



# DIAGNOSTIC DES RISQUES NIVOLOGIQUES

## TC Face Nord - VAL THORENS

V1 niveau DAET du 17 Octobre 2022

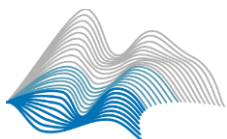


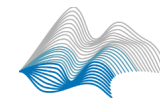
### ENGINEERISK

690 route de la Motte Servolex 73160 Saint-SULPICE / FR

☎ : + 33 (0)6 23 75 04 44 - Site Web : [www.engineerisk.com](http://www.engineerisk.com)

Siret : 499 774 032 000 35 - SAS au capital de : 11 870 €





## Etude réalisée par Engineerisk

Rédigée par : Ing. Fanny BOURJAILLAT

☎ : +33 (0)6 23 75 06 42

✉ : [fb@engk.fr](mailto:fb@engk.fr)

Visa :

Validée par : Dr. Ing. Philippe BERTHET-RAMBAUD

☎ : +33 (0)6 23 75 04 44

✉ : [pbr@engk.fr](mailto:pbr@engk.fr)

Visa:

Ce rapport contient 21 pages et constitue un tout indissociable; une utilisation partielle n'engage pas la responsabilité d'Engineerisk

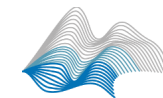
Sauf mention contraire : crédits photos Engineerisk / figures en plan orientées nord vers le haut/ Fond orthophoto Géoportail

Référence : FRA564

Version 1 du 17 octobre 2022 - niveau DAET

## REFERENCES

- [1] Visites sur site et échanges :
  - a : du 06.09.2019 en compagnie de F. BONNEVIE (Responsable service des Pistes de Val Thorens)
  - b : du 26.07.2022, en compagnie de S. HUDRY (Responsable service des Pistes de Val Thorens) et R. LUZY (Directeur Pistes Vallée des Belleville)
- [2] Localisation projet, source : SETAM
- [3] [www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr)
- [4] PIDA, Source : Service des Pistes
- [5] Archives nivo-météorologiques de JF.Meffre
- [6] Différents relevés nivo-météorologiques, Source : service des pistes Val Thorens
- [7] Lidar, Source : Mairie des Bellevilles

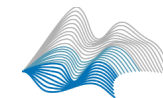


---

## SOMMAIRE

Références .....	2
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>2. ETAT DES RISQUES CONNUS .....</b>	<b>5</b>
A. LES AVALANCHES .....	5
EPA – CLPA .....	5
Protections existantes - PIDA .....	8
B. LE PHENOMENE DE REPTATION.....	9
<b>3. SITE &amp; CONTEXTE NIVO-METEO .....</b>	<b>10</b>
A. Climatologie & Manteau neigeux de référence .....	10
B. Epaisseurs mobilisables .....	11
<b>4. SCENARIOS DE REFERENCE ET QUANTIFICATION DES PHENOMENES.....</b>	<b>13</b>
A. Scénarios de référence .....	13
B. Charge due à la reptation .....	14
C. Charge des avalanches denses.....	15
D. Charge des avalanches aérosol .....	16
<b>5. RESULTATS DES MODELISATIONS NUMERIQUES .....</b>	<b>18</b>
A. Avalanches denses .....	18
B. Avalanches aérosol .....	20
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>21</b>





# 1. INTRODUCTION

Toujours dans le cadre de la modernisation de son domaine skiable, et suite à l'avortement du projet de remplacement du TSF du col, la SETAM souhaite aujourd'hui proposer un nouvel axe : la télécabine Face Nord (Figure 1 & Figure 2).

Cette télécabine prendrait son départ au niveau du restaurant d'altitude le Caribou vers 2680 m d'altitude, pour arriver sur le secteur de la G2 du Funitel vers 3010 m.

L'objet de ce rapport est de d'établir un diagnostic des risques nivologiques d'avalanche et de reptation, ceci dans le but d'optimiser les futures localisations de pylônes et/ou gares.

