. (e-mail : stephane.roudnitska@onf.fr)

² Mohamed Naaim. Cemagref de Grenoble – UR ETNA, 2 Rue de la papeterie, Domaine universitaire, 38402 Saint Martin d'Hères, France. Tel : 33 (4) 76 76 27 22 ; Fax : 33 (4) 76 51 38 03. (e-mail : mohamed.naaim@cemagref.fr)

INTRODUCTION

Le 12 février 1881, une avalanche de neige poudreuse d'une puissance colossale submergeait les gorges de la Sache, barrait le lit de l'Isère et recouvrait la moitié sud du village des Brévières de Tignes, sur la rive opposée. Une douzaine de maisons furent ensevelies sous 10 à 20 m de neige et de débris d'arbres. 33 personnes furent surprises dans leur sommeil et emmurrées chez-elles (1/3 de la population de l'époque). Après cinq jours de recherches éprouvantes, on déplora 9 décès (dont 3 par noyade, l'Isère ayant envahi plusieurs maisons pendant quelques heures) et de nombreux blessés. Cette avalanche, l'une des plus catastrophiques de Savoie, n'était jamais descendue si loin de mémoire d'homme et ne s'est pas reproduite dans de telles proportions depuis (quatre avalanches ont approché l'Isère, mais sans jamais la traverser). Un tel événement, aussi rare soit-il (période de retour apparemment supérieure au siècle), n'en reste pas moins le plus fort connu, postérieur au Petit Age Glaciaire et survenu dans un site qui n'a quasiment pas évolué depuis. Au titre de la doctrine nationale, le phénomène devait donc être pris en compte dans le Plan de Prévention des Risques naturels de Tignes, réalisé en 2005. Une part importante du village des Brévières, devenu station de ski, s'est donc retrouvée en zone de risque fort, soumise à de très fortes contraintes souvent incompatibles avec une réhabilitation du bâti ancien.

La commune de Tignes a accepté ce zonage mais a souhaité qu'une étude soit engagée pour dimensionner des protections paravalanches efficaces à long terme contre ce phénomène de référence, et susceptibles de réduire le niveau d'exposition et les contraintes d'urbanisme sur les Brévières. La solution apparue rapidement comme la plus appropriée fut la réalisation d'une ou deux tournes en sortie de couloir, permettant de dévier le flux vers une zone non habitée. Compte tenu de la complexité du site et des trajectoires possibles, le service RTM de Savoie, missionné pour cette expertise, a proposé que les ouvrages soient dimensionnés sur la base d'une simulation numérique en 2D de l'avalanche coulante de 1881. Pour ce faire, il a demandé l'appui du Cemagref de Grenoble - unité ETNA. L'approche naturaliste de l'expert RTM associée aux connaissances théoriques du chercheur, lui-même auteur du modèle, ont été un atout indéniable pour mener à bien cette mission.



Fig. 1 Localisation de l'avalanche de la Sache sur la commune de Tignes

Fig. 1 Location of the Sache avalanche in the city of Tignes.

METHODOLOGIE

L'étude s'est déroulée en sept phases :

- 1) Constitution d'un modèle numérique de terrain sur l'ensemble de l'emprise de l'avalanche de 1881 ;
- 2) Synthèse de tous les éléments de connaissance de l'avalanche de 1881 et de la nivologie locale pour paramétrer au mieux la modélisation 1D puis 2D du phénomène de référence ;
- 3) Simulations itératives avec Saint Venant 2D de l'avalanche de référence sur terrain actuel ;
- 4) Pré-dimensionnement des tournes, à l'aide des données historiques, des résultats de modélisation et des contraintes du site, puis insertion des ouvrages dans le MNT ;
- 5) Simulation 2D de l'avalanche de référence interférant avec les tournes, puis proposition d'amélioration du dispositif pour réduire le risque résiduel sur les Brévières ;
- 6) Nouvelles simulations pour valider le dispositif ainsi amélioré, en précisant son rôle sur l'extension du phénomène ;
- 7) Définition du risque résiduel sur Les Brévières vis-à-vis de ce scénario.

RECONSTITUTION HISTORIQUE DE L'AVALANCHE DE 1881

Pour comprendre le déroulement et l'emprise de cet événement exceptionnel, vieux de 130 ans, nous nous sommes appuyés sur :

- ♦ la carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA) et les témoignages associés (2005) ;
- ♦ les photos de Paul Mougin (Eaux et Forêts) prises les jours suivant la catastrophe ;
- ♦ les articles de journaux de l'époque (Courrier des Alpes, Revue Savoisième...) ;
- ♦ des monographies sur l'histoire, la géographie et les avalanches de Tignes et de la Hte Tarentaise ;
- ♦ des cartes postales des Brévières datant du début du XXème siècle ;
- ♦ le cadastre de Tignes datant de 1905 ;
- ♦ plusieurs campagnes de photos aériennes et des vues récentes du couloir.

Outre les faits déjà énoncés en introduction, ces documents nous ont appris que l'avalanche était survenue après une semaine de chutes de neige qualifiées de considérables en Haute Tarentaise. Sa zone de départ se situerait sur le flanc sud-est de la Grande Parei, vers 2800 – 3000 m d'altitude. Les photos de P. Mougin prises quelques jours après l'avalanche (lorsque la route fut réouverte) fournissent des indications précises et indiscutables sur la dynamique et l'ampleur du phénomène, et notamment sur sa largeur extraordinaire dans les gorges de la Sachette (cf. fig. 2). Les noms des bâtiments ou des propriétaires de bâtiments ensevelis nous ont aussi aidé, en complément du cadastre et des photos d'époque, à cartographier les dépôts et leurs épaisseurs dans le village.

