DIAGNOSTIC AVALANCHE INITIAL

Projet de TC10 du Vallon

(et rétro-analyse des dommages du 30/01/2021 sur P17)

V0 du 31/03/2021

ENGINEERISK

Savoie Technolac – BP 10334 - 73 377 Le Bourget du Lac / FR

: + 33 (0)6 23 75 04 44 - Site Web : www.engineerisk.com

Siret : 499 774 032 000 43 - SAS au capital de : 11 870 €

Etude réalisée par Engineerisk

Rédigée par : Dr. Ing. Philippe BERTHET-RAMBAUD
: +33 (0)6 23 75 04 44
: philippe.berthet-rambaud@engineerisk.com
Visa:

Relue par : Ing. Fanny BOURJAILLAT
: +33 (0)6 23 75 06 42
: fanny.bourjaillat@engineerisk.com
Visa :

Ce rapport contient 32 pages
Sauf mention contraire : crédits photos Engineerisk / figures en plan orientées nord vers le haut/ Fond orthophoto Géoportail
Référence : FRA478
Version 0 du 31/03/2021

REFERENCES

- [1] Visite sur site du 05/02/2021
- [2] Val d'Isère Téléphériques, TC10 Vallon – projet, Ligne Pré-étude, Plan n°12 LI 00 01 ind 0, 04/11/2020
- [3] Engineerisk, Expertise des aléas avalanche de Val d'Isère, Synthèse Phase 2 : résultats interprétés par secteur, V3bis, 11/06/2019
- [4] JF Meffre/ASI, Analyse des risques d'avalanches sur le projet de télésiège des Pyramides, Août 2003
- [5] Carte du PIDA de la station de Val D'Isère sous format vectoriel géoréférencé, source : Régie des Pistes 2021

SOMMAIRE

Références 2

1. INTRODUCTION 4

2. ETAT DES RISQUES CONNUS 5

A. EPA – CLPA 5

CLPA n°154 Grand Vallon 6

CLPA N°195 arrivée du téléski des Pyramides 8

CLPA N°72 : Grand Plan Signal de L'Iseran 8

CLPA 74 & 75 - Petit Plan 11

B. Protections existantes - PIDA 12

3. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO 14

A. Site 14

B. Nivométrie 16

4. SCENARIOS DE REFERENCE ET QUANTIFICATION DES PHENOMENES 19

A. Scénarios de référence 19

B. Charge due à la reptation 21

C. Charge des avalanches denses 21

D. Charge des avalanches aérosol 23

5. RESULTATS 25

A. CLPA n°154 (bordure est/gauche) 25

B. CLPA n°72 25

6. SYNTHESE YC AUTRES PENTES & CONCLUSIONS PRELIMINAIRES VS [2] 31

© Engineerisk 2021

1. INTRODUCTION

L'aménagement du Vallon de L'Iseran a débuté en 1972 ''par le haut'' avec la construction du téléski du Col (doublé l'année suivante) toujours en opération aujourd'hui. La construction du téléphérique du Fornet suivit dans la foulée en 1973, complétée en 1976 par les téléskis des Pyramides et du Signal.

Cependant et malgré cette ossature, manquait une liaison directe pour joindre le Col de L'Iseran depuis le sommet du téléphérique du Fornet : C'est ainsi que vit le jour la télécabine actuelle du Vallon de l'Iseran en 1986 (Figure 1).

Aujourd'hui, atteint par l'âge et dépassé techniquement, cet appareil doit être remplacé par Val d'Isère Téléphériques selon une ligne a priori identique mais en revoyant fortement le calepinage des pylônes (dont le nombre serait diminué d'environ 50% : 30 actuellement contre possiblement 21 à terme [2]).

L'objet du présent rapport est donc de procéder au diagnostic des différents risques nivologiques (avalanche et reptation) jalonnant cette ligne pour identifier et limiter au maximum les zones à risques et donc les prescriptions dimensionnantes futures. A ce titre, les dommages récentes sur l'actuel P17, étêté par l'avalanche du 30 janvier 2021, sont également rétro-analysés pour parfaire l'évaluation des phénomènes dans le secteur.

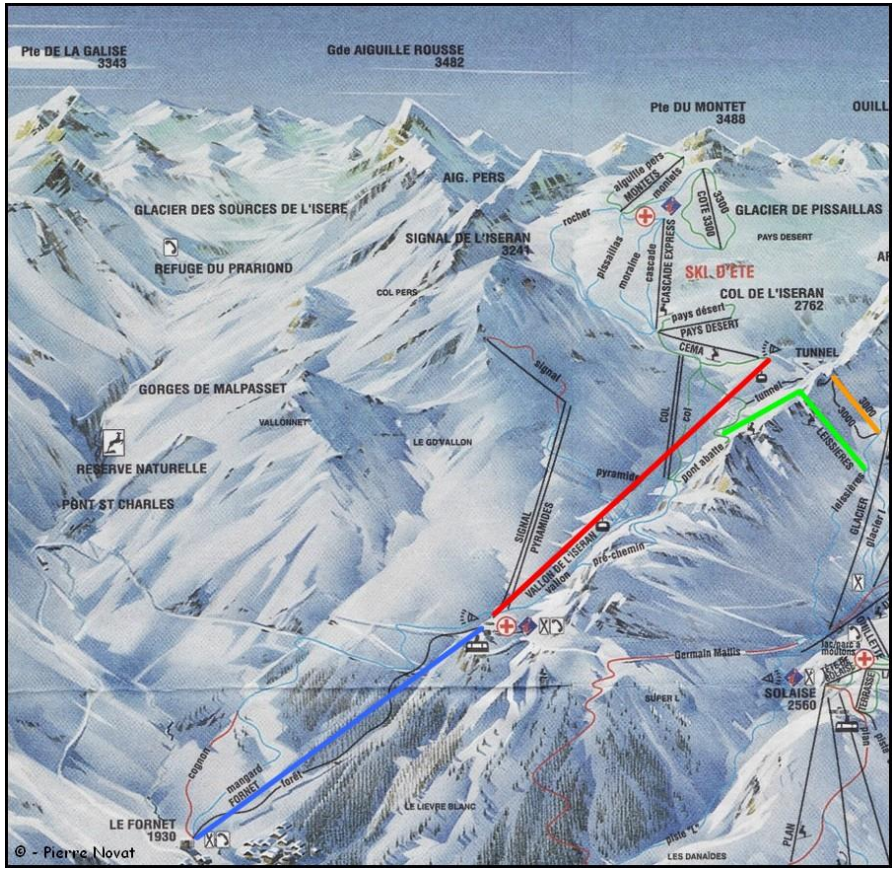

Figure 1 – Vue de la liaison Fornet – Col de L'iseran par le téléphérique (en rouge) et la télécabine du Vallon sur un ancien plan des pistes. Depuis, le téléski Pyramides et la partie aval du TK du Signal ont été remplacés par le TSD des Pyramides et la partie supérieure du Signal dédoublée.

2. ETAT DES RISQUES CONNUS

A. EPA – CLPA[1]

La figure ci-dessous fournit l'évolution de la Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux (CLPA) du secteur au gré de ses versions successives:

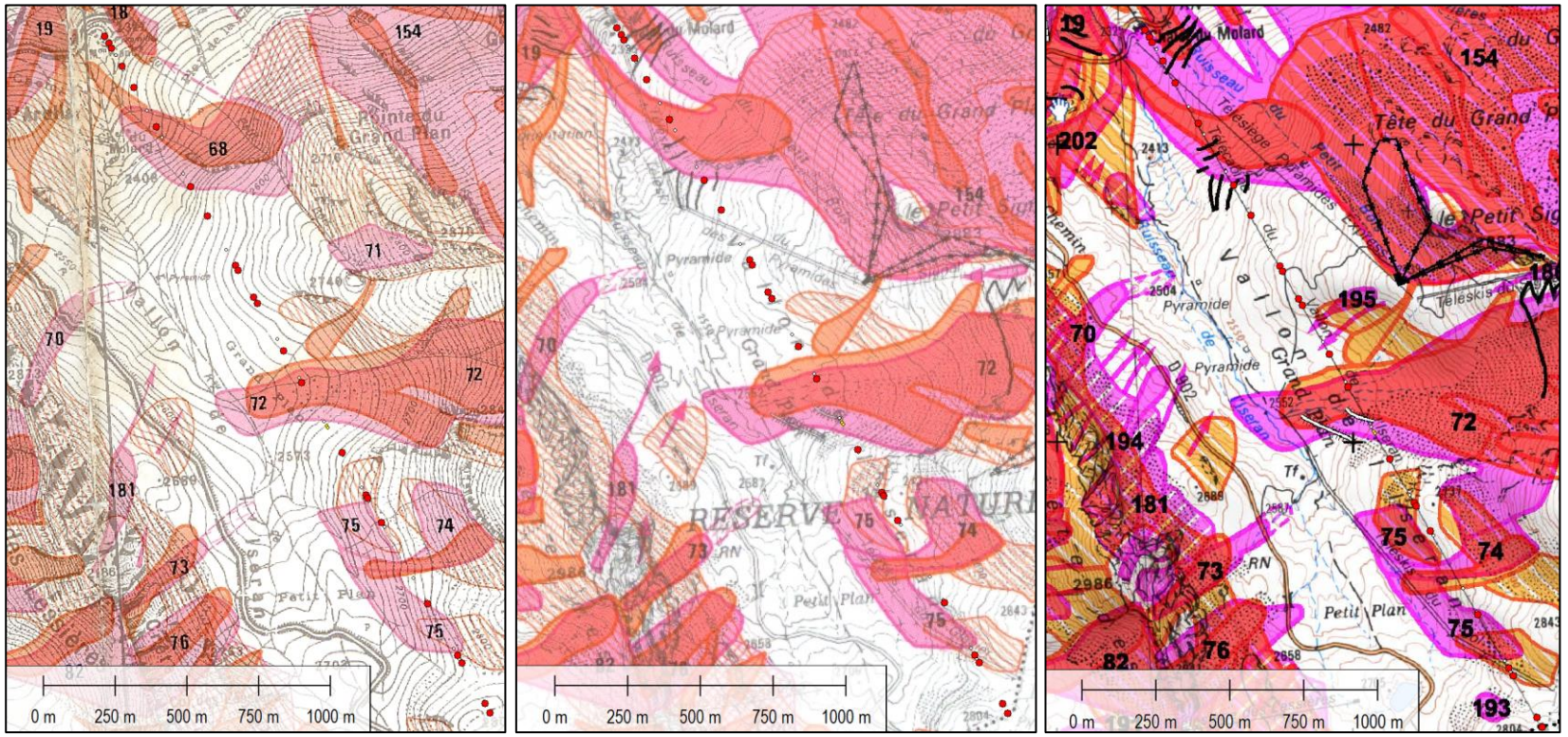

Figure 2 – Extrait de la CLPA – De gauche à droite, versions de 1970, 1990 et actuelle –points rouges=pylônes projetés

[1] www.avalanches.fr

Ainsi de l'aval vers l'amont, la ligne est menacée (toujours et uniquement en rive droite) par :

CLPA n°154 Grand Vallon (également suivie dans le cadre de l'Enquête permanente sous le n°7 : Cognon) : celle-ci-est désormais issue de la fusion avec les anciennes n°68 et 71 et a connu plusieurs épisodes qui sont descendus jusqu'en fond de vallée et le village du Fornet (1767, 1914,[3].

Pour autant et pour ce qui nous intéresse ici, il s'agit de se focaliser sur la partie supérieure et la rive gauche de cette avalanche qui s'est notamment manifestée le 2 avril 1981 après une grosse chute de neige et suite à déclenchement préventif. [4] la décrit en détail :

''Le 2 avril 1981, le nivo météorologue de Val d'Isère relevait 80 mm d'eau (à 1.850 m d'altitude) qui s'ajoutaient à 37 mm tombés durant les 48 h précédentes. Depuis le début des précipitations, la température à 1.850 m oscillait entre 0° et 5°. La couche de neige fraîche, humide, devait dépasser 1 m à 2.700 m dans les zones de départ.

Les photos [page suivante] confirment et détaillent les dires des témoins :

- la cassure se situait à priori un peu au-dessus de 2.700 m sur la croupe du Petit Signal []
- elle contourna la croupe du Petit Signal et s'étendit en versant nord de la Tête du Grand Plan ; plusieurs langues descendirent très bas dans la vallée []
- une fracture se propagea au sommet des barres rocheuses situées vers 2.550 m entre le ruisseau de l'Iseran et le ruisseau du Petit Bois (sous l'action de l'avalanche qui déboucha de ce dernier).
- la neige issue de la moitié ouest de ces dernières pentes traversa le téléski du Signal avant de s'arrêter sur la piste ; elle passa quelques dizaines de mètres sous le pylône 4, mais coucha le P.3
- un petit volume de neige continua par le ruisseau du petit Bois à partir de 2.350 et dépassa la RD 902, mais la plus grosse partie de l'avalanche poursuivit jusqu'au lieu-dit Le Molard. Elle endommagea les gares des téléskis du Signal et des Pyramides ainsi que leurs pylônes communs P.1 et P.2. Elle s'arrêta, sans dommages, contre la porte de la maison cantonnière et un peu avant la gare du téléphérique du Fornet.
- une faible partie seulement de l'avalanche rejoignit le ruisseau de l'Iseran (en évitant le pont) et descendit vers la vallée'' [4].

Figure 3 – Vue de la localisation des TKs Pyramides et Signal par rapport à la TC (Source : remontees-mecaniques.net) avant leur reconfiguration avec le TSD actuel des Pyramides

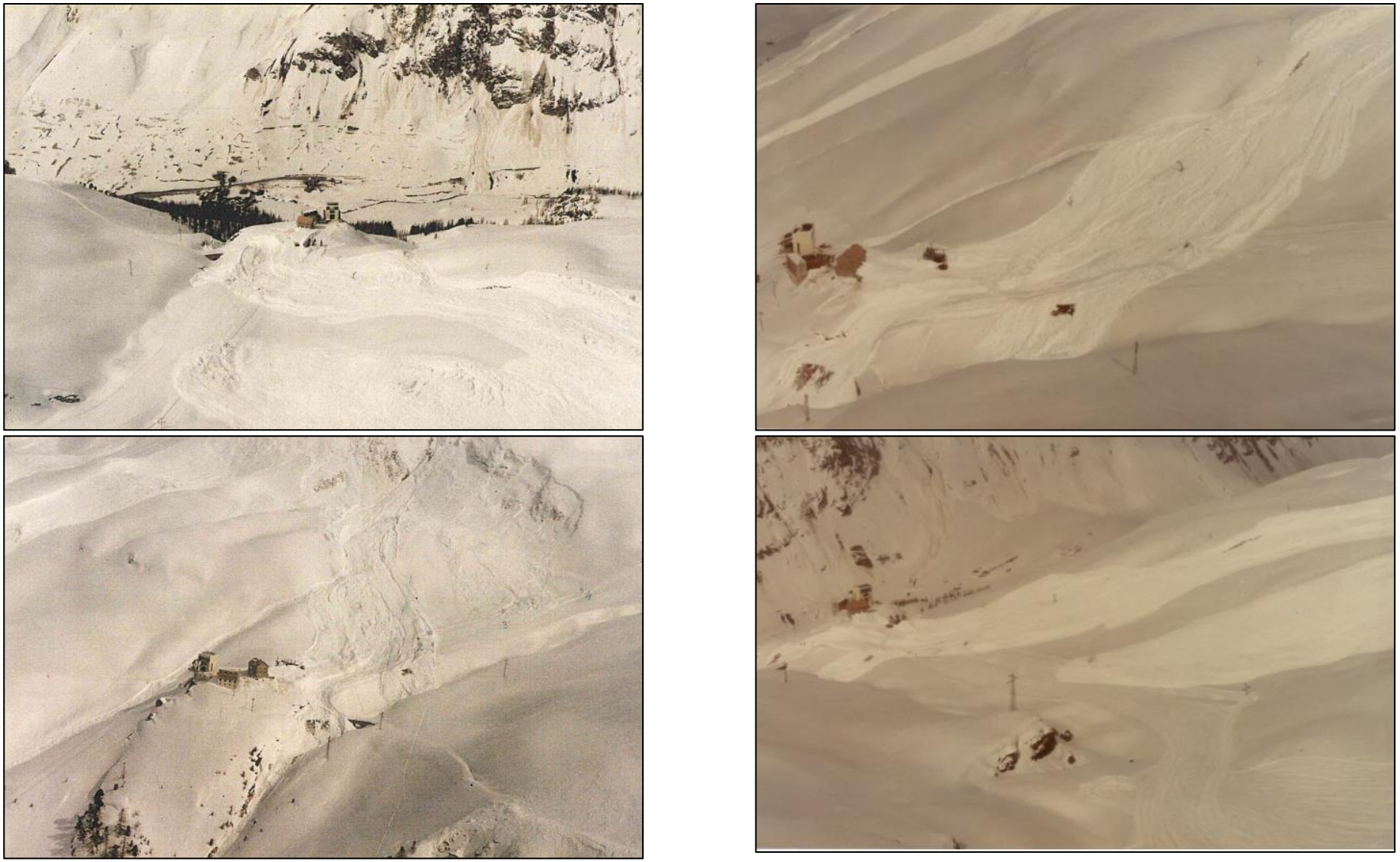

Figure 4 – Différentes vues de l'avalanche du 2 avril 1981 (source : JF Meffre / STVI / JM Clarey)

© Engineerisk 2021

CLPA N°195 ARRIVEE DU TELESKI DES PYRAMIDES

Cette petite emprise ajoutée sur la dernière version de la carte génère de petits phénomènes en comparaison des emprises voisines. Sa fiche signalétique indique ''L'avalanche est soit partie sur toute la largeur et a sauté le rocher, soit s'est cantonnée dans le couloir en rive droite. Elle s'est arrêtée au niveau de la ligne de la télécabine du Vallon de l'Iseran.''