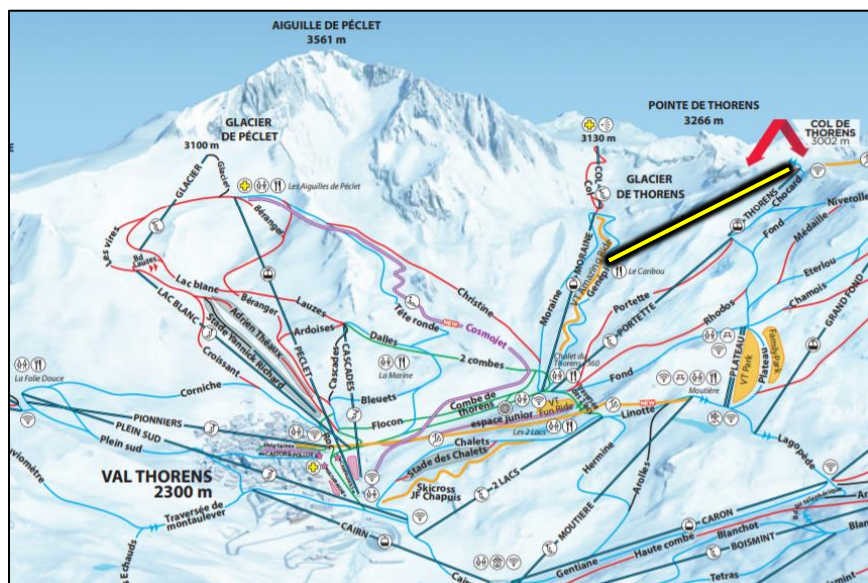


Figure 1: Localisation du projet en jaune sur le plan des pistes

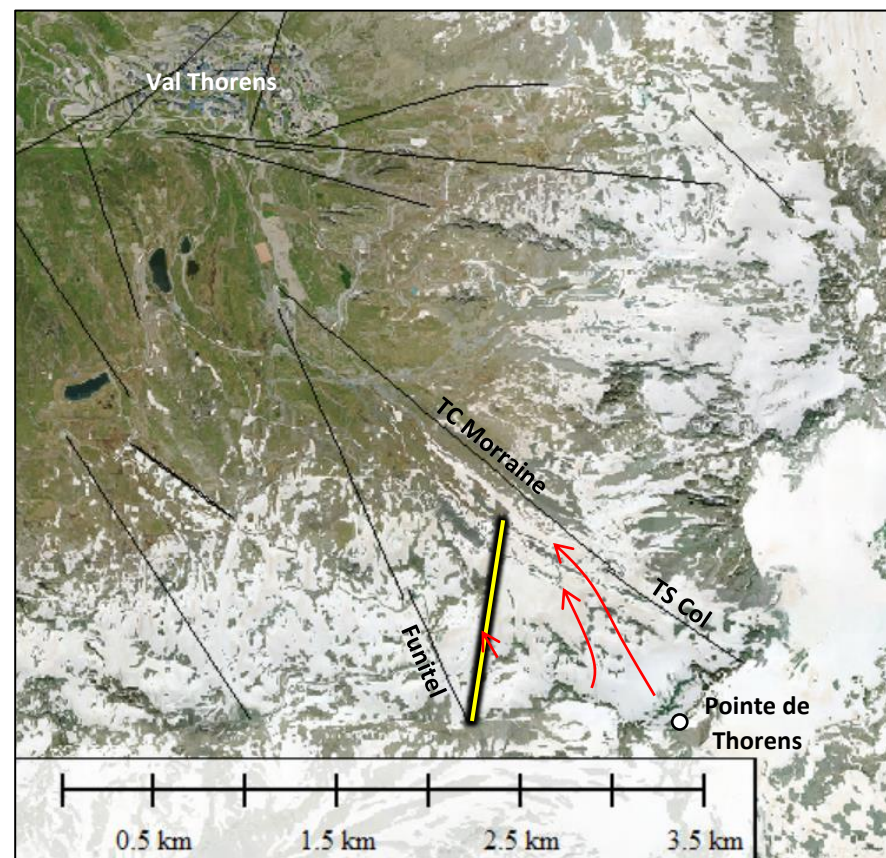
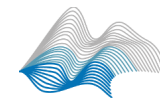


Figure 2: Localisation du projet (en jaune) sur plan et écoulements principaux connus en rouge





## 2. ETAT DES RISQUES CONNUS

### A. LES AVALANCHES

#### EPA – CLPA

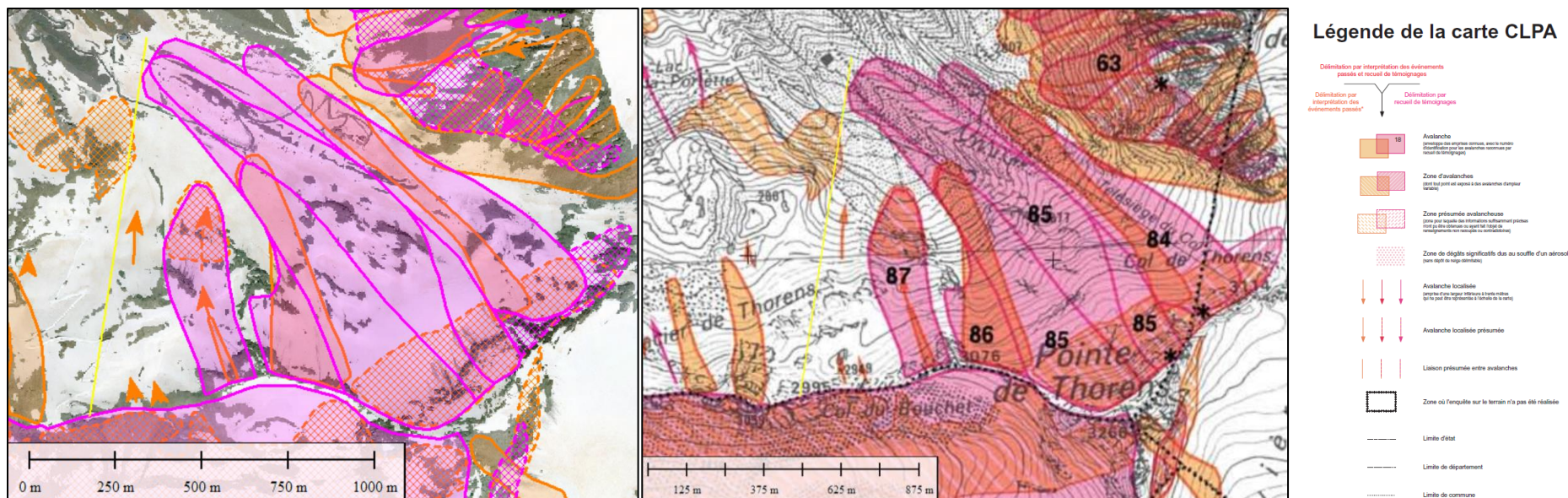


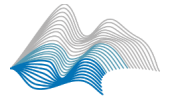
Figure 3: Vue en plan du projet (en jaune) et couches vectorisées de la CLPA (à gauche) extrait de la carte CLPA (à droite) [3]

Le projet ne traverse directement aucune “avalanche” de la CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux [3], Figure 3).

Pour autant le secteur de sa G1 est en limite de l'avalanche CLPA n°85 “Pointe de Thorens”.

Dans les fiches signalétiques correspondantes, est repris un événement de novembre 2002 (également évoqué et discuté lors [1a]), et pour lequel il est précisé les informations suivantes :

*“L'avalanche a été déclenchée au GAZEX. Elle est partie au sol (des couches de gobelets étaient installées à la base du manteau neigeux depuis le début de l'automne). Tout le panneau est parti depuis l'abri GAZEX jusqu'au col à l'ouest de la Pointe de Thorens. Elle est descendue droit dans la pente en sautant les rognons rocheux et de glace. Elle est passée à une trentaine de mètres du départ du téléski du Col. Elle a emprunté la piste de ski alpin et la combe en rive gauche de celle-ci. Elle a détruit l'ancien bâtiment des toilettes publiques (Figure 4) (le toit a été*



*déposé sur la piste). Elle s'est séparée en 2 au niveau de la croupe. Le dépôt s'est fait sur la piste et dans la combe, une centaine de mètres en amont du restaurant. L'avalanche est descendue en neige poudreuse. Les dégâts ont été observés a posteriori."*

