



# RAPPORT

## RISQUES NIVOLOGIQUES – PRESCRIPTIONS DE DETAILS

### TSD Aiguille Percée - TIGNES

vo du 14 septembre 2023

Rédigé par : Fanny BOURJAILLAT

 + 33 6 23 75 06 42 fb@engk.fr

Visa :



Validé par : Dr. Ing. Philippe BERTHET-RAMBAUD

 + 33 6 23 75 04 44 pbr@engk.fr

Visa :



Ce rapport contient 23 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 : FRA574  
Version 0 du 14/09/2023 – niveau PRO

## REFERENCES

- [1] Etude Engineerisk, réf : " FRA574-20221222 STGM Diagnostic des risques nivologiques - Etude comparative TSD Aiguille Percée"
- [2] Données projet, réf." PL\_964\_B" transmises le 31.07.2023, Source DCSA
- [3] [www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr)
- [4] PIDA, Source : régie des pistes de Tignes
- [5] Lidar, Source : Syntegra
- [6] C. Whilelm, Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz, Mtt.Eidgenössisches Institut fü Schnee und Lawinenforschung, 54, Davos 1997
- [7] Chronique des relevés nivo-météorologiques du domaine skiable de Tignes (depuis 1970-1971), Source : régie des Pistes
- [8] Etude ASI, MEFFRE JF, 2005, réf : "

# SOMMAIRE

I. Introduction .....	4
II. ETAT DES RISQUES CONNUS.....	5
A. Les avalanches.....	5
B. Phénomène de reptation.....	8
III. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO.....	9
A. Climatologie & manteau neigeux de référence.....	9
B. Epaisseurs mobilisables.....	10
IV. SCENARIOS DE REFERENCE ET QUANTIFICATION DES PHENOMENES.....	13
A. Scénarios de référence.....	13
B. Charge due au phénomène de reptation .....	14
C. Charge des avalanches denses .....	15
V. MODELISATIONS NUMERIQUES DES ECOULEMENTS.....	16
A. ECOULEMENTS DENSES .....	16
B. AVALANCHES AEROSOLS .....	18
VI. CONCLUSION .....	22

# I. INTRODUCTION

Suite à [1] qui comparait l'exposition aux risques nivologiques de deux tracés envisagés pour le remplacement du TSD Aiguille Percée (Figure 2 & Figure 2), il est désormais question de donner les prescriptions de détails pour la ligne finalement retenue.

Il s'agit de l'axe n°1 (=axe actuel) pour lequel les différentes infrastructures ont été localisées de manière définitive.

Pour rappel, dans [1] avaient été détectés :

- Un risque d'avalanche dense entre les altitudes 2540 m et 2 590 m, plus ou moins important selon les périodes de retour trentennale et centennale
- Un risque (modéré) d'avalanche aérosol sur le secteur de la G1 uniquement pour l'avalanche (très) exceptionnelle.



Figure 1: Vue de l'axe actuel (n°1 dans [1])

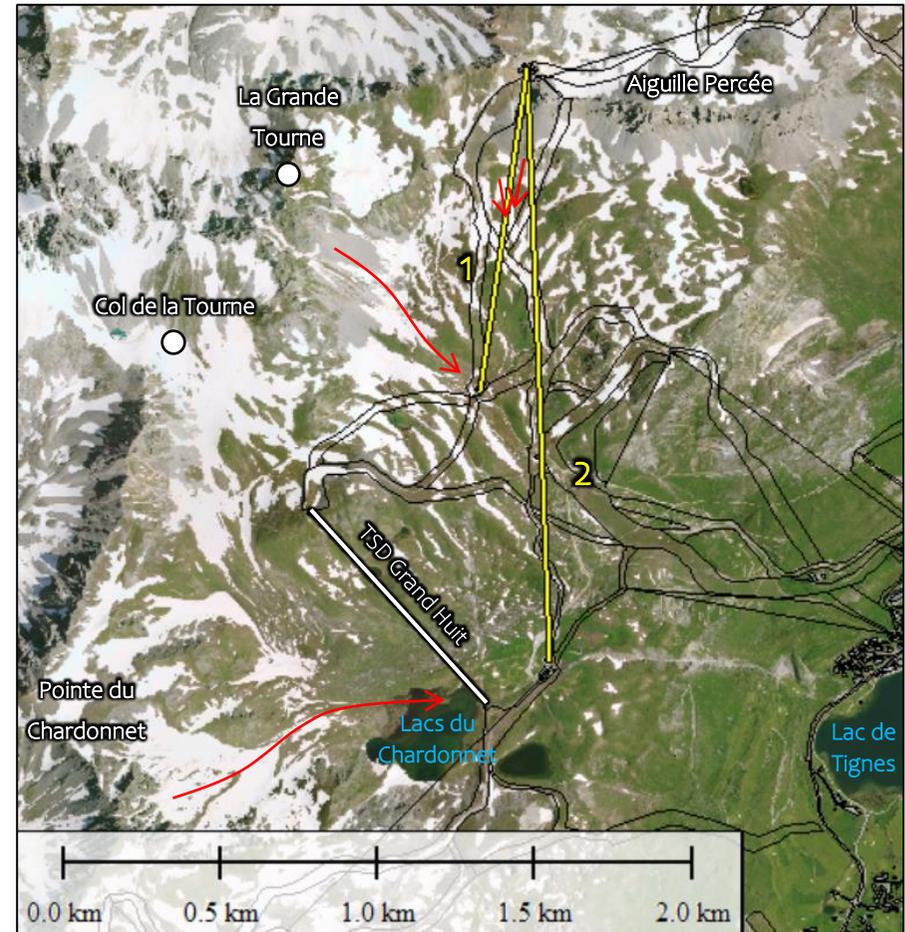


Figure 2: Localisation générale des deux projets de ligne pour le TSD Aiguille Percée (en jaune). En rouge les principaux écoulements