CLPA N°72 : GRAND PLAN SIGNAL DE L'ISERAN

Cette emprise est l'autre gros ''problème'' que rencontre la ligne de la télécabine : descendue de manière remarquable à plusieurs reprises ces dernières décennies, aussi bien en neige froide (1986, 2010 Figure 7 & Figure 8) qu'en neige lourde (1993, 2001 - Figure 5, 2010 encore Figure 10), elle est surtout à l'origine de dommages ''récurrents'' :

- en 1981 sur le départ des TK du Col (Figure 6)
- en 1990 sur le pylône 17 de la télécabine, réparé une première fois (Figure 9)
- dernièrement le 30 janvier 2021 avec à nouveau ''scalpage'' du P17

Figure 5 – Avalanche du Grand Plan en neige lourde en 2001 (STVI/JM Clarey)

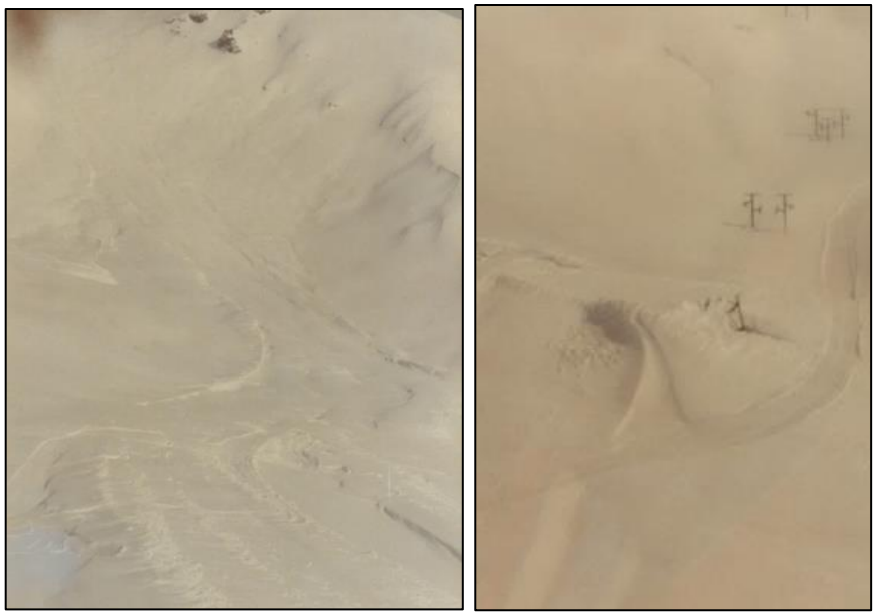

Figure 6 – Avalanche de 1981 avec endommagement du départ des TKs du Col (STVI/JM Clarey)

Figure 7 – Avalanche du 1er mars 2010 (data-avalanche.org)

Figure 8 – Avalanche du 26 décembre 2010 (data-avalanche.org)

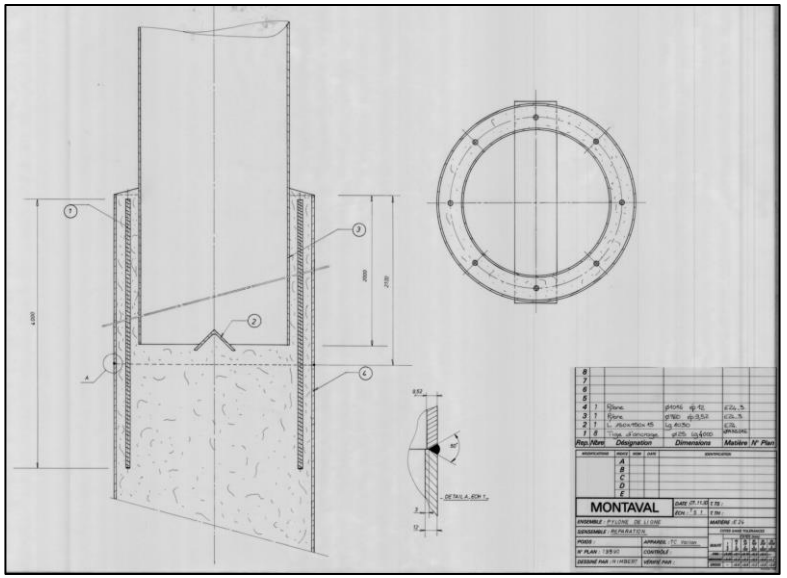

Figure 9 – Reprise du pylône 17 suite à son étêtement en 1990 (STVI/JM Clarey)

Figure 10 – Avalanche du 3 mai 2010 (STVI/JM Clarey)

Cette avalanche du Grand Plan de début 2021 s'inscrit dans des conditions particulières (fermeture des stations de ski pour cause d'épidémie Covid) qui de fait ont conduit à une moindre présence des équipes opérationnelles sur le terrain et à une réduction des opérations (PIDA, purge des tournes – Cf. paragraphe suivant). Mais au-delà de ce contexte, la deuxième quinzaine de janvier a surtout connu un défilé quasi ininterrompu de perturbations… après un début d'année déjà bien chargé.

Ce sont ainsi jusqu'à 3 mètres de cumul qui sont mesurés en altitude sur le mois, ce qui explique aisément un événement d'ampleur remarquable y compris en termes de sollicitations: principalement (en plus de dégâts divers sur les balanciers des pylônes voisins du fait du mouvement du câble) le P17 se retrouve à nouveau étêté, l'essentiel de la partie basale du fût remplie en béton lors de la réparation de 1990 (Figure 9) restant en place (Figure 12).

La partie cisaillée est retrouvée à moins de 20 mètres du chalet des téléskis du Col soit quand même à plus de 200m de sa position initiale (Figure 11).

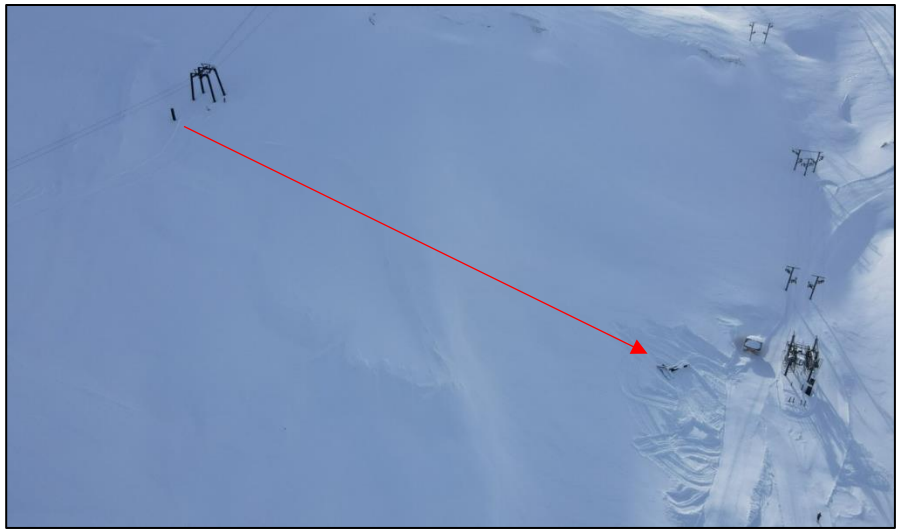

Figure 11 – Déplacement de la tête du P17 jusqu'au départ des TKs du Col

Figure 12 – vue de la partie supérieure arrachée et transportée (à gauche) et restant du fût inférieur, bétonné en 1990 (à droite – amont du versant vers la droite de la photo)

© Engineerisk 2021

CLPA 74 & 75 - PETIT PLAN ce dernier système d'emprises référencé dans la CLPA encadre la dernière partie de la ligne sous forme de longues pentes propices à l'amont et à l'aval (Figure 13). Comme l'indique la fiche signalétique, ''L'avalanche s'est plusieurs fois déclenchée depuis la rupture de pente et est descendue jusqu'à la ligne du téléski amont du Col.''

Figure 13 – Vue des pentes de part et d'autre de la dernière partie de la ligne avant son arrivée au Col : à gauche/à l'amont CLPA n°74 , à droite/à l'aval CLPA n°75 et ligne de connexion entre les deux entre P23 et P24 (source : remontees-mecaniques.net)

Pour information, les pentes aval (donc qui ne concernent pas le projet tant qu'il reste sur la même trajectoire) se poursuivent au nord par une zone photo-interprété qui correspond à une croupe convexe qui s'est notamment manifestée en février 2015 sous les pylônes P19, P20, P21 (Figure 14).

Figure 14 – Avalanche du 17 février 2015 (source : data-avalanche.org)

B. PROTECTIONS EXISTANTES - PIDA

Naturellement, le secteur est intégré au Plan d'Intervention de Déclenchement des Avalanches (PIDA) de la Station (Figure 15 [5]) qui combine différents moyens pour couvrir l'ensemble des pentes sensibles, y compris avec des moyens déportés (Gazex® - Figure 16, Catex) pour parer à toutes les conditions.