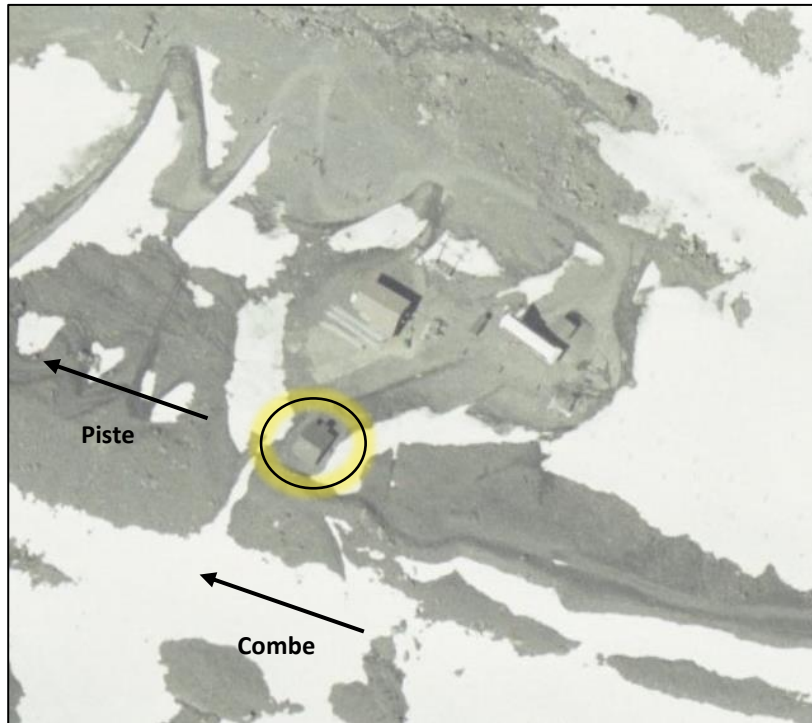


Figure 4: Vue du bâtiment des toilettes publiques en 2001 (Source : Géoportail)

Le restaurant en question dans ce témoignage doit certainement correspondre à celui du "Caribou". Le secteur de la G1 n'aurait donc pas été directement impacté par cette avalanche de novembre 2002.

*PS : D'après [1a], cette avalanche aurait cependant bien touché la G1 de l'actuel TSF du Col...*

Les derniers échanges [1b], ont permis d'identifier un événement plus récent, survenu en janvier 2021 (rappelons que l'exploitation des domaines skiables lors de cet hiver 2020-2021 était inexistante du fait de la situation sanitaire "Covid-19") : une avalanche de type aérosol se serait déclenchée naturellement (départ de plaque) de part et d'autre de la Pointe de Thorens (yc l'emprise de la CLPA n°86). Elle aurait traversé les pistes Asters puis Généri pour rejoindre la piste de la Moraine en s'écoulant à une soixantaine de mètres à l'est du restaurant le Caribou (aux environs donc de la zone prévue pour la G1 du projet TC Face Nord...). Aucun dégât ni "plâtrage" n'a été observé sur les façades de ce dernier.



Figure 5: Vue de la face ouest de la Pointe de Thorens suite à l'événement de janvier 2021 (Source : S. HUDRY)



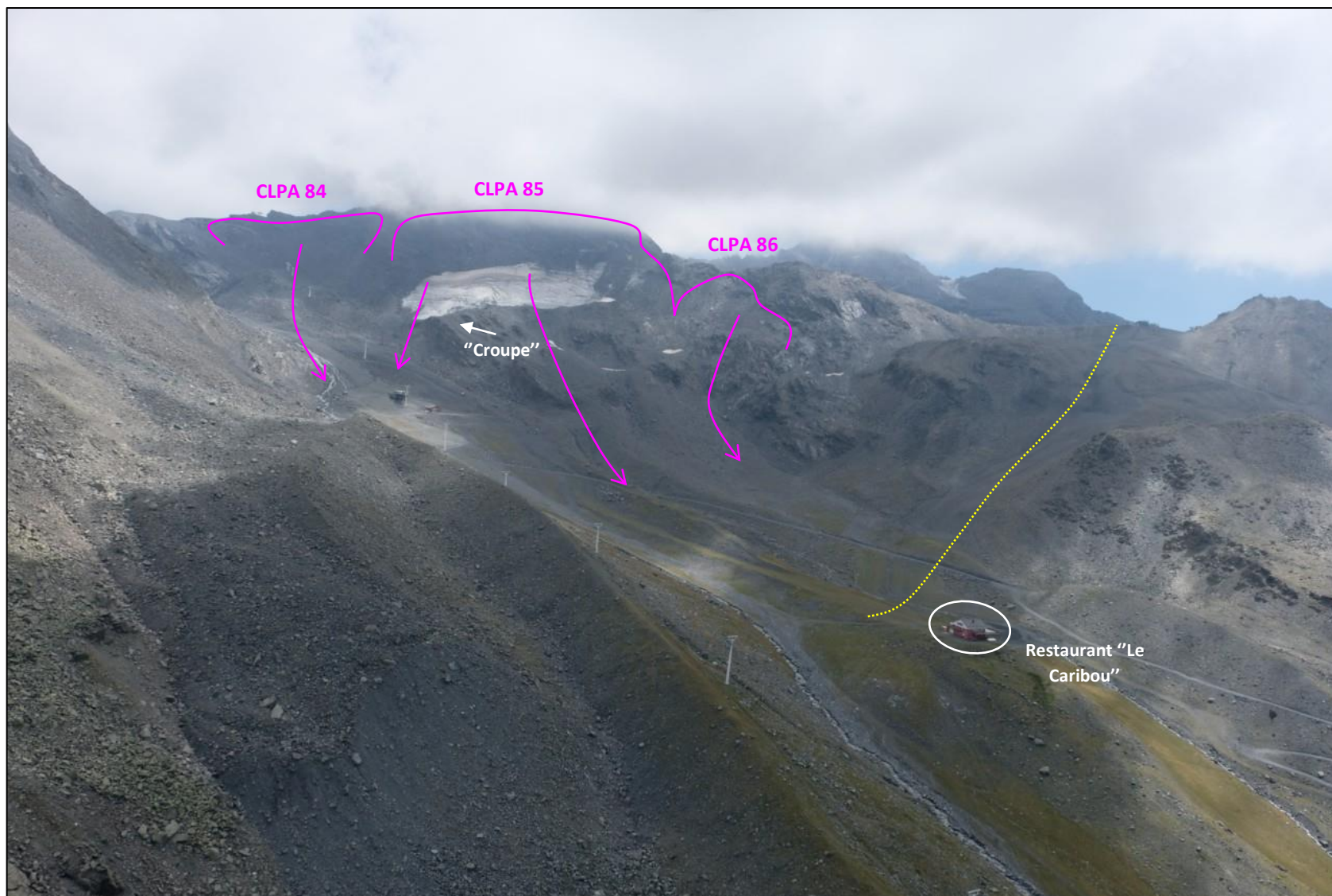
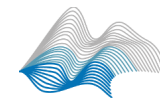
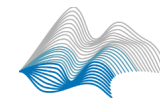


Figure 6: Vue générale du versant et de ses principales emprises CLPA (projet en jaune)



## PROTECTIONS EXISTANTES - PIDA

Le secteur de la Pointe de Thorens et sa CLPA 85 est bien connu du service des pistes de Val Thorens puisqu'il est intégré dans son PIDA (Plan d'Intervention pour le Déclenchement des Avalanches [4], Figure 7), dans sa zone interdite P.