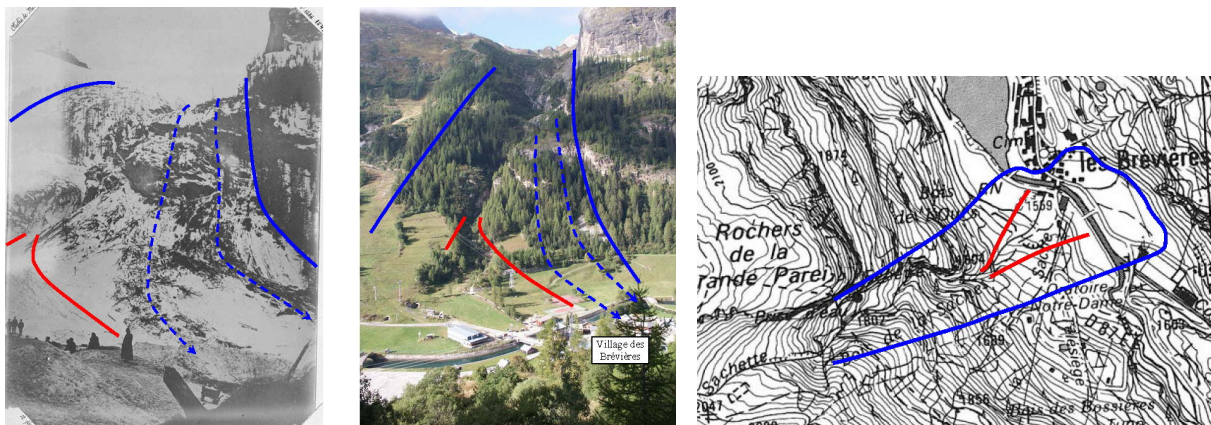


Fig. 2 à 4 Tracé de l'emprise et des dépôts principaux de l'avalanche de 1881, grâce aux photos de P. Mougin

Fig. 2 à 4 Contours of the main deposit of the 1881 avalanche, determined from the pictures by P. Mougin.

VALIDATION DE LA TRAJECTOIRE DE REFERENCE

Concernant la zone de départ, les récits de l'avalanche de 1881 font tous référence au versant sud-est de la Gde Parei mais diffèrent sur l'origine exacte du phénomène (qui n'était d'ailleurs peut-être pas visible). Certains habitants pensent qu'une rupture de sérac sur la crête sommitale, à plus de 3000 m, en serait la cause et qu'une telle avalanche n'est plus possible aujourd'hui avec le recul des glaciers. En réalité, les glaciers de l'Inverneau et de la Martin ne surplombaient déjà plus ce versant à la fin du XIX^{ème} siècle. Cette hypothèse apparaît donc bien fragile, et les fortes chutes de neige de la semaine précédente apparaissent logiquement comme le principal facteur déclenchant. L'analyse topographique du versant et les photos de l'avalanche de 1999 nous ont conduit à privilégier comme zone d'apport principale une pente d'éboulis inclinée à 39°, comprise entre 2950 et 2800 m.

La CLPA établit un lien directe entre cette zone de départ et le village des Brévières (couche majenta tracée d'après témoignages). Toutefois, s'agissant d'un vallon éloigné des zones habitées, avec plusieurs replats et plusieurs zones de départ intermédiaires, il était nécessaire de vérifier la vraisemblance de cette longue trajectoire par une analyse géomorphologique, complétée par des simulations rustiques de l'écoulement dense, à l'aide du modèle « Saint Venant 1D ». Nous avons compris qu'il s'agissait d'une avalanche à seuils, se déposant sur des replats intermédiaires en conditions normales, mais parvenant à les franchir et même à gagner en puissance en conditions de forte reprise de neige fraîche. Nous avons réussi à reproduire les dépôts de 1881 avec un départ à 2950 m, une hauteur initiale de neige mobilisée égale à 3 m, une hauteur moyenne de neige reprise égale à 1 m, un coefficient de frottement sec de 0,14 et un coefficient de frottement turbulent de 1500 (cf. fig.5). Ces valeurs sont compatibles avec une avalanche exceptionnelle issue d'un pente de haute montagne abritée des vents dominants et alimentée par une épaisse couche de neige froide. S'agissant du même cadre formel de modélisation, nous avons repris ces valeurs d'entrée pour la simulation en 2D.

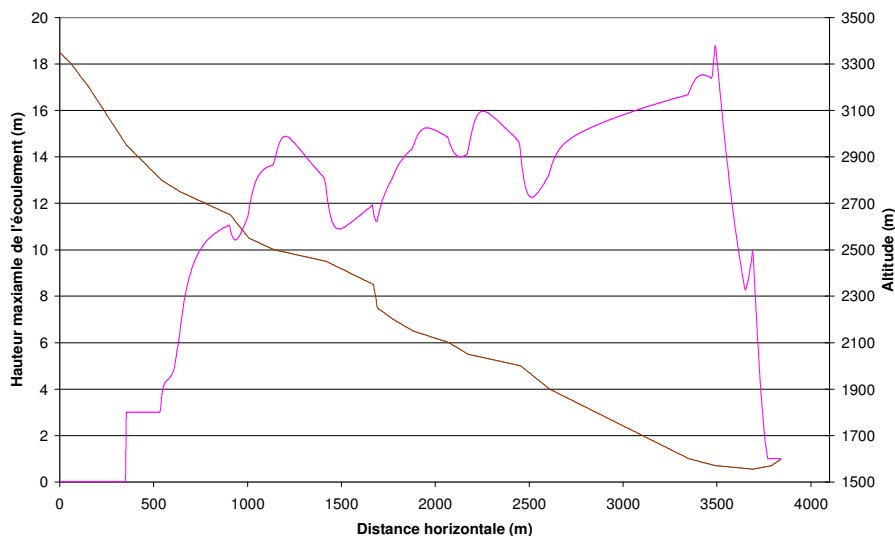


Fig. 5 Hauteur maximale de l'avalanche de 1881, simulée avec Saint Venant 1D.