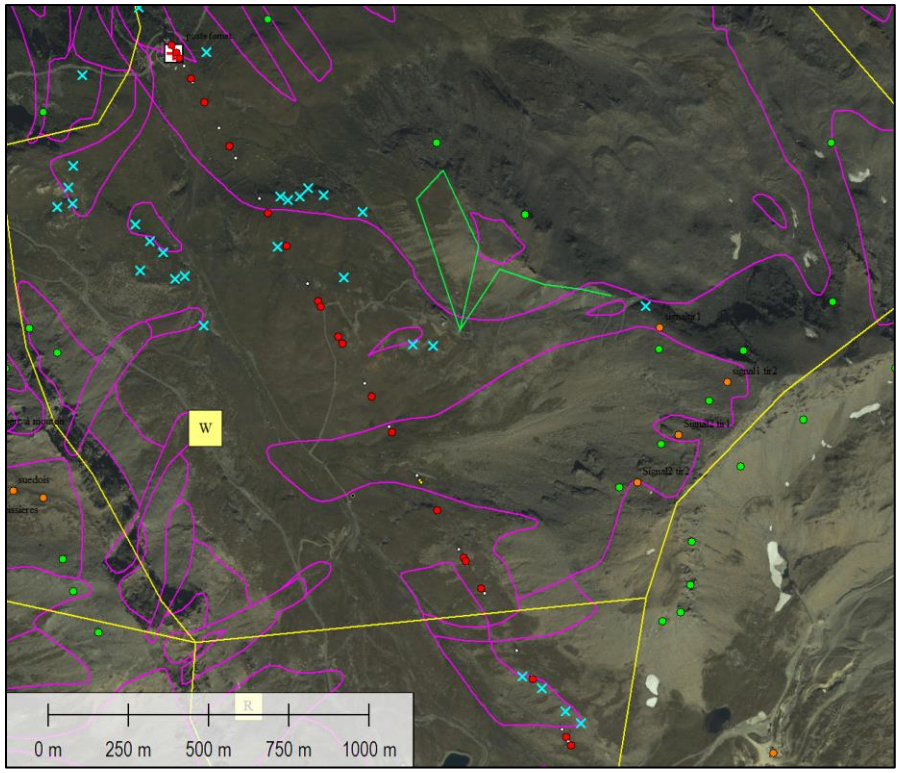

Figure 15 – PIDA du secteur [5] : croix bleues = tirs manuels, Gazex® en orange, héligrenadage en vert, Catex en trait vert (fond orthophoto Géoportail avec emprises témoignées de la CLPA)

Figure 16 – Exemple de résultats de tirs Gazex® dans la face ouest du Signal de l'Iseran en 2019 (source : data-avalanche.org)

En complément, les installations de remontée mécanique se sont vu adjoindre des protections de type tourne : une première à l'aval en bordure de la ligne d'écoulement naturel pour protéger le départ des TKs du Col puis une juste à l'amont du P17 et du double portique 18 de la télécabine (Figure 19).

Or il s'agit plutôt de simples levées de terre limitées par rapport à des phénomènes volumineux et très véloces (par exemple, la digue aval n'a pas empêché les dégâts de 1981 sur les TKs du Col - Figure 6). Pire, la tourne du haut peut même générer un effet tremplin pour que l'écoulement, en plein développement à cet endroit, impacte préjudiciablement le pylône 17 (Figure 25) sur sa moitié supérieure en majorant le bras de levier destructeur.

© Engineerisk 2021

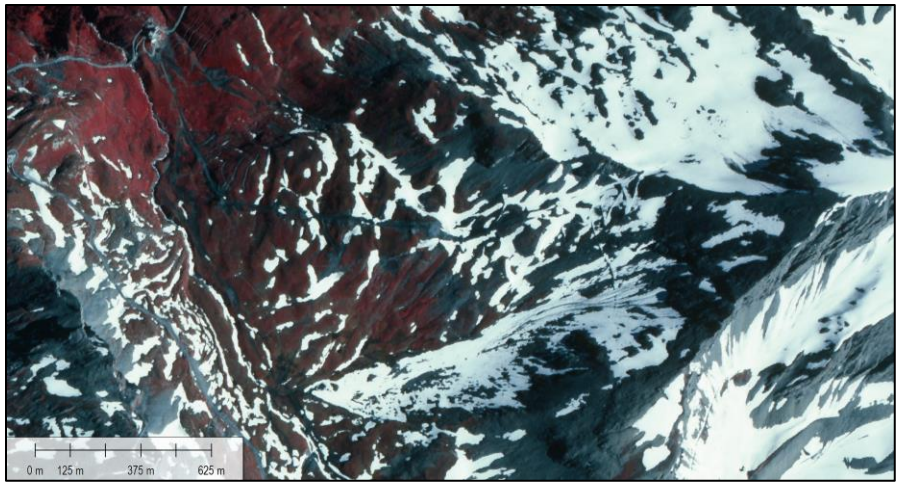

Figure 17 – Vue de la tourne aval (cliché IGN de 1980)

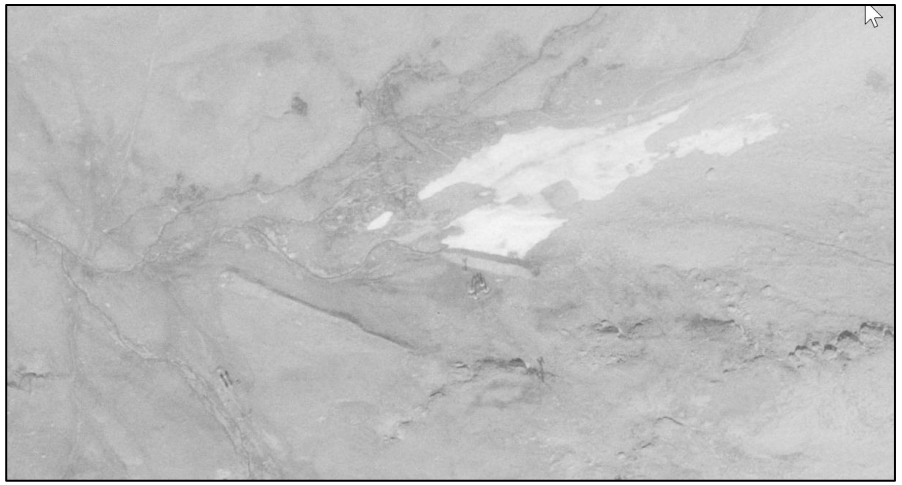

Figure 18 – Vue des 2 tournes (cliché IGN du 01/09/1986) avec dépôt encore présent à l'amont

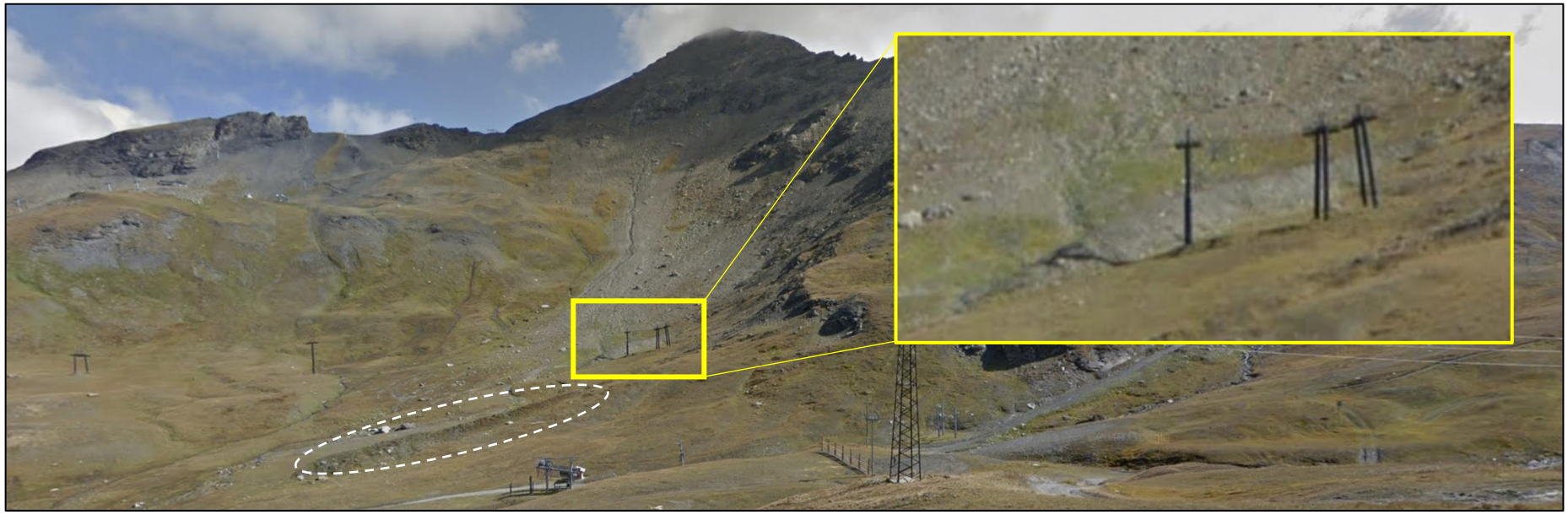

Figure 19 – Vue des 2 tournes en terrain hors neige

© Engineerisk 2021

3. SITE & CONTEXTE NIVO-METEO

A. SITE

En complément des éléments précédents, la figure ci-contre présente la distribution des pentes considérées comme propices aux phénomènes nivologiques, c'est-à-dire entre 30° (valeur en deçà de laquelle le manteau neigeux est considéré comme stable sauf circonstance vraiment particulières) et 55° (déclivité au-delà de laquelle la neige se purge régulièrement naturellement en petits volumes).

Cette carte confirme l'activité en rive droite de la ligne de la remontée qui croise également quelques pentes en cours de route : frontalement au-dessus du P7 (Figure 22), latéralement à l'amont du P10 (Figure 23) avant la longue traversée à plat voire descendante du Grand Plan (Figure 24) suivie de la pente au-dessus du portique 18 (Figure 25) pour finir par les pentes transverses des deux dernières emprises CLPA (Figure 13).