Deux points de tirs équipés d'exploseurs Gazex permettent de déclencher le versant ouest de la Pointe, plus particulièrement les emprises avalanche n°268 et 269.

Suite à l'événement de janvier 2021, un Gazex supplémentaire (3m<sup>3</sup>) viendra s'ajouter au dispositif existant le prochain hiver et permettra ainsi de sécuriser l'ensemble du versant [1b].

Un point de tir traditionnel (par lancer de charges explosives) permet également de déclencher l'avalanche n°301 dont le parcours concerne la ligne du projet de TC Face Nord (Zone interdite U). Les écoulements habituellement obtenus s'arrêtent sur la piste rouge "Asters".

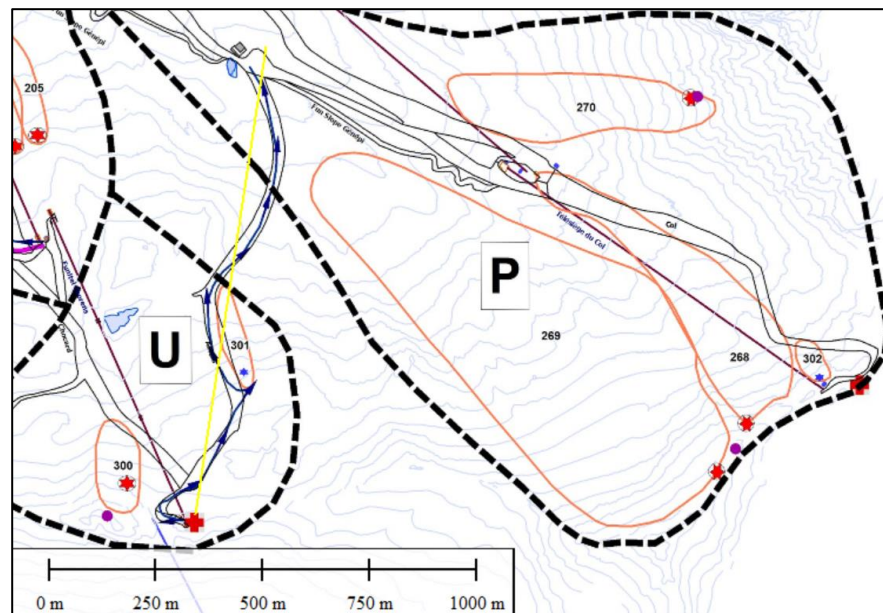
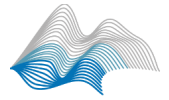


Figure 7: Extrait de la carte PIDA [4]

➔ Le projet peut être menacé dans son secteur G1 par une avalanche (a priori aérosol) provenant du versant ouest de la Pointe de Thorens (CLPA 85 + CLPA 86) ainsi que par des écoulements dans sa partie médiane au niveau de l'emprise PIDA n°301.





## B. LE PHENOMENE DE REPTATION

Malgré le fait que les zones soient d'ores et déjà sécurisées en partie par déclenchement préventif (à travers le PIDA), 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°.

Ce phénomène 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).

**La reptation, qui peut ajouter une charge sur les infrastructures concerne les petites tranches d'altitude suivantes :**

- 2805m – 2815m
- 2850m – 2875m
- 2880m – 2895m
- 2930m – 2945m
- 2970m – 3005m

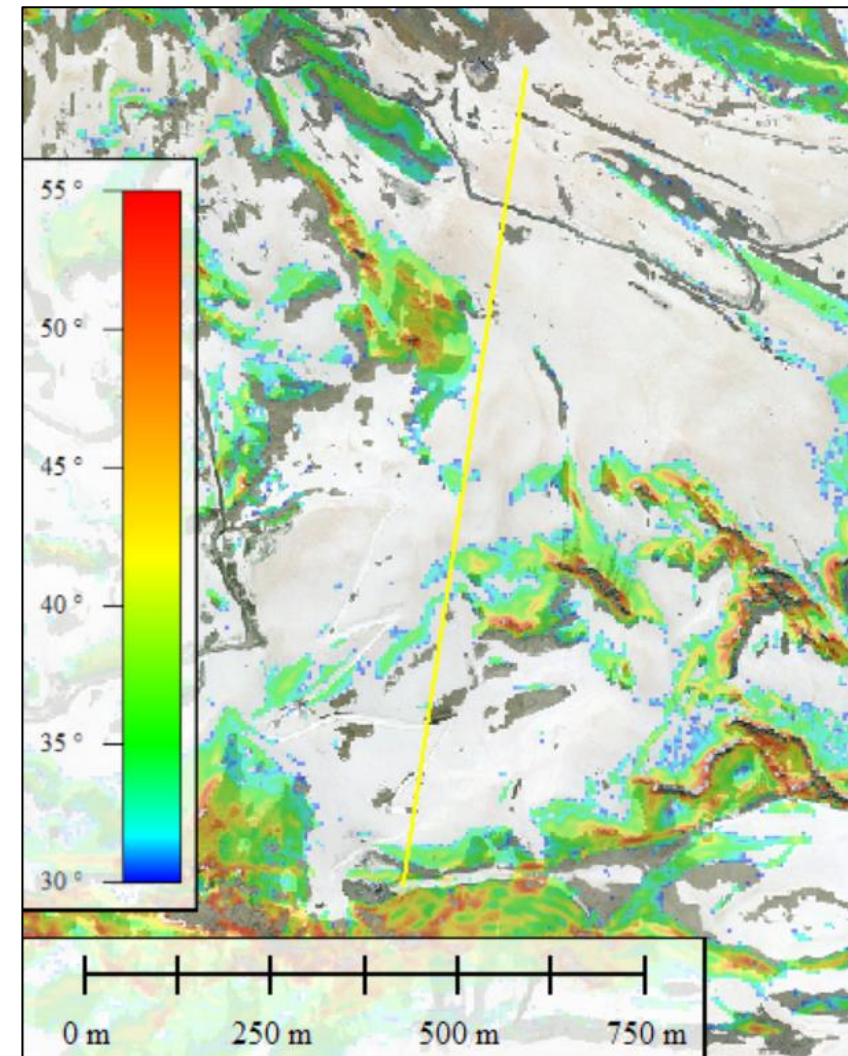
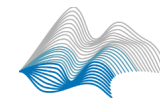


Figure 8: Carte des pentes (comprises entre 30° et 55°) [7]



### 3. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO

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

Le site d'étude est situé dans le massif météorologique de de la Vanoise. Il est globalement bien enneigé, avec 150 jours de neige au sol en moyenne à 1 800m à partir de mi-novembre.

Le cumul des chutes de neige est important, avec 620 cm en moyenne à 2 280m d'altitude et un maximum atteint lors de l'hiver 2017-18 avec un record de 1016cm [6] (Figure 9).