## II. ETAT DES RISQUES CONNUS

### A. LES AVALANCHES

CLPA/EPA

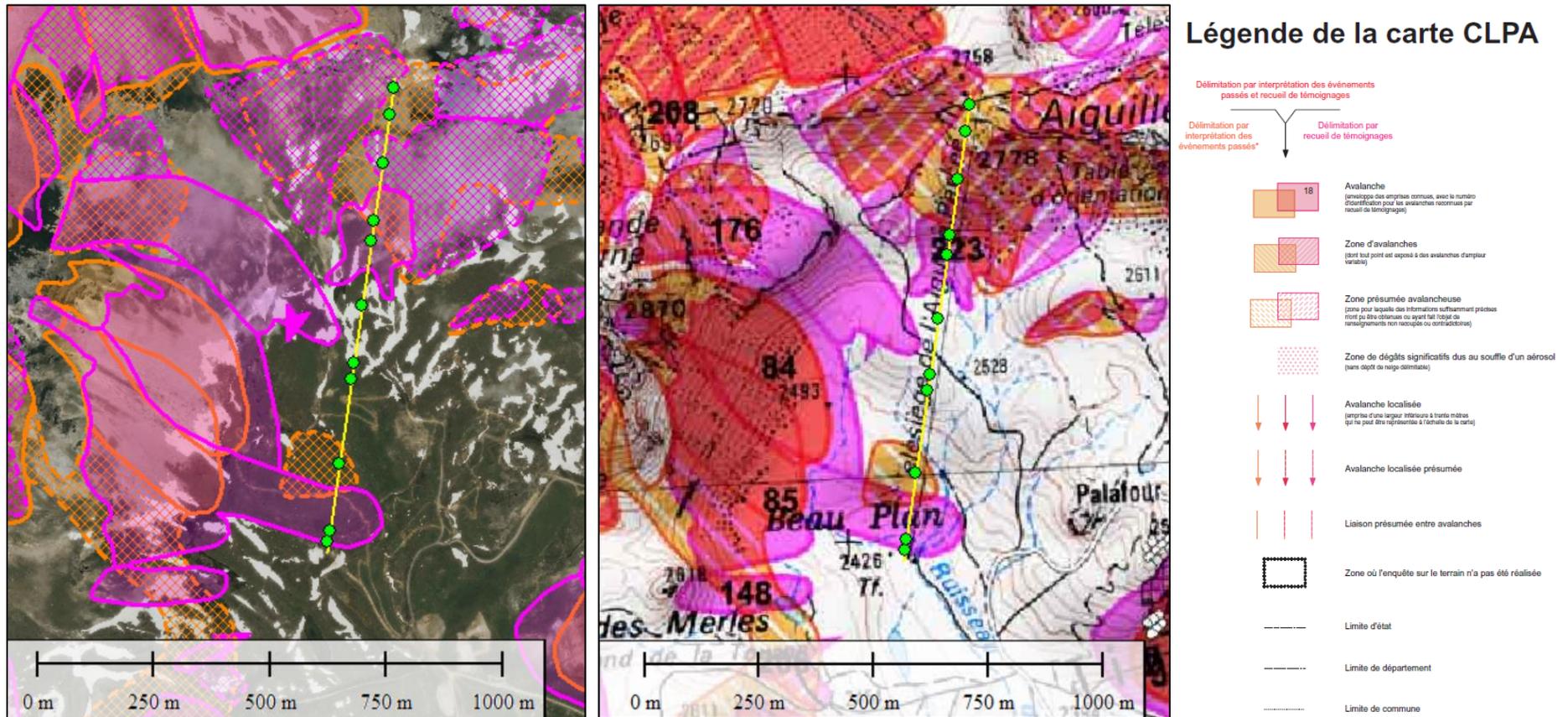


Figure 3 : Couches vectorisées de la CLPA sur fond orthophoto et extrait de la carte CLPA correspondante [3]

D'après la CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanches [3] - Figure 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), qui répertorie les plus gros phénomènes connus à ce jour, les "avalanches" numérotées suivantes (accompagnées des témoignages repris des fiches signalétiques correspondantes) sont susceptibles d'atteindre le projet :

❖ CLPA n°85 "La Grande Tourne" :

« En 1980, l'avalanche est venue taper contre la gare de départ du télésiège de l'Aiguille Percée. Elle est venue s'arrêter contre la gare, a endommagé la cabane des remontées mécaniques et l'ancien transformateur qui était situé plus à l'est »

❖ CLPA n°223 "Sous le Télésiège de l'Aiguille Percée" :

« Janvier 2003 : Rupture d'une plaque à vent. Cassure linéaire atteignant 2 à 3m d'épaisseur. » cf. Figure 4.

→ D'après [3] donc :

- Le projet est menacé par la CLPA 223 dans sa partie haute.
- Le secteur de la G1 est également concerné par l'avalanche CLPA n°85, a priori uniquement en phénomène d'avalanche poudreuse/aérosol.

### Protections existantes : PIDA

Le domaine skiable de Tignes est doté d'un PIDA (Plan d'Intervention pour le Déclenchement des Avalanches [4], Figure 5) qui permet de sécuriser la totalité des emprises pouvant atteindre des enjeux sur le domaine (remontées mécaniques, pistes de ski...).

La carte PIDA est souvent différente de la carte CLPA puisqu'il s'agit des emprises maximales obtenues lors des opérations de déclenchement d'avalanche. Cette carte est d'ailleurs souvent plus représentative de la réalité "quotidienne" notamment en ce qui concerne les directions principales des écoulements.



Figure 4 : Photo de l'avalanche de 2003 au niveau du point de tir PIDA 441 (Source/ ONF/RTM) directement sous la ligne du TSF3 de l'Aiguille Percée

D'après cette carte PIDA donc et les différents témoignages obtenus et repris dans [1] : Le projet est concerné par l'emprise n°441 (CLPA 223) dans sa partie haute ainsi que l'emprise 641 au niveau de sa G1 (CLPA 85). Notons ici une bonne correspondance avec la carte CLPA.

Les échanges avaient effectivement permis de confirmer qu'une avalanche (exceptionnelle) avait atteint le secteur de la G1 de l'axe actuel en 1980. Il s'agissait d'une avalanche aérosol, de neige sèche donc, dont le cœur a atteint et détruit la gare qui à l'époque n'était constituée que de matériaux en bois. Ce phénomène ne s'est produit qu'une seule fois ces 35 dernières années ; les pentes de la Grande Tourne sont très raides et se purgent donc rapidement de manière naturelle. Les écoulements s'arrêtent généralement en pied de versant.



## B. PHENOMENE DE REPTATION

Malgré le fait que les zones soient d'ores et déjà sécurisées en partie par déclenchement préventif (à travers le PIDA [4]), qui permet surtout de traiter les parties superficielles du manteau neigeux, les parties inférieures ne sont pas toujours stabilisées, "accrochées" au sol et peuvent conduire au phénomène de reptation.

Ce phénomène de déformation initialement lente mais qui peut dégénérer ensuite en avalanche, concerne le plus souvent des neiges de printemps ou des neiges lourdes sur des sols peu/mal gelés. Il est d'autant plus important lorsque le sol présente une très faible rugosité (pentes herbeuses, dalles rocheuses...) sur des pentes supérieures à 30°, exposées sud (Figure 6 & Figure 7).

Il est évalué selon le référentiel Suisse "Prise en compte du danger d'avalanches et de la pression de la neige pour les installations à câbles" (SLF 2016).

➔ Seuls les P7, P8 et P9 seront concernés par ce phénomène.

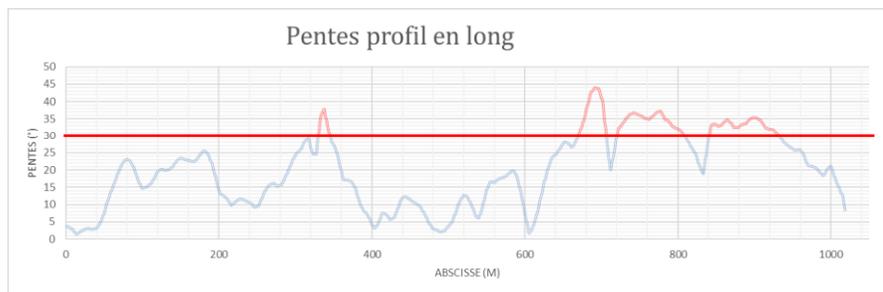


Figure 6: Pentes - Profil en long selon [2]