Ainsi, si le profil longitudinal est globalement doux, il n'échappe pas à quelques zones de pentes supérieures à 30° (Figure 20) qui peuvent générer des effets de reptation sur les pylônes qui y seraient implantés (même si l'orientation plutôt nord et le type de sol limitent le phénomène)

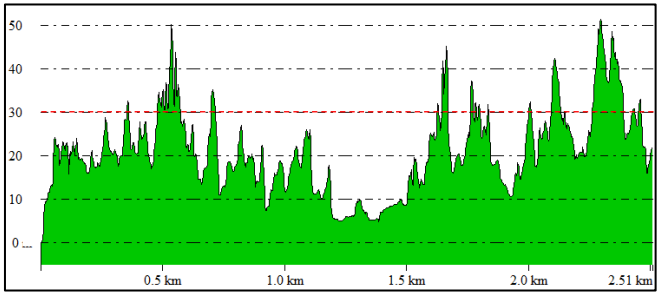

Figure 20 – Distribution des pentes (en degrés) le long du profil de ligne

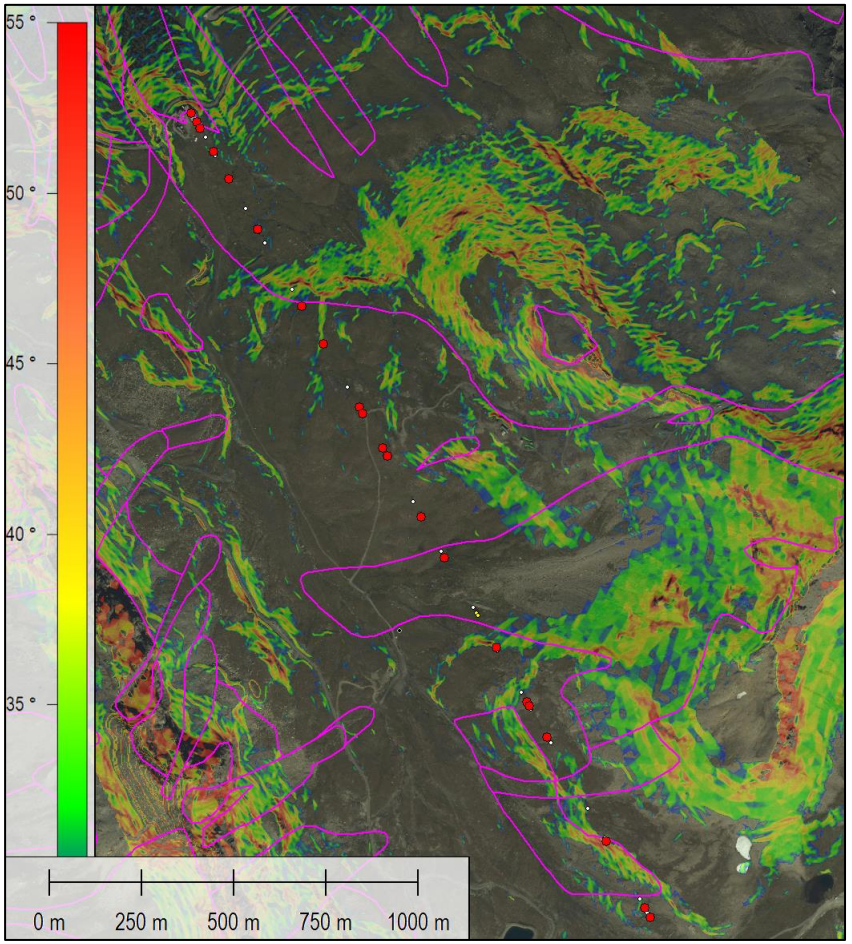

Figure 21 – Carte des pentes propices aux avalanches (entre 30 et 55° [2]) – En rouge pylônes projetés, en blanc et jaune pylônes et portiques existants

© Engineerisk 2021

Figure 22 – Vue des pentes au-dessus du portique P6 actuel (source : remontees-mecaniques.net)

Figure 23 – Vue des pentes à l'amont du P10 actuel (source : remontees-mecaniques.net)

Figure 24 – Vue de la traversée du Grand Plan (source : remontees-mecaniques.net)

Figure 25 – Vue du P17 et portique 18 avec leur tourne de protection avant les pentes menant vers P19 et P20 (source : remontees-mecaniques.net)

B. NIVOMETRIE

Les éléments qui suivent sont directement issus de [3] dont l'essentiel est rappelé ici:

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[2].

Il faut cependant signaler l'aspect délicat (mais en même temps incontournable) de ce genre d'estimations :

- Les méthodes statistiques comportent toutes leurs biais et les valeurs des précipitations extrêmes sont définies avec une certaine imprécision.
- Les séries de données disponibles sont courtes (quelques décennies au mieux : depuis 1971 à Val d'Isère avec aussi quelques périodes lacunaires) et il est donc hasardeux de faire des extrapolations à (trop) long terme[3].
- D'autres influences (transport de neige par le vent) peuvent contribuer de manière non négligeable aux épaisseurs présentes mais sans nécessairement disposer d'informations systématiques 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[4] fait toujours référence pour structurer la démarche et définir l'épaisseur d_o mobilisable dans une zone de départ d'avalanche donnée :

[2] Meunier M, Ancey C, Richard D., Conceptual approach to the study of snow avalanches, Cemagref, 2005

[3] Par exemple pour les périodes de retour pluri-centennales (300 ans), il est certes toujours possible de procéder ''mathématiquement'' mais il est admis de plutôt les lier aux cumuls trentennaux en observant qu'ils sont en général très bien corrélés (ratio en moyenne de 1.4).

[4] 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

© Engineerisk 2021

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 Val d'Isère (1850m) mais aussi le poste voisin de Tignes (2080m) (fournies par Météo France), il a été possible d'en faire le traitement statistique en privilégiant la méthode des maximas hivernaux : il s'agit d'utiliser les plus forts cumuls tombés en 24hrs, 48hrs et 72hrs sur chaque hiver d'observation (Tableau 1).

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 26, Tableau 2 et Tableau 3).

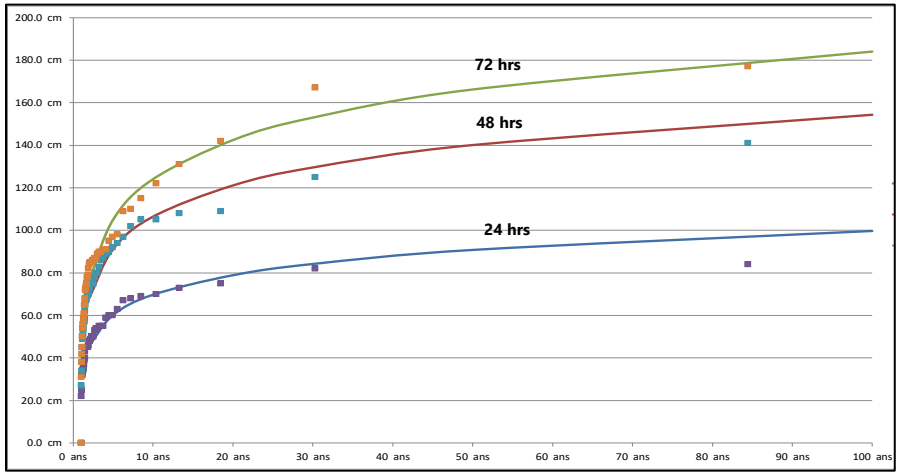

Figure 26 – Ajustement de la loi statistique sur les maximas hivernaux pour Val d'Isère

cumul brut ss tassement	Val d'Isère (1850m)			Tignes (2080m)		
	24 hrs	48hrs	72hrs	24 hrs	48hrs	72hrs
1970-1971	-	-	-	81 cm	104 cm	104 cm
1971-1972	45 cm	65 cm	65 cm	51 cm	69 cm	69 cm
1972-1973	35 cm	38 cm	38 cm	38 cm	43 cm	47 cm
1973-1974	45 cm	70 cm	72 cm	45 cm	80 cm	83 cm
1974-1975	55 cm	94 cm	98 cm	30 cm	33 cm	43 cm
1975-1976	25 cm	45 cm	59 cm	-	-	-
1976-1977	0 cm	0 cm	0 cm	-	-	-
1977-1978	82 cm	102 cm	167 cm	85 cm	105 cm	132 cm
1978-1979	32 cm	59 cm	73 cm	50 cm	75 cm	80 cm
1979-1980	55 cm	92 cm	95 cm	60 cm	100 cm	100 cm
1980-1981	48 cm	75 cm	82 cm	55 cm	75 cm	105 cm
1981-1982	75 cm	125 cm	131 cm	53 cm	102 cm	129 cm
1982-1983	54 cm	86 cm	87 cm	62 cm	104 cm	105 cm
1983-1984	69 cm	105 cm	122 cm	58 cm	90 cm	105 cm
1984-1985	37 cm	67 cm	90 cm	39 cm	75 cm	91 cm
1985-1986	50 cm	97 cm	97 cm	60 cm	75 cm	80 cm
1986-1987	32 cm	57 cm	61 cm	45 cm	77 cm	100 cm
1987-1988	46 cm	89 cm	115 cm	45 cm	80 cm	108 cm
1988-1989	54 cm	70 cm	91 cm	51 cm	98 cm	120 cm
1989-1990	73 cm	141 cm	177 cm	78 cm	136 cm	168 cm
1990-1991	63 cm	80 cm	90 cm	43 cm	70 cm	70 cm
1991-1992	84 cm	108 cm	142 cm	89 cm	109 cm	136 cm
1992-1993	67 cm	75 cm	86 cm	59 cm	67 cm	82 cm
1993-1994	45 cm	69 cm	79 cm	44 cm	69 cm	82 cm
1994-1995	68 cm	78 cm	85 cm	61 cm	81 cm	90 cm
1995-1996	45 cm	67 cm	74 cm	50 cm	68 cm	68 cm
1996-1997	35 cm	49 cm	50 cm	38 cm	67 cm	67 cm
1997-1998	50 cm	75 cm	75 cm	55 cm	100 cm	100 cm
1998-1999	48 cm	75 cm	84 cm	50 cm	66 cm	78 cm
1999-2000	40 cm	68 cm	85 cm	38 cm	56 cm	71 cm
2000-2001	32 cm	38 cm	38 cm	26 cm	43 cm	45 cm
2001-2002	50 cm	54 cm	54 cm	34 cm	50 cm	65 cm
2002-2003	45 cm	52 cm	56 cm	45 cm	52 cm	55 cm
2003-2004	43 cm	73 cm	78 cm	47 cm	80 cm	96 cm
2004-2005	49 cm	62 cm	65 cm	35 cm	65 cm	74 cm
2005-2006	45 cm	83 cm	86 cm	36 cm	67 cm	70 cm
2006-2007	34 cm	50 cm	56 cm	38 cm	60 cm	65 cm
2007-2008	55 cm	73 cm	85 cm	42 cm	67 cm	89 cm
2008-2009	60 cm	80 cm	87 cm	62 cm	79 cm	85 cm
2009-2010	33 cm	45 cm	45 cm	27 cm	40 cm	48 cm
2010-2011	22 cm	27 cm	31 cm	21 cm	27 cm	31 cm
2011-2012	70 cm	105 cm	110 cm	57 cm	92 cm	97 cm
2012-2013	60 cm	87 cm	89 cm	54 cm	85 cm	86 cm
2013-2014	25 cm	34 cm	42 cm	25 cm	35 cm	41 cm
2014-2015	39 cm	56 cm	59 cm	32 cm	48 cm	55 cm
2015-2016	37 cm	57 cm	68 cm	30 cm	46 cm	58 cm
2016-2017	53 cm	90 cm	91 cm	49 cm	74 cm	75 cm
2017-2018	59 cm	109 cm	109 cm	70 cm	123 cm	123 cm
Max	84 cm	141 cm	177 cm	89 cm	136 cm	168 cm
moyenne	48 cm	72 cm	81 cm	49 cm	74 cm	84 cm

