



RAPPORT

DIAGNOSTIC DES RISQUES NIVOLOGIQUES & PRESCRIPTIONS PARAVALANCHES

Allongement aval TSD Châtelet (et vérification du reste de la ligne)

V1 03/08/2026 niveau DAET

Rédigé par : Philippe BERTHET-RAMBAUD



+ 33 6 23 75 04 44



pbr@engk.fr

Visa :



Validé par : Fanny BOURJAILLAT



+ 33 6 23 75 06 42



fb@engk.fr

Visa :



Ce rapport, rédigé sans recours à l'IA, contient 40 pages et constitue un tout indissociable; une utilisation partielle n'engage pas la responsabilité d'Engineerisk

Sauf mention contraire : crédits photos Engineerisk / figures en plan orientées nord vers le haut/ Fond orthophoto Géoportail

Référence : FRA586i

Version 1 du 03/08/2026 niveau DAET

REFERENCES

- [1] Visite sur site du 27/02/2026 en compagnie de Jérémy Maillard, Responsable Etudes Travaux Neufs S3V et Raphaël Guzzi, responsable service remontées mécaniques Méribel-Mottaret + échanges téléphoniques avec Romain Hazucka, responsables du service des pistes de Méribel-Mottaret
- [2] DCSA, présentation des différentes variantes de reconstruction TSD Châtelet, ref : ML 226.2641 xxx, 24/03/2026
- [2bis] DCSA, TSD6 Chatelet, ref : ML226.2641 NCL932A, 24/07/2026
- [3] www.avalanches.fr
- [4] MNT issu du LidarHD de l'IGN dans l'état actuel des terrains
- [5] Données publiques de Météo France depuis 1996 (sous <https://donneespubliques.meteofrance.fr/> Licence ouverte d'Etalab

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	4
II.	ETAT DES RISQUES CONNUS	6
A.	Historique : EPA-CLPA	6
B.	Protections	9
C.	Cas de la G1 ₂₀₀₆ et des premiers pylônes (CLPA n°18 & avalanche 2026)	11
III.	SITE & CONTEXTE NIVO-METEO	15
A.	Site - généralités	15
B.	Climatologie [3]	17
C.	Epaisseurs en jeu : mobilisables dans les zones de départ, manteau neigeux établi	18
D.	Evolutions climatiques	21
IV.	SCENARIOS DE REFERENCE ET OUTILS DE MODELISATION	27
A.	Scénarios de référence	27
B.	Charge due au phénomène de reptation	29
C.	Charge des avalanches denses	29
D.	Outil de base – Avalanches denses coulantes – RAMMS	30
E.	Outil de modélisation évolué – RAMMS ::Extended	31
V.	ANALYSES & DISCUSSIONS	33
A.	Ligne existante à partir de P2 ₂₀₀₆ =P2 _{bis(2027)}	33
B.	Zone de la G1 ₂₀₀₆	36
C.	Rallongement de la ligne et décalage du départ vers le nord	39
VI.	CONCLUSION	40

I. INTRODUCTION

Lors de la séquence nivologique remarquable de février 2026, le TSD Châtelet sur le domaine skiable de Méribel-Mottaret (Figure 1) a été impacté le 17 par une importante avalanche déclenchée au niveau de sa G₁₂₀₀₆¹ et de son P₁₂₀₀₆ et rendu inopérant pour le reste de la saison. Le présent rapport procède donc au diagnostic de cet événement en parallèle de fournir les vérifications et prescriptions nécessaires à la configuration définitive de l'appareil [2bis] consistant, parmi les différentes alternatives (ci-contre [2]), à l'allongement de la ligne d'environ une centaine de mètres (Figure 3 - position "G_{1intermédiaire}" dans [2]).

En plus de la nouvelle G₁₂₀₂₇, on note également l'ajout de 2 pylônes, P₁₂₀₂₇ et P₂₂₀₂₇, le P₂₂₀₀₆ historique devenant P_{2bis(2027)} (Figure 3).

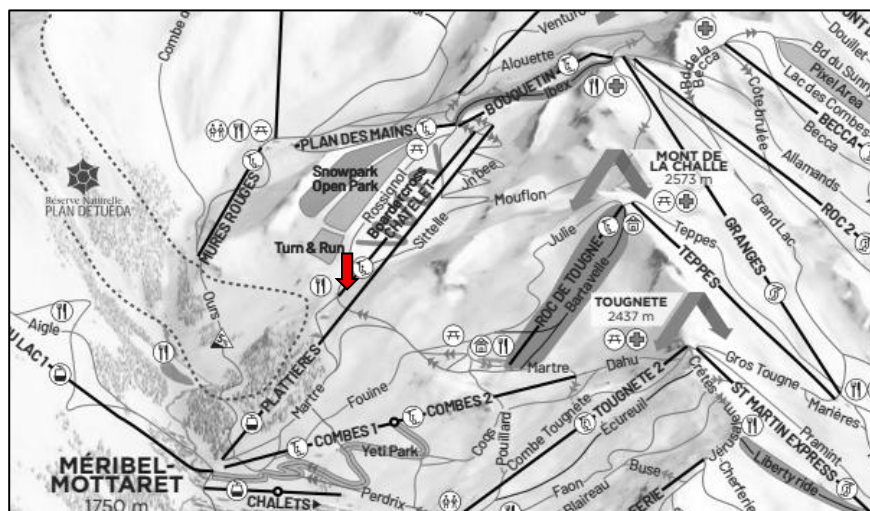


Figure 1 – Localisation du site sur le plan des pistes

¹ Pour éviter les confusions, les éléments de la ligne historique sont indicés 2006 alors que les éléments de l'allongement sont indicés 2027. Les éléments

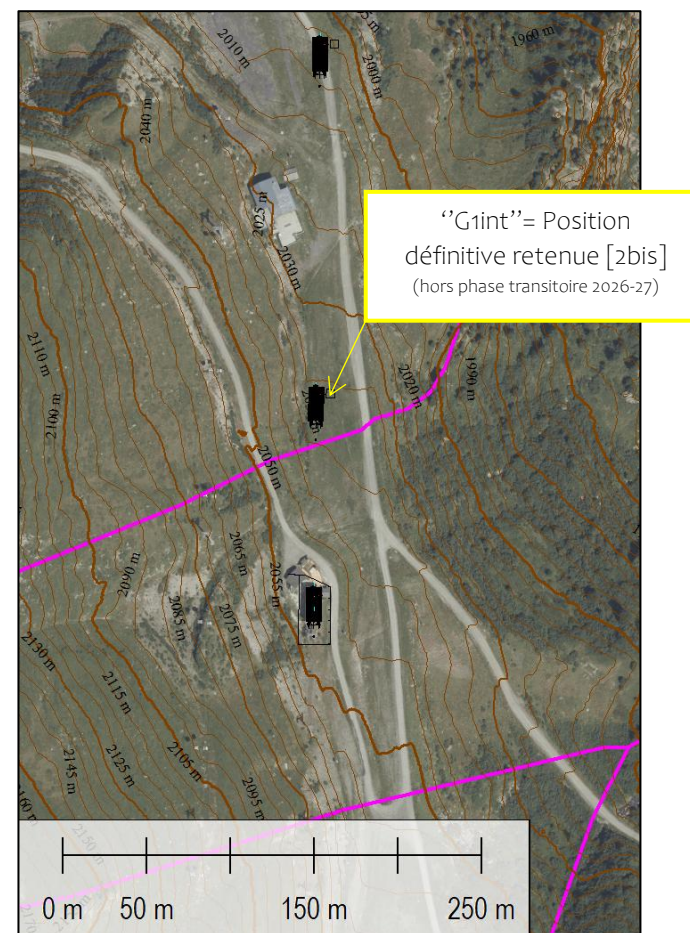


Figure 2 – En noir, vue des 3 implantations envisagées dans [2] (l'actuelle en bas de la

inchangés ne sont pas indicés.

figure) – Limites témoignées de la CLPA en magenta

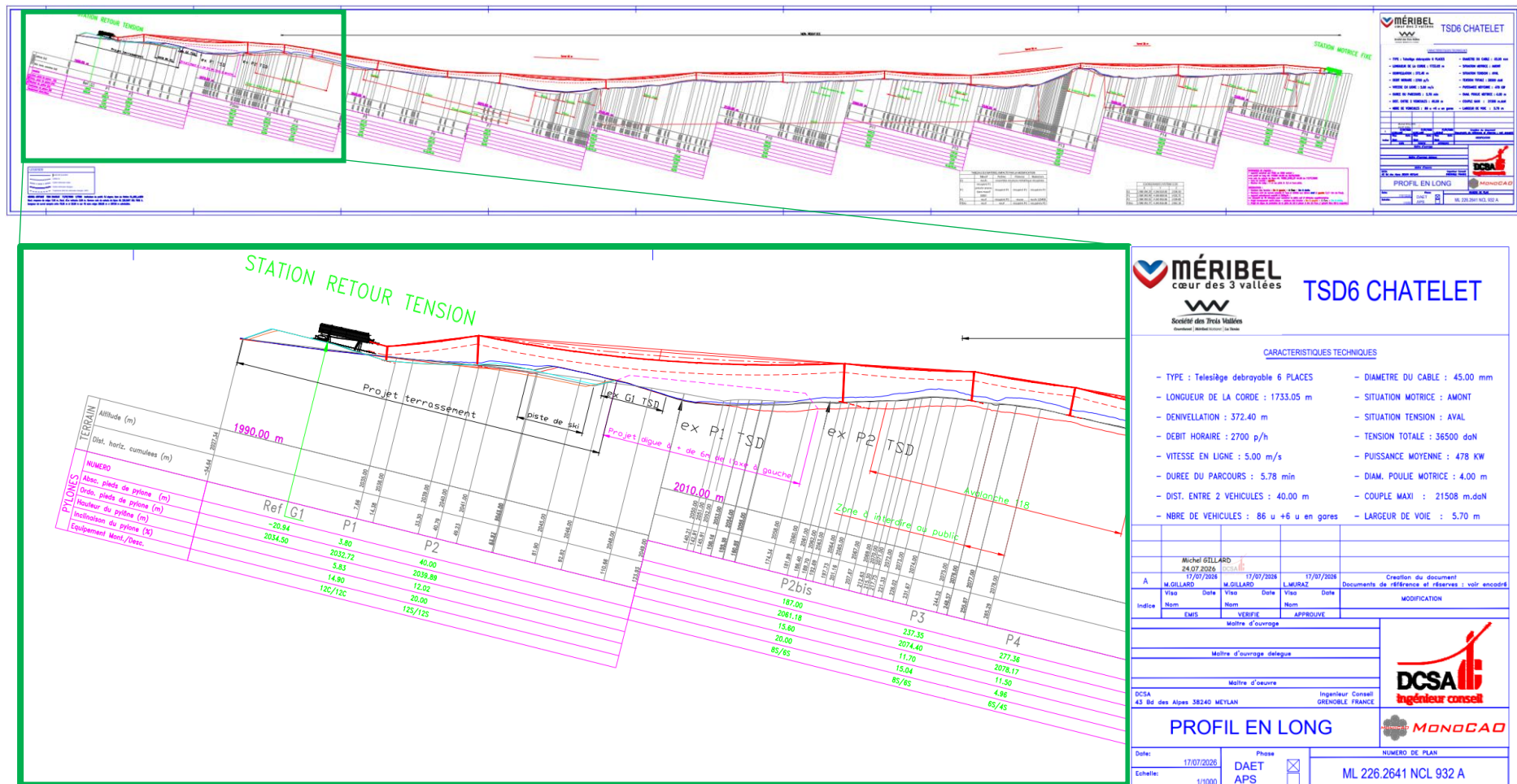


Figure 3 – Présentation de la nouvelle ligne [2bis] avec zoom sur l'allongement aval

II. ETAT DES RISQUES CONNUS

A. HISTORIQUE : EPA-CLPA

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA [3]) depuis la première version de 1970 (à

gauche) jusqu'à aujourd'hui (à droite) en passant par une version intermédiaire de 1990 (au centre).

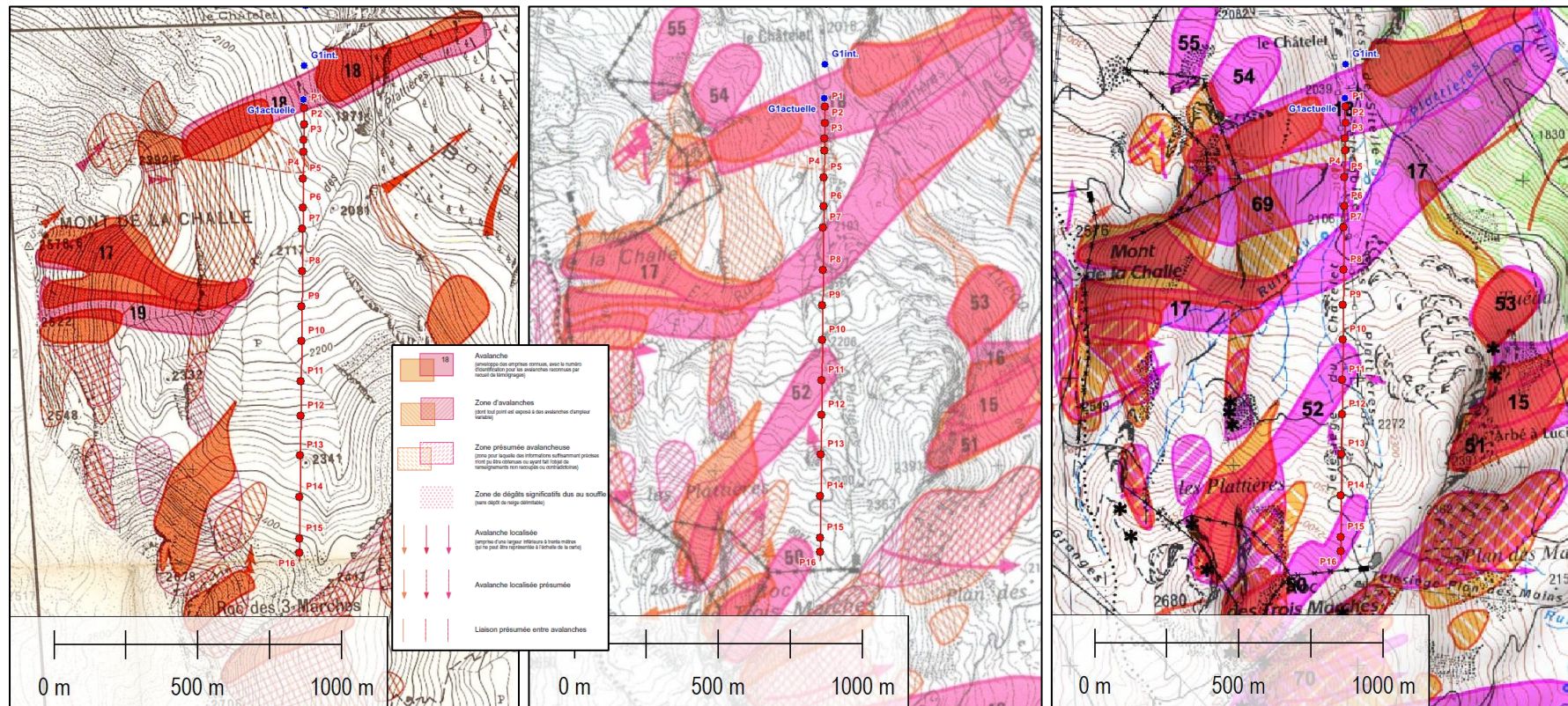


Figure 4 – Evolution de la CLPA : 1^{ère} version de 1970 à gauche, version de 1990 au centre et version “actuelle” à droite [3]. En rouge, ligne avant allongement. En bleu, alternatives G1 [2]

On constate ainsi de très fortes évolutions, principalement en termes d'emprises numérotées :

- Entre 1970 et 1990 avec l'ajout des n°50, 52 (vis-à-vis du P11), 54 (qui ne concerne pas le TSD) et l'intégration de la 19 à la 17 qui est fortement allongée vis-à-vis des P7 et P8 jusqu'au Plan de Tuéda. La 18 qui concerne la G1 actuelle et les 3 premiers pylônes est fortement épaissie.
- Depuis 1990 avec l'allongement de la n°50 qui touche désormais l'extrémité amont de la ligne (P15, P16 et G2) et l'ajout de n°69 entre la n°17 et la n°18 et concernant P5 et P6.

Les fiche signalétiques correspondantes amènent les éléments suivants pour la ligne (hors secteur G1 traité séparément ci-après) :

- **N°17 "Mont de la Challe"** : peu d'information hormis une dernière observation dans les années 1960 (n°1) – 1970. La G1 de l'ancien TSF3 Châtelet était située dans cette emprise mais sans problème a priori.

- **N°50 "Roc des 3 Marches"** : le 11 février 1999, L'avalanche est tirée au CATEX [visible sur la CLPA]. Elle a arraché la cabane d'arrivée du télésiège du Châtelet et les infrastructures du slalom mis en place à l'occasion. L'avalanche est descendue en neige poudreuse. Elle n'a pas traversé la ligne du télécabine des Plattières. Elle s'est arrêtée au niveau de l'entrée du snowpark. La neige s'est déposée sur la piste de ski alpin. En zone d'arrivée, un léger aérosol a saupoudré la télécabine. Par contre, c'est le souffle qui aurait fait exploser la cabane d'arrivée du télésiège avant même que l'écoulement dense ne l'atteigne. Il faut cependant signaler que si les noms sont identiques, ils concernent à l'époque les anciennes installations homonymes avec un secteur qui a largement évolué au gré des années (y compris en termes de terrassement et donc potentiellement de trajectoires et extension d'avalanches). L'actuel TSD Châtelet date ainsi de 2006, postérieurement à l'avalanche de 1999 qui justifie l'emprise CLPA actuelle.