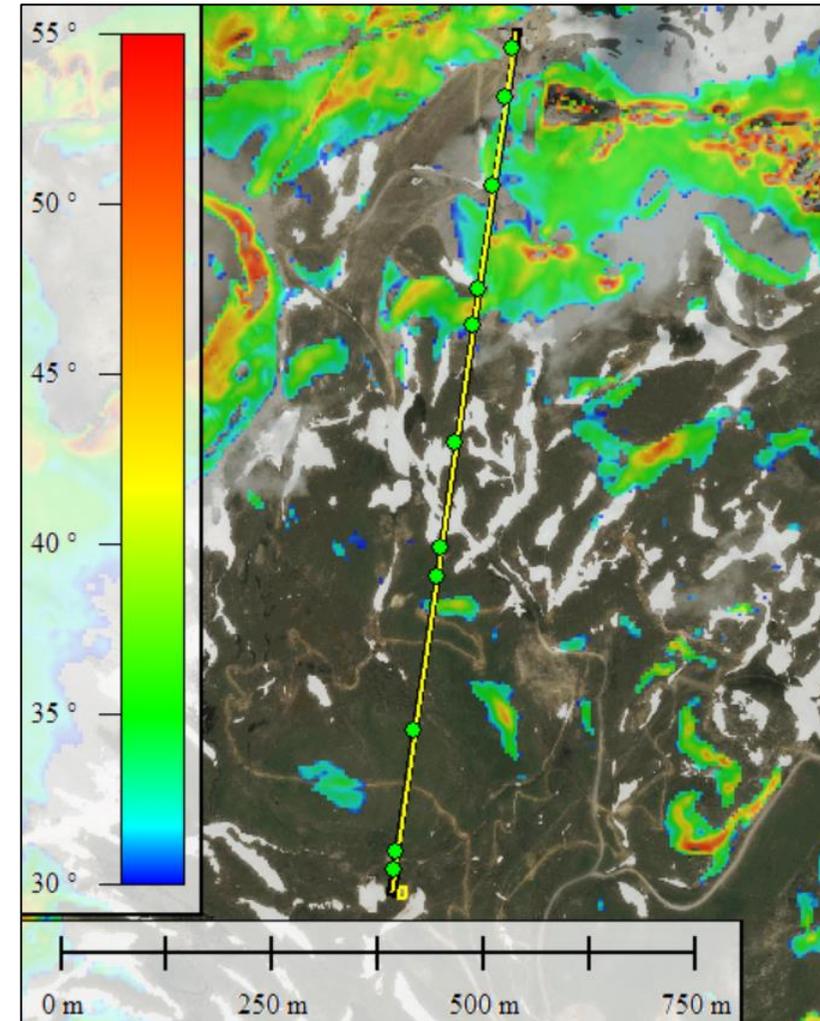


Figure 7: Carte des pentes. Surbrillance des valeurs comprises entre 30° et 55° [5]

### III. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO

#### A. CLIMATOLOGIE & MANTEAU NEIGEUX DE REFERENCE

Le secteur de l'étude se situe dans le massif de la Haute-Tarentaise et plus particulièrement dans sa partie méridionale (de Sainte Foy Tarentaise jusqu'aux sources de l'Isère). Cette dernière se trouve d'une part parfois protégée des régimes de secteur ouest, d'autre part parfois sous l'influence de l'Italie, elle reste une zone globalement bien enneigée.

La première installation "normale et définitive" de la neige se fait normalement dès mi-novembre en altitude. La neige peut résister jusqu'en mai vers 1800/2000 m.

Les cumuls de neige fraîche de l'hiver sont loin d'être négligeables, avec en moyenne 550 à 650 cm vers 1800/2000 m (un hiver sur quatre avec près de 800 cm, le dernier en date étant l'hiver 2017-2018 avec un cumul total 835cm à Tignes).

- Principaux flux météorologiques :

- Les flux d'ouest à nord-ouest sont responsables des précipitations les plus importantes pour ce massif.  
Le sud de la Haute-Tarentaise peut être moins arrosé, notamment dans des régimes peu rapides. Si la situation perturbée se produit après une période de temps froid, l'air froid est difficile à chasser, et la limite pluie/neige reste souvent basse pendant plusieurs heures. Il arrive même fréquemment que le redoux soit très limité, voire inexistant en altitude.
- Les flux de sud-ouest à sud sont en général peu propices à des précipitations significatives sur ce massif, en raison de l'établissement d'un régime de foehn sur la frontière qui provoque un assèchement remarquable. Cependant, il arrive qu'un front froid très dynamique arrive

à occasionner des précipitations modérées lors de son passage (10 à 15 mm d'équivalent en eau, en un laps de temps bref).

Dans le cas d'un flux d'ouest à sud-ouest, le régime de foehn n'est pas systématique : la circulation perturbée peut être ondulante et occasionner des précipitations faibles à modérées, parfois sur une longue durée.

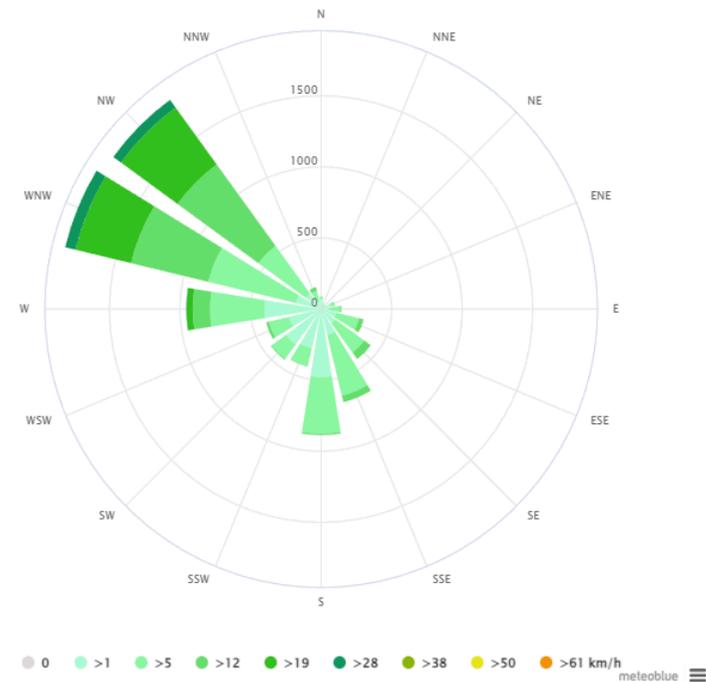


Figure 8: Rose des vents pour Tignes

- Le régime de sud-est met bien en évidence les différences entre les deux zones du massif : tandis que le nord est en permanence "foehné", le sud est touché par des débordements neigeux venant d'Italie. Ils peuvent apporter jusqu'à 40 à 60 cm en 24 h (exceptionnellement plus encore sur les secteurs de Val d'Isère et de Tignes).

Les régimes de sud sont de plus en plus fréquents sur le domaine skiable de Tignes.

Les données de la Régie des Pistes de Tignes, relevées depuis la saison 1970-1971 ([7], Figure 9), ont permis de déterminer comme valeur de référence trentennale une hauteur de manteau neigeux de 1.8m à l'altitude de 2080m.

## B. EPAISSEURS MOBILISABLES

Cette analyse vise principalement à établir les épaisseurs de neige mobilisables lors de la rupture du manteau neigeux pour alimenter les modélisations avec des conditions initiales réalistes.

Habituellement, il est considéré que les grandes avalanches surviennent à l'occasion de très fortes précipitations. Les précipitations sont d'ailleurs le principal facteur météorologique qui ait un lien (relativement) direct avec les grandes crues avalancheuses, bien que d'autres facteurs puissent en être à l'origine (très fort redoux par exemple).