Tableau 1 – Valeurs des cumuls bruts (sans tassement) hivernaux à partir des mesures à Val d'Isère et Tignes (source Météo-France)

© Engineerisk 2021

Cumul/occur	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
1 j	46 cm	60 cm	70 cm	79 cm	84 cm	91 cm	100 cm
2 j	68 cm	91 cm	106 cm	121 cm	129 cm	140 cm	154 cm
3 j	76 cm	105 cm	124 cm	142 cm	153 cm	166 cm	184 cm

Tableau 2 – Résultats statistiques des cumuls bruts par période de retour et nombre de jours pour Val d'Isère (1850m)

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 3 – 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 obtenues, 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 conservative 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. Ici, il est intéressant de comparer le Tableau 3 aux prédéterminations fournies par Météo France (www.avalanches.fr) pour le site le plus proche de Tignes Brévières à 1560m (Tableau 4). En convertissant la lame d'eau via la valeur de densité communément admise de 125 kg/m^3, 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. Cette valeur est étendue également à Val d'Isère.

		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 4 – Prédétermination Météo-France pour Tignes Brévières en équivalent en eau (www.avalanches.fr)

- 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 décroit 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 5 est appliqué à l'épaisseur ''stable'' à 28°.

ψ	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 5 – Valeur du facteur de pentes en fonction de la déclivité (ψ en degrés [5])

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). Par exemple, le tableau suivant fournit les épaisseurs mobilisables pour une zone de départ à 2500m de 37°.

		Durée de retour			
		10 ans	30 ans	100 ans	300 ans
Epaisseurs mobilisables	1 j	47 cm	56 cm	65 cm	78 cm
	2 j	69 cm	81 cm	94 cm	114 cm
	3 j	81 cm	96 cm	111 cm	134 cm

Tableau 6 – Epaisseurs mobilisables pour une zone de départ à 37° et 2500m

© Engineerisk 2021

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[5]. La problématique des avalanches et de la reptation y étant somme toute traitée succinctement, ce qui suit s'inspire également des pratiques suisses[6].

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 **$REPT_{30}$** (charge variable principale) combiné à l'avalanche **$AVAL_{30}$** (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 **$AVAL_{100}$**. Ce scénario (type 30 janvier 2021) 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} (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 Hn_{100} correspondant au cumul de référence sur 3 jours l'ayant générée (manteau récent sans reptation).

[5] NF EN 13107 :2015 *Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Ouvrages de génie-civil*

[6] 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.

© Engineerisk 2021

- 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/cœur (assimilable à une phase pseudo-dense mais sans couche de refoulement) surmontée du nuage turbulent de pression ±Pc (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 θx 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.

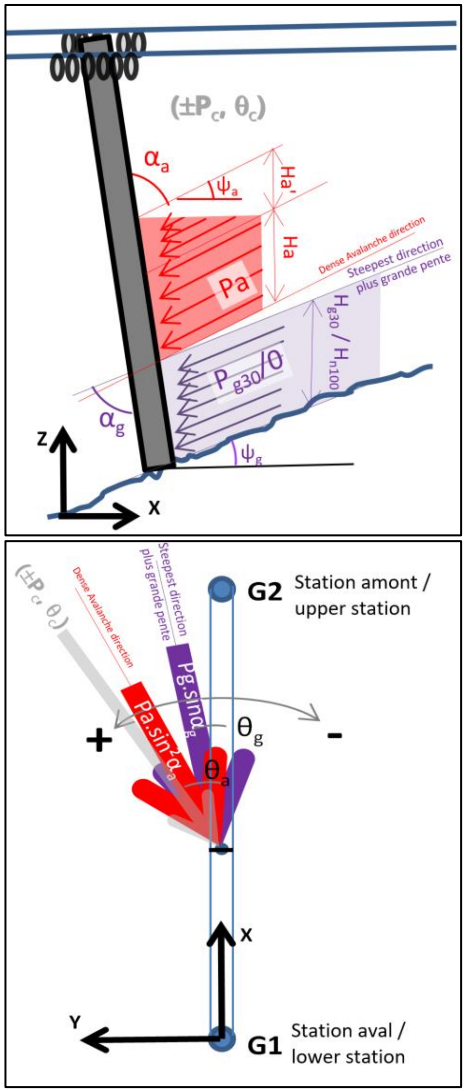

Figure 27 - Schéma type de coexistence des avalanches et de la reptation

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 :

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

- **ρ**: 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 à ce stade considérée de 2m au pied. 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 2) 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

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

$$P_g = P_g . \sin \alpha_g$$

C. CHARGE DES AVALANCHES DENSES

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

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

Avec :

- **Cd** : 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

© Engineerisk 2021

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 $\mathbf{P_a}$ effectivement appliquée au pylône dépendra de l'angle $\boldsymbol{\alpha_a}$ entre la direction de l'avalanche et la génératrice du pylône (°).

$$\mathbf{P_a} = Pa.\,sin^2\alpha_a = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 sin^2\alpha_a$$

S'agissant d'avalanches coulantes denses, une hauteur de refoulement supplémentaire (notée Ha' sur la Figure 27) 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 entrainée 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
- 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 6.
- 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 [2].

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 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.

© Engineerisk 2021

D. CHARGE DES AVALANCHES AEROSOL

Vu la séquence temporelle, l'aérosol et sa couche de saltation finissent en général par devancer la partie dense coulante. Dans ce cas et du point de vue du génie-civil, le profil de sollicitation correspondant constitue donc un cas de charge spécifique indépendant. Il est toujours considéré comme accidentel quelle que soit la période de retour.

Il s'agit également de noter que :

- La pression de nuage (±Pc sur la Figure 27), plus faible[7], correspond à une phase de suspension aérienne turbulente pour laquelle la sollicitation s'applique autant en surpression qu'en dépression.
- Elle est donc appliquée positivement +Ps dans la direction incidente du phénomène θs (selon les mêmes règles que les autres θ) au-dessus de la pression de la couche de saltation et négativement -Ps sur la face opposée sur toute la hauteur au-dessus du manteau neigeux en place H_n (pas de pression de saltation de ce côté-là)

Le développement avancé de la version étendue de RAMMS[8] a donné l'opportunité des calculs présentés pour cette phénoménologie, au titre d'une utilisation de testeur en partenariat avec le SLF.

Au-delà de la possible prise en compte et restitution des aérosols, la 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 décrite 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

[7] Elle peut cependant induire des effets élastiques indirects majeurs par la sollicitation qu'elle applique sur les câbles (cf. le §5B)

[8] 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.

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 centre de Davos a pu fournir avec la version 2.7 un jeu de paramètres rétro-calé sur un certain nombre d'avalanches représentatives qui se sont produites lors d'une importante phase avalancheuse dans les Grisons en janvier 2018 et qu'on peut considérer comme valable pour des phénomènes ''multi-décennaux'', ''quasi-centennaux''.