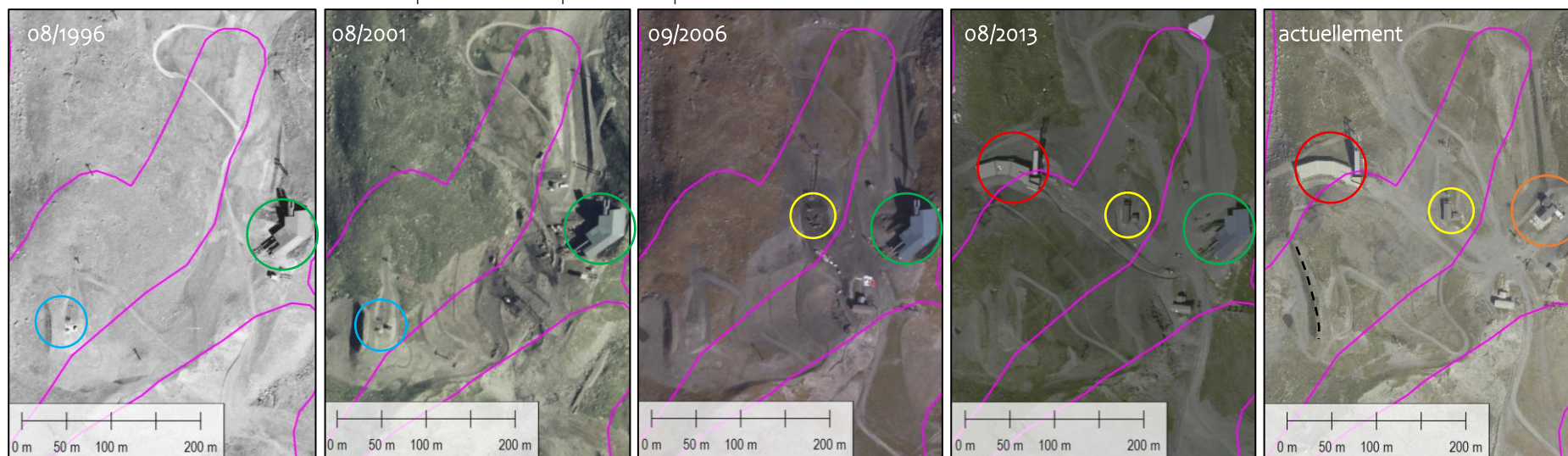


Figure 5 – Evolution du terrain au niveau de l'emprise CLPA n°50 (source Géoportail "remonter le temps" – images rectifiées manuellement et pouvant conduire à des décalages limités) : G2 TSF3 Châtelet "historique" et sa digue de protection en bleu (rallongée suite à l'avalanche de 2016 – pointillés noirs), G2 TSD6 Châtelet actuel en jaune, G4G5 TC Plattières "historique" en vert ("remplacée" par la G1 du TSD Bouquetins en orange), G2 TC Plattières actuelle en rouge – En magenta limite témoinnée de la CLPA correspondant ici à l'avalanche du 11/02/1999

Dans cette emprise n°50, il faut également signaler un déclenchement au Catex en janvier 2016 qui a finalement conduit à la mobilisation simultanée de toutes les pentes de cette emprise, pour générer un écoulement froid et (vraisemblablement) rapide. Cet écoulement a dépassé la digue (non encore allongée, juste vraisemblablement recalibrée après l'avalanche de 1999), renversé le P1 du Catex (Figure 6) et tangenté la G2 de la TC actuelle des Plattières pour s'arrêter directement à proximité. Cet épisode avait donné lieu à une première analyse² qui avait justifié (figures ci-contre) le remplacement du pylône du Catex et la requalification de la digue (notamment son allongement - Figure 7). Celle-ci est désormais régulièrement purgée.



Figure 6 – Vue du pylône du Catex couché après l'avalanche



Figure 7 – Vue des travaux d'allongement de la digue en 2016 (source : service des pistes) pour obtenir les pointillés noirs de la Figure 5

² Engineerisk, Amélioration de la protection du P1 du Catex et de la G2 de la TC des Plattières vis-à-vis de l'avalanche du Roc des 3 Marches (CLPA n°50), v1 du

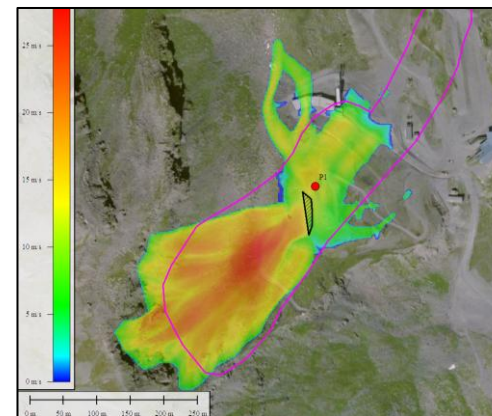


Figure 8 – D'après ², modélisation de l'avalanche de janvier 2016 (ep. 60cm, S30, restitution des vitesses max) – point rouge : P1 du catex / hachures noires : parement amont de la digue à l'époque / trait rose : emprise historique CLPA

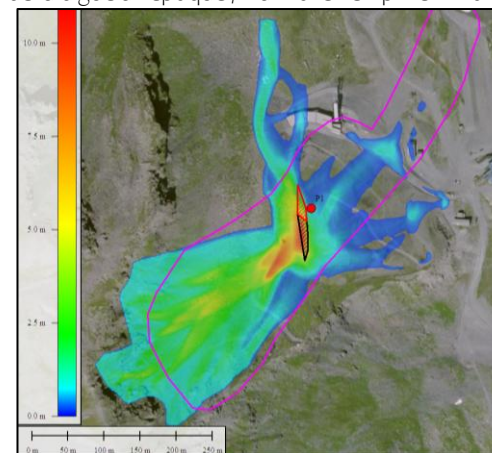


Figure 9 – D'après ², modélisation de l'avalanche de janvier 2016 mais avec une épaisseur mobilisable majorée à 80cm (S30, restitution des hauteurs max) avec une digue allongée et réhaussée d'environ 2m dans la section au droit du mât – point rouge : P1 du catex / hachures noires : parement amont de la digue initiale/ hachures rouges : allongement numérique du parement / trait rose : emprise historique CLPA

02/09/2016

- *N°52 “Plattières”* : L'avalanche est déjà partie en un seul panneau dont la cassure de départ a pris toute la largeur du cirque sous la barre centrale et, à hauteur de celle-ci, de part et d'autre des 2 GAZEX.
- *N°69 “Catex du Châtelet”* : L'avalanche est descendue durant l'hiver 1999. La neige s'est déposée pour une grande partie sur la piste de ski alpin et jusqu'au télécabine des Plattières. En zone de départ, une partie est commune aux avalanches 18 et 69 : en effet, au niveau de l'angle du CATEx,

sous la crête, le panneau latéral est déjà parti de l'un ou de l'autre côté de la croupe (où est situé un pylône de la ligne retour du CATEx).

Un certain nombre d'emprises (dont aucune n'est suivie dans l'Enquête Permanente sur les Avalanches) viennent donc tangenter et/ou ont déjà traversé historiquement la ligne (en plus du secteur G1 traité ci-après) mais sans qu'aucune approche ou même dégâts n'aient pu être constatés lors du présent siècle.

B. PROTECTIONS

Plusieurs éléments de protection ont déjà été cités dans la description précédente :

- Tourne de protection de l'ancien TSF3 Châtelet, a priori recalibrée après l'avalanche de 1999 puis à nouveau et allongée après celle de 2016 (Figure 7).
- Systèmes de déclenchement également visibles sur la CLPA (Figure 4)

Ces derniers constituent l'ossature du PIDA du domaine skiable de Méribel Mottaret (version à jour page suivante) qui combine parfois de manière redondante Catex (3 appareils sur le secteur) et Gazex® (réseau MH autour de la CLPA 52, réseau CHAT autour des CLPA 18 et 69, exploseur B3 dans la CLPA n°50 – Le réseau MB ne concerne pas la ligne).

On note des emprises relativement différentes de la CLPA, plus courte au niveau de la CLPA n°50, moins oblique au niveau de la CLPA n°52, moins courbe au niveau de la bordure nord de la CLPA n°17 et partielle au niveau de la CLPA n°69. Selon cette source, l'appareil apparaît cependant exposé au niveau de ses 4 premiers pylônes (cf. partie suivante) et de ses P6, P7, P8.

Les emprises PIDA correspondantes (118, 119, 121 et 122) avaient d'ailleurs servies de base pour identifier les pylônes à dimensionner dans le cadre de la construction du TSD actuel³.

A noter que ce secteur est en dehors des périmètres traités au PPR de la commune des Allues⁴.

³ IMS-RN, Etude avalanche, sollicitations sur pylônes du télésiège du Châtelet, indice 1, février 2006

⁴ Préfecture de la Savoie, Commune de Les Allues, Plan de Prévention des Risques Naturels, approuvé le 27 mars 2018.

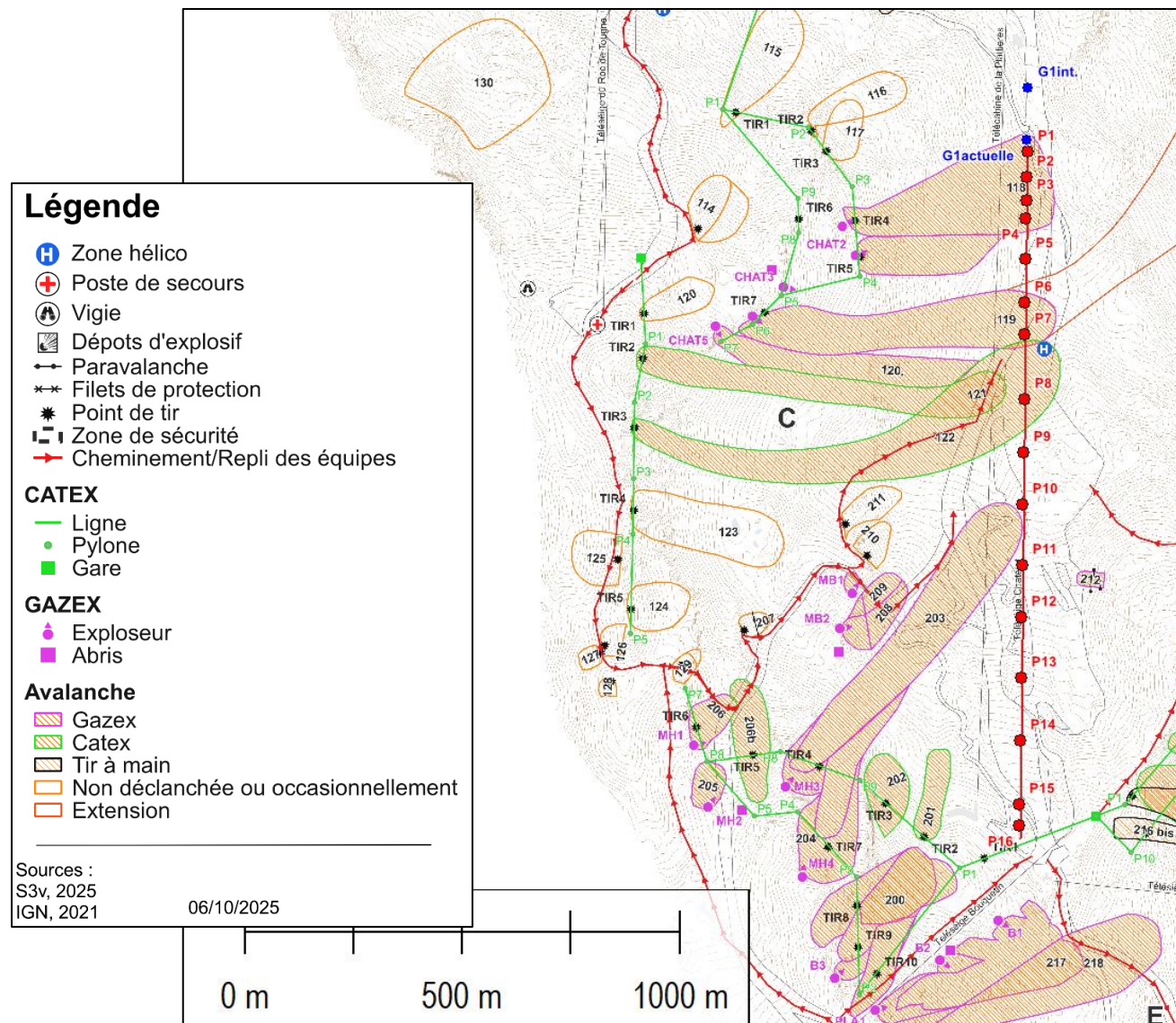


Figure 10 – Extrait du Plan d'Intervention de Déclenchement des Avalanches (PIDA) du domaine skiable de Méribel Mottaret pour la saison 2025-26 avec superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) et des alternatives de reconstruction de la G1 (en bleu)

C. CAS DE LA G₁₂₀₀₆ ET DES PREMIERS PYLONES (CLPA N°18 & AVALANCHE 2026)

Selon la CLPA, la fiche signalétique de cette emprise n°18 “Chalet de Tuéda” indique seulement : *L'avalanche est descendue le 11 février 1999 [même jour que la CLPA n°50 précitée lors de cette fameuse crue avalancheuse de 1999]. Elle est partie de la crête au niveau des rochers et est arrivée au niveau du Plan de Tueda où elle a détruit une cabane. En zone de départ, une partie est commune aux avalanches 18 et 69 : en effet, au niveau de l'angle du CATEX, sous la crête, le panneau latéral est déjà parti de l'un ou de l'autre côté de la croupe (où est situé un pylône de la ligne retour du CATEX). L'avalanche a été déclenchée artificiellement. Alt. Départ : 2450 m. Alt. Arrivée : 1700 m. Une cabane de vente de fromages située au niveau de la cave de Tueda a été partiellement détruite. Les pistes de ski de fond ont été coupées au niveau du Plan de Tueda.*

En fait, ce couloir et ses événements passés ont déjà pu faire l'objet de différentes analyses^{5,6}, la première plutôt par rapport à l'événement de 1999 décrit ci-avant et la seconde par rapport à une avalanche naturelle le 29 janvier 2021 lors de l'hiver Covid et qui avait surtout détruit le chalet technique du télésiège (en plus d'un déraillement câble - Figure 12 - sûrement du fait du passage bas des sièges eux-mêmes potentiellement touchés par l'écoulement).

En plus des avalanches de 1999 (mais pendant laquelle l'actuel TSD n'était pas encore présent) et de 2021 (Figure 12 & Figure 13, certes dans des conditions de gestion particulière avec beaucoup moins de déclenchements proactifs), l'avalanche du 17 février 2026 est la troisième avalanche récente ici, la deuxième avec des dommages remarquables au niveau de la remontée mécanique.



Figure 11 - Vue en exploitation normale de la G₁₂₀₀₆ et du chalet (à droite) détruit en exploitation normale (source : www.remontees-mecaniques.net)



Figure 12 - Vue du versant naturellement purgé par l'avalanche en janvier 2021

⁵ Engineerisk, Projet 2024 : réhabilitation du chalet d'alpage “Cave de Tuéda” – Méribel Mottaret, diagnostic des risques nivologiques et prescriptions paravalanches, v1 du 14/10/2024

⁶ Engineerisk, reconstruction du Chalet du TSD6 Châtelet, Méribel Mottaret, diagnostic des risques nivologiques et prescriptions paravalanches, Vo du 17 mai 2021



Figure 13 - Aperçu des dégâts de l'avalanche du 29 janvier 2021

Le 17 février 2026, les conditions ont été à peine différentes, s'agissant cette fois d'un déclenchement artificiel mais au cours d'une séquence nivologique assez remarquable illustrée par les relevés nivologiques de la station de mesure de Méribel Mottaret (1700m – en bleu ci-contre) qui peuvent être extrapolés à plus haute altitude par les relevés à Val Thorens (2283m – en orange ci-contre).

Suite à une succession de perturbations, on constate ainsi un accroissement certes remarquable du manteau neigeux (+86cm à Méribel, +1m28 à Val Thorens) mais en 10 jours jusqu'à un maximum le 20 février. La plus grosse chute journalière n'a ainsi été que de l'ordre de 35 cm en 24 heures mais 85cm en 3 jours et le 17 n'est qu'une situation à "mi-épisode" (qui a quand même donné lieu à l'émission d'un premier risque 5/5 par Météo France le 11).

D'après le service des pistes [1], les opérations PIDA de la veille n'ont donné ici aucun résultat mais le premier tir Gazex® (CHAT) le 17 matin déclenche l'ensemble du versant (Figure 16) avec un important volume, mobilisant sûrement de précédentes couches, des accumulations apportées par le vent et également alimenté en cours de route par des reprises intermédiaires (Figure 15). Il fond sur la zone de la G₁₂₀₀₆ où les dégâts sont importants :

- L'essentiel de l'avalanche est arrivé de manière oblique au niveau de l'avant de la G₁₂₀₀₆ et du P₁₂₀₀₆ (Figure 17), complètement renversé et ayant emmené avec lui et au sol le brin est du câble.

- Le flux a également pénétré et traversé sous la gare en touchant/pliant un certain nombre de sièges (Figure 20) jusqu'à atteindre et renverser l'abri opérateur et le petit poste du contrôleur (Figure 21). Le chalet détruit en 2021 (mais reconstruit renforcé) est a priori resté en place, également grâce à sa position latérale par rapport au flux principal (Figure 17). Le portique d'entrée skieurs, situé plus au sud et profitant de l'abri du chalet précité, est également resté debout (quoique déformé).
- L'avalanche a ensuite traversé la piste de la Sitelle pour sauter dans le versant inférieur où elle a cassé quelques arbres (Figure 18) mais sans atteindre le Plan de Tuéda.
- Au-delà de cette extension "en plan", il faut aussi signaler un fort développement vertical de l'avalanche vu le constat d'un trou dans la toiture de la G₁₂₀₀₆ : il s'agit probablement de l'effet tremplin de la tourne-étrave située à l'amont et qui est censée protéger la G₁.