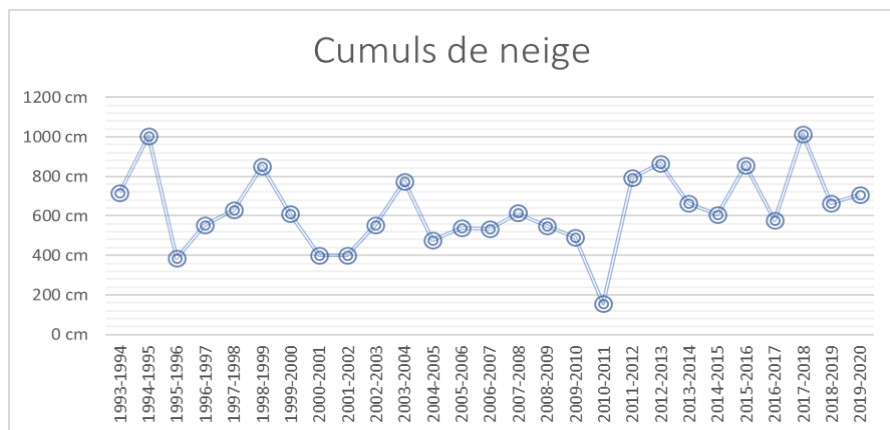


Figure 9: Cumuls de neige obtenus à l'altitude de 2280m [6]

Les principaux flux météorologiques apportant des épisodes pluvio-neigeux significatifs sont les suivants (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- Le courant d'Ouest : à l'origine de précipitations souvent modérées sur quasiment toute la Vanoise
- Le courant de Nord-ouest : Actif (20 à 30 mm en 24h), parfois pendant plusieurs jours
- Le courant de sud-ouest / sud-est : Souvent associé à un régime de foehn

qui donne de fortes rafales sur l'ensemble du massif.

Ces courants (surtout sud-est) sont de plus en plus récurrents sur le massif ces dernières années avec de fortes accumulations possibles dans les pentes qui concernent cette étude (ce fut notamment le cas lors de l'épisode de janvier 2021) [1b].

- Les retours d'est sont plus rares mais peuvent être très importants lorsqu'ils se produisent, ce qui fut notamment le cas lors de l'hiver 2016-2017 [1].

En parallèle, [5] a permis de déterminer comme valeur représentative de référence trentennale une hauteur établie de manteau neigeux de 2m à l'altitude 2200m. Cette valeur est confortée par les relevés effectués par le service des pistes [6] depuis l'hiver 2018-2019 à 2280m d'altitude avec moyenne de 2.2m sur les 4 dernières saisons.

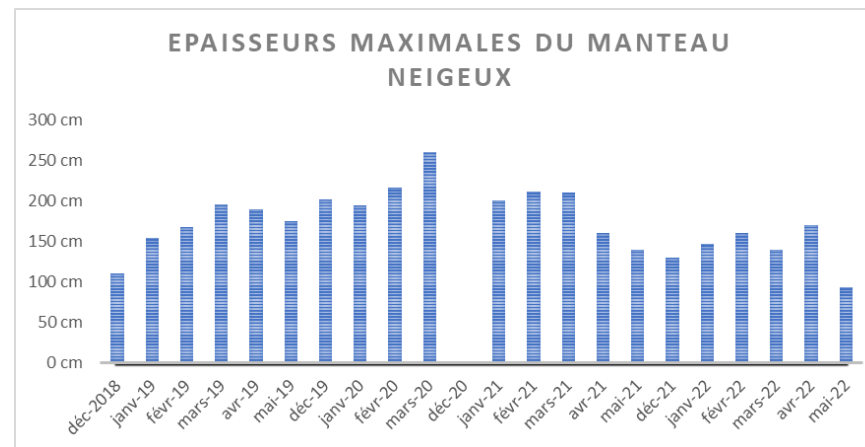
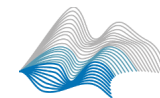


Figure 10: Epaisseurs maximales mensuelles du manteau neigeux relevées depuis la saison 2018-2019 [6]



Elle 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,

## B. EPAISSEURS MOBILISABLES

En vue d'analyses quantitatives des phénomènes et en partant de l'hypothèse qu'une avalanche d'une période de retour donnée est elle-même issue de l'épaisseur mobilisable correspondante<sup>1</sup>, 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

<sup>1</sup> Burkard A., Salm B., Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit do zur Berechnung von Fliesslawinen/Estimation de l'épaisseur moyenne de

respectivement nord).

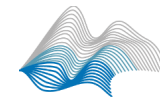
sur [www.avalanches.fr](http://www.avalanches.fr)). La variable restituée est la hauteur des précipitations hivernales (sur la période du 15 novembre au 15 mai) exprimée en mm d'eau, cumulée sur 1 à 3 jours et pour des temps de retour de 2 à 100 ans. Ces lames d'eau sont à convertir en équivalent neigeux considérant une densité communément admise de 125 kg/m<sup>3</sup> pendant la chute. Le cas échéant, ces valeurs peuvent également être extrapolées jusqu'au tri-centennal en majorant le trentennal de 40% (en moyenne).

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 2cm/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.
- Enfin, en tenant compte de la déclivité : jusqu'à 28° (valeur limite en-deçà

déclenchement do pour le calcul des avalanches coulantes, rapport interne n°668, IFENA, Davos 1992





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  $d_o$  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).

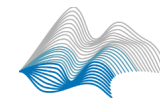
$\varphi$	28	30	32.5	35	37.5	40	45	50
$f(\varphi)$	1	0.9	0.79	0.71	0.65	0.6	0.52	0.46

Tableau 1: Valeur du facteur de pentes en fonction de la déclivité ( $\psi$  en degrés <sup>2</sup>)

Ainsi ici à partir des valeurs des stations Météo-France les plus proches Avrieux (ref: 73026001, altitude: 1102m, distante de 9.9km) et de Aussois (Ref: 73023001, altitude: 1516m, distance: 11km), on obtient finalement par moyennes pondérées tenant compte de la distance et de la différence d’altitude, les épaisseurs mobilisables par périodes de retour correspondantes. Elles sont déclinées par zone de départ selon leurs caractéristiques (altitude et déclivité moyennes). Par exemple, le tableau ci-après fournit les valeurs suivantes pour 3000m et 38° :

		PERIODE DE RETOUR			
		10 ans	30 ans	100 ans	300 ans
Epaisseurs mobilisables	1 j	43 cm	51 cm	62 cm	71 cm
	2 j	68 cm	77 cm	89 cm	107 cm
	3 j	90 cm	100 cm	114 cm	140 cm

Tableau 2: Extrapolation à la zone du projet des épaisseurs de neige mobilisables à partir des données des stations Météo France d’Avrieux et Aussois pour une altitude de 3000 m et des pentes à 38°



## 4. 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>2</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>3</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 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 **AVAL<sub>100</sub>**. Ce scénario couvre les cas

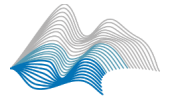
d'événements naturels par exemple avant la saison d'exploitation pour les emprises du PIDA ou pour une avalanche périphérique non déclenchée préventivement. Le cumul considéré est ici de 72 heures

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 au §1A (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).