Fig. 5 Maximum flow height of the avalanche of 1881, simulated using the 1D shallow water model.

SIMULATION EN 2D DE L'AVALANCHE DE REFERENCE SUR TERRAIN ACTUEL

Le modèle numérique de terrain (MNT) a été réalisé sur plus de 300 ha, par stéréo-restitution de photos prises d'avion et d'hélicoptère, avec report des principales ruptures de pente. La densité moyenne des points est d'un tous les 25 m en zone haute et d'un tous les 5 m en zone basse, où sont prévus les ouvrages. A noter que les points relevés correspondent bien au sol et non à la cime des arbres en zone boisée. Ce MNT a ensuite été converti en grille de points au pas métrique, pour les besoins de la modélisation.

Il s'est avéré trop long de faire tourner le modèle au pas métrique dès la zone de départ. Nous avons donc initié un écoulement avec un pas de calcul de 5 m jusqu'à l'entrée des gorges. Cette première phase nous a renseigné sur l'emprise de la phase dense en altitude (plus large que ne l'affichait la CLPA – cf. fig. 6) et sur les caractéristiques de l'écoulement à l'entrée de la zone d'écoulement confinée. Nous avons ensuite relancé une nouvelle simulation à ce niveau, au pas métrique, en retenant une vitesse initiale de 30 m/s, une hauteur d'écoulement de 12 m, une largeur d'écoulement de 160 m, un volume de neige en mouvement de 900 000 m³ (déduit des photos du dépôt de 1881) et une montée du débit très rapide à l'arrivée du front de l'avalanche (déduit des mesures sur sites expérimentaux). L'essai le plus concluant a finalement été obtenu avec un coefficient de frottement sec remonté à 0,17.

Les résultats se sont avérés globalement fidèles à l'avalanche observée en termes d'emprise et de hauteurs de dépôt, avec toutefois un excès de débordement en rive gauche, au droit d'une chicane, générant une trop grande extension vers le cœur des Brévières (cf. fig. 7). Un large débordement s'est pourtant bien produit à ce niveau (en phase dense comme en aérosol) mais nous avons considéré que le modèle surestimait son rôle dans l'endommagement du village. Cette surestimation peut venir en partie d'une insuffisante prise en compte de la perte d'énergie contre les obstacles (gorges) et de la suppression sur le MNT du boisement et des bâtiments sinistrés, qui ont probablement joué un rôle de frein ou d'obstacle.

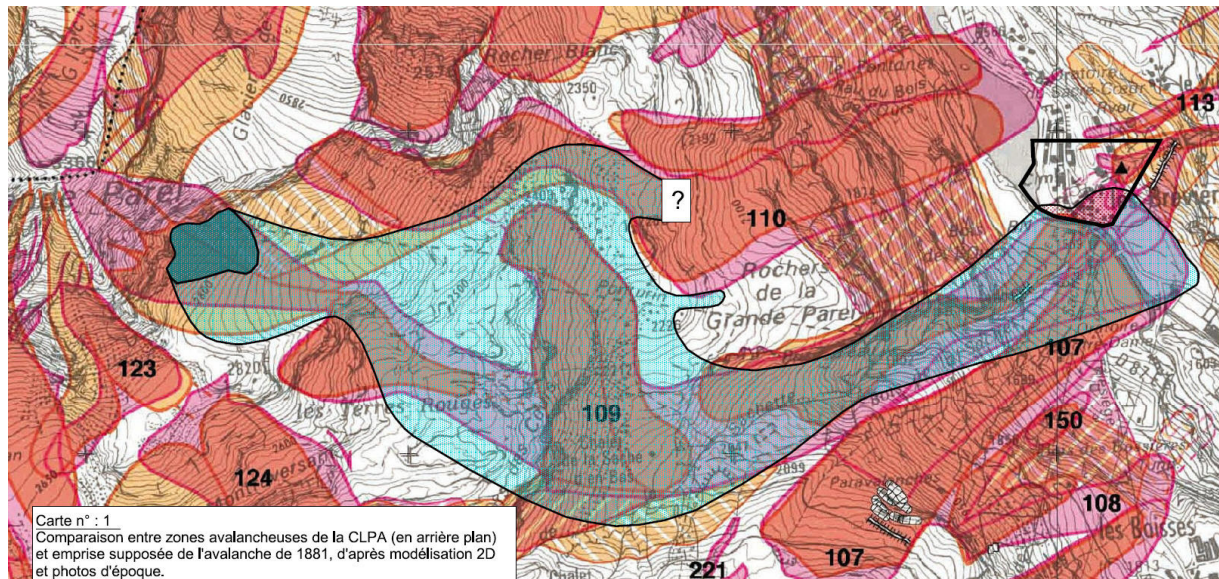


Fig. 6 Comparaison entre CLPA (en fond) et simulation 2D de l'avalanche de référence, en partie haute
Fig. 6 Comparison between the CLPA and the 2D numerical simulation of the reference event in the upper part of the avalanche path.