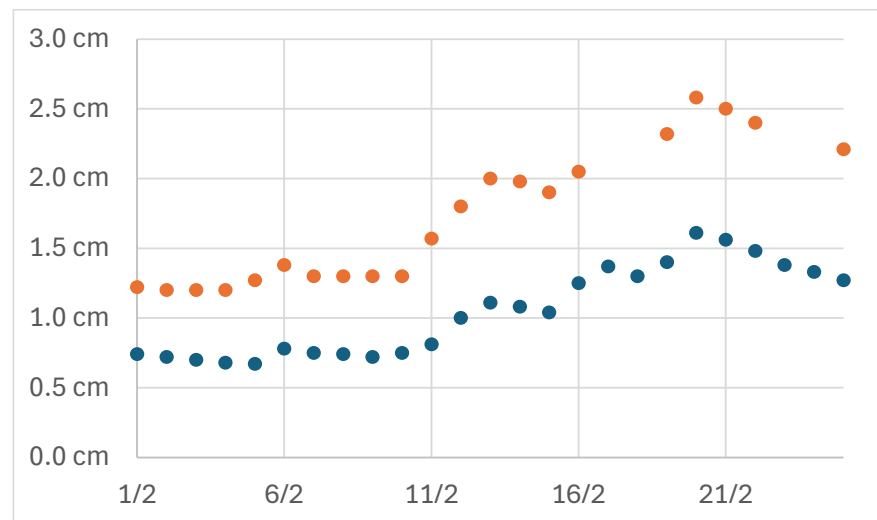


Figure 14 – Mesures de la hauteur du manteau au cours du mois de février 2026 à Méribel Mottaret (1700m en bleu) et Val Thorens (2283m en orange)

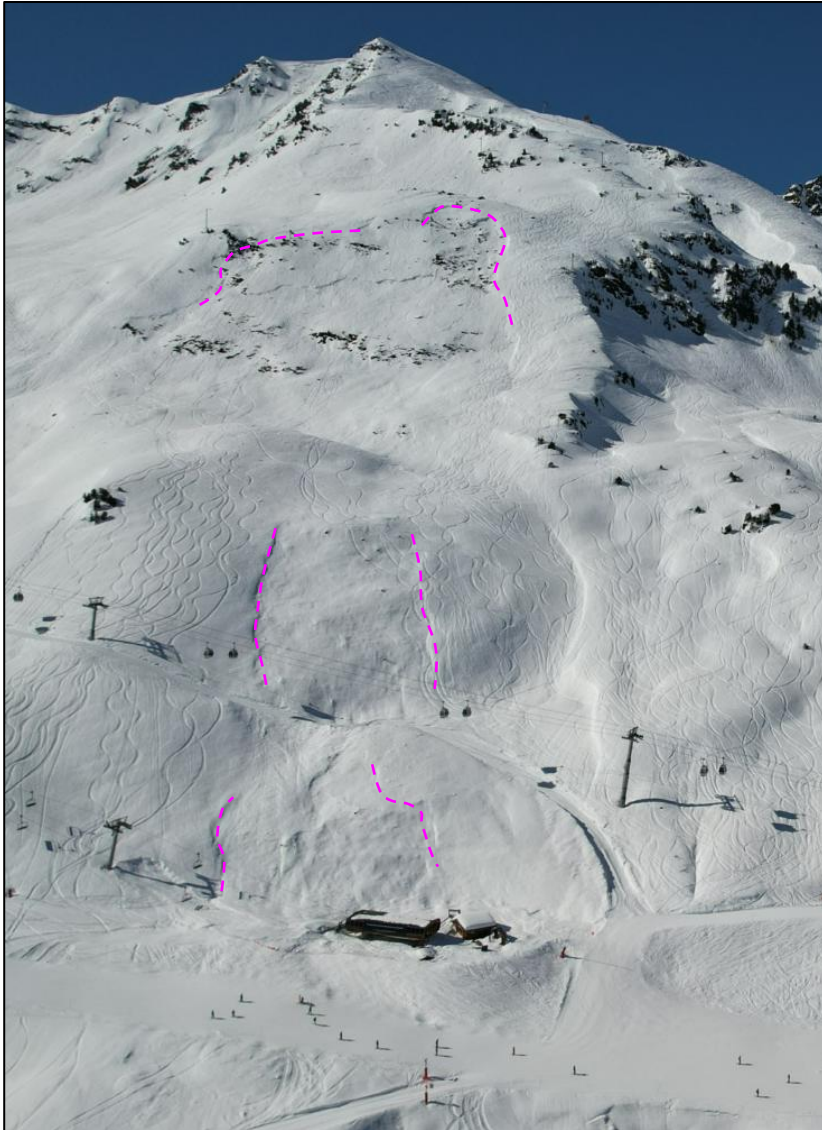


Figure 15 – Vue globale de la trajectoire du 17/02/2026 avec la fracture initiale mais aussi des traces claires de reprise (photo prise 10 jours plus tard [1])



Figure 16 – Vue de la zone de départ de l'avalanche du 17 février 2026 (photo prise 10 jours plus tard [1])



Figure 17 – Vue depuis l'amont de la zone de la G12006 après l'avalanche du 17 février 2026 (photo prise 10 jours plus tard [1])



Figure 18 – Vue des traces de l'avalanche du 17 février 2026 au niveau de la piste de l'ours (photo prise environ 2 mois plus tard)



Figure 19 – Vue de la G12006 et du P12006 dont ne ressort que la tête sous le dépôt juste après l'avalanche du 17 février 2026



Figure 20 – Vue du déport de l'échelle d'accès à la machinerie et des dépôts sous la gare (photo prise 10 jours plus tard [1])



Figure 21 – Vue de l'arrière de la G12006 après l'avalanche du 17 février 2026 (photo prise 10 jours plus tard [1]). A gauche, chalet reconstruit suite à l'avalanche de 2021

III. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO

A. SITE - GENERALITES

De manière cohérente avec la CLPA (Figure 4), les pentes les plus propices (Figure 23) sont surtout concentrées sous la ligne de crêtes (Figure 24) qui va du Roc des 3 Marches (2704m repère ❶ au sud & Figure 22) au Mont de la Challe (2576m repère ❷ au nord) et à ses contreforts qui dominent la G12006.

On note également quelques zones secondaires et intermédiaires de pentes, repérées par des "zones d'avalanches sur la CLPA. Enfin pour les emprises CLPA n°17 et 18, il faut signaler le comportement "à seuil" avec une extension qui habituellement ne dépasse pas la "plateforme" de la piste et qui de manière historique/exceptionnelle peut plonger dans le versant inférieur où elle peut se réintensifier jusqu'au Plan de Tuéda.

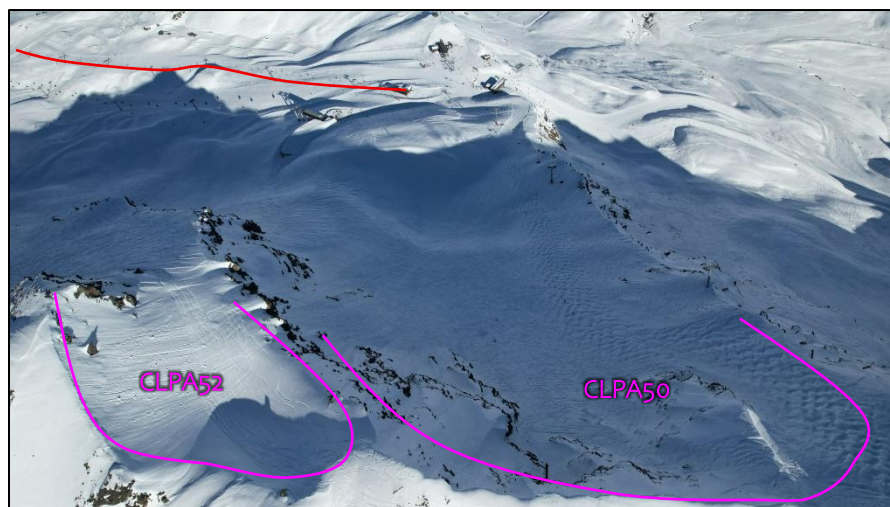


Figure 22 – Vue de la face nord-est du Roc des 3 Marches depuis l'amont avec les emprises CLPA n°50 et 52 – Ligne actuelle en rouge

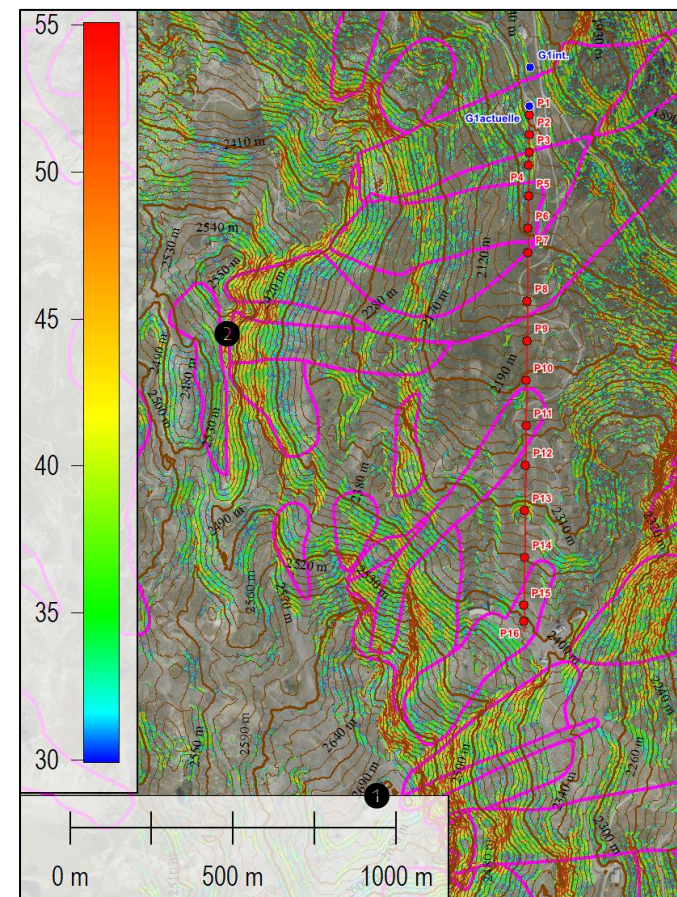


Figure 23 – Carte des pentes (en degrés) issue de [4] dans la gamme des pentes propices aux phénomènes nivologiques (i.e. entre 30 et 55°) avec superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) – [2] en bleu



Figure 24 - Vue générale du versant et des principales zones de départ menaçantes de la CLPA – Ligne 2006 en rouge – G12027 en bleu [2]

B. CLIMATOLOGIE [3]

Le secteur d'étude fait partie du massif de la Vanoise qui est globalement correctement enneigé.

Les principaux flux météorologiques apportant des épisodes pluvio-neigeux significatifs sont les suivants :

- *Le courant d'Ouest* est à l'origine de précipitations souvent modérées sur quasiment toute la Vanoise, à l'exception peut-être de la zone limitrophe de la Haute-Maurienne.
- *Le courant de Nord-Ouest* est également actif, avec des précipitations modérées, parfois pendant plusieurs jours.
- *Le courant de Sud-Ouest* est souvent associé à un régime de foehn qui donne de fortes rafales sur quasiment l'ensemble du massif. Les précipitations sont alors retardées, voire annihilées (moins de 10 mm). En revanche, dans le cas d'un flux ondulant (de Sud-Ouest à Ouest par exemple), le foehn ne se déclenche pas systématiquement, et des précipitations parfois durables peuvent se produire.
- *Le régime de Nord* est finalement assez actif, que ce soit du fait du passage d'une perturbation, ou bien d'une traîne (régime d'averses). Le blocage des nuages, surtout dans le centre de la Vanoise, donne parfois lieu à de bons cumuls de neige.

Même si d'autres directions locales (parfois très différentes) sont possibles en fonction du (micro)relief comme le montre les figures ci-contre, les flux généraux de sud / sud-ouest sont les plus fréquents et dynamiques : les versants menaçant ici ont quand même plutôt tendance à être chargés sous le vent.

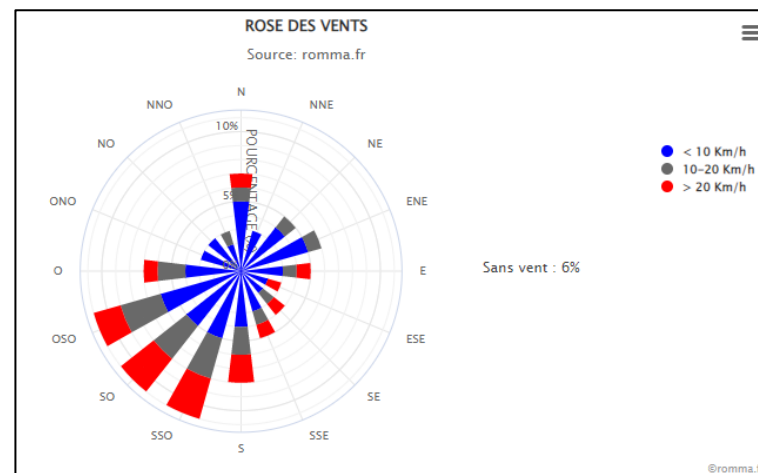


Figure 25 – Rose des Vents de la station du réseau Romma au sommet du Roc des 3 marches (Méribel) (source : romma.fr)

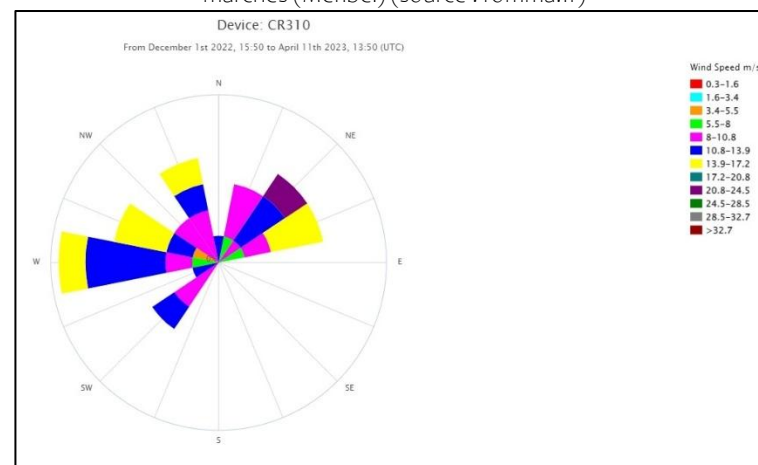


Figure 26 – Rose des Vents de la station de Courchevel au niveau de la Saulire (source : Service des Pistes de Courchevel)

C. EPAISSEURS EN JEU : MOBILISABLES DANS LES ZONES DE DEPART, MANTEAU NEIGEUX ETABLI

En vue d'analyses quantitatives des phénomènes et en partant de l'hypothèse qu'une avalanche en neige froide⁷ (la plus rapide et a priori la plus impactante) d'une période de retour donnée est elle-même issue de l'épaisseur mobilisable correspondante⁸ en général sur 3 jours, il s'agit donc d'estimer ces épaisseurs mobilisables à partir de l'analyse statistique des précipitations.

Il faut cependant signaler l'aspect délicat (mais en même temps incontournable) 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. Par ailleurs, les valeurs erronées ou manquantes ne sont pas 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 (écarts possibles jusqu'à 75%).
- D'autres influences (transport de neige par le vent) peuvent contribuer de manière non négligeable aux épaisseurs présentes.

Il convient donc de garder une attitude prudente sur cette démarche en restant capable d'évaluer la vraisemblance des résultats et/ou le cas échéant d'en tester la sensibilité. Ici, la méthode IFENA 1992 fait toujours référence pour structurer la démarche. En termes de données, le CEMAGREF (désormais INRAe) a réalisé, en 2006-2007, une étude pour de nombreux postes du réseau pluviométrique de Météo-France et permettant de disposer de données « officielles » (disponibles

sur www.avalanches.fr) et relativement fiables au sens où elles incluent d'anciennes décennies et les épisodes marquants de ces époques (par exemple, 47 saisons depuis 1956 pour les prédéterminations de [3] à St Martin de Belleville). La variable restituée est la hauteur des précipitations hivernales (sur la période du 15 novembre au 15 mai) exprimée en mm d'eau, cumulée sur 1 à 3 jours et pour des temps de retour de 2 à 100 ans. Ces lames d'eau sont à convertir en équivalent neigeux considérant une densité communément admise de 125 kg/m³ pendant la chute (valeur confirmée par la cohérence des comparaisons suivantes avec de vraies statistiques de neige). Le cas échéant, ces valeurs peuvent également être extrapolées jusqu'au tri-centennal en majorant le trentennal de 40% (en moyenne).

En parallèle, il est intéressant de compléter les éléments précédents par nos propres statistiques via les données désormais publiques de Météo France [5]. Il s'agit ici aussi de privilégier la méthode des maxima hivernaux (valeurs du Tableau 1 y.c. graphe de la Figure 28) en les ajustant classiquement sur une loi statistique de type Gumbel (Figure 27).

Ce graphe permet aussi de déterminer une épaisseur trentennale de référence du manteau neigeux au sol d'environ 1m70 à 1700m à extrapoler ensuite avec l'altitude selon un gradient communément admis de 15cm/100m et modulée le cas échéant en fonction de l'orientation selon les pratiques suisses (minoration, respectivement majoration, limitée à 10% pour les orientations sud, respectivement nord).