Les épaisseurs de neige mobilisables sont donc classiquement estimées à partir de l'analyse statistique des précipitations sous l'hypothèse qu'une avalanche d'une période de retour donnée est elle-même issue de l'épaisseur mobilisable correspondante<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Meunier M, Ancey C, Richard D., Conceptual approach to the study of snow

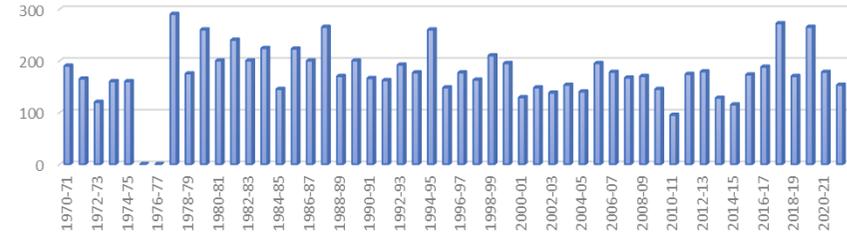


Figure 9: Epaisseur maximale de neige mesurée au sol (à 2080m) [7]

Cette valeur est ensuite extrapolée en fonction de l'altitude selon un gradient de 15cm/100m et modulée en fonction de l'orientation selon les pratiques suisses (minoration, respectivement majoration, limitée à 10% pour les orientations sud, respectivement nord).

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 : depuis 1970 à Tignes avec aussi quelques périodes lacunaires, année "covid" 2019-2020 notamment avec une prise de mesure stoppée en cours de saison) et il est donc hasardeux de faire des extrapolations à (trop) long terme. Il est certes toujours possible de procéder "mathématiquement" à l'estimation des cumuls correspondants mais il est admis de plutôt les lier aux cumuls trentennaux en observant qu'ils sont en général très bien corrélés (ratio entre 1.3 et 1.45, en moyenne de 1.4).

avalanches, Cemagref, 2005

- Les méthodes statistiques comportent toutes leurs biais et les valeurs des précipitations extrêmes sont définies avec une certaine imprécision.
- D'autres influences (transport de neige par le vent) peuvent contribuer de manière non négligeable aux épaisseurs présentes mais sans nécessairement disposer d'informations tangibles pour les sites en question.

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.

Le document suisse<sup>2</sup> fait toujours référence pour structurer la démarche et définir l'épaisseur  $d_0$  mobilisable dans une zone de départ d'avalanche donnée :

S'agissant d'avalanches naturelles, le paramètre "source" prépondérant est celui du cumul de neige récente : classiquement, on tient compte d'une durée de trois jours consécutifs. Il n'est pas utile de prendre en considération des durées de précipitation plus longues même si des décrochements peuvent occasionnellement se produire dans de la "vieille" neige.

La première étape consiste donc à lier cumuls de neige récente et période de retour. En disposant de la chronique des chutes de neige journalière pour Tignes ([7]), il a été possible d'en faire le traitement statistique en privilégiant la méthode des maxima hivernaux : il s'agit d'utiliser les plus forts cumuls tombés en 24hrs, 48hrs et 72hrs sur chaque hiver d'observation (Tableau 1).

SAISON	TIGNES			Epaisseur
	max 24h	max 48h	max 72h	
1970-71	81 cm	104 cm	104 cm	190 cm
1971-72	51 cm	69 cm	69 cm	165 cm
1972-73	38 cm	43 cm	47 cm	120 cm
1973-74	45 cm	80 cm	83 cm	160 cm
1974-75	30 cm	33 cm	43 cm	160 cm
1975-76	-	-	-	-
1976-77	-	-	-	-
1977-78	85 cm	105 cm	132 cm	290 cm
1978-79	50 cm	75 cm	80 cm	175 cm
1979-80	60 cm	100 cm	100 cm	260 cm
1980-81	55 cm	75 cm	105 cm	200 cm
1981-82	53 cm	102 cm	129 cm	240 cm
1982-83	62 cm	104 cm	105 cm	200 cm
1983-84	58 cm	90 cm	105 cm	224 cm
1984-85	39 cm	75 cm	91 cm	145 cm
1985-86	60 cm	75 cm	80 cm	223 cm
1986-87	45 cm	77 cm	100 cm	200 cm
1987-88	45 cm	80 cm	108 cm	265 cm
1988-89	51 cm	98 cm	120 cm	170 cm
1989-90	78 cm	136 cm	168 cm	200 cm
1990-91	43 cm	70 cm	70 cm	166 cm
1991-92	89 cm	109 cm	136 cm	162 cm
1992-93	59 cm	67 cm	82 cm	192 cm
1993-94	44 cm	69 cm	82 cm	177 cm
1994-95	61 cm	81 cm	90 cm	260 cm
1995-96	50 cm	68 cm	68 cm	148 cm
1996-97	38 cm	67 cm	67 cm	177 cm
1997-98	55 cm	100 cm	100 cm	163 cm
1998-99	50 cm	66 cm	78 cm	210 cm
1999-00	38 cm	56 cm	71 cm	195 cm
2000-01	26 cm	43 cm	45 cm	129 cm
2001-02	34 cm	50 cm	65 cm	148 cm
2002-03	45 cm	52 cm	55 cm	138 cm
2003-04	47 cm	80 cm	96 cm	153 cm
2004-05	35 cm	65 cm	74 cm	140 cm
2005-06	36 cm	67 cm	70 cm	195 cm
2006-07	38 cm	60 cm	65 cm	178 cm
2007-08	42 cm	67 cm	89 cm	167 cm
2008-09	62 cm	79 cm	85 cm	170 cm
2009-10	27 cm	40 cm	48 cm	145 cm
2010-11	21 cm	27 cm	31 cm	95 cm
2011-12	57 cm	92 cm	97 cm	174 cm
2012-13	54 cm	85 cm	86 cm	179 cm
2013-14	25 cm	35 cm	41 cm	128 cm
2014-15	32 cm	48 cm	55 cm	115 cm
2015-16	30 cm	46 cm	58 cm	173 cm
2016-17	49 cm	74 cm	75 cm	188 cm
2017-18	70 cm	123 cm	123 cm	272 cm
2018-19	26 cm	31 cm	34 cm	170 cm
2019-20	68 cm	79 cm	79 cm	265 cm
2020-21	33 cm	52 cm	52 cm	178 cm
2021-22	35 cm	50 cm	50 cm	153 cm

Tableau 1 – Valeurs des cumuls bruts (sans tassement) hivernaux à partir des mesures à Tignes [7]

<sup>2</sup> 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

Ensuite, ces valeurs permettent de déterminer le gradex des chutes de neige (le gradex donne le taux d'accroissement de la variable en fonction du temps de retour) ainsi que le mode (plus grande valeur systématiquement dépassée) pour appliquer la méthode des moments en vue de l'ajustement de la loi statistique (type Gumbel - Figure 10 et Tableau 2).

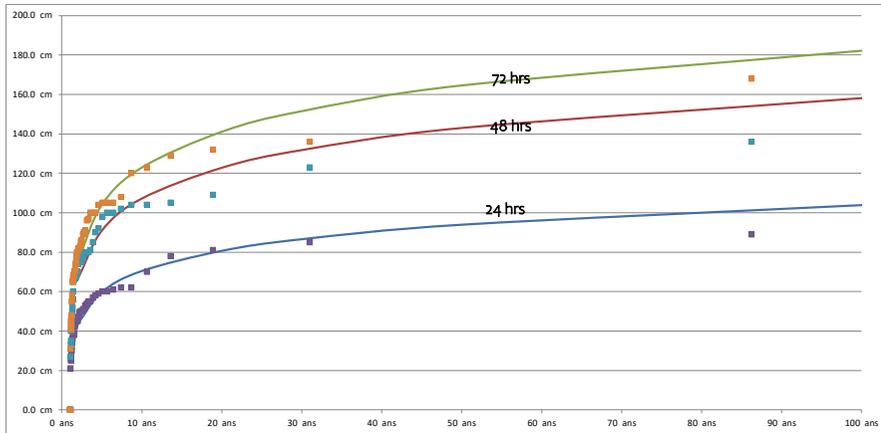


Figure 10 : Ajustement de la loi statistique sur les maximas hivernaux pour Tignes