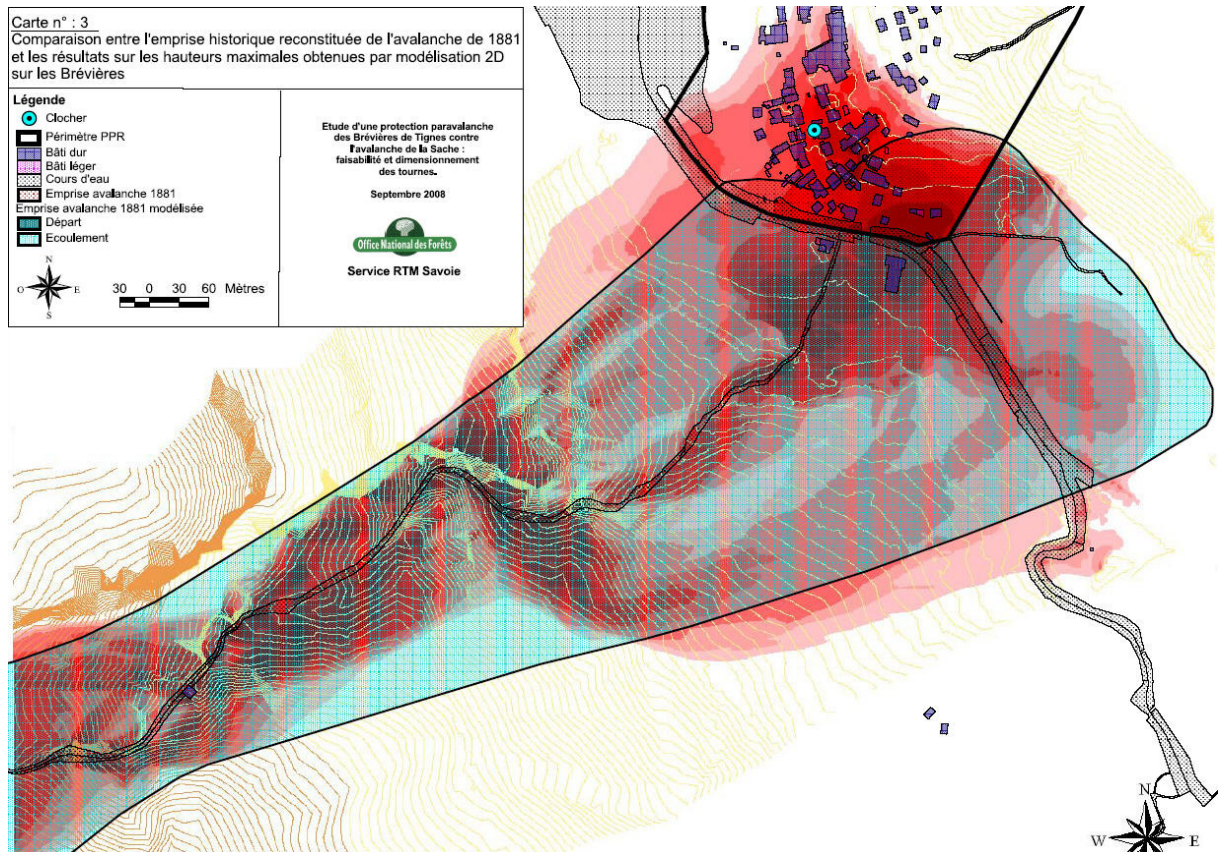


Fig. 7 Comparaison entre hauteurs max. de l'écoulement simulé (en fond) et emprise historique, en partie basse
Fig. 7 Maximum deposit height (2D numerical simulation) and the limits of the reference event in the run-out zone of the avalanche path.

PRE-DIMENSIONNEMENT DES TOURNES ET INTEGRATION AU MNT

Au vu de l'emprise connue des dépôts dans le village, précisée grâce à notre travail de reconstitution historique, et en tenant partiellement compte des trajectoires débordantes mise en évidence par la simulation numérique, nous avons été amené à modifier notre projet initial de tourne. En complément de la tourne principale pressentie au débouché du couloir, une 2nde tourne a donc été retenue au pied du Bois d'Ours, lequel avait été balayé par l'avalanche de 1881. Ce sont donc deux tournes de 150 et 200 m de long qui ont été étudiées. Parallèles et décalées pour intercepter toutes les trajectoires, leur orientation a été optimisée pour ne pas induire une déviation de l'avalanche supérieure à 35° (cf. fig. 8). Leur hauteur utile a été définie avec la formule analytique traditionnelle, en fonction de la hauteur et de la vitesse calculée de l'écoulement incident. Cela nous a conduit à proposer un ouvrage de 16 m de haut au débouché du couloir et variant de 10 à 16 m de haut sous la zone de débordement, avec un raidissement à 80° de la moitié inférieure du parement amont (volume total de remblais d'environ 120 000 m³).

Une fois les emprises d'ouvrages validées par la commune (étape indispensable étant donné les nombreux enjeux touristiques environnants : remontées mécaniques, restaurant, terrains de tennis, pistes de ski, pylône HT), le projet a été affiné en 3D sur le logiciel Covadis et intégré au MNT pour être confronté à la simulation numérique de l'avalanche de 1881.