⁷ Sans négliger la possibilité d'avalanches de neige lourde voire de fond mobilisant tout ou partie du manteau neigeux en place mais selon des critères d'entrée seulement à dire d'expert

⁸ Burkard A., Salm B., *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 1992

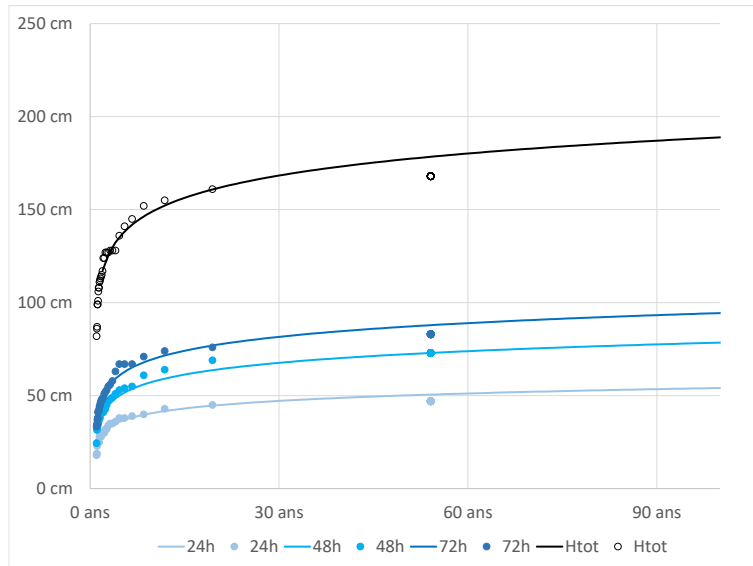


Figure 27 – Ajustement de la loi statistique de Gumbel pour les données du Tableau 1

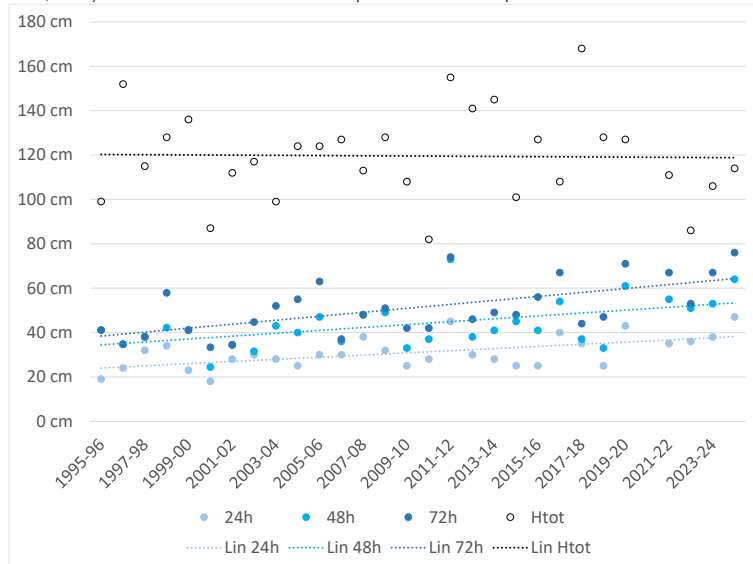


Figure 28 – Graphe des données du Tableau 1 et courbes de tendance

saison	24 hrs	48 hrs	72 hrs	Htot
1995-96	19 cm	41 cm	41 cm	99 cm
1996-97	24 cm	35 cm	35 cm	152 cm
1997-98	32 cm	38 cm	38 cm	115 cm
1998-99	34 cm	42 cm	58 cm	128 cm
1999-00	23 cm	41 cm	41 cm	136 cm
2000-01	18 cm	24 cm	33 cm	87 cm
2001-02	28 cm	34 cm	34 cm	112 cm
2002-03	30 cm	32 cm	45 cm	117 cm
2003-04	28 cm	43 cm	52 cm	99 cm
2004-05	25 cm	40 cm	55 cm	124 cm
2005-06	30 cm	47 cm	63 cm	124 cm
2006-07	30 cm	36 cm	37 cm	127 cm
2007-08	38 cm	48 cm	48 cm	113 cm
2008-09	32 cm	49 cm	51 cm	128 cm
2009-10	25 cm	33 cm	42 cm	108 cm
2010-11	28 cm	37 cm	42 cm	82 cm
2011-12	45 cm	73 cm	74 cm	155 cm
2012-13	30 cm	38 cm	46 cm	141 cm
2013-14	28 cm	41 cm	49 cm	145 cm
2014-15	25 cm	45 cm	48 cm	101 cm
2015-16	25 cm	41 cm	56 cm	127 cm
2016-17	40 cm	54 cm	67 cm	108 cm
2017-18	35 cm	37 cm	44 cm	168 cm
2018-19	25 cm	33 cm	47 cm	128 cm
2019-20	43 cm	61 cm	71 cm	127 cm
2020-21	-	-	-	-
2021-22	35 cm	55 cm	67 cm	111 cm
2022-23	36 cm	51 cm	53 cm	86 cm
2023-24	38 cm	53 cm	67 cm	106 cm
2024-25	47 cm	64 cm	76 cm	114 cm
2025-26	39 cm	69 cm	83 cm	161 cm

Tableau 1 – Récapitulatif des maximums hivernaux : valeurs disponibles selon [5] pour le poste de mesures de Méribel-Mottaret à 1700m

Une fois ces valeurs liées aux périodes de retour obtenues pour le site de mesure et sur un terrain plat, il convient donc de les corriger :

- Tout d’abord en intégrant le tassement naturel : pour 3 jours, une valeur conservatrice de 15% peut être admise, supposée indépendante de l’altitude. Le tassement est considéré négligeable en 24 heures et de 10% en 48 heures.
- En extrapolant les valeurs à l’altitude des zones de départ. Pour 3 jours, on trouve dans la littérature des valeurs de gradients nivométriques entre 3 et 7cm pour 100m. Faute de données plus précises, une valeur moyenne de 1.7cm/100m/jour est admise.
- Ensuite, en majorant le cas échéant à dire d’expert les valeurs pour tenir compte de la contribution (positive ou négative) du transport de neige par le vent. Ici et moyennant des zones de départ considérées de manière plutôt globalisante, cette contribution peut présenter un bilan neutre entre zones érodées et accumulées.
- Enfin, 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 55°. La méthode évalue ainsi un facteur de pente selon les valeurs du tableau suivant qui est appliqué à l’épaisseur “stable” à 28°.

Au final, on obtient donc par périodes de retour, l’épaisseur d_0 mobilisable en moyenne sur toute la surface potentielle de déclenchement (en notant qu’elle ne correspond pas en général à l’épaisseur moyenne mesurée le long de la ligne de rupture et qui peut être plus importante/spectaculaire).

φ	28	30	32.5	35	37.5	40	45	50
$f(\varphi)$	1	0.9	0.79	0.71	0.65	0.6	0.52	0.46

Tableau 2 - Valeur du facteur de pente en fonction de la déclivité (φ en degrés °)

Ainsi ici à partir des mesures des stations les plus représentatives, on obtient les tableaux ci-dessous qui illustrent les épaisseurs mobilisables par périodes de retour correspondantes en fonction des caractéristiques (altitude et déclivité moyennes) de la zone de départ considérée, par exemple ici à 2500m et 35° :

		PERIODE DE RETOUR			
		10 ans	30 ans	100 ans	300 ans
Epaisseurs mobilisables	1 j	36 cm	41 cm	47 cm	58 cm
	2 j	55 cm	62 cm	71 cm	87 cm
	3 j	71 cm	79 cm	89 cm	111 cm

		10 ans	30 ans	100 ans	300 ans
Epaisseurs mobilisables	1 j	35 cm	39 cm	43 cm	54 cm
	2 j	50 cm	56 cm	62 cm	79 cm
	3 j	64 cm	70 cm	77 cm	98 cm

Tableau 3 - Epaisseurs de neige mobilisables pour une pente à 35° à une altitude de 2500 m à partir des :

- En haut : prédéterminations [3] de la station Météo France de Saint-Martin de Belleville (altitude 1500m, réf : 73257001)
- En bas : statistiques issues du Tableau 1 pour le poste de mesure de Méribel-Mottaret (altitude 1700m)

En plus de microclimats locaux, la principale différence entre ces deux tableaux est la période considérée des mesures (2^{ème} moitié du XX^{ème} siècle en haut, premières décennies du XXI^{ème} siècle en bas) qui montre déjà les évolutions climatiques à l’œuvre. En même temps et paradoxalement, les tendances moyennes depuis le début de ce siècle sont plutôt haussières pour les cumuls (pluri-)journaliers (Figure 28) et quasi-constante pour la hauteur maxi du manteau neigeux saisonnier : la chronique bénéficie en cela notamment des deux dernières saisons avec les deux périodes remarquables de la mi-avril 2025 et de ce mois de février 2026. Cette période positive est vraisemblablement transitoire comme expliqué dans la partie suivante. En attendant et de manière conservatrice, la suite considère la moyenne des valeurs issues deux sources précitées pour déterminer une épaisseur mobilisable à une altitude et une pente donnée.

D. EVOLUTIONS CLIMATIQUES

Sur ce sujet du changement climatique, il est également intéressant d'apporter quelques éléments complémentaires issus de la littérature scientifique : parmi les certitudes dont l'augmentation globale des températures d'autant plus marquée sur nos massifs⁹ (10 à 20% de plus par rapport au reste du pays¹⁰), la limite pluie-neige sera globalement plus haute qu'aujourd'hui avec une conséquence directe sur le manteau neigeux, notamment à basse et moyenne altitude : plus humide et plus dense, réduit en quantité et durée d'enneigement plus faible, ce que montrent déjà les analyses sur la période récente¹¹ ainsi que les prévisions sur la Figure 30.

Les évolutions seront d'autant plus marquées au printemps et d'ici la fin de ce siècle¹². Elles sont exacerbées dans des massifs comme les Pyrénées ou les Alpes du sud avec des conséquences directes sur l'économie du ski¹³ (Figure 29).

Aux altitudes moyennes et élevées qui nous intéressent ici, les changements de température (même si les mesures à l'Aiguille du Midi à 3842m montrent déjà une augmentation moyenne de 0.5° par décennie depuis 1980¹⁴) et de précipitations pourront cependant être plus dynamiques, avec des oscillations rapides (qui vont de toute façon se multiplier¹⁵) entre les extrêmes, et avec donc moins de tendances définitives à court ou moyen terme en raison des effets locaux (et finalement comme constaté ces dernières années).

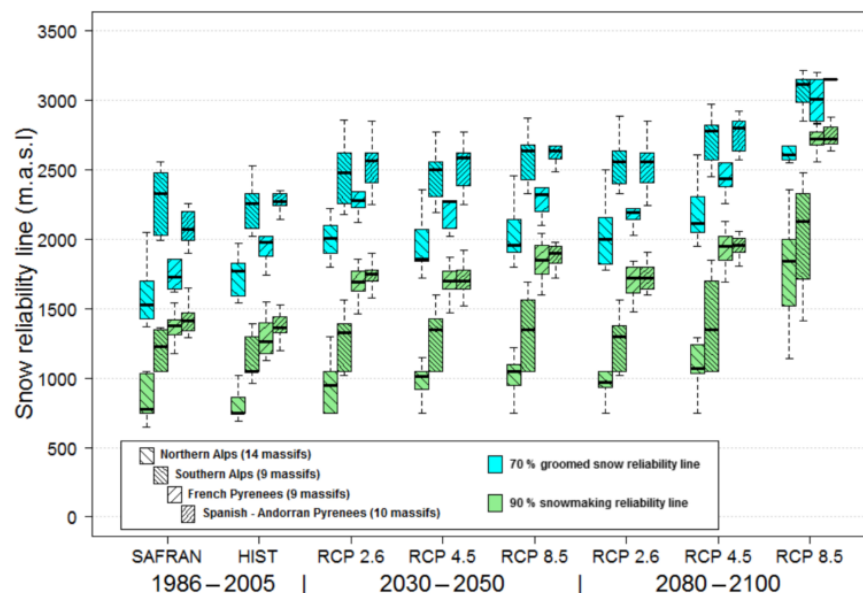


Figure 29 – Altitude de fiabilité de l'enneigement en fonction des massifs alpins et pyrénéens et évolution pour la période de référence (1986-2005), le futur proche (2030-2050) et la fin du siècle (2080-2100) basée sur les différents scénarios du GIEC (RCP)¹³

⁹ Pepin, N. C., Amone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., et al. (2022). *Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world*. Reviews of Geophysics, 60, e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>

¹⁰ Hugues François, Raphaëlle Samacoïts, Carlo Carmagnola, Jean-Michel Soubeyroux, Matthieu Lafaysse, Samuel Morin, *Enneigement des massifs montagneux et stations de sports d'hiver dans une France à +2,7 et +4 °C*

¹¹ Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer, 2019: High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

¹² Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y., and Morin, S. (2014). *Projected changes of snow*

conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. Cryosphere 8, 1673–1697. doi: 10.5194/tc-8-1673-2014

¹³ Spandre S., François H., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M., George E., and Morin S, *Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation*, The Cryosphere, 13, 1325–1347, 2019 <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>

¹⁴ M. Jacquemart, S. Weber, M. Chiarle, M. Chmiel, A. Cicoira, C. Corona, N. Eckert, J. Gaume, F. Giacomini, J. Hirschberg, R. Kaitna, F. Magnin, S.I. Mayer, C. Moos, A. van Herwijnen, M. Stoffel, *Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps*, Earth Sci. Rev., 258 (2024), Article 104886

¹⁵ Wu, S., Luo, M., Lau, G.NC. et al. *Rapid flips between warm and cold extremes in a warming world*. Nat Commun 16, 3543 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58544-5>

Ainsi, des études scientifiques montrent que l'intensité des précipitations hivernales devrait globalement augmenter dans les Alpes en hiver¹⁶ (Figure 31). Cependant, cette tendance combinée à l'augmentation des températures résulte en une augmentation potentielle des chutes de neige en moyenne seulement à haute altitude (zone rouge sur la Figure 32). En effet, les chutes de neige à basse altitude diminuent, elles, drastiquement avec le réchauffement (Figure 33).

Inévitablement, l'augmentation des précipitations citée plus haut y résultera donc en une augmentation des événements pluvieux. Par ailleurs, cela dépend aussi des massifs et la Vanoise (repère jaune sur la Figure 34) parmi les quelques secteurs les mieux servis (+3.5% à 2700m).

Globalement, si on peut donc retenir une possible augmentation du manteau neigeux à haute altitude notamment liée à l'intensité plus élevée des chutes de neige avec l'évolution de la température de l'air¹⁷, cette augmentation restera limitée et surtout, en dessous, il faut plutôt s'attendre à une modification substantielle du manteau neigeux tant en quantité qu'en qualité.

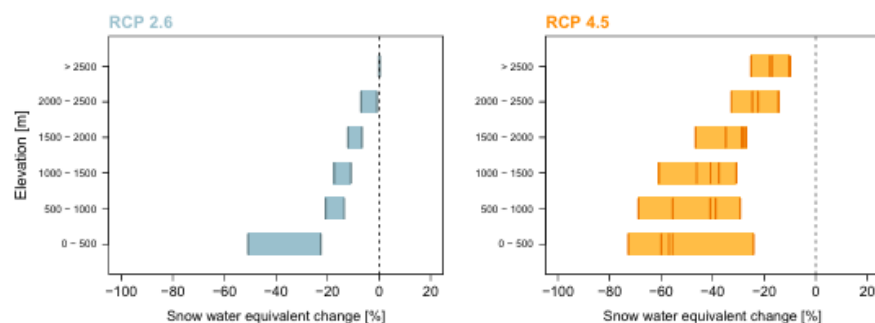


Figure 30 - Evolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux à l'horizon 2070-2099 selon les 2 scénarios d'émissions les plus optimistes¹⁸ en fonction de l'altitude

¹⁶ Erwan Le Roux, *Non-stationary modelling of snow-related extremes in the French Alps: analysis of past and future trends*, Thèse de doctorat, janvier 2022

¹⁷ Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A., and Schär, C. (2018). *Future snowfall in the Alps: projections based*

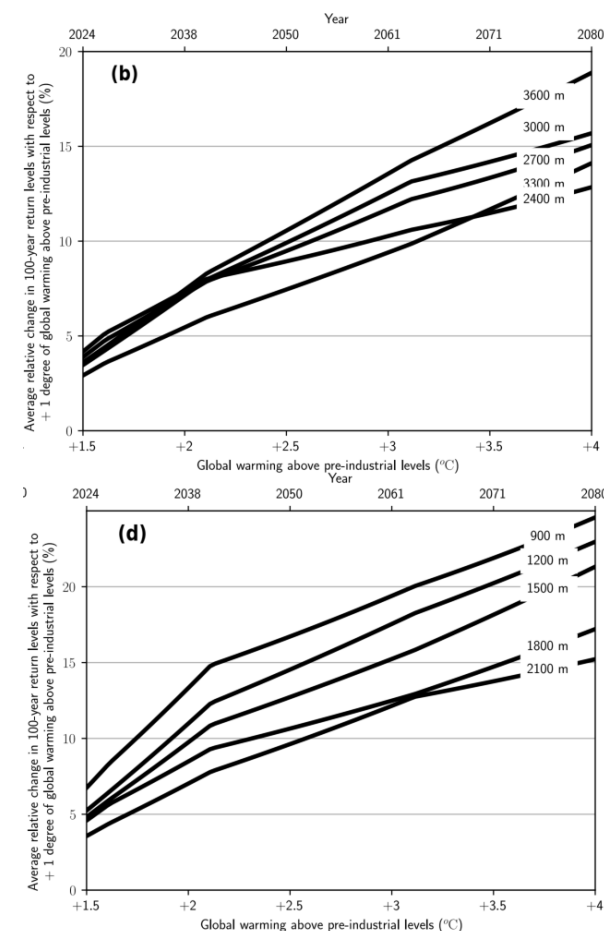


Figure 31 – Evolution (en %) des références centennales de précipitations hivernales par tranche d'altitude (hautes altitudes en haut, moyenne à faibles en bas) dans les Alpes (tous sous-massifs confondus) en fonction du niveau de réchauffement climatique à l'avenir¹⁶

on the EURO-CORDEX regional climate models. *Cryosphere* 12, 1–24. doi: 10.5194/tc-12-1-2018