Cumul/occur.	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
1 j	44 cm	60 cm	70 cm	81 cm	87 cm	94 cm	104 cm
2 j	66 cm	91 cm	107 cm	123 cm	132 cm	143 cm	158 cm
3 j	75 cm	104 cm	123 cm	141 cm	151 cm	164 cm	182 cm

Tableau 2 : Résultats statistiques des cumuls bruts par période de retour et nombre de jours pour Tignes (2080m)

Une fois ces valeurs liées aux périodes de retour obtenus, elles correspondent aux cumuls bruts (addition de chutes journalières), pour le site de mesure (donc à l'altitude correspondante) et sur un terrain plat. Pour obtenir l'épaisseur mobilisable cette fois sur la pente de la zone de départ, 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 groupement BBCM a poussé cette valeur à 20% pour leurs analyses dans le cadre du PPR de Chamonix en 2013 – des valeurs

“nationales” agréées par tous seraient souhaitables). 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, la littérature fournit des valeurs de gradients nivométriques entre 3 et 7cm pour 100m. Ici, il est intéressant de comparer le Tableau 2 aux prédéterminations fournies par Météo France ([www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr)) pour le site le plus proche de Tignes Brévières à 1560m (Tableau 3)

		Durée de retour (ans)						
		2	5	10	20	30	50	100
Nbre jours de pluie cumulés	1j	50,1	63,4	71,7	79,5	83,8	89,1	96
	2j	70,5	89,8	103,3	116,9	124,9	135,3	149,8
	3j	85	109,5	126,1	142,4	151,9	163,9	180,3

Tableau 3 – Prédétermination Météo-France pour Tignes Brévières en équivalent en eau ([www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr))

En convertissant la lame d'eau via la valeur de densité communément admise de 125 kg/m<sup>3</sup>, on obtient la meilleure correspondance entre les deux tableaux selon leur altitude respective en retenant une valeur de gradient altimétrique de 1.7cm/jour/100m.

- En obtenant les valeurs tri-centennales comme 1.4 fois les valeurs trentennales
- 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 50-55°. La méthode de référence évalue ainsi un facteur de pente par analogie avec le critère de Mohr-Coulomb basé sur le rapport de la résistance d'une couche intermédiaire faible sur la contrainte de cisaillement. Intuitivement, cela signifie qu'au-delà de pentes à 28° et

donc dans ces conditions d'instabilités, une partie de la neige qui tombe ne va pas s'agglomérer et contribuer à l'augmentation de l'épaisseur du manteau neigeux. En pratique, le facteur de pente selon les valeurs du Tableau 4 est appliqué à l'épaisseur "stable" à 28°.

$\psi$	28	30	32,5	35	37,5	40	45	50
$f(\psi)$	1,00	0,90	0,79	0,71	0,65	0,60	0,52	0,46

Tableau 4 : Valeur du facteur de pentes en fonction de la déclivité ( $\psi$  en degrés [5])

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). Par exemple, le tableau suivant fournit les épaisseurs mobilisables pour une zone de départ à 2800m de 38° de pente.

		PERIODE DE RETOUR			
		10 ans	30 ans	100 ans	300 ans
Epaisseurs mobilisables	1 j	47 cm	56 cm	65 cm	78 cm
	2 j	68 cm	81 cm	94 cm	113 cm
	3 j	79 cm	93 cm	108 cm	130 cm

Tableau 5 : Epaisseurs mobilisables pour une zone de départ à 38° et 2800m, en considérant comme données d'entrée celles fournies par la régie des pistes de Tignes

## IV. SCENARIOS DE REFERENCE ET QUANTIFICATION DES PHENOMENES

### A. SCENARIOS DE REFERENCE

Dans le cadre d'un enjeu de type remontée mécanique, il s'agit désormais de formaliser les prescriptions concernant les risques nivologiques (avalanche – indice a et reptation – indice g) selon le cadre général de la NF EN 13107 :2015<sup>3</sup>. La problématique des avalanches et de la reptation y étant somme toute traitée succinctement, ce qui suit s'inspire également des pratiques suisses<sup>4</sup>.

Ainsi, deux scénarios sont exhibés (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 **REPT<sub>30</sub>** (charge variable principale) combiné à l'avalanche **AVAL<sub>30</sub>** (charge variable d'accompagnement). Par

<sup>3</sup> NF EN 13107 :2015 Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Ouvrages de génie-civil

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

<sup>4</sup> 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.

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 au § **Erreur! Source du renvoi introuvable.Erreur! Source du renvoi introuvable.** (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 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.

## B. CHARGE DUE AU PHENOMENE DE REPTATION

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

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

- Il s'agit également de noter que les directions d'application  $\theta_x$  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. Les schémas suivants récapitulent les configurations et les angles correspondants. Les hauteurs mesurées verticalement sont notées  $H$  et les épaisseurs correspondantes sont dénommées  $D$ .

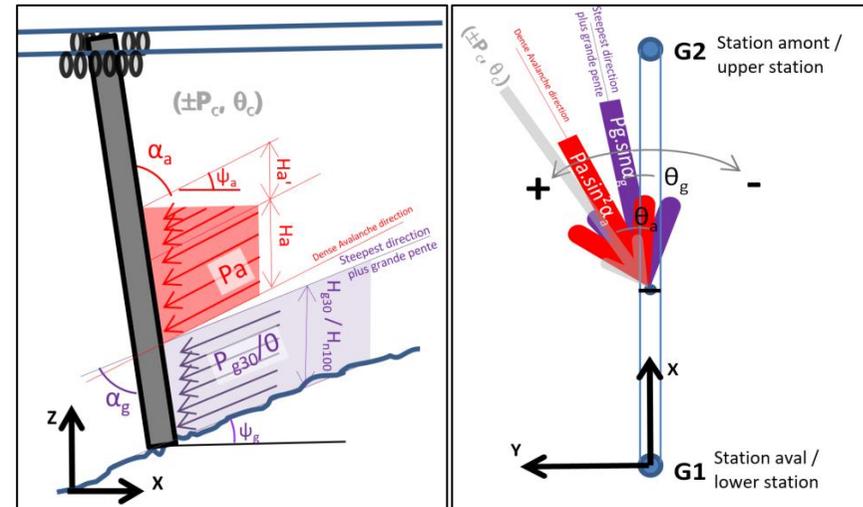


Figure 11 - Schéma type de coexistence des avalanches et de la reptation

- $\rho$  : densité ( $t/m^3$ ) considérée classiquement de 0.4 pour les manteaux neigeux préjudiciables.
- $g$  : accélération de la pesanteur ( $10m/s^2$ )
- $Hg$  : hauteur de neige de référence. Sa valeur de référence est considérée linéairement répartie par rapport à l'altitude à partir d'une valeur représentative de 1.8m à 2080m. Comme évoqué

précédemment, la hauteur d'application (mais pas le calcul de l'intensité) est minorée en cas de combinaison avec une avalanche pour tenir compte de l'érosion du manteau en place par cette dernière.