<sup>2</sup> NF EN 13107 :2015 *Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Ouvrages de génie-civil*

<sup>3</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.



- 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.
- 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.

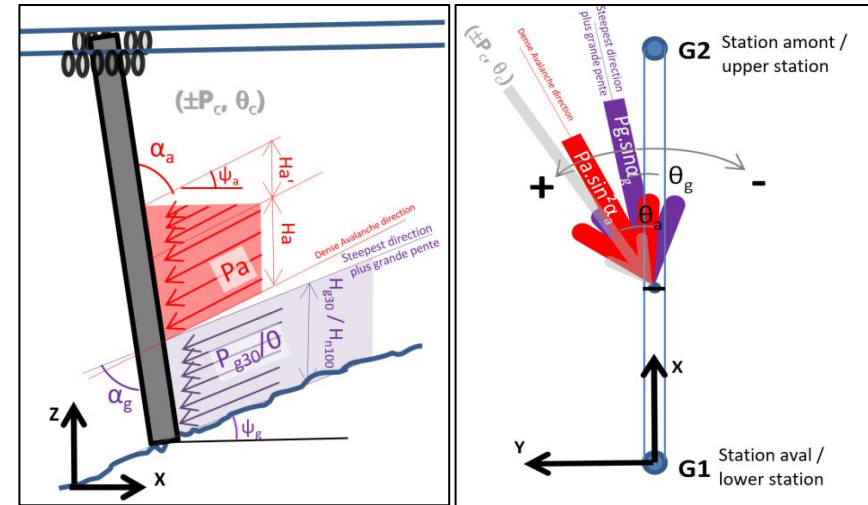


Figure 11 - Schéma type de coexistence des avalanches et de la reptation

## B. CHARGE DUE A LA REPTATION

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

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

- $\rho$ : densité (t/m<sup>3</sup>) considérée classiquement de 0.4 pour les manteaux neigeux préjudiciables.
- $g$ : accélération de la pesanteur (10m/s<sup>2</sup>)
- $H_g$ : 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 2m à 2280m. 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

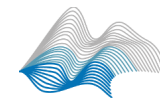
considérée

- $N$ : facteur de glissement qui dépend du sol (ici classe 3) et de l'exposition
- $\eta$ : facteur d'influence prenant en compte la présence du pylône
- $\psi_g$ : angle de la pente locale (°) : la reptation est considérée suivre la ligne de plus grande pente

In fine, la pression de reptation  $P_g$  effectivement appliquée au pylône dépendra de l'angle  $\alpha_g$  entre la direction de glissement du manteau neigeux et la génératrice du pylône (°).

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





## 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 :

- **Cd** : 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 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 Cd.
- **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.

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

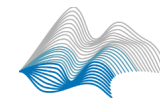
de la reconnaissance de terrain et des résultats de modélisation : les scénarios listés précédemment sont évalués à l'aide du logiciel 2D de référence internationale RAMMS (v 1.7.20 - <http://ramms.slf.ch/ramms/>) de l'Institut Fédéral Suisse d'Etudes des Avalanches à Davos. Ce logiciel reste basé sur 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
- 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 [7].

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.

## D. CHARGE DES AVALANCHES AEROSOL

Les plus grosses avalanches connues sur le secteur sont des avalanches de type "aérosol", d'où la nécessité d'intégrer cette phénoménologie dans les analyses.

L'avancement de la version étendue (désormais 2.7.94) de RAMMS<sup>4</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.

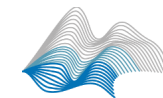
D'une part, le phénomène est alimenté au fur et à mesure de sa descente (sans donc avoir à définir des zones de départ additionnelles en cours de route pour "constituer" le volume représentatif total) mais d'autre part, nécessite d'introduire de nouveaux paramètres. Par exemple, la reprise ou la génération 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

---

<sup>4</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.



mobilisé au départ pour définir les valeurs maximums des coefficients  $\mu$ ,  $\xi$  et de la cohésion C (Figure 12).

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 2) et une couche érosive distribuée: à partir d'une valeur à une altitude donnée, le logiciel calcule sa distribution sur le domaine de calcul tenant compte du facteur de pente 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>5</sup>, seul le cloud drag, d'une valeur standard de 4, peut permettre d'ajuster le calcul à une particularité du site (3 pour 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

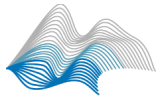
  

Parameters	A	B	C	D
Mu ( )	0.55	0.42	0.38	0.32
Xi (m/s2)	1800	1900	1900	2000
Cohesion (Pa)	200	100	75	50

Figure 12 : matrice de choix du jeu de paramètres en fonction de la période de retour et du volume (source SLF)

<sup>5</sup> P. Bartelt, L. Stoffel, RAMMS Extended input parameters, Draft version 7 juillet





## 5. RESULTATS DES MODELISATIONS NUMERIQUES

### A. AVALANCHES DENSES

#### ❖ En ce qui concerne le versant ouest de la **Pointe de Thorens** :

Une avalanche dense “seule” ne peut atteindre le projet de TC Face nord, et ce aussi bien en conditions trentennale que centennale (Figure 14).

Les extensions maximales correspondent plutôt bien aux emprises représentées dans la carte PIDA bien que le cheminement exact des écoulements soit (au sein de l’emprise) plus complexe : l’avalanche se sépare bien en deux au niveau de la croupe à 2900m et s’écoule ensuite préférentiellement dans la combe (tel que reporté pour l’événement de novembre 2002).

Dans tous les cas et même en considérant une catégorie de volume très conservative pour l’événement centennial - Médium au lieu de Small - les écoulements s’arrêtent bien en amont de la piste Asters et ne concernent donc pas le projet.

#### ❖ A propos de l’emprise PIDA 301 :

Une zone de départ plus étendue a été considérée pour les modélisations, elle englobe également le petit cirque situé tout de suite au nord et qui présentent des pentes supérieures à 30° qui surplombent le projet de TC Face Nord (en transparence rouge dans la Figure 13).

Pour autant, la ligne de TC Face Nord ne reste concernée qu’au droit de l’emprise n°301. Les avalanches provenant du cirque restent en limite du tracé et ne représentent qu’un très faible danger.