¹⁸ Kotlarski, Gobiet, Morin, Olefs, Rajczak, Samacoïts, *21st century alpine climate change*, 2022

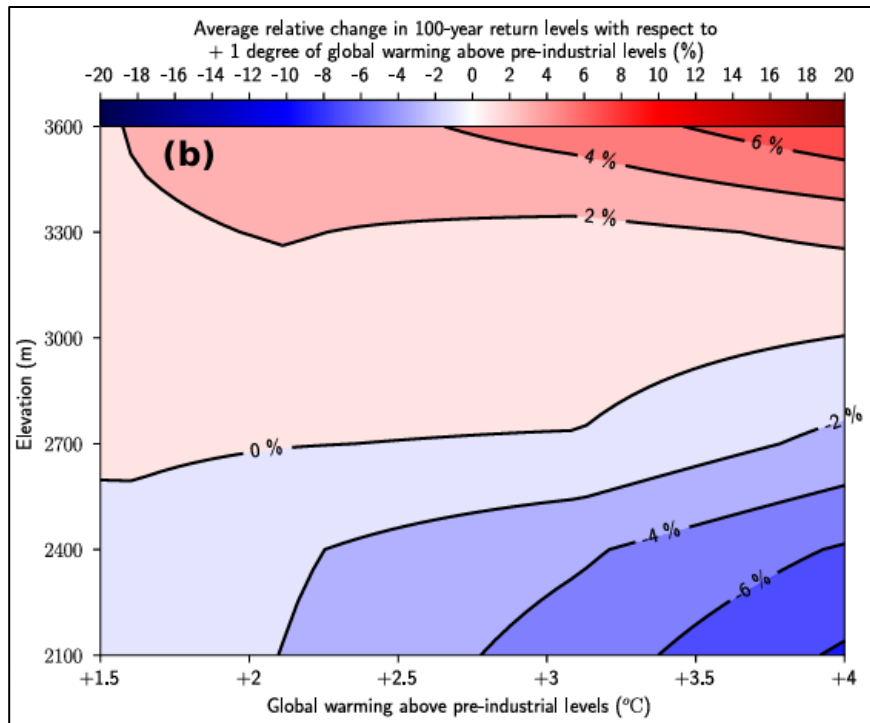


Figure 32 – Evolution relative des références centennales de chutes de neige en fonction du réchauffement climatique (de +1.5 à +4°C) sur la tranche d'altitude 2100 – 3600m (valeurs moyennées à l'échelle de toutes les Alpes Françaises) ¹⁶

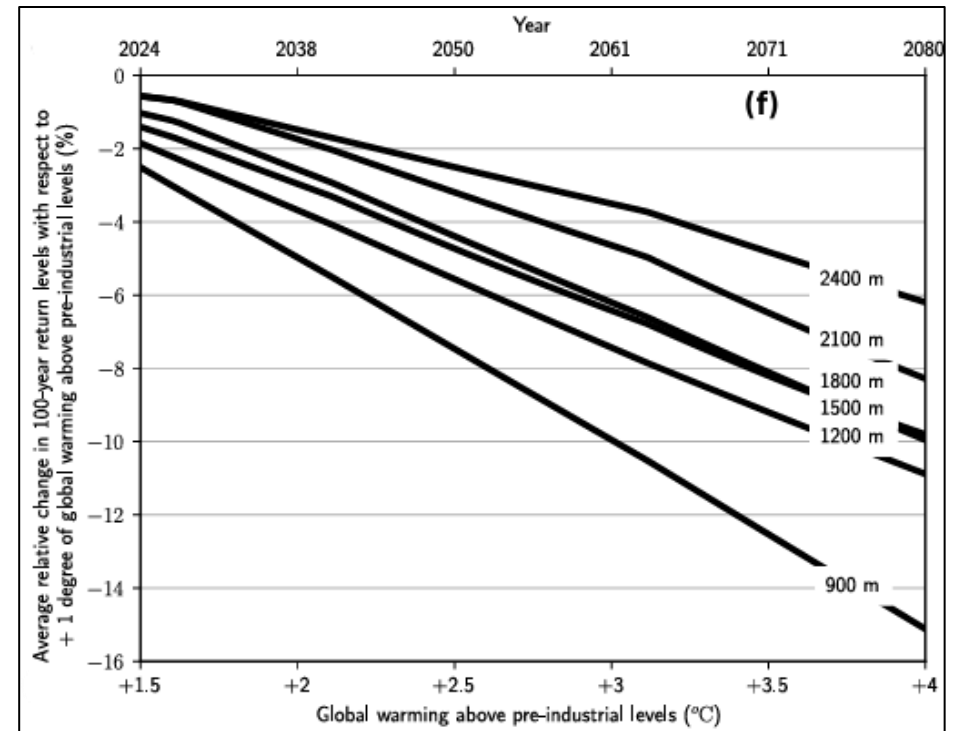


Figure 33 – Evolution (en %) des références centennales des chutes de neige en fonction du réchauffement climatique (de +1.5 à +4°C en correspondance avec les années selon le scénario 8.5 RCP du GIEC) ¹⁶

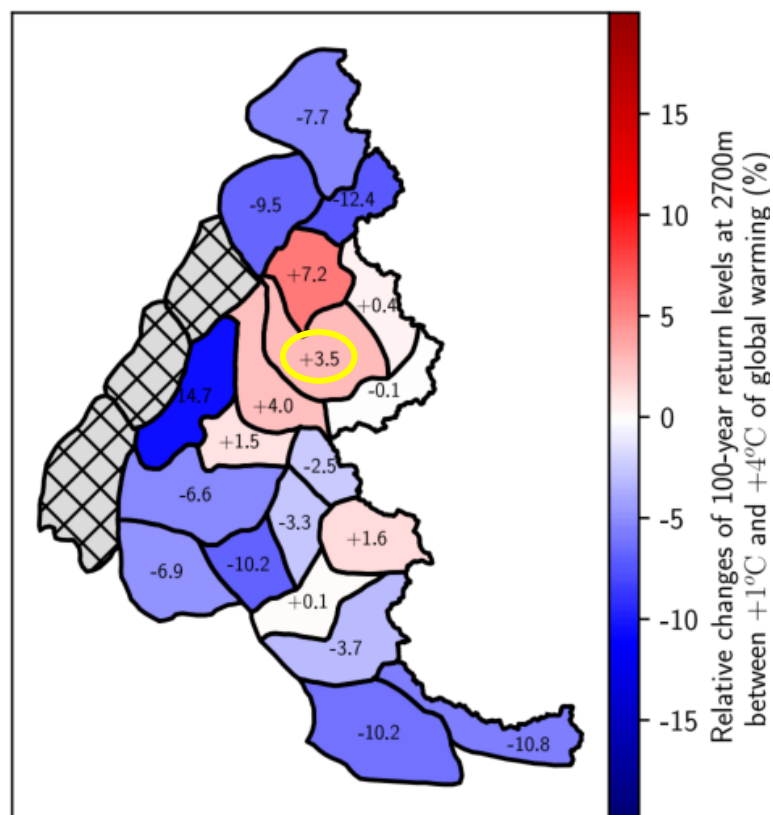


Figure 34 – Evolution (% en couleurs, valeurs chiffrées en kg/m² ce qui peut s'apparenter à l'évolution quotidienne en cm des chutes de neige) des références centennales de précipitations hivernales sous forme de neige par massif à l'altitude 2700m entre un réchauffement climatique global à +1°C et +4°C¹⁶

Finalement et même si les observations d'événements (progressivement de meilleure qualité) semblent augmenter, il est démontré que certains massifs ont

au contraire déjà vu une réduction de l'activité avalancheuse effective (Figure 35):

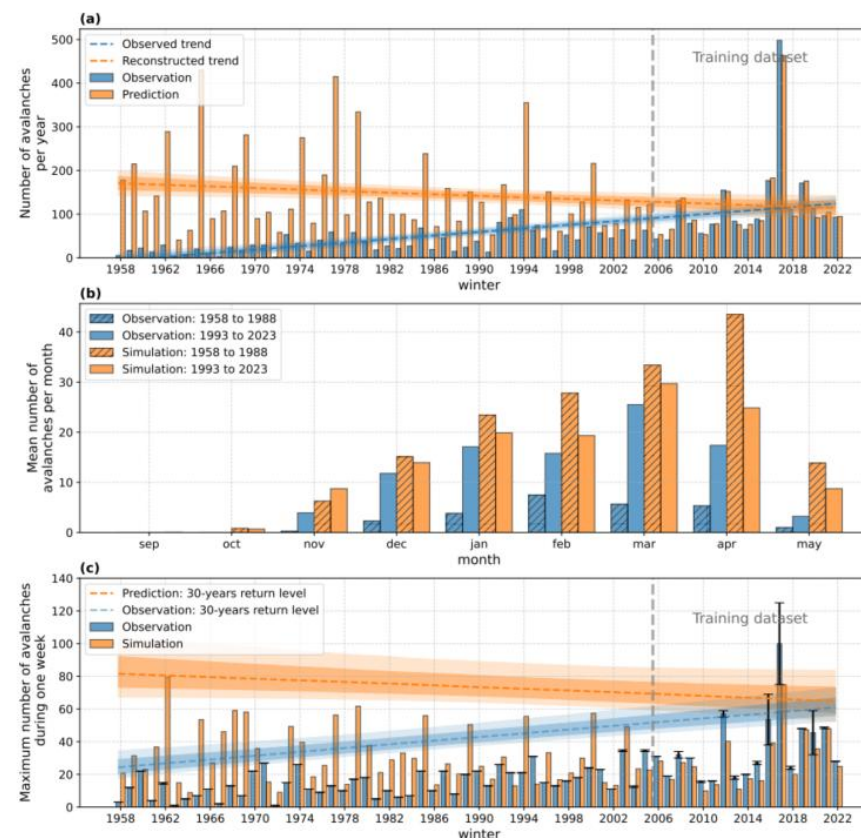


Figure 35 – Activité avalancheuse passée en Haute Maurienne¹⁹ : a) nombre annuel d'avalanches, b) nombre moyen d'avalanches par mois, c) nombre maximal d'avalanches par semaine. Les prédictions du modèle sont représentées en orange. Les observations brutes sont représentées en bleu. Pour a) et c), les tendances linéaires sont représentées avec leurs percentiles 10, 25, 50, 75 et 90.

¹⁹ Doussot, F., Viallon-Galinier, L., Eckert, N., and Hagenmuller, P.: 1950–2100 climate trends in

avalanche activity in Haute-Maurienne, French Alps, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-336>, 2026

Pour autant, cela n'empêche toujours pas la manifestation d'événements encore remarquables et qui peuvent continuer à menacer les infrastructures mais c'est ici leur dynamique qui sera progressivement modifiée.

En particulier, la proportion d'avalanches impliquant de la neige humide, même en hiver, a globalement augmenté sur les dernières décennies, comme l'a montré une étude sur la vallée de Chamonix²⁰ (Figure 36 à gauche). Durant cette même période, une autre étude²¹ a également pointé la diminution forte de la proportion d'avalanches aérosol à l'échelle des Alpes Françaises (Figure 36 à droite et donc a fortiori dans les massifs plus méridionaux). Ces différents effets se contrebalançant, cela ne devrait pas augmenter l'activité globale (et donc le risque ou les conséquences en termes de dommages²²) qui aura même tendance à globalement baisser¹⁹. Ces évolutions observées devraient se poursuivre et s'accroître à partir d'une certaine altitude comme l'a confirmé une étude Suisse (situation plus ou moins équivalente aux Alpes du Nord) basée sur les différents scénarios du GIEC²³ (Figure 37).

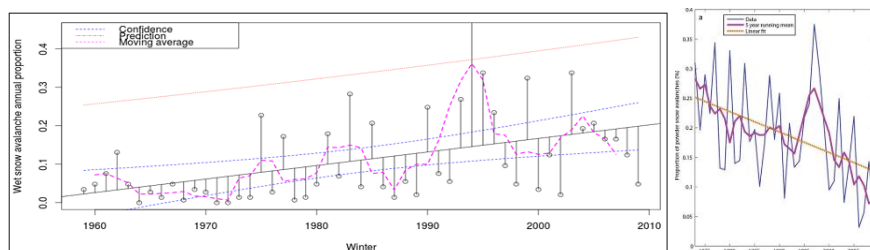


Figure 36 – A gauche, évolution de la proportion d'avalanches humides dans la vallée de Chamonix²⁰ – A droite, évolution de la proportion d'avalanches aérosol à l'échelle des Alpes Françaises²¹

²⁰ Mohamed Naaim, Nicolas Eckert, *Decrease of Snow Avalanches Activity and Proliferation of Wet Snow Avalanches in French Alps Under Climate Warming*, 2016

²¹ Eckert, N., Keylock, C. J., Castebrunet, H., Lavigne, A., and Naaim, M. (2013). *Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions - from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods*. J. Glaciol. 59, 93–114. doi: 10.3189/2013JoG12J091

²² Ortner G., Bründl M., Kropf C.M., Rössli T., Bühler Y., and Bresch D.N., *Large-scale risk assessment on snow avalanche hazard in alpine regions*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 23, 2089–2110, 2023 <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2089-2023>

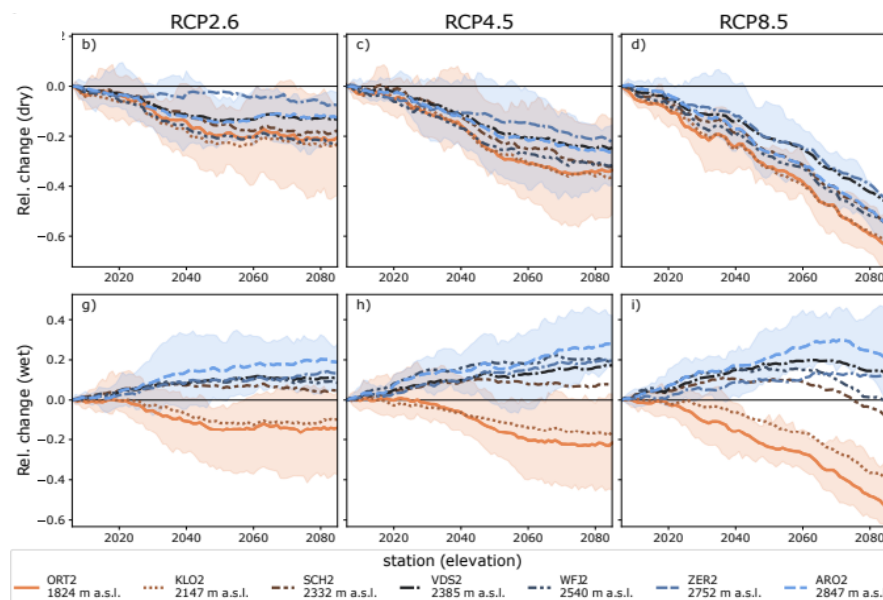


Figure 37 – Evolution de l'activité avalancheuse par type (neige froide en haut, humide en bas) au cours du XIXème siècle selon les scénarios du GIEC (RCP) en différents sites des Alpes suisses (altitudes indiquées en bas) par rapport à la période 1991-2020²³

Dans le détail, ces tendances sont également confirmées à l'échelle de l'écoulement²⁴ : dès lors qu'au cours de sa trajectoire, l'avalanche rencontre des neiges plus "chaudes" et humides, ses caractéristiques changent, produisant des coulées qui restent plus en altitude (tendant même à largement disparaître dans des massifs bas comme les Vosges²⁵) et/ou se réduisent (Figure 38) :

²³ S. Mayer, M. Hendrick, A. Michel, B. Richter, J. Schweizer, H. Wernli, and A. van Herwijnen, *Changes in snow avalanche activity in response to climate warming in the Swiss Alps*, EGUSphere <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1026>, 2024.

²⁴ Eckert, N., Keylock, C. J., Castebrunet, H., Lavigne, A., and Naaim, M. (2013). *Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions - from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods*. J. Glaciol. 59, 93–114. doi: 10.3189/2013JoG12J091

²⁵ F. Giacona, N. Eckert, C. Corona, R. Mainieri, S. Morin, M. Stoffel, B. Martin, M. Naaim, *Upslope migration of snow avalanches in a warming climate*, PNAS 2021 Vol. 118 No. 44 e2107306118

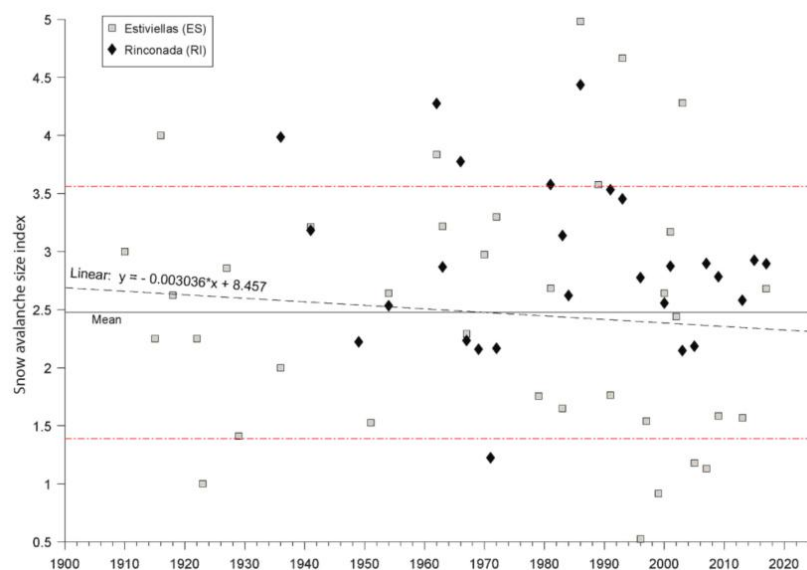


Figure 38 – Distribution des tailles d'avalanches pour 2 couloirs près de Canfranc (Espagne) au cours des 100 dernières années, d'après l'indice de taille calculé²⁶. La tendance montre une diminution progressive de la taille moyenne des avalanches.