Ainsi, ce jeu de paramètre récemment actualisé[9] est utilisé tel quel (en ne s'autorisant au besoin que des ajustements très limités) :

- Densité neigeuse compacte (type dépôt) : 450 kg/m^3
- μ maximum : 0.55
- ξ de référence : 2000 m/s^2
- Cohésion de référence : 200 Pa
- Zone de départ :
    - A considérer comme le panneau déclencheur initial
    - Densité : 200 kg/m3
    - Température de référence : -10°C
    - Teneur en eau : non activée
- Erosion du manteau neigeux en place :
    - Loi gouvernée par la vitesse et la pente
    - Prise en compte de la dépendance à la pente
    - Répartition du manteau neigeux sur le versant à partir d'une épaisseur de référence à 28° à une altitude donnée et en tenant compte d'un niveau habituel de gradient nivométrique (3cm/100m ici)
    - Dépendance de la température avec l'altitude de 0.3°C/100m
    - Teneur en eau : non activée
    - Niveau d'interaction (''bonding''=low) permettant de définir les différents coefficients de transfert
- Modélisation mixte avec coefficient de génération d'énergie dans l'écoulement de 7%
- Autres coefficients phénoménologiques selon la Figure 28

Comme indiqué et vu le stade de développement de ce logiciel, il convient de rester très prudent d'où l'attention portée à la représentativité des résultats.

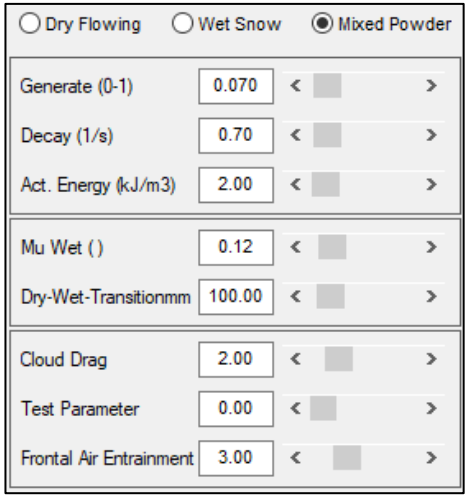

Figure 28 – Coefficients phénoménologiques par défaut dans RAMMS :: aérosol

[9] P. Bartelt & O. Buser, *Dynamic response of hanging cables and tall cable-supporting structures to avalanche impact,* rapport interne, SLF, 2020.

5. RESULTATS

A. CLPA N°154 (BORDURE EST/GAUCHE)

Le comportement de la ligne d'écoulement principale de cette avalanche telle qu'observée en 1981 (Figure 4) est bien représentée par la modélisation, confirmant l'atteinte possible de plusieurs pylônes selon le scénario considéré (cf. synthèse suivante)

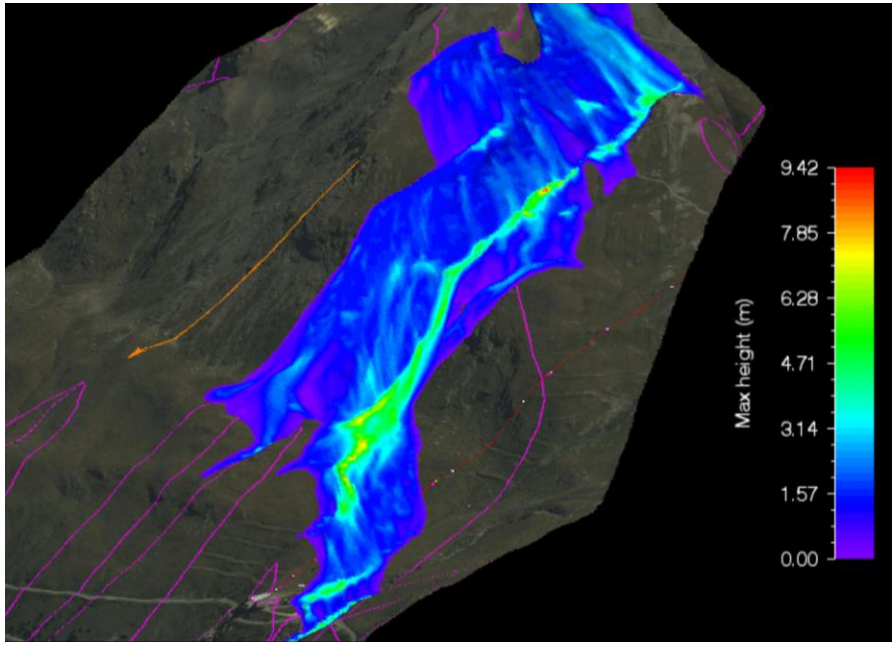

Figure 29 – Modélisation de la principale ligne d'écoulement de l'avalanche de 1981 (catégorie de volume médium, cohésion de 300Pa)

B. CLPA N°72

Même si le projet [2] prévoit de décaler sensiblement le premier pylône (P14) présent à l'amont de cette traversée (plus de 120m plus loin que le P17 actuel), il est intéressant de regarder plus en détail le comportement de cette emprise par rapport aux dommages constatés en ce début d'année 2021.

Ainsi, en considérant d'abord un phénomène dense coulant et vu la forme transversalement concave du site, la modélisation confirme logiquement qu'un départ dans les pentes les plus fortes (Figure 21) en rive gauche peut certes atteindre la limite connue de la CLPA mais va plutôt avoir tendance à survirer en cas de conditions marquées pour même ''contourner le P17 actuel (Figure 30). Dans ce cas, le pylône projeté P13 pourrait même se retrouver concerner en rive droite du phénomène.

Le P17 ''nécessite'' un départ englobant ''forcément'' tout ou partie des pentes en rive droite pour arroser toute la largeur aval de l'emprise (Figure 31) avec d'ailleurs une très bonne correspondance avec les limites de la CLPA (y compris ici aussi sur le P13 projeté). Les caractéristiques de l'écoulement au niveau de la tourne supérieure (vitesse supérieure à 20-25m/s) confirment largement son dépassement avec le possible effet tremplin évoqué précédemment.

En considérant une phénoménologie aérosol, moins sensible au relief, un départ dans les pentes centrales les plus raides montre une trajectoire plus rectiligne avec un cœur qui impacte franchement le P17 (Figure 32).

© Engineerisk 2021

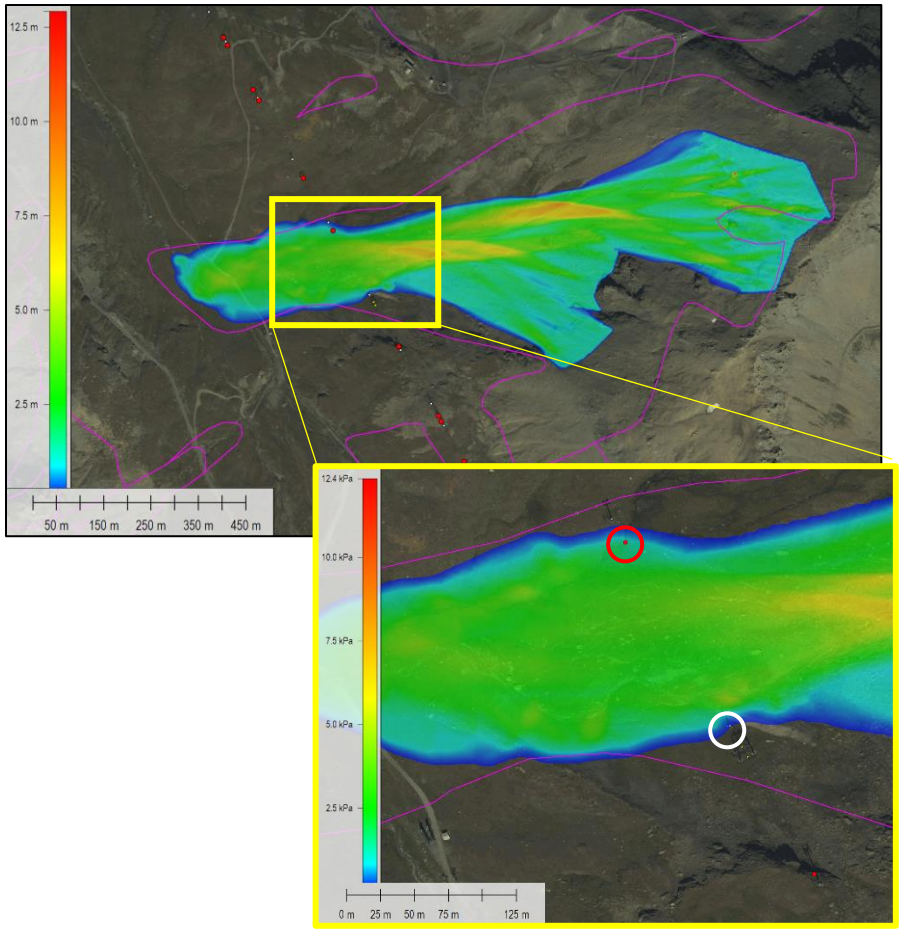

Figure 30 – Modélisation dense coulante dans l'emprise CLPA n°72 en conditions centennales à partir des pentes rive gauche (catégorie de volume médium, cohésion faible) – cercle blanc= P17 actuel, cercle rouge = P13 projeté [2]