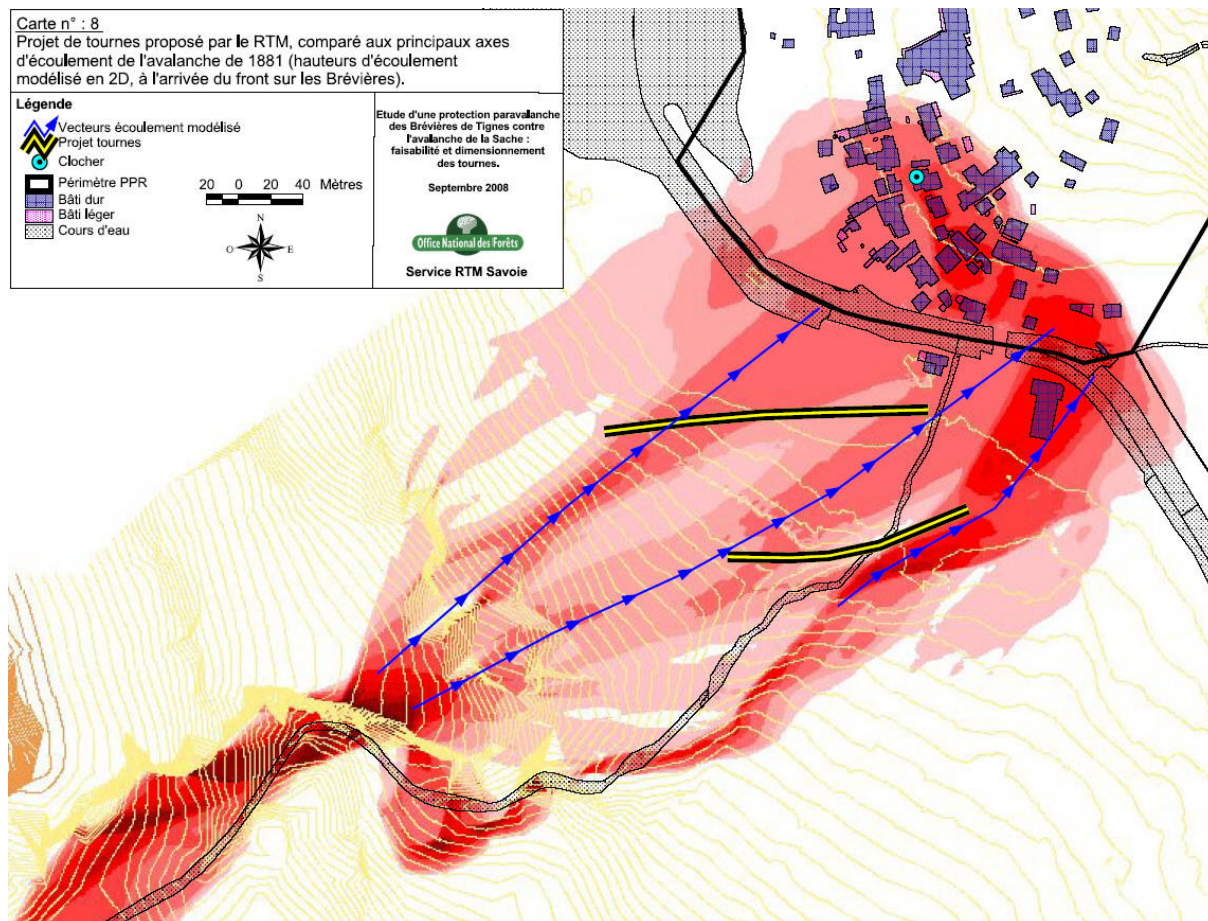


Fig. 8 Axes des tournes proposées, en fonction des trajectoires soulignées par la simulation 2D (hauteurs)
Fig. 8 Deflecting dams axes, determined according to the trajectories obtained thanks to 2D simulations.

SIMULATION 2D DE L'AVALANCHE DE REFERENCE SUR LE PROJET DE TOURNES

Cette nouvelle simulation a été conduite avec les mêmes valeurs de paramètres que la précédente, sur la base d'une grille de points intégrant les déblais – remblais du projet. Les résultats graphiques (vidéo de l'écoulement et cartes de hauteurs et vitesses maximales) ont montré clairement que la tourne secondaire restait sans effet sur le flux débordant (cf. fig 9). Même surestimée, cette surverse nécessitait un rehaussement de l'ouvrage et une augmentation de sa capacité de stockage.