Les exceptions peuvent éventuellement concerner les configurations canalisées propices à la création de Warm Plug²⁷ à l'aval avec de possibles sur-extensions longitudinales, parfois selon des directions étonnantes (les fameuses "moustaches"). Il s'agit également d'être prudent par rapport aux avalanches de fond (éventuellement précédées de phénomènes de reptation) qui peuvent mobiliser des volumes plus importants que ceux de la dernière chute de neige. Il n'est pas non plus exclu un "nouveau" phénomène, déjà fréquent notamment

dans les pays nordiques : le slush flow²⁸, un écoulement mélangeant neige très humide et eau liquide avec un coefficient de friction bien plus faible et des trajectoires majorées.

Pour résumer, la conclusion du rapport du GIEC¹¹ sur ce sujet illustre bien la situation : Il y a des preuves et un large consensus sur le fait que les changements observés dans les avalanches en régions montagneuses seront exacerbés à l'avenir, avec globalement une réduction du risque à basse altitude et des changements divers à haute altitude (augmentation des avalanches de neige humide, variabilité encore possible de l'activité avalancheuse globale).

Or dans ces conditions, il faut souligner la robustesse du protocole de quantification utilisé ici (qui doit toujours continuer à couvrir les maximums périodiques possibles):

- Il est directement inspiré d'autres pratiques internationales
- Le recours à la période de retour centennale permet normalement de couvrir les plus gros événements historiques passés mais aussi les épisodes (encore) véritablement "hivernaux" comme ce mois de février 2026 (dont les cumuls restent bien inférieurs aux valeurs, notamment centennales, données par les tableaux précédents).
- En parallèle, l'utilisation de statistiques de neige intégrant des décennies "anciennes" encore peu touchées par les évolutions récentes garantit la prise en compte de valeurs conservatives d'épaisseurs mobilisables
- En termes de pression/sollicitation, les "nouveaux" impacts peuvent rester couverts²⁹ grâce à la combinaison de paramètres à la fois plus pénalisants (par exemple la densité de la neige) et d'autres moins préjudiciables (vitesses plus faibles).

²⁶ O. Franco-Ramos, J. Boyano-Galiano, A. Muñoz-Torrero Manchado, J. I. Lopez-Moreno, J. A. Ballesteros-Canovas, *Climate snow-avalanche linkage revealed by geomorphological, historical and tree-ring records in the central Spanish Pyrenees*, Cold Regions Science and Technology 244 (2026) 104819

²⁷ Köhler, A., McElwaine, J. N., & Sovilla, B. (2018). *GEODAR Data and the Flow Regimes of Snow Avalanches*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123, 1272–1294. <https://doi.org/10.1002/2017>

²⁸ ONF-RTM – INRAE, *Changement climatique et avalanches, note de synthèse sur l'état des connaissances*, juin 2025

²⁹ G. Ortner, A. Michel, M.B.A Spieler, M. Christen, Y. Bühler, M. Bründl, D.N. Bresch, *A novel approach for bridging the gap between climate change scenarios and avalanche hazard indication mapping*, Cold Regions Science and Technology 230 (2025) 104355

IV. SCENARIOS DE REFERENCE ET OUTILS DE MODELISATION

A. SCENARIOS DE REFERENCE

Dans le cadre d'un enjeu de type remontée mécanique, il s'agit de formaliser les prescriptions concernant les risques nivologiques (avalanche – indice a et reptation – indice g) selon le cadre général du récent règlement RM2 (STRMTG 2023) qui justifie la présente analyse. La problématique des avalanches et de la reptation y étant somme toute traitée succinctement, ce qui suit s'inspire également des pratiques suisses³⁰. Par ailleurs, le RM2 introduit une période de retour cinquantennale (issue de la norme EN 13107) peu habituelle en avalanchologie (et non calibrée dans les logiciels utilisés) et/ou alors que certains services instructeurs en DDT souhaitent voir évalué aussi un scénario à l'occurrence centennale par rapport à la période de retour de référence de la gestion des risques en France (doctrine PPR notamment).

Ainsi, deux scénarios sont exhibés ici³¹ (l'introduction des valeurs correspondantes dans les combinaisons d'action restant à la charge du projeteur) :

- Le scénario **Var30** de type ELS et de période de retour 30 ans est centré sur le phénomène de reptation **REPT₃₀** (charge variable principale) combiné à l'avalanche **AVAL₃₀** (charge variable d'accompagnement). Par rapport aux précédentes pratiques, ce scénario reclasse l'avalanche en charge variable considérant les interactions régulières entre ce phénomène lorsqu'il est fréquent et/ou déclenché et les pylônes concernés. Ce cas couvre donc surtout l'exploitation normale lors de la saison d'ouverture et/ou les emprises traitées au PIDA. A ce titre, le cumul de neige considéré est de 48 heures.

- Le scénario **Acc100** de type ELU, centré sur la seule charge accidentelle d'une avalanche centennale **AVAL₁₀₀**. Ce scénario couvre les cas d'événements naturels par exemple avant la saison d'exploitation pour les emprises du PIDA ou pour une avalanche périphérique non déclenchée préventivement. Le cumul considéré est ici de 72 heures.

Géométriquement, la coexistence entre le manteau neigeux en place et les écoulements est considérée comme suit :

- **Var30** : L'avalanche trentennale se produit au-dessus du manteau neigeux en place et de hauteur H_{g30} selon les informations données précédemment (et que ce manteau neigeux génère ou non de la reptation selon les conditions du site).
- **Acc100** : L'avalanche centennale se produit "seulement" au-dessus de la dernière couche de neige H_{n100} correspondant au cumul de référence sur 3 jours l'ayant générée (manteau récent sans reptation).

La coexistence des deux phénomènes est prise en compte indirectement en minorant la hauteur du manteau neigeux/de la couche au sol forfaitairement de 50cm pour tenir compte de l'érosion : cette modification ne s'applique qu'à la hauteur d'application et l'éventuelle charge de reptation reste bien calculée selon la hauteur nominale (CF. § suivant).

L'éventuelle charge aérosol (indice $c="cloud"$) vient s'appliquer selon ses propres caractéristiques physiques. Son profil type est en général composé d'une couche de saltation (assimilable à une phase pseudo-dense mais sans couche de

³⁰ Margreth S., Stoffel L., Schaer M. 2016: *Prise en compte du danger d'avalanches et de la pression de la neige pour les installations à câbles. Guide pratique*. WSL Ber.46 :44p.

³¹ Le TSD actuel n'a été initialement dimensionné que par rapport à un scénario trentennal selon l'étude IMSRN de 2006³ (mais qui inclut aussi à la même occurrence un scénario de neige plus lourde s'écoulant plus lentement)

refoulement) surmontée du nuage turbulent de pression $\pm P_c$ (supposée constante à l'échelle des enjeux concernés) et qui peut s'appliquer autant en surpression qu'en dépression.

Les valeurs de pression de sollicitation sont fournies parallèlement au terrain selon la direction incidente (angles θ_x par rapport à l'axe de ligne - Figure 39) du phénomène considéré : ces directions d'application θ_x peuvent être différentes, d'une part de l'axe de la ligne et d'autre part, entre ces différentes charges puisque la trajectoire des avalanches n'est pas directement le long de la ligne de plus grande pente à l'endroit du pylône (contrairement à la reptation).

De ce fait, chacune de ces directions correspond aussi à une pente apparente potentiellement différente (angles ψ_x): les projections mécaniques correspondantes (fonction de l'inclinaison du pylône) pour le calcul structurel sont à la charge du projeteur (sinon, cela revient à considérer la situation conservative d'un pylône perpendiculaire aux pentes d'évolution de chaque phénomène). Les schémas suivants récapitulent les configurations et les angles correspondants. Les hauteurs mesurées verticalement sont notées H et les épaisseurs correspondantes sont dénommées D.

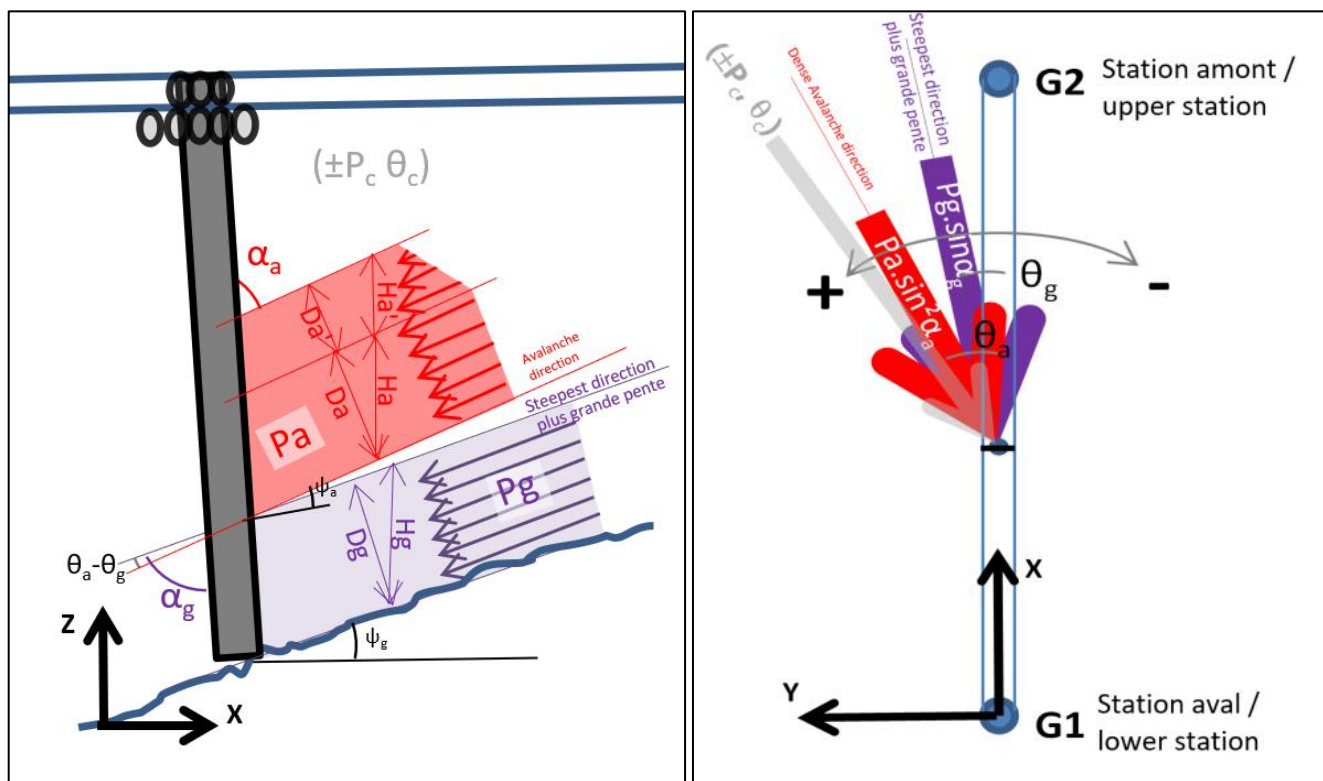


Figure 39 - Schéma type de coexistence des avalanches et de la reptation

B. CHARGE DUE AU PHENOMENE DE REPTATION

Cette charge P_g (kPa) due à la reptation du manteau neigeux est normalement calculée sur son épaisseur nominale selon :

$$P_g = \frac{\rho \cdot g \cdot H_g \cdot K \cdot N \cdot \eta}{2 \cos \psi_g}$$

- ρ : densité (t/m³) considérée classiquement de 0.4 pour les manteaux neigeux préjudiciables.
- g : accélération de la pesanteur (10m/s²)
- H_g : hauteur de neige de référence.
- K : facteur de rampement qui dépend de la pente et de la densité considérée
- N : facteur de glissement qui dépend du sol et de l'exposition
- η : facteur d'influence prenant en compte la présence du pylône
- ψ_g : angle de la pente locale (°) : la reptation est considérée suivre la ligne de plus grande pente

En pratique ici, seuls les P2₂₀₀₆ (renuméroté P2_{bis(2027)}), P3 et P4 actuels subissent un dévers (Figure 40) dans des pentes à peine supérieures à 30° et morcelées (Figure 23), a priori peu préjudiciables vis-à-vis de la reptation. Or, ces pylônes situés dans l'emprise 118 du PIDA ont, d'après l'étude IMSRN de 2006³, fait l'objet d'un dimensionnement vis-à-vis d'une pression avalancheuse entre 50 et 58 kPa

C. CHARGE DES AVALANCHES DENSES

La pression caractéristique de l'avalanche P_a (kPa) est calculée par analogie hydraulique selon :

$$P_a = \frac{1}{2} C_d \rho V^2$$

Avec :

sur 4m de haut (au-dessus d'un manteau neigeux préconisé de 2m de haut) et qui couvre l'éventuelle action de la reptation qui pourrait avoir lieu. Par ailleurs, avec l'allongement (Figure 3 - [2bis]), aucune nouveau pylône₂₀₂₇ n'est concerné par une zone de pente préjudiciable: la reptation n'est donc pas/plus un sujet ici.



Figure 40 – De droite à gauche, vue des P2₂₀₀₆= P2_{bis(2027)}, P3 et P4 du TSD Châtelet (photo prise lors de [1] avec donc P1₂₀₀₆ enseveli à l'avant de la G1 suite à l'avalanche du 17/02/2026)

- C_d : coefficient de trainée. Celui-ci dépend de la forme de l'obstacle et théoriquement des caractéristiques de l'écoulement. Sa valeur par défaut est fixée à 1 pour une section de pylône cylindrique (respectivement 1.5 et 2 pour une section triangulaire et carrée) mais qui est majorée lorsque le nombre de Froude diminue fortement (zone de ralentissement/arrêt de l'avalanche).

- ρ : densité (t/m^3) considérée classiquement de 0.3 dans les écoulements. A noter que cette densité n'est pas directement celle du manteau neigeux en place ni celle des chutes de neige fraîche mais cette valeur largement reconnue assure une cohérence globale des résultats avec le choix de C_d .
- V : vitesse moyenne sur la hauteur de l'écoulement (m/s).

In fine, la pression $P_{a\perp}$ effectivement appliquée de manière normale à la surface du pylône dépendra de l'angle α_a entre la pente d'évolution de l'avalanche et la génératrice du pylône ($^\circ$).

$$P_{a\perp} = P_a \cdot \sin^2 \alpha_a = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \alpha_a$$

S'agissant d'avalanches coulantes denses, une hauteur de refoulement supplémentaire (notée H_a' sur la Figure 39) générée par l'interaction avec le pylône/obstacle est prise en compte. Strictement, la répartition de la pression sur cette hauteur de refoulement est supposée triangulaire et son ampleur est interprétée de la formule proposée par le guide suisse précité.

En plus des aspects purement géométriques, cette charge d'avalanche dense dépend donc principalement de la valeur de la vitesse qui est interprétée à partir de la reconnaissance de terrain et des résultats de modélisation

D. OUTIL DE BASE – AVALANCHES DENSES COULANTES – RAMMS

Les scénarios listés précédemment sont évalués à l'aide du logiciel 2D de référence internationale RAMMS (v 1.8.27 – www.ramms.ch) initialement de l'Institut Fédéral Suisse d'Etudes des Avalanches à Davos. Ce logiciel reste basé sur le modèle de Voellmy (1955) qui utilise une loi d'écoulement moyennée 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 μ et visqueux ξ associé au carré de la vitesse d'écoulement.

Les hypothèses suivantes sont utilisées :

- Jeu complet de paramètres correspondant à la période de retour du scénario considéré : l'ensemble des préconisations quant au choix des paramètres du SLF sont respectées sans ajustement ou modification.
- Zone(s) de départ définie(s) de manière experte et exhaustive par combinaison de la pente (entre 30 et 55°, valeur au-delà de laquelle la neige se purge naturellement) et de la courbure (concavité).
- Chacune des zones ainsi définies est affectée d'une épaisseur mobilisable d_0 correspondant à son altitude et sa pente moyennes selon le processus indiqué précédemment.

- Densité : 300 kg/m^3 . Cette densité est celle de l'écoulement qui ne correspond pas à celle du manteau neigeux dans la zone de départ.
- Résolution de la grille régulière représentant la topographie actuelle: 5m [4] conformément au calibrage du logiciel.

Un des paramètres prépondérants pour ces modélisations est le choix de la catégorie de volume qui va gouverner le comportement de l'avalanche. Ce volume doit s'entendre comme celui qui va "interagir avec lui-même" au sein des lignes d'écoulements et pour cela, RAMMS permet le choix entre "tiny" ($<5000m^3=T$), "small" ($<25000m^3=S$), "medium" ($<60000m^3=M$) et "large" ($>60000m^3=L$).

A noter que le paramètre de cohésion N_0 disponible dans les dernières versions du logiciel est utilisé le cas échéant dans la gamme des neiges froides / sèches (valeur jusqu'à 100Pa) pour privilégier les trajectoires les plus importantes et rapides tout en permettant d'affiner les résultats.

Lorsqu'il faut combiner au mieux les contributions de hauteur et pression dans la sollicitation potentiellement générée, les résultats sont restitués sous forme de l'intensité avalancheuse, elle-même assimilable à la force subie par un obstacle

de largeur unitaire (donc en kN/ml et obtenue par la multiplication des cartes brutes de hauteur et pression maxi fournies par RAMMS).

Quel que soit l'outil de calcul utilisé et vu la variabilité possible³², les résultats de simulation sont bien des résultats bruts à considérer comme tels : ils fournissent

E. OUTIL DE MODELISATION EVOLUE – RAMMS ::EXTENDED

Après plusieurs années de tests auprès de bureaux d'études partenaires comme Engineerisk, la mise à disposition officielle de la version étendue (désormais 3.0.6) de RAMMS³³ a donné l'opportunité de nouveaux types de calculs par rapport aux approches "historiques" basées sur la version traditionnelle de RAMMS présentée précédemment. Au-delà des controverses qu'il a pu générer et désormais refermées^{34,35}, cet outil a fait l'objet d'importants développements³⁶ et applications permettant d'envisager désormais une utilisation encadrée "pour ce qu'il perçoit du fonctionnement du site étudié".