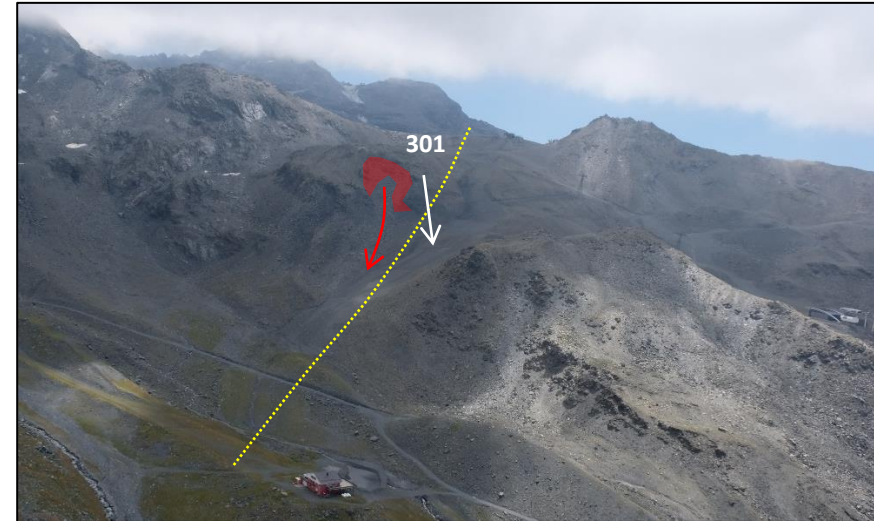


Figure 13: Vue du versant accueillant la ligne et des pentes considérées pour les modélisations

→ **Le projet n’est concerné par les risques d’avalanches denses que dans sa partie médiane, au droit de l’emprise PIDA n°301.**

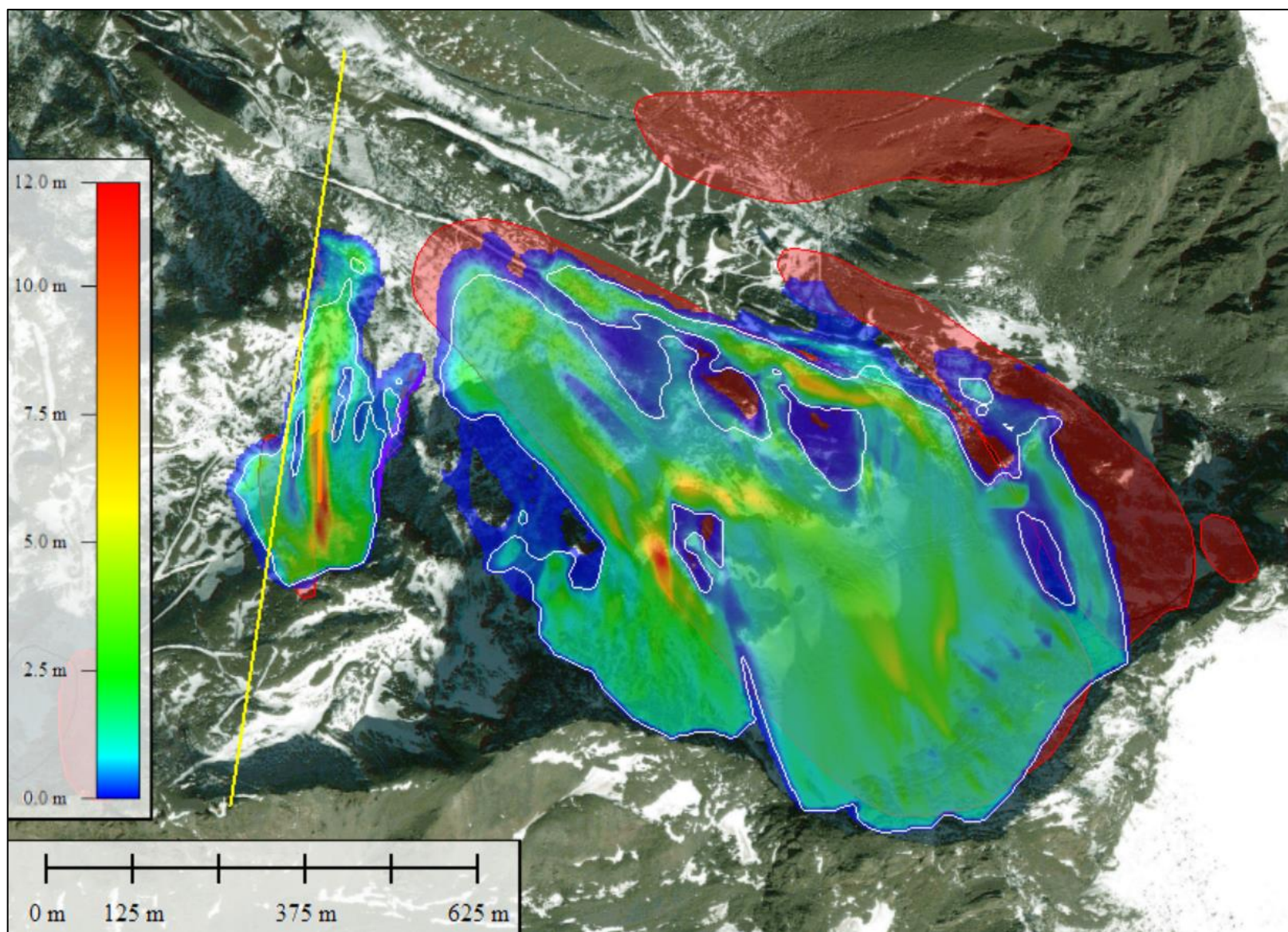
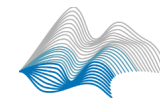
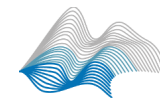


Figure 14 : Epaisseurs maximales des écoulements obtenues par modélisation numérique pour une avalanche centennale (trait blanc : limite des extensions trentennales)





## B. AVALANCHES AEROSOL

Cette phénoménologie concerne uniquement les pentes du versant ouest de la Pointe de Thorens dont la configuration permet le développement de telles avalanches (et non le secteur du point de tir 301).

❖ La première étape a été de tenter de recouper les résultats avec l'événement survenu en février 2021. Il a fallu considérer des paramètres très conservatifs (avalanche tri-centennale notamment !) pour retrouver les extensions du **cœur de l'écoulement/ de la couche de saltation** évoquées lors de [1b], ce qui peut d'ailleurs justifier du caractère plutôt rare de cette avalanche (Figure 15).