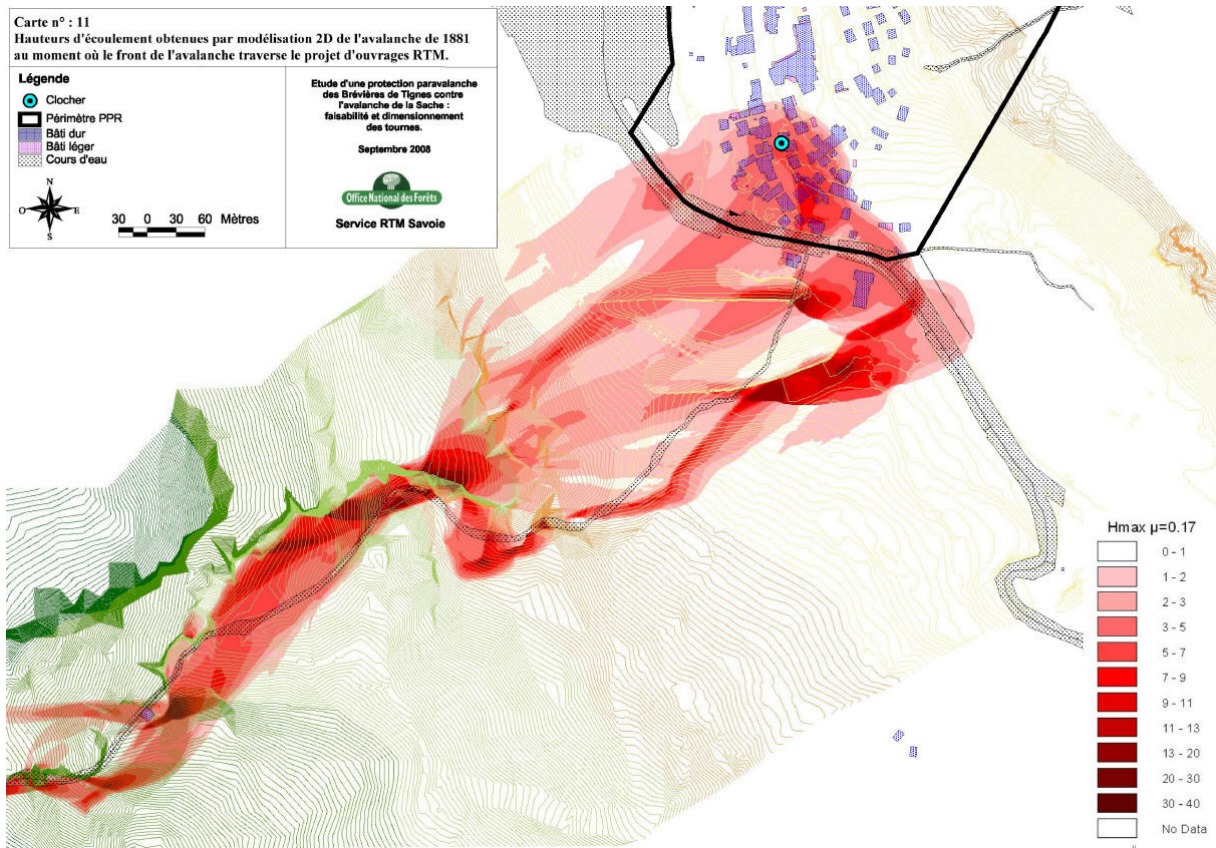


Fig. 9 Hauteurs d'écoulement obtenues au passage du front de l'avalanche sur le projet de tournes
Fig. 9 Flow heights at the front of the avalanche with the deflecting dams.

AMELIORATION DU DISPOSITIF PARAVALANCHE

Nous avons donc choisi de rehausser la tourne secondaire pour qu'elle atteigne partout 16 m de haut (suppression d'un point bas), tout en élargissant sa fosse de réception jusqu'en pied de versant. Ce projet modifié a été validé sur le principe par la commune, à la condition que la piste de ski impactée par les ouvrages soit reprofilée et puisse conserver ses caractéristiques. Les améliorations du dispositif ont été intégrées au projet RTM sur Covadis, avec un volume total de remblais s'élevant désormais à 150 000 m³ (cf. fig. 10 et 11).

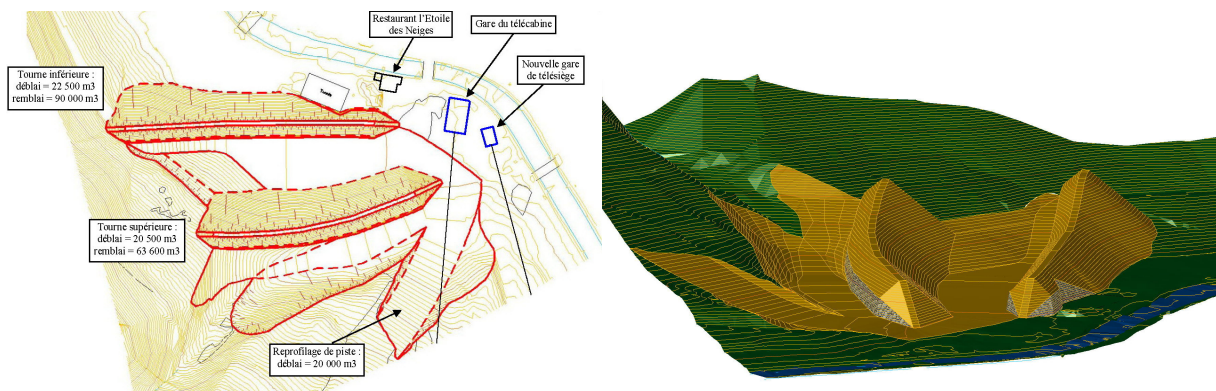


Fig. 10 et 11 Plan topo et vue 3D du projet de tournes amélioré
Fig. 10 et 11 Topographic map and 3D view of the proposed deflecting dams.

NOUVELLES SIMULATIONS 2D – EMPRISE RETENUE APRES TRAVAUX

La deuxième simulation à partir du projet amélioré est restée décevante, le flux débordant ne semblant guère plus perturbé qu'auparavant. Nous avons alors eu l'idée de réduire la pente du front de l'avalanche à l'entrée des gorges, en modifiant à la marge les conditions initiales de la simulation en partie basse (allongement de la durée d'augmentation du débit de quelques secondes, pour tenir compte de l'amortissement de l'onde de crue au fil de son long parcours). Après cette correction tardive, les résultats se sont avérés bien plus proches de notre avis d'expert sur l'efficacité des tournes, tout en restant conformes au scénario de 1881 sans les ouvrages (cf. fig. 12). Un débordement de neige dense se produit encore en rive gauche dans le Bois de l'Ours mais son épaisseur est réduite des 2/3. Ce flux, moins puissant mais plus cohérent avec les photos d'archive de 1881, est correctement dévié par la tourne secondaire. L'application des nouvelles règles de calcul du guide européen pour la conception des digues paravalanches (2009) révèle aussi que la nouvelle hauteur de tourne est suffisante. En revanche, on observe une nette surverse par dessus la tourne principale mais la fosse à l'arrière permet de contenir le phénomène. Au final, le couple de tournes s'avère très efficace pour enrayer la propagation du front de l'avalanche. Si des dépôts finissent par toucher les Brévières, c'est par un mécanisme de vidange progressif de la fosse vers le fond plat de la vallée de l'Isère, du fait de la faible viscosité théorique de la neige retenue par le modèle (cf. fig. 13). D'expérience, on peut s'attendre au contraire à ce que les dépôts figent assez vite et s'accumulent les uns sur les autres, sans se répandre autant autour des ouvrages. Nous avons donc pondéré les résultats du modèle et considéré que l'avalanche dense de référence pouvait encore s'étendre à l'arrière des tournes jusqu'aux toutes premières habitations, sans pour autant recouvrir une bande de 60 m de large en rive droite de l'Isère.