Surtout, l'intérêt est d'aborder la modélisation des avalanches par une approche radicalement différente pour notamment pouvoir comparer et compléter les résultats obtenus avec la version traditionnelle de RAMMS. En particulier, il ne s'agit plus de gérer simplement le glissement d'un volume de neige initial, sans reprise supplémentaire au cours de sa trajectoire et en affectant l'interface avec le terrain d'un comportement frottant plus ou moins complexe. Au contraire et à partir d'un volume mobilisé au départ et qui sert d'impulsion, RAMMS::extended intègre les équations de reprise de neige tout au long de la trajectoire gouvernée par la gravité mais donc aussi par l'interaction avec le

la "vision" du modèle (avec ses points forts et ses limites) quant au fonctionnement des phénomènes avalancheux sur le site étudié. Dans tous les cas, ces résultats sont donc systématiquement interprétés et les prescriptions ajustées pour tenir compte des conditions locales et/ou de particularités.

manteau neigeux en place et les «échanges entre les différentes phases (Figure 41).

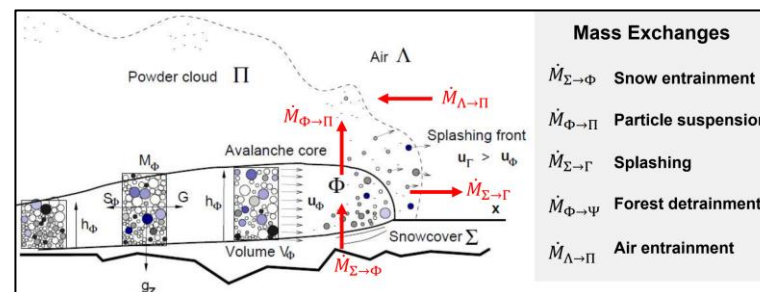


Figure 41 – Vue des 5 processus d'échange alimentant le modèle

D'une part, le phénomène est alimenté au fur et à mesure de sa descente (sans donc avoir à définir des zones de départ additionnelles en cours de route pour "constituer" le volume représentatif total) mais d'autre part, nécessite d'introduire de nouveaux paramètres. A ce stade, le paramétrage des calculs a cependant encore progressé avec désormais la possibilité de choisir une catégorie de volume (même principe qu'évoqué précédemment) et une période

³² A. Wirbel, F. Oesterle, G. Chambon, T. Faug, J. Gaume, J. Glaus, S. Hergarten, D. Issler, Y. Ito, M. Martini, M. Mergili, M. Rauter, J. Robl, G. Rosatti, K. Tsunematsu, C. Tollinger, H. Vicar, D. Zugliani, J.-T. Fischer, ISeeSnow v1.0 - a pilot study for snow avalanche model intercomparison of thickness-integrated shallow flow approaches and beyond, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-6053> Preprint 2026

³³ Bartelt P., Christen M., Snow avalanche dynamics with RAMMS::extended, user manual, RAMMS AG, September 2025

³⁴ Bartelt, P.; Buser, O., 2018: Avalanche dynamics by Newton. Reply to comments on avalanche flow models based on the concept of random kinetic energy. Journal of Glaciology, 64, 243: 165-170. doi:

10.1017/jog.2018.1

³⁵ Bartelt, P.; Buser, O., 2016: Reply to "Discussion of "The relation between dilatancy, effective stress and dispersive pressure in granular avalanches" by P. Bartelt and O. Buser (DOI: 10.1007/s11440-016-0463-7)" by Richard Iverson and David L. George (DOI: 10.1007/s11440-016-0502-4). Acta Geotechnica, 11, 6: 1469-1473. doi: 10.1007/s11440-016-0503-3

³⁶ J. Glaus, K. Wikstrom Jones, Y. Buhler, M. Christen, P. Ruttnen-Jansen, J. Gaume and P. Bartelt, RAMMS::extended – Sensitivity analysis of numerical fluidized powder simulation avalanche in three-dimensional terrain, Proceedings of The International Snow Science Workshop, ISSW, Bend, 2023

de retour pour définir les valeurs maximums des coefficients de frottement μ et ξ de la cohésion N_0 (tableau ci-après) que le modèle module en temps réel en fonction des conditions de l'écoulement. Cette évolution permet désormais de considérer un processus de référence³⁷ en particulier pour les avalanches aérosol³⁸.

La possibilité d'approcher cette phénoménologie particulière a été un des premiers points forts de RAMMS ::extended , notamment faute d'alternatives opérationnelles. Dans ce cas, la reprise ou la génération d'un aérosol sont très fortement dépendantes de la "qualité" de la neige du manteau neigeux en place qui dépend elle-même (notamment) de la température et de la densité. Il convient d'ajouter à cela un certain nombre de coefficients de "transfert" entre les différentes phases du phénomène, le calcul restituant ici à la fois le cœur fluidifié et pseudo-dense "surmonté" du nuage.

Ainsi, une couche érosive distribuée correspondant elle-même à la chute de neige récente de référence (valeur de référence d_0^* analogue au d_0 traditionnel mais sur une pente à 28° normalement sans contribution du vent) est calculée sur le domaine de calcul tenant compte du facteur de pente (Tableau 2), d'un gradient nivométrique (entre 3 et 5cm/100m) mais aussi d'éventuels seuils de limitation (déclivité max, altitude min, présence de forêt).

Ensuite le calcul est réalisé à partir d'une zone de départ (définie de manière analogue à celle de la version traditionnelle de RAMMS y compris donc son

épaisseur mobilisable d_0) sur la base des principaux paramètres modifiables suivants :

- la température de la neige représentative à la fois dans la zone de départ puis là aussi redistribuée automatiquement dans la couche érosive en fonction de l'altitude selon un gradient de température (entre 0.2 et 0.4°, typiquement 0.3° C par 100m pour les Alpes du Nord). Cette température n'est pas la température de surface de la neige mais bien plutôt une température moyenne sur les épaisseurs concernées par les processus de mobilisation et entrainement. Pour les Alpes (du nord), le SLF a pu définir quelques grandes valeurs représentatives issues de l'analyse de nombreux profils correspondant à des situations avalancheuses : de l'ordre de -5° C (voire -4°) jusqu'à 2100m, -7° (voire -8°) au-delà de 2600m et -6° sinon. Les dernières versions intègrent la température de l'air mais assimilée à celle retenue pour la neige.
- La densité initiale qui varie typiquement entre 175 kg/m³ (possiblement 150 pour les zones de départ les plus raides) et 200kg/m³ en descendant en altitude et extrapolée selon différents modèles. Celui correspondant au cumul classique sur 3 jours est utilisé ici.

Une valeur seuil est enfin introduite pour empêcher que les petites épaisseurs d'écoulement cependant rapides puissent éroder trop de neige. 300 Pa est retenu. Les autres paramètres (cloud drag autour de 3, splash à 0.2, generate à 0.07...) sont utilisés comme préconisés par le SLF.

Release Volume (m³)	Category	10Y	30Y	100Y	300Y
< 5000	Tiny (T)	A	A	B	C
5'000-25'000	Small (S)	B	B	C	D
25'000-60'000	Medium (M)	C	C	D	E
>60'000	Large (L)	D	D	E	F

Parameter	A	B	C	D	E	F
μ_0	0.55	0.48	0.42	0.37	0.33	0.30
ξ_0 (m/s²)	1800	1850	1900	1900	1950	2000
N_0 (Pa)	200	150	100	100	75	50

Figure 42 – matrice de paramétrisation en fonction de la période de retour et de la catégorie de volume

³⁷ L. Stoffel, M. Christen, S. Margreth and P. Bartelt, *Snow Entrainment, Snow Temperature and Density*, RAMMS AG Workshop, Tromsø, sept. 2024

³⁸ Bartelt P, Buser O, Vera Valero O and Bühler Y (2016) *Configurational energy and the formation of mixed flowing powder snow ice avalanches*. Ann. Glaciol., 57(71), 179–187.

V. ANALYSES & DISCUSSIONS

A. LIGNE EXISTANTE A PARTIR DE $P_{2006}=P_{2BIS(2027)}$

L'objet de ce paragraphe est de vérifier si/dans quelle mesure la partie de ligne qui doit être conservée ($P_{2006}=P_{2BIS(2027)}$ et au-delà) respecte bien les critères actuels de dimensionnement d'une remontée mécanique selon les scénarios précités. La reptation n'étant pas préjudiciable (cf. précédemment), il s'agit principalement de vérifier les prescriptions de l'étude IMSRN de 2006³, limitées à l'occurrence trentennale mais qui paraissent quantitativement conservatives, par rapport au scénario centennal.

Au niveau des bassin-versants des emprises CLPA n°50 et 52 dans les pentes du Roc des 3 Marches, les résultats (ci-contre) confirment :

- L'efficacité de la tourne au-dessus de la G2 du TC Plattières qui capte désormais l'ensemble des flux. Bien entendu, cela induit sa purge très régulière comme actuellement, en rappelant également que ce scénario centennal ne tient pas compte de l'influence bénéfique du déclenchement. Ici, les pentes bénéficient de la redondance de Catex et de Gazex pour optimiser les possibilités.
- Le caractère vraisemblablement erroné (en termes d'orientation) de l'emprise CLPA n°52 dont l'extrémité doit viser plus à l'ouest comme indiqué sur le PIDA et finalement sans approcher la ligne du TSD.

Conformément à l'étude IMSRN de 2006³, aucun des pylônes de cette section supérieure (de P9 à P16 inclus) y compris la G2 ne nécessite de prescription particulière, même à l'occurrence centennale.

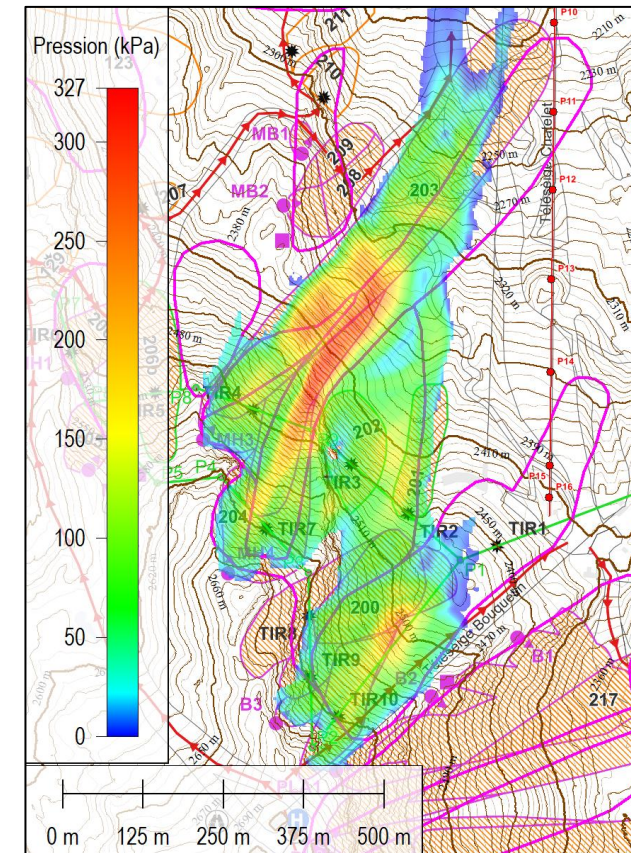


Figure 43 – Modélisation dense coulante centennale (catégorie de volume Small, cohésion de 50 Pa) pour la section du TSD Châtelet sous le Roc des 3 Marches – Echelle de couleur = pression max pour un “gros” obstacle (à diviser par 2 pour un pylône) – Limites témoignées de la CLPA en magenta – Fond du PIDA avec superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge)

Vis-à-vis des pentes du Mont de la Challe et de ses contreforts pour lesquelles ³ a fourni des dimensionnements, le choix s'est porté sur un calcul à la fois centennal mais également maximisé en termes de catégorie de volume (LARGE) et d'exhaustivité des zones de départ sommitales (au niveau de la G1, la partie nord des pentes préjudiciables n'a juste pas été considérée).

En considérant le cas dense coulant comme le plus représentatif, on obtient le tableau comparatif en termes d'intensité ci-dessous : il confirme le pessimisme de l'étude IMSRN de 2006³ : Seul le P5 qui n'avait a priori pas fait l'objet d'une prescription particulière (car en dehors des emprises PIDA qui avaient fait référence pour déterminer les pylônes exposés) subit une intensité supérieure. Cependant, cette dernière correspond à un écoulement "numérique", certes plutôt rapide mais d'à peine quelques décimètres d'épaisseur et qui est interprétable comme non préjudiciable vu la résistance intrinsèque de ce type de support)

Emprise PIDA	Pylône	Maxi P IMSRN ²	H IMSRN ²	Intensité IMSRN ²	Intensité RAMMS 100ans
118	P2 ₂₀₂₆ =P2 _{Bis(2027)}	58 kPa	4 m	232 kN/ml	10 kN/ml
	P3	58 kPa	4 m	232 kN/ml	10 kN/ml
	P4	58 kPa	4 m	232 kN/ml	10 kN/ml
-	P5	-	-	-	30 kN/ml
119	P6	81 kPa	4 m	324 kN/ml	30 kN/ml
	P7	81 kPa	4 m	324 kN/ml	20 kN/ml
122	P8	45 kPa	4 m	180 kN/ml	0 kN/ml

Figure 44 – Comparaison des résistances en termes d'intensité entre les prescriptions de l'étude IMSRN de 2006³ et le résultat RAMMS dense coulant centennal pour les pentes et contreforts du Mont de la Challe (Figure 45)

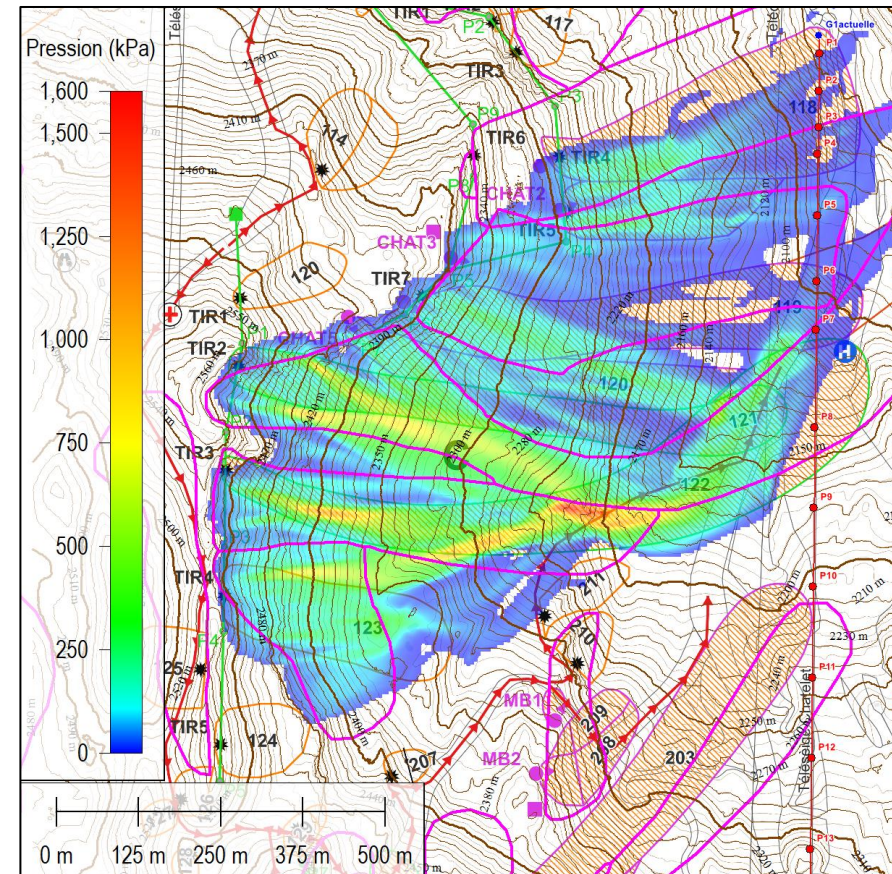


Figure 45 – Modélisation dense coulante centennale (catégorie de volume maximisée LARGE, cohésion nulle) pour la section du TSD Châtelet sous les contreforts du Mont de la Challe (seule la moitié sud des pentes au-dessus de la G1 a été considérée) – Echelle de couleur = pression max pour un "gros" obstacle (à diviser par 2 pour un pylône) – Limites témoignées de la CLPA en magenta – Fond du PIDA avec superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) et les alternatives de reconstruction (en bleu)

Par rapport à la figure précédente, on constate également certaines distorsions d'emprises dans le versant sud-est du Mont de la Challe :

- L'emprise CLPA 69 a clairement tendance à diverger en bordure sud. Ce qui est cohérent avec la topographie. A ce titre, l'emprise PIDA 119 pourrait être orientée un peu plus vers le sud-est.
- Les emprises PIDA 121 et 121 pourraient aussi être affinées mais sont globalement assez cohérentes avec les résultats.
- En revanche, l'emprise CLPA n°17 jusqu'au Plan de Tuéda pose réellement question : en notant le long (quasi) "replat" intermédiaire (Figure 46) à traverser, ce point avait déjà été soulevé dans ⁵ et ici non plus il n'a pas été possible d'en reproduire le principe y compris en mobilisant un aérosol tri-centennal maximisé avec 2 zones de départ (Figure 47). L'examen des clichés historiques amène le même doute, a fortiori vu les arbres présents en 1970 (ci-contre également), soi-disant après la dernière observation de cette avalanche³⁹ (et alors que le site n'était pas encore équipé du tout donc vraisemblablement avec peu d'observateurs).

Cela confirme donc la faible exposition de la ligne du TSD Châtelet à partir du P₂₀₀₆=P_{2bis(2027)} et qui n'est pas remise en cause par la présente analyse actualisée par rapport aux critères désormais demandés.