- **K** : facteur de rampement qui dépend de la pente et de la densité considérée
- **N** : facteur de glissement qui dépend du sol (ici classe 3) et de l'exposition
- **η**: facteur d'influence prenant en compte la présence du pylône
- **ψ<sub>g</sub>**: angle de la pente locale (°) : la reptation est considérée suivre la ligne de plus grande pente

## C. CHARGE DES AVALANCHES DENSES

La pression caractéristique de l'avalanche **P<sub>a</sub>** (kPa) est calculée par analogie hydraulique selon :

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

Avec :

- **C<sub>d</sub>** : coefficient de traînée. 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<sup>3</sup>) considérée classiquement de 0.3 dans les écoulements. A noter que cette densité n'est pas directement celle du

In fine, la pression de reptation **P<sub>g</sub>** effectivement appliquée au pylône dépendra de l'angle **α<sub>g</sub>** entre la direction de glissement du manteau neigeux et la génératrice du pylône (°) :

$$P_g = P_g \cdot \sin \alpha_g$$

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<sub>d</sub>.

- **V** : vitesse moyenne sur la hauteur de l'écoulement (m/s).

In fine, la pression **P<sub>a</sub>** effectivement appliquée au pylône dépendra de l'angle **α<sub>a</sub>** entre la direction de l'avalanche et la génératrice du pylône (°).

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

S'agissant d'avalanches coulantes denses, une hauteur de refoulement supplémentaire (notée Ha' sur la Figure 11) 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.

## V. MODELISATIONS NUMERIQUES DES ECOULEMENTS

Les modélisations (écoulements dense et aérosol) ont été réalisées lors de [1], elles seront reprises ici et interprétées pour l'axe n°1.

### A. ECOULEMENTS DENSES

#### Logiciel RAMMS

En plus des aspects purement géométriques, la 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 : les scénarios listés précédemment sont évalués à l'aide du logiciel 2D de référence internationale RAMMS (v 1.8.0 - <http://ramms.slf.ch/ramms/>) 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  $\mu$  et visqueux  $\xi$  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. A noter que s'agissant d'un site Pyrénéen, les valeurs limite d'altitude séparant la table de référence des coefficients de frottement sont ajustées respectivement à 1700 et 1200m conformément au manuel utilisateur.
- Zones de départ définies 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 correspondant à son altitude et sa pente moyennes selon le même processus que celui ayant conduit au Tableau 2.
- Densité : 300 kg/m<sup>3</sup>. 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 [5].

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<sup>3</sup>=T), "small" (<25000m<sup>3</sup>=S), "medium" (<60000m<sup>3</sup>=M) et "large" (>60000m<sup>3</sup>=L).

A noter que le paramètre de cohésion 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. En parallèle, le coefficient de trainée du pylône étant modulé du nombre de Froude de l'écoulement, la possible surcharge liée à un écoulement plus lourd/humide est indirectement prise en compte dans les prescriptions finales.

## Résultats

Comme évoqué dans [1], les résultats des modélisations numériques d'avalanches denses (Erreur! Source du renvoi introuvable.) montrent deux tendances distinctes :

- Tendance assez représentative pour les points de tir 441 et 442 (en partie haute) pour lesquels les emprises reprennent assez bien celles de 2003 (Erreur! Source du renvoi introuvable.), avec les rôles importants du bassin de rétention et des affleurements rocheux, qui jouent respectivement le rôle de rétention et de déviation des écoulements.
- Une difficulté à retrouver les emprises connues et témoignées sur le secteur G1, y compris en considérant une période de retour centennale. Une zone de départ ainsi qu'une catégorie de volume très conservatives ont dû être considérées pour l'approcher. Cette pseudo-atteinte reste malgré tout très limitée, avec des vitesses très faibles (avalanche en phase de dépôt) et des hauteurs quasi-nulles.

Ces résultats permettent de souligner que :

- Les avalanches denses sont représentatives de la partie haute
- Des phénomènes plutôt de type avalanches aérosols (cf. § V.B) permettent d'expliquer les "surextensions" des événements connus sur le secteur G1.

En ce qui concerne la ligne, la tranche d'altitude évoquée en introduction n'a pu être évitée pour la localisation de certains pylônes (présence d'une zone humide en pied de versant et hauteurs de survols trop importantes). Les P7 et P8 se retrouvent alors dans des zones à fortes sollicitations, respectivement de 70kPa et 60 kPa en condition centennale appliqués sur des épaisseurs de 2m.

Pour autant et si l'on compare à l'étude nivologique de 2005 [8], par exemple la pression estimée (à partir de l'événement de 2003) sur le P10 actuel était bien supérieure, de l'ordre de 90kPa sur une épaisseur de 1.7m.

Cette nouvelle évaluation, à l'aide d'outils modernes, est donc plus favorable (sans être totalement contradictoire, les ordres de grandeur restent tout de même relativement assez identiques) et ne remet pas en cause la faisabilité du projet.

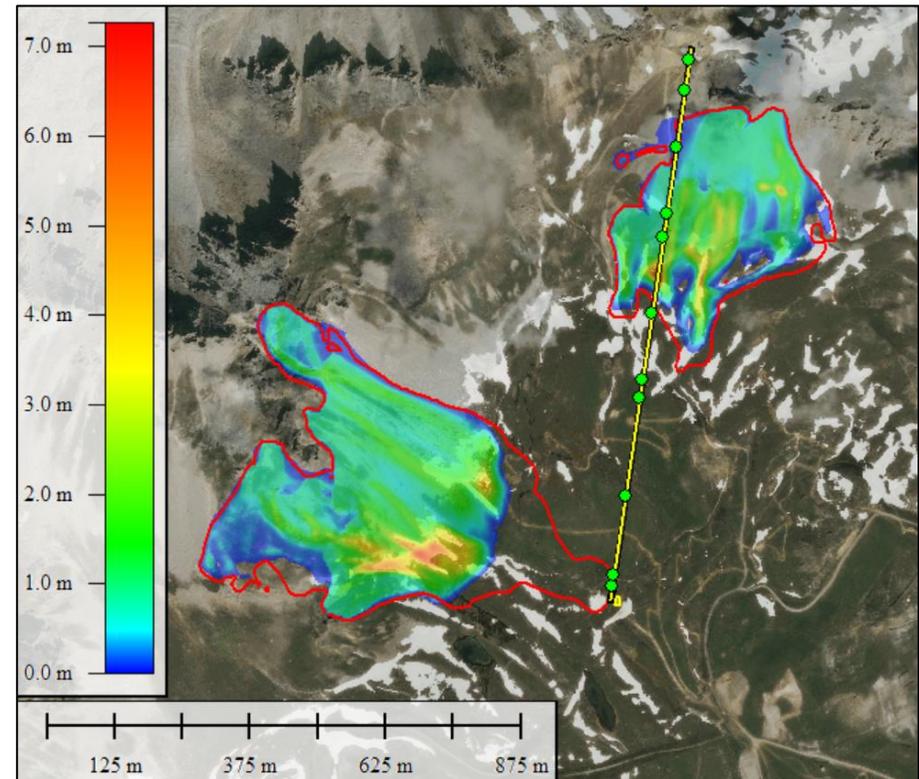


Figure 12: Epaisseurs maximales des écoulements denses en conditions trentennale. En rouge, extension maximale en condition centennale.

## B. AVALANCHES AEROSOLS

### Logiciel RAMMS ::EXTENDED

L'avancement de la version étendue (désormais 2.7.95) de RAMMS<sup>5</sup> a donné l'opportunité des calculs présentés ci-après, au titre d'une utilisation de testeur en partenariat avec le SLF de Davos. Si cet outil fait encore l'objet de développements, avec donc l'attention correspondante quant aux interprétations et calages, il bénéficie d'un recul de plus en plus important sur de multiples cas et configurations pour pouvoir l'utiliser "pour ce qu'il perçoit du fonctionnement du site étudié".