Les échanges avec S. Hudry ont permis de confirmer que le vent de sud-est était particulièrement intense les jours précédents l'événement avec donc des accumulations plus que conséquentes dans les pentes ouest de la Pointe de Thorens. Cette dernière information est d'ailleurs confirmée par la Figure 5, sur laquelle on note (en corrélation avec la carte des pentes) que la plaque s'est détachée dans des zones où les surfaces qui atteignent et dépassent 30° sont peu nombreuses...

Rappelons également que le domaine skiable était fermé, les pentes ne faisaient l'objet d'aucun déclenchement préventif, n'étaient pas skiées et donc stabilisées.

Dans tous les cas, plutôt qu'une seule langue qui traverse les pistes Asters, Génépi et emprunte celle de Morraine, il s'agirait plutôt de deux écoulements distincts empruntant deux combes différentes (flèches rouges dans la Figure 15) et ayant la possibilité/capacité de se rapprocher voire communiquer au niveau du plateau du secteur de la G1 du projet de TC Face Nord (en amont du restaurant Le Caribou).

Bien que tri-centennal, cet événement sera l'événement de référence retenu pour les calculs d'une avalanche centennale...

➔ La G1 est épargnée par cette couche de saltation ; les futurs pylônes pourront cependant être localisés de part et d'autre de la combe afin d'éviter les efforts supplémentaires.

❖ En ce qui concerne **la partie aérienne de l'avalanche (le nuage aérosol)**, les efforts qu'il développe au niveau du secteur de la G1 sont de l'ordre de 5 kPa maximum (trait noir dans la Figure 15).

➔ Il sera conseillé d'éviter toutes ouvertures sur les façades est des futurs bâtiments.

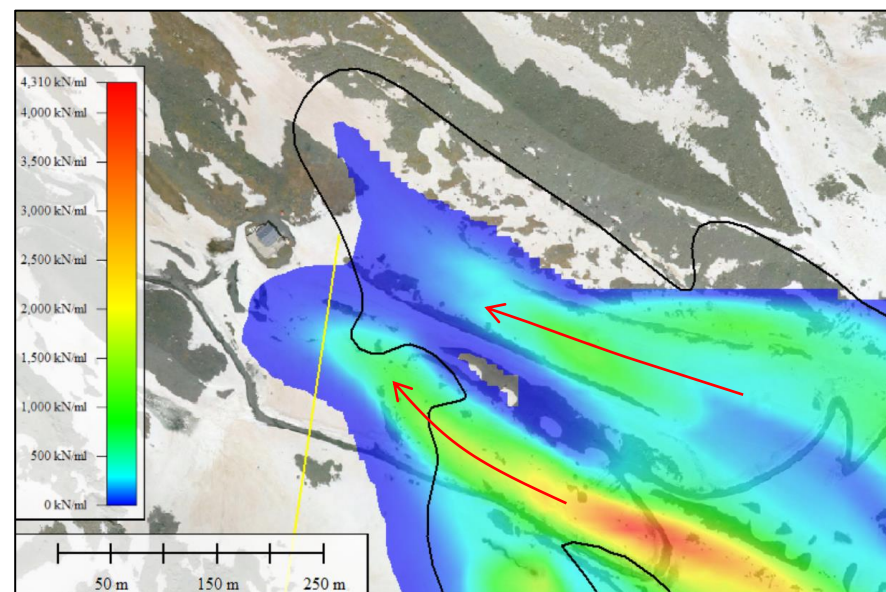
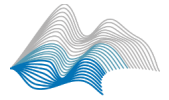


Figure 15: Intensité avalancheuse du cœur de l'écoulement (H\*P) pour une avalanche tri-centennale au niveau du secteur de la G1 du projet de la TC Face Nord. En noir : limite des 5 kPa du nuage aérosol





## 6. CONCLUSION

Bien que concerné par les risques nivologiques d'avalanches et de reptation, la faisabilité du projet de TC Face Nord n'est absolument pas remise en cause :

- ❖ Les tranches d'altitude concernées par le **phénomène de reptation** sont reprises dans le §2.B.
- ❖ La ligne rencontre des **avalanches denses** trentennales et centennales uniquement dans sa partie médiane, au droit de l'emprise PIDA 301. Les sollicitations restent acceptables, de l'ordre de 30 kPa maximum. La tranche d'altitude suivante pourra être évitée pour la localisation des futurs pylônes : 2830m/2890m.
- ❖ Une **avalanche de type aérosol** a atteint en février 2021 le secteur de la G1 du projet. Cette avalanche montre des extensions assez exceptionnelles (de l'ordre de l'occurrence tri-centennale).

De manière conservatrice, elle a tout de même été retenue comme évènement de référence pour calibrer l'avalanche centennale :

- La gare, selon la configuration actuelle, n'est impactée que par le nuage de l'aérosol, avec des pressions maximales de l'ordre de 5kPa.  
La conception du bâtiment devra être adaptée pour résister à cette valeur.
- Le cœur de l'écoulement atteint la première partie de la ligne, avec des efforts de l'ordre de 30kPa également. Afin d'optimiser la localisation des futurs pylônes, la tranche d'altitude suivante pourra être évitée : 2685m/2690m.

La figure ci-contre reprend les sollicitations brutes correspondantes le long du profil du projet de TC Face Nord pour les phénomènes d'avalanches (dense et aérosol) et reptation.

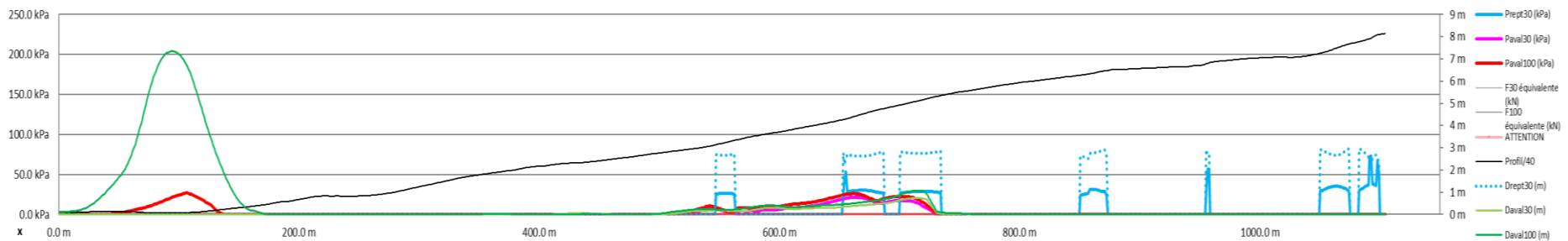


Figure 16: Restitution brute des sollicitations avalanche et reptation le long du profil du projet de TC Face Nord