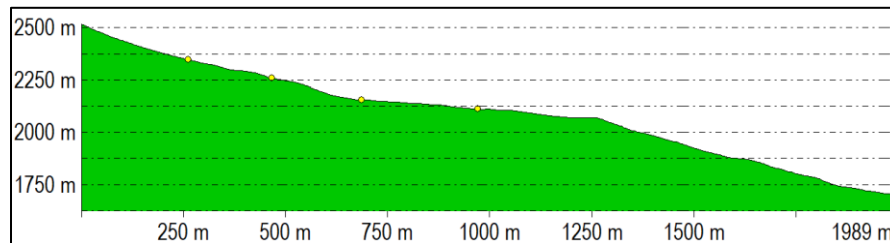


Figure 46 - Profil topographique de l'emprise CLPA n°17

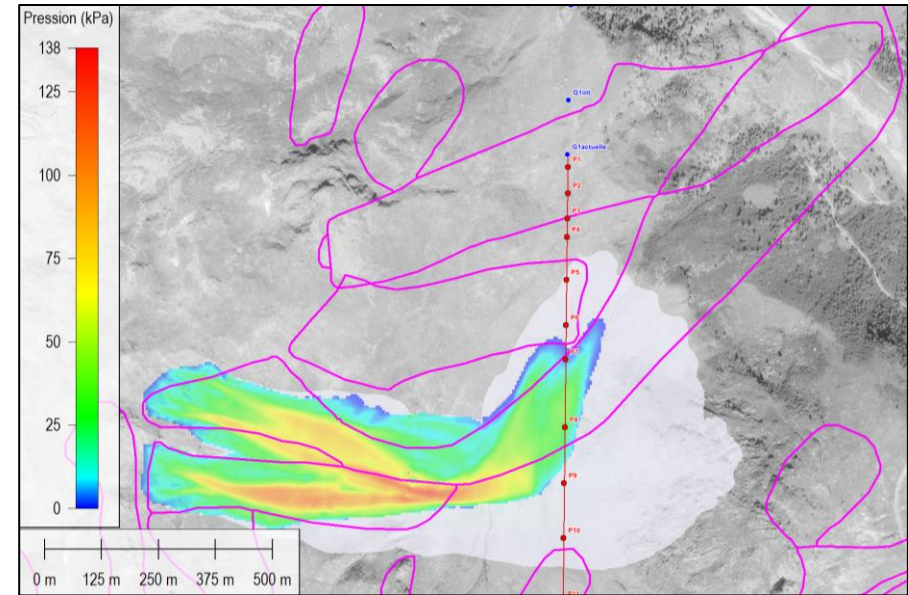


Figure 47 - Modélisation aérosol tri-centennale (catégorie de volume maximisée LARGE) par rapport à la soi-disant atteinte du Plan de Tuéda par l'emprise CLPA n°17 – Echelle de couleur = pression max pour le cœur du phénomène – Zone blanchâtre = extension du nuage - Limites témoignées de la CLPA en magenta – Fond cliché IGN de 1970 (source Géoportail "remonter le temps" – image rectifiée manuellement et pouvant conduire à des décalages limités) avec superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) et les alternatives de reconstruction (en bleu)

³⁹ En revanche, la CLPA n°18 montre bien sur ce cliché de 1970 une partie aval de trajectoire

complètement déboisée

B. ZONE DE LA G₁₂₀₀₆

Comme décrit précédemment, la zone actuelle de la G₁₂₀₀₆ a été particulièrement impactée avec les dégâts indiqués. Positivement, aucun nouveau pylône n’y sera érigé (Figure 3 – [2bis]) permettant a priori de s’affranchir de la problématique sur la nouvelle infrastructure.

Il convient cependant de revenir sur l’impact constaté au niveau de la toiture de la G₁₂₀₀₆ (Figure 50) et qui aurait pu aussi concerner une configuration de ligne sans pylône ici. On ne peut notamment exclure des développements verticaux du fait de la présence de la tourne à l’amont et d’un possible effet tremplin induit. En cohérence avec les modélisations représentatives du phénomène de février 2026 (Figure 48 & Figure 49), un calcul de jet selon⁴⁰ a ainsi pu être mené qui n’exclut pas cette possibilité (Figure 52).

Ce phénomène vertical est aussi souligné par la ruine du P₁₂₀₀₆ (Figure 51). En effet selon l’étude IMSRN de 2006³, il est quand même sensé soutenir un moment de 930 kN.m (sous réserve de l’application des pondérations et avec l’hypothèse d’un diamètre de l’ordre de 1m). Or d’après les modélisations ci-contre, le moment effectif serait plutôt induit par une pression de 50 kPa (valeur cohérente avec ³) mais seulement sur 1.5m à 2m d’épaisseur (contre 4m dans ³) soit au pire 300kN.m, 3 fois moins que sa résistance théorique : si le pylône P₁₂₀₀₆ s’est renversé, c’est donc forcément que l’impact principal a eu lieu plus haut (a fortiori pour un pylône en compression “porté” par ses câbles) où la surface de la tête (potences, trains de galets, passerelles) pénalise rapidement les surfaces.

Dans tous les cas et alors que sa présence (pour ménager une fosse suffisante) raidit aussi de fait les pentes aval du talus qui peut s’écouler dans la gare (Figure 53), la tourne amont a donc surtout une influence néfaste pour les événements majeurs (alors qu’elle est très utile pour les petits phénomènes) : elle ne peut les arrêter et au contraire va même les soulever.

⁴⁰ T. Jóhannesson, P. Gauer, P. Issler and K. Lied, eds. 2009. The design of avalanche protection dams:

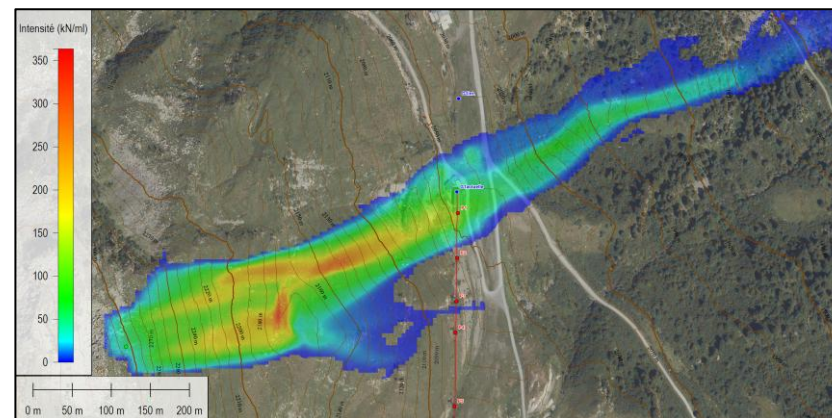


Figure 48 - Modélisation dense coulante centennale (catégorie de volume MEDIUM Vu les reprises intermédiaires) sur terrain actuel- Echelle de couleur = intensité max - superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) et des alternatives de reconstruction (en bleu)

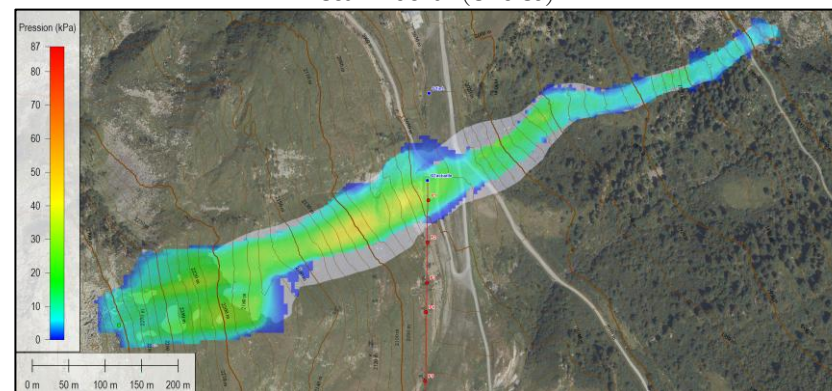


Figure 49 - Modélisation aérosol centennale – Echelle de couleur = pression max pour le cœur du phénomène – Zone blanchâtre = extension du nuage - superposition de la ligne 2006 du TSD Châtelet (en rouge) et des alternatives de reconstruction (en bleu)

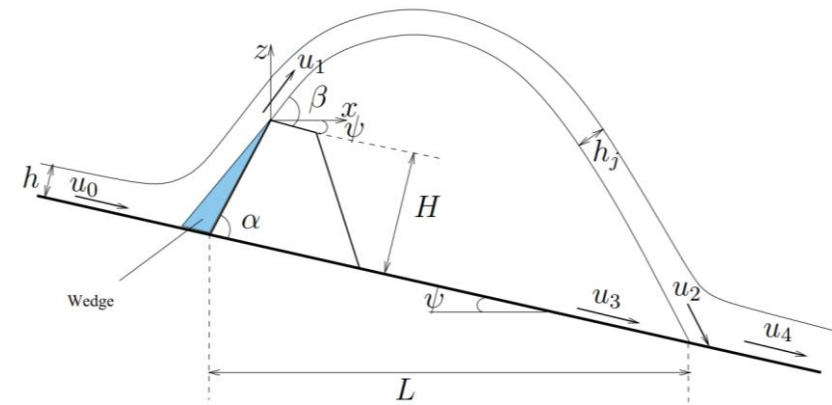
recent practical and theoretical developments. Brussels, European Communities. 195pp. ISBN 978-92-79-08885-8



Figure 50 – Vue du dessus de la gare avec un trou dans la toiture



Figure 51 – Vue de la ruine à la base du P12006 (photo S3V)



uo flot incident	24 m/s
h flot incident	2 m
Pente du terrain ψ	35 °
H tas	3 m
Angle du parement amont par rapport au terrain α	85 °
k	0.9
u1	20.7 m/s
β théorique	65 °
β pratique	44 °
f/hj	0.004 m-1
L	61.9 m

Figure 52 – Calcul réaliste selon ⁴⁹ du jet possible pour atteindre la gare depuis la tourne

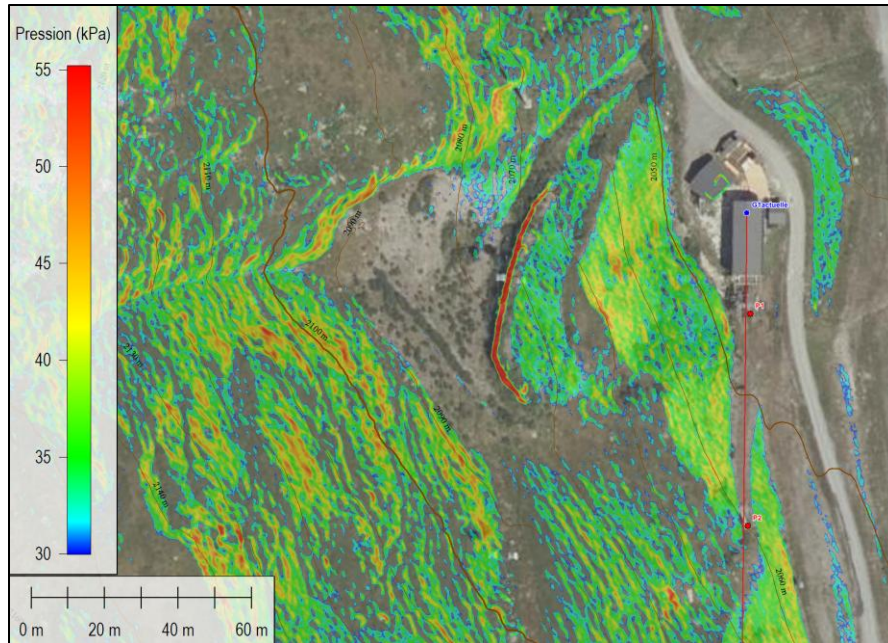


Figure 53 – Carte des pentes dans le secteur de la G12006 à la pleine résolution du LidarHD [4] : 50cm

Dans ces conditions et pour éviter un tel phénomène aérien parasite sur la nouvelle ligne (y compris en l'absence de pylônes), il est important d'éliminer cet effet tremplin, donc en gommant la tourne actuelle.

Or et cette fois du point de vue de la sécurité de la piste contigüe, les volumes de matériaux correspondant peuvent être avantageusement (et gravitairement) réutilisés en érigeant la levée de terre maximale en bordure est de la plateforme historique de la G12006/juste avant la piste de la Sitelle : l'avantage est double, avec une meilleure localisation, moins soumise aux fortes vitesses, ménageant une vraie fosse pour stocker les dépôts et une position permettant aussi de capter les éventuels coulées de la partie aval du talus (qui pourra aussi être adouci par la même occasion en privilégiant une pente régulière depuis la limite amont de la fosse actuelle soit vers 2080-2085m).

Cette nouvelle digue, d'une hauteur minimale de 3m50 à 4m, verra idéalement son parement ouest raidi et se concentrera surtout sur la quarantaine de mètres démarant au droit de l'arrière de l'ancienne G12006 jusqu'au droit de l'ancien P12006. En fonction des volumes de matériaux disponibles, elle peut utilement se poursuivre de part (ancien portique skieurs) et d'autre (une dizaine à quinzaine de mètres au-delà du P12006).

C. RALLONGEMENT DE LA LIGNE ET DECALAGE DU DEPART VERS LE NORD

Les figures ci-dessous illustrent la situation de l'allongement prévu [2bis] : on constate d'une part à l'amont quelques poches de pentes "un peu" raides mais réduites et suffisamment éloignées des nouvelles infrastructures pour ne pas présenter de problèmes. D'ailleurs, le terrassement en remblais de la G₁₂₀₂₇ va lui-même gommer une bonne partie du talus le plus aval existant.

D'autre part et s'il apparaît dans l'emprise historique CLPA (Figure 4), le P₂₂₀₂₇ n'est pas dans une zone connue au PIDA et/ou par le service des Pistes [1]. Cependant, vu les traces visibles sur la Figure 55, il est assez clair que l'avalanche

de février 2026 n'est pas passée très loin, a fortiori vu l'influence possible de la partie nord de la tourne (d'où l'intérêt supplémentaire de la gommer). **Dans ces conditions, il est conseillé, au seul titre du scénario centennal précité, d'intégrer les prescriptions suivantes pour ce pylône P₂₂₀₂₇.**

	SCENARIO		ACC100= AVAL ₁₀₀					ψa	θa
	X	Z	Hn ₁₀₀	Pa ₁₀₀ =Pa ₁₀₀ /sin²α _a	Ha ₁₀₀	Ha' ₁₀₀	CHARGE		
P ₂₂₀₂₇	40.0 m	2039.9 m	0.6 m	20 kPa	1.0 m	0.5 m	Accident.	-50 °	0 °

Tableau 4 - Prescriptions centennales accidentelles pour le pylône P₂₂₀₂₇ [2bis]

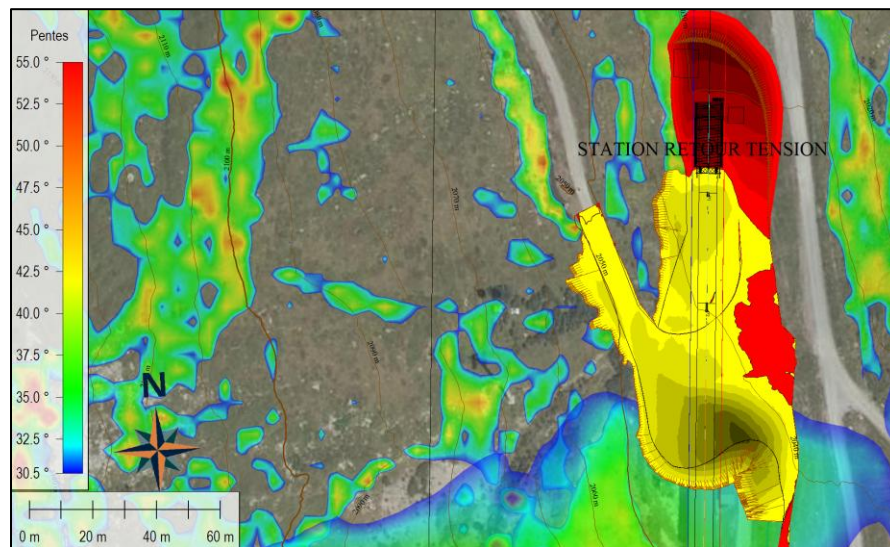


Figure 54 – Vue de l'ensemble G₁₂₀₂₇, P₁₂₀₂₇, P₂₂₀₂₇ d'après [2bis] sur la carte des pentes (échelle de couleurs) issue de [4] : en jaune zones de déblais, en rouge remblais. Courbes de niveau tous les 10m



Figure 55 – Position approximative de G₁₂₀₂₇, P₁₂₀₂₇, P₂₂₀₂₇ d'après [2bis]

VI. CONCLUSION

Avec deux événements dommageables en quelques années après l'avalanche de référence de 1999 qui avait atteint le Plan de Tuéda, l'emprise CLPA 18 nécessite de revoir la conception du départ du TSD Châtelet. Est donc prévue à l'échéance 2027 l'allongement de la ligne selon [2bis] et permettant de complètement enjamber la zone critique.

Cette situation est beaucoup plus favorable d'autant que le reste de la ligne existante a pu être vérifié et rentre bien dans le cadre de vérification actuel. Deux précautions limitées sont cependant à prévoir :

- Le gommage de la tourne actuelle pour éviter un éventuel tremplin dont le jet pourrait éventuellement rencontrer la partie aérienne de la ligne. Cette contrainte peut être transformée en avantage/amélioration en utilisant (gravitairement) les matériaux pour ériger la digue décrite dans la partie §VB.
- Le dimensionnement complémentaire du P2 selon les prescriptions du Tableau 4 précédent

Dans ces conditions, cet appareil qui a déjà vécu 20 ans peut envisager les années à venir avec la pérennité et la sécurité attendues vis-à-vis des avalanches.