Au-delà de la possible prise en compte et restitution des aérosols, cette version étendue (que nous nommerons RAMMS ::aérosol par commodité pour son usage ici mais qui couvre un spectre bien plus large) présente aussi des différences majeures avec la version traditionnelle de RAMMS présentée ci-avant: en particulier, il ne s'agit plus de gérer simplement le glissement d'un volume de neige sur un terrain en affectant l'interface d'un comportement frottant plus ou moins complexe.

En effet, à partir d'une zone de départ définie de manière analogue à précédemment, RAMMS ::aérosol 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 manteau neigeux en place, l'évolution du volume et de la densité du core/cœur de l'écoulement et le cas échéant, la mise en suspension dans le nuage aérosol.

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. Par exemple, la reprise ou la génération d'un aérosol sont très fortement dépendantes de la "qualité" de la neige qui

dépend elle-même (notamment) de la température et de la teneur en eau. Il convient d'ajouter à cela un certain nombre de coefficients de "transfert" entre les différentes phases du phénomène.

A ce stade, le paramétrage des calculs a encore progressé avec désormais la possibilité de choisir une période de retour, elle-même croisée avec le volume mobilisé au départ pour définir les valeurs maximums des coefficients  $\mu$ ,  $\xi$  et de la cohésion C (

Figure 13).

Cette évolution simplifie la situation pour pouvoir désormais considérer un processus de référence basé sur la zone de départ (définie de manière analogue à celle de la version classique de RAMMS y compris donc son épaisseur mobilisable, ici par rapport à un cumul de 3 jours centennal selon les mêmes étapes que celles pour l'obtention du Tableau 5) et une couche érosive distribuée: à partir d'une valeur à une altitude donnée, le logiciel calcul sa distribution sur le domaine de calcul tenant compte du facteur de pente (Tableau 4) et d'un gradient nivométrique (entre 3 et 5cm/100m).

Le dernier paramètre modifiable est 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 0.3 et 0.5° par 100m. Pour les Alpes, le SLF a pu définir quelques grandes valeurs typiques : entre -4° vers 2000m jusqu'à -6° vers 2500m et -7° au-delà de 2600m.

Les autres coefficients sont utilisés tels quels<sup>6</sup>, seul le cloud drag, d'une valeur standard de 4, peut permettre d'ajuster le calcul à une particularité du site (3 pour

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> P. Bartelt, L. Stoffel, RAMMS Extended input parameters, Draft version 7 juillet

une falaise induisant une mise en suspension importante, 5 pour une avalanche avec un faible développement aérosol).

	Return Period			
Release Volume	10Y	30Y	100Y	300Y
< 5'000	A	A	AB	AB
5'000 - 50'000	A	AB	B	B
50'000 - 100'000	AB	B	B	C
> 100'000	B	B	C	D

Parameters	A	B	C	D
Mu ( )	0.55	0.42	0.38	0.32
Xi (m/s <sup>2</sup> )	1800	1900	1900	2000
Cohesion (Pa)	200	100	75	50

Figure 13 – matrice de choix du jeu de paramètres en fonction de la période de retour et du volume (source SLF)

## Résultats

Les modélisations d'avalanches aérosols n'ont été effectuées que sur les pentes est de la Grande Tourne et de la Pointe du Chardonnet, dont les configurations s'y prêtent et pour lesquelles cette phénoménologie est connue et récurrente.

Il a malgré tout été difficile d'obtenir des résultats correspondant aux différents événements connus et/ou aux emprises CLPA ; ou alors, des paramètres d'entrée très conservatifs ont été intégrés pour parvenir à l'événement type 1980 (ce qui en confirme le caractère exceptionnel). Il a notamment été question de considérer des avalanches tri-centennales avec des épaisseurs de l'ordre de 1.5m dans les zones de départ. Du fait du caractère conservateur des données d'entrée utilisées pour recouper le phénomène "avalanche aérosol", ces résultats seront intégrés **uniquement pour une occurrence centennale**.

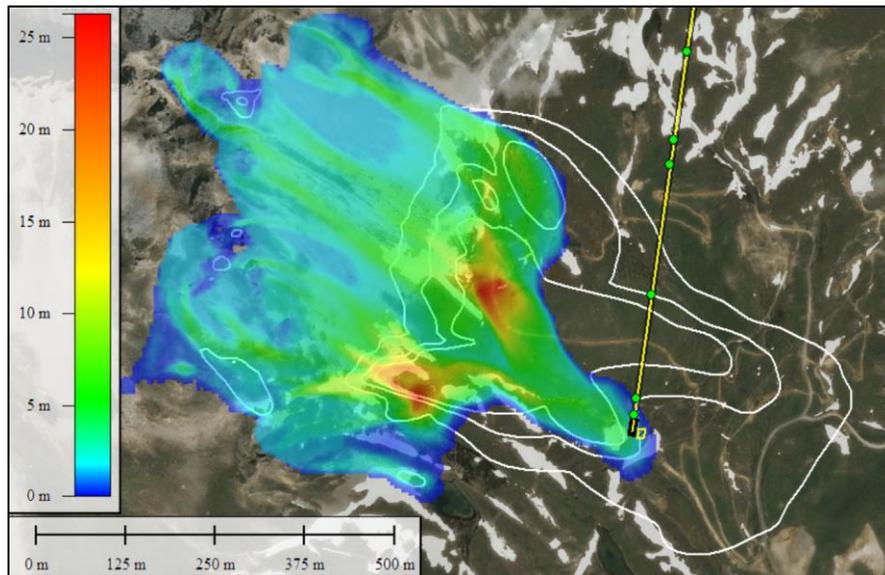
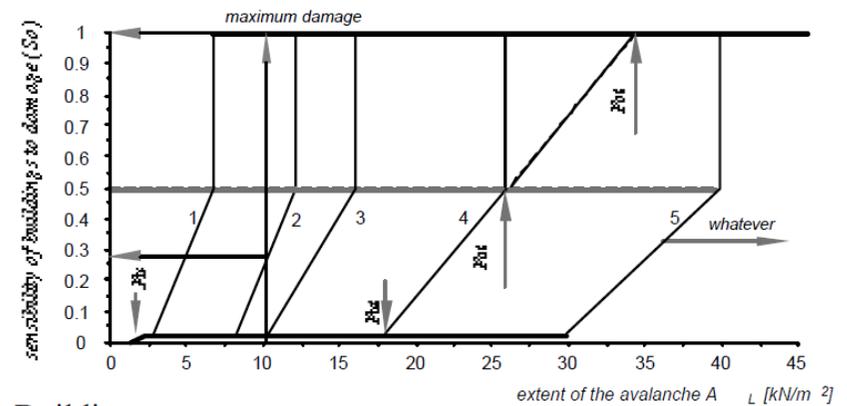


Figure 14: Epaisseurs maximales de la phase coulante de l'avalanche aérosol en condition exceptionnelle. En blanc : isobares de la pression du nuage de l'aérosol

On retrouve donc un cœur/partie basale du phénomène qui atteint effectivement le secteur de la G1 (Figure 14) et qui a la capacité de détruire un bâtiment de "construction légère", avec des pressions brutes de l'ordre de 5 kPa qui s'appliquent sur une épaisseur de 1.5m (au-dessus du manteau neigeux en place). Ceci recoupe bien le témoignage de l'avalanche de 1980 (Figure 15).

Cette valeur s'appliquera également sur le pylône de gare mais ne sera pas dimensionnante.