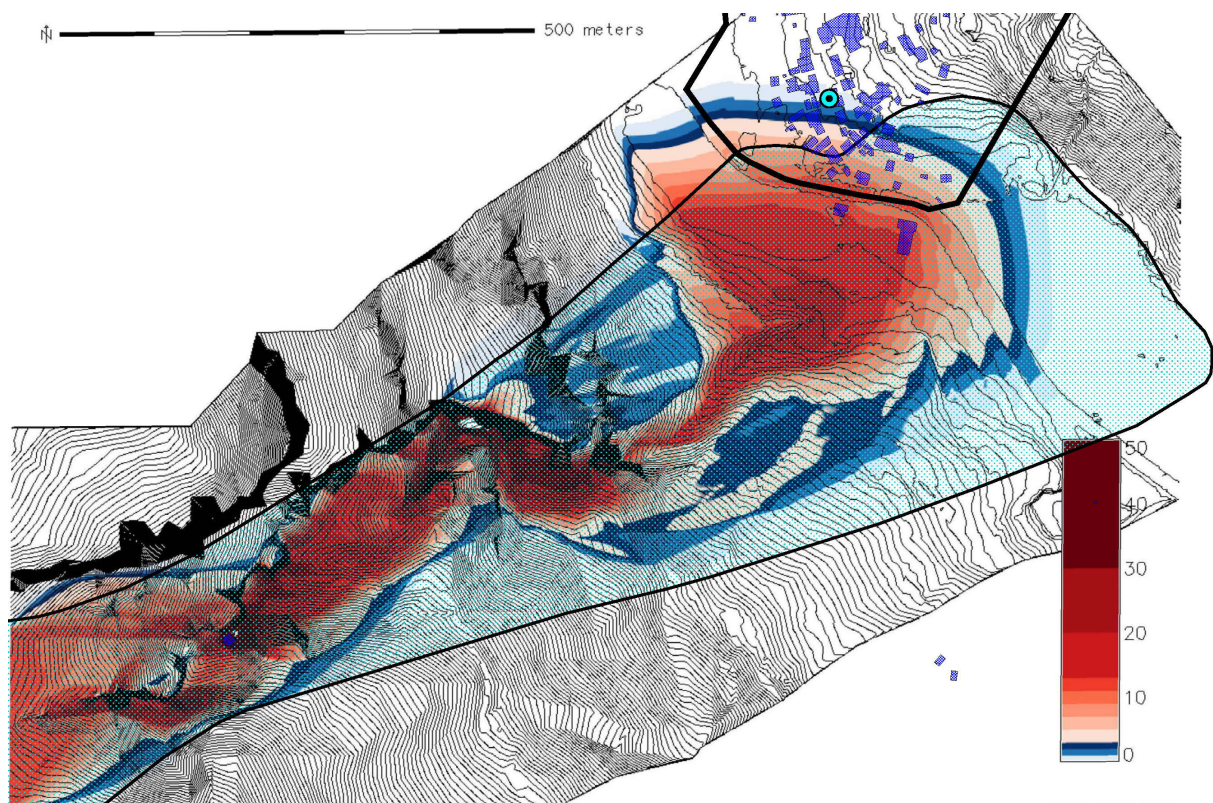


Fig. 12 Comparaison entre hauteurs max. de l'écoulement simulé (en fond) et emprise historique, en partie basse
Fig. 12 Comparison between the max. simulated flow height and the historical extension in the run-out zone.