### Building category

- 1 = light construction, 2 = mixed construction ('chalets'),
- 3 = masonry, 4 = concrete buildings with reinforcement,
- 5 = reinforced buildings

Figure 15 : "Sensibilité des bâtiments à l'endommagement" [6]

En ce qui concerne la partie aérosol de l'avalanche :

- Les pressions du nuage sont de 2kPa maximum au niveau du secteur de la gare et de son bâtiment (Figure 14).
- La ligne ne subira pas de pression supérieure à 2kPa a fortiori en considérant une situation à au moins 10m au-dessus du sol (Figure 16).

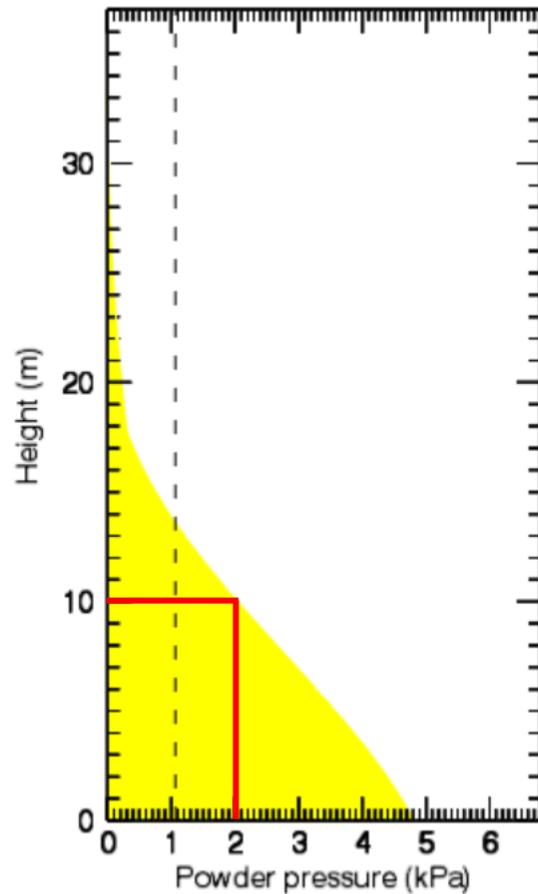


Figure 16: Evolution de la pression du nuage aérosol en fonction de sa hauteur. Point pris le long de la ligne au niveau le plus défavorable du nuage.

→ Finalement :

- En ce qui concerne le cœur / partie basale de l'aérosol :  
La façade ouest du bâtiment devra résister à une pression de 4.5kPa sur une hauteur de 2m (au-dessus du manteau neigeux rapporté à 1m mais y compris un peu de refoulement). Cette valeur n'est pas sur-dimensionnante pour un bâtiment de construction en dur, ce qui sera le cas ici. Les ouvertures devront cependant être équipées en conséquence, par des volets métalliques par exemple.  
  
Les pressions ne seront pas non plus dimensionnantes pour le pylône de gare.
- En ce qui concerne la phase aérosol/le nuage :  
Les valeurs (2kPa considérés comme une charge accidentelle) sont normalement directement couvertes par les hypothèses habituelles de vent (considérées comme une charge variable).

## VI. CONCLUSION

L'axe n°1 finalement retenu pour remplacer en lieu et place l'actuel TSF de l'Aiguille Percée est concerné par les risques nivologiques (avalanche et reptation) mais sans pour autant remettre en cause sa faisabilité comme le démontre l'existence de cet appareil depuis plus de quarante ans :

- **Le phénomène de reptation** s'appliquera sur les P7, P8 et P9.
  
- **Les avalanches denses** ne concernent de manière remarquable que les P7 et P8 (à la fois en conditions trentennale et centennale).  
Les sollicitations sont certes importantes mais les massifs pourront être dimensionnés en conséquence pour reprendre les efforts.  
Le P1 ainsi que le pylône de gare ne sont touchés qu'à la marge.
  
- **Les avalanches aérosol** ne sont considérées que pour une période de retour centennale.
  - o Concrètement, la partie basale ne sera préjudiciable que pour les ouvertures de la façades ouest du bâtiment qui sera construit en dur et pourra largement supporter les 4.5 kPa évalués dans le § V.B.
  - o La phase aérosol reste dans les gammes habituelles de pression de vent et ne sera pas dimensionnante.

Les prescriptions de détails sont fournies dans la Figure 17.

	POSITION		REPTATION					AVALANCHE										$\psi_a$	$\theta_a$
	SCENARIO		VAR30= REPT <sub>30</sub> + AVAL <sub>30</sub>					ACC100= AVAL <sub>100</sub>											
	x	z	$P_{g30}$ = $P_{30}/\sin\alpha_g$	$H_{g30}$	$\psi_g$	$\theta_g$	CHARGE	$P_{a30}$ = $P_{30}/\sin^2\alpha_a$	$H_{a30}$	$H_{a'30}$	CHARGE	$H_{n100}$	$P_{a100}$ = $P_{30}/\sin^2\alpha_a$	$H_{a100}$	$H_{a'100}$	CHARGE			
<b>SE REFERER AU § V.B DU RAPPORT</b>																			
G1	0.0 m	2426.7 m																	
P1	23.1 m	2424.6 m	-									1.2 m	5 kPa	1.0 m	0.8 m	Accident.	1 °	50 °	
P2	45.0 m	2426.4 m	-																
P3	190.0 m	2474.6 m	-																
P4	372.0 m	2531.9 m	-																
P5	407.0 m	2535.6 m	-																
P6	530.0 m	2544.7 m	-																
P7	670.0 m	2562.0 m	35 kPa	1.8 m	30 °	10 °	Variable Principale	30 kPa	1.5 m	1.0 m	Variable accomp.	1.3 m	70 kPa	2.5 m	2.0 m	Accident.	31 °	5 °	
P8	713.0 m	2591.6 m	35 kPa	1.8 m	-	10 °	Variable Principale	30 kPa	1.5 m	1.0 m	Variable accomp.	1.3 m	60 kPa	2.5 m	1.5 m	Accident.	24 °	5 °	
P9	836.0 m	2666.8 m	45 kPa	2.7 m		-20 °	Variable Principale												
P10	940.0 m	2700.8 m	-																
P11	997.5 m	2718.9 m	-																
G2	1018.0 m	2727.3 m	<b>PAS CONCERNEE</b>																

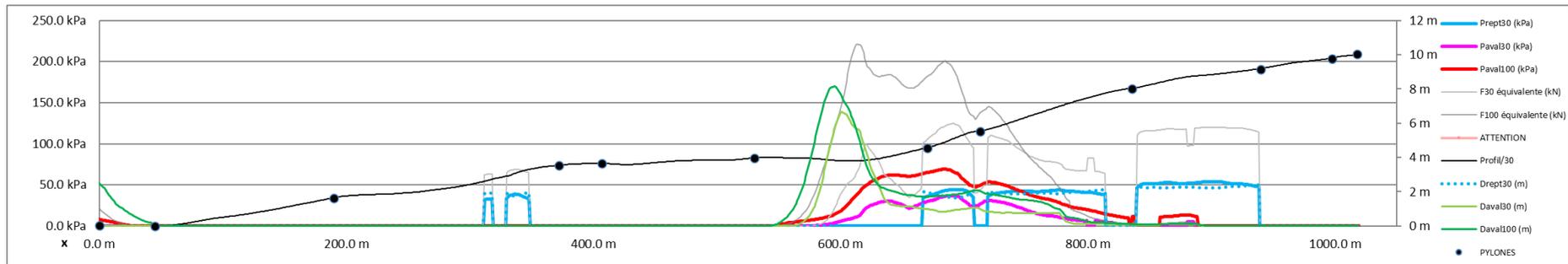


Figure 17: En haut = Tableau des prescriptions de détails. En bas= Pressions et épaisseurs brutes d'application le long du profil