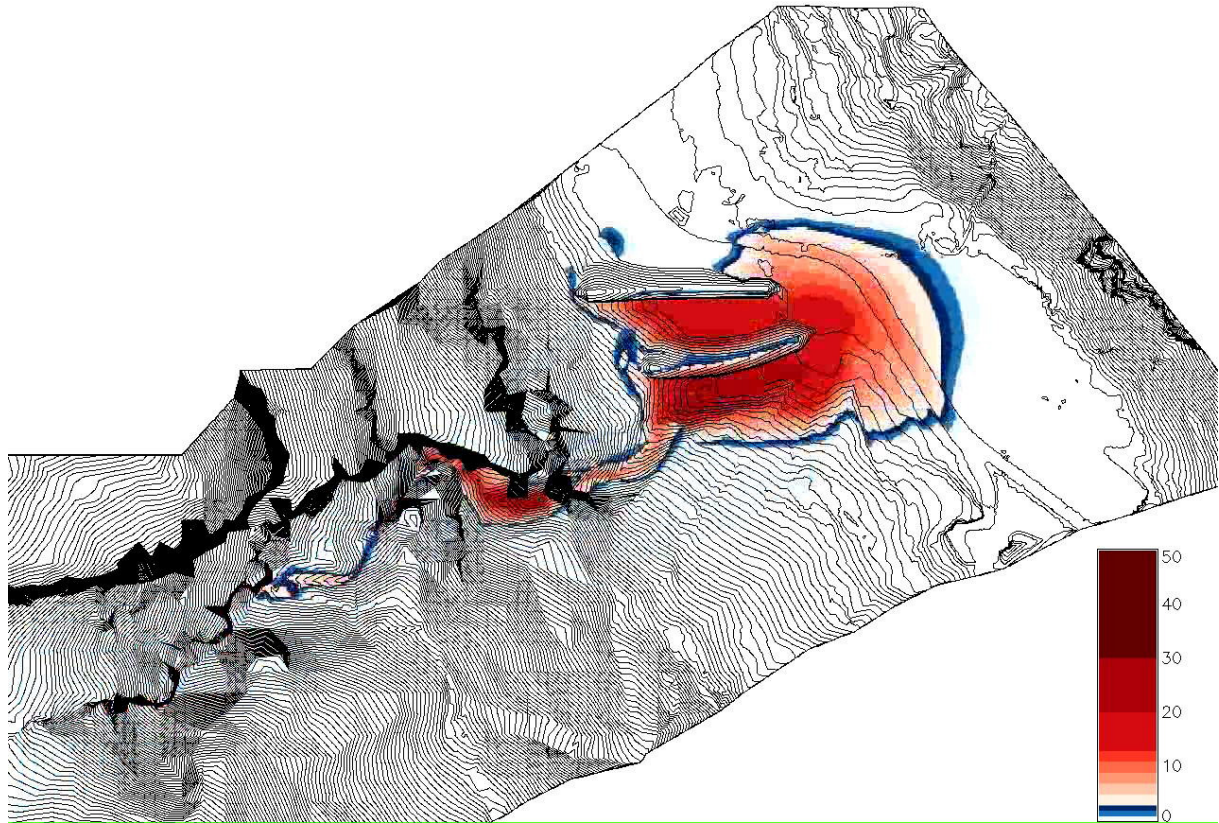


Fig. 13 Hauteurs des dépôts simulés au contact du couple de tournes, en fin d'étalement dans le lit de l'Isère
Fig. 13 Heights of the simulated deposits with the deflecting dams, at the end of spreading area in the Isère river.

RISQUE RESIDUEL A L'ARRIERE DES TOURNES

Vu le caractère très exceptionnel du scénario de 1881, nous n'avons pas retenu, s'agissant de la protection des biens, un scénario aggravé comme la survenance d'une deuxième grosse avalanche sur des tournes déjà remplies. Ce cas de figure peut néanmoins être appréhendé dans le cadre du Plan Communal de Sauvegarde. Nous avons alors estimé les niveaux d'aléas résiduels à l'arrière des ouvrages à partir de la carte des hauteurs de dépôt ci-dessus (cf. fig. 13), du moins pour la phase dense. Concernant la phase aérosol qui a sûrement accompagné l'avalanche de 1881, nous avons considéré que le projet de tournes ne modifiait pas son niveau d'intensité sur le village, sachant qu'il était déjà vraisemblablement faible en 1881, au vu de l'absence de dégât significatif au-delà des dépôts. Au final, les travaux proposés permettraient de réduire significativement l'exposition d'une douzaine de bâtiments existants.

CONCLUSION

Cette mission, menée par le service RTM de Savoie avec l'appui du Cemagref – unité ETNA, s'est avérée à la fois passionnante et complexe. Elle nous a confronté à un cas limite en matière prévention des risques : la prise en compte d'un événement ancien et exceptionnel par son ampleur dans l'aménagement du territoire, en zone d'enjeux forts, qui pourrait conduire à la réalisation d'un ouvrage préjudiciable pour l'environnement. Pour répondre à la demande de la commune qui souhaitait un dispositif capable de garantir la sécurité des habitations, il fallait écarter les techniques ne présentant pas un haut niveau de fiabilité à l'échelle du siècle (déclenchement préventif, réseau d'écrans paravalanches, terrassements en zone de départ...). Cela nécessitait aussi une grande rigueur dans le dimensionnement des ouvrages retenus, basé sur un scénario de référence précis. Ce scénario a été difficile à établir, du fait de l'ancienneté de l'avalanche, de données lacunaires et de la complexité du site. Nous avons déjà à ce stade dû calibrer des hypothèses concernant la hauteur de neige mobilisée, le volume total de l'avalanche, l'hydrogramme, les trajectoires ayant le plus impacté les Brévières... Au-delà de ces choix, se sont greffées des difficultés liées aux limites de la modélisation numérique, avec ici un problème récurrent de similitude entre avalanche observée et avalanche simulée. Nous retiendrons par exemple les limites concernant la prise en compte des pertes d'énergie contre les obstacles, la simplification du terrain dans le MNT et la modélisation de la physique du matériau neige, pourtant particulièrement complexe, dans le modèle.

Après de nombreux essais, nous sommes arrivés à dimensionner un couple de tournes en pied de versant qui répond en grande partie à la demande de sécurisation. Le dire d'expert et les résultats de la modélisation, sur la base de paramètres réalistes, ont pu converger et montrer que le projet réduisait sensiblement l'exposition d'une douzaine de bâtiments sur le sud du village. La solution retenue peut être considérée comme fiable dans la durée (pas d'intervention humaine en période de crise, peu d'entretien) mais elle est relativement coûteuse (0,6 à 1 M€) et surtout très volumineuse, avec un impact visuel fort.

REFERENCES

- Cemagref – ETNA (2006). Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanches (CLPA) sur Tignes. Archives du service RTM Savoie et archives départementales de la Savoie (consultations 2008).
- Commission Européenne – Direction de la Recherche (2009). Conception des digues de protection paravalanches.
- Naaïm M., Faug T., Naaïm F., Eckert N. (2010). 'Return period calculation and passive structure design at the Taconnaz avalanche path, France', *Ann. Glaciol.*, Volume 51, Issue 54, pp 89-97.