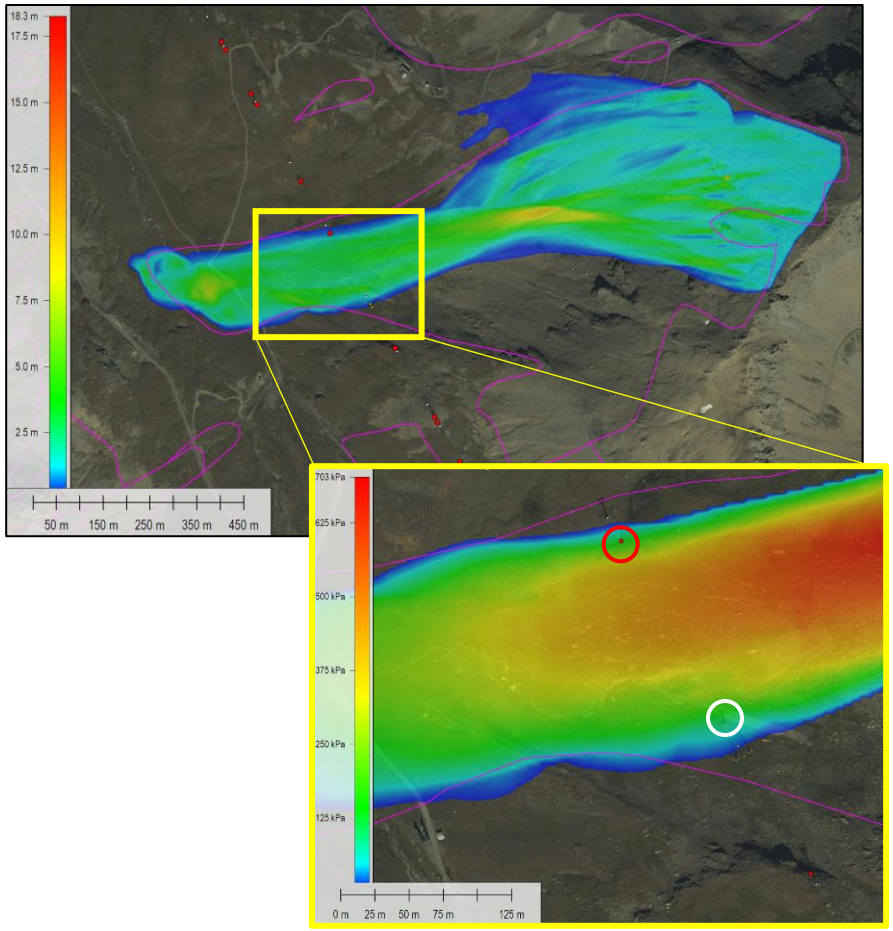

Figure 31 – Modélisation dense coulante dans l'emprise CLPA n°72 en conditions centennales à partir des pentes sommitales (catégorie de volume large, cohésion faible) – cercle blanc= P17 actuel, cercle rouge = P13 projeté [2]

© Engineerisk 2021

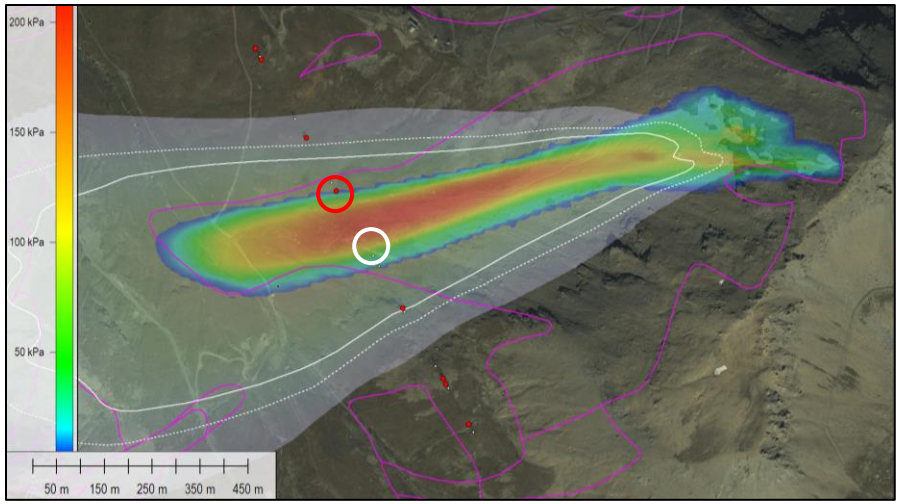

Figure 32 – Modélisation aérosol dans la CLPA n°72 selon les conditions de référence – Cœur du phénomène en échelle de couleur, extension du nuage en blanchâtre, limite des 1kPa en pointillés, 2 kPa en trait plein

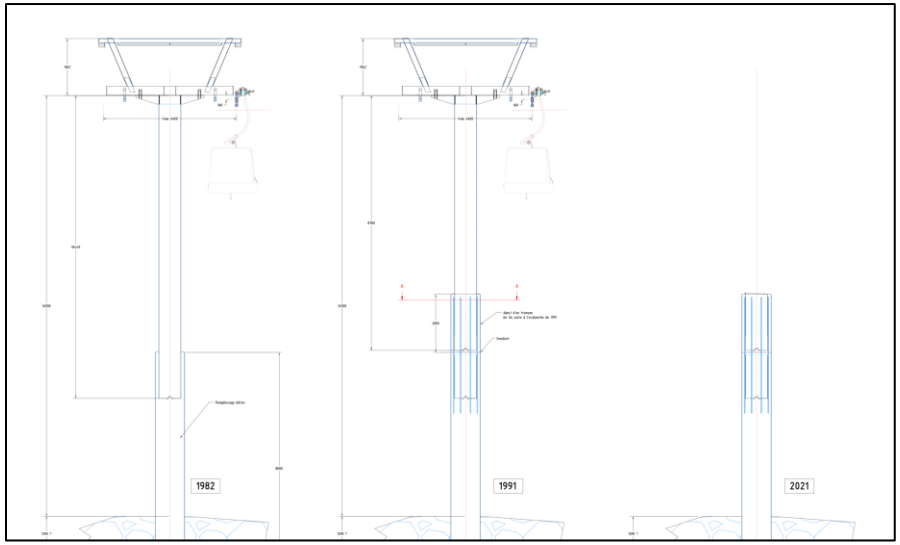

Figure 33 – Evolution du P17 entre son état initial (à gauche), suite à une première avalanche en 1990 puis après le 30 janvier 2021 (STVI/JM Clarey)

Structurellement, un modèle éléments finis de la zone intermédiaire du P17 a été développé pour tâcher d'approcher les dégâts observés début 2021. Conformément aux éléments à disposition, l'acier E24 de l'époque a été assimilé à du S235 actuel dont le comportement ''réaliste'' (c'est-à-dire sa résistance physique non idéalisée règlementairement mais tenant également compte de sa sensibilité à la vitesse de déformation, de son endommagement jusqu'à la ruine…) est représenté par un modèle de Johnson Cook selon les paramètres fournis Figure 34 :

Description	Notations	Numerical value
Modulus of elasticity	E (N/m^2)	203×10^9
Poisson's ratio	ν	0.33
Density	ρ (Kg/m^3)	7850
Yield stress constant	A (N/m^2)	304.330×10^6
Strain hardening constant	B (N/m^2)	422.007×10^6
	n	0.345
Viscous effect	C	0.0156
Thermal softening constant	m	0.87
Reference strain rate	$\dot{\varepsilon}_0$	0.0001 s^{-1}
Melting temperature	θ_{melt} (K)	1800
Transition temperature	$\theta_{transition}$ (K)	293
Fracture strain constant	D_1	0.1152
	D_2	1.0116
	D_3	−1.7684
	D_4	−0.05279
	D_5	0.5262

Figure 34 – Paramètres retenus pour le comportement de l'acier du pylône P17 via un modèle de Johnson Cook selon *M.A. Iqbal, K. Senthil, P. Bhargava, N.K. Gupta, The characterization and ballistic evaluation of mild steel, International Journal of Impact Engineering 78 (2015) 98-113*

Vu la typologie des dégâts constatés, le reste de la structure, collée parfaitement à cette section déformable, est représentée de manière rigide, ce qui revient à en négliger le comportement propre mais pour constituer une surface (y compris la représentation (très) simplifiée de la tête - Figure

© Engineerisk 2021

35) sur laquelle appliquer une pression croissante selon des taux temporels cohérents avec un impact avalancheux (ici 1MPa/s également pour optimiser les coûts de calculs).

Le calcul est mené en ''dynamique rapide'' selon un schéma d'intégration en temps explicite avec le logiciel de calcul Abaqus.

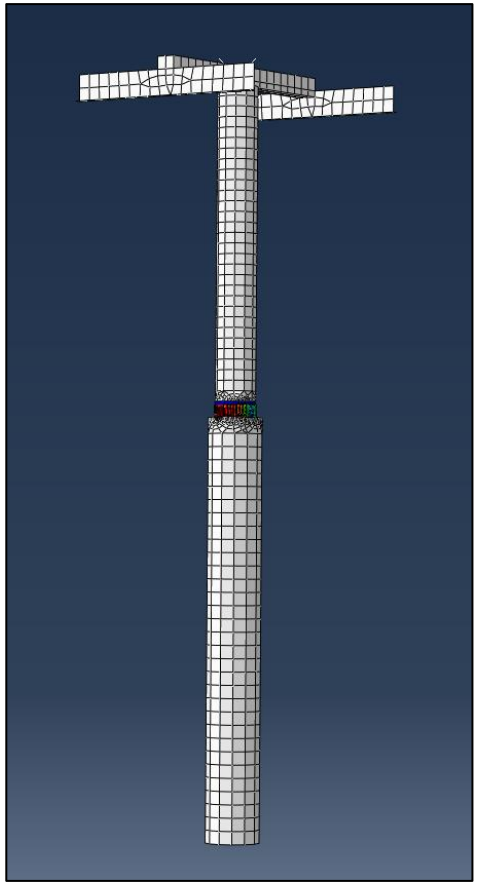

Figure 35 – Vue du modèle éléments finis du pylône P17 : en blanc, parties rigides, en coloré, partie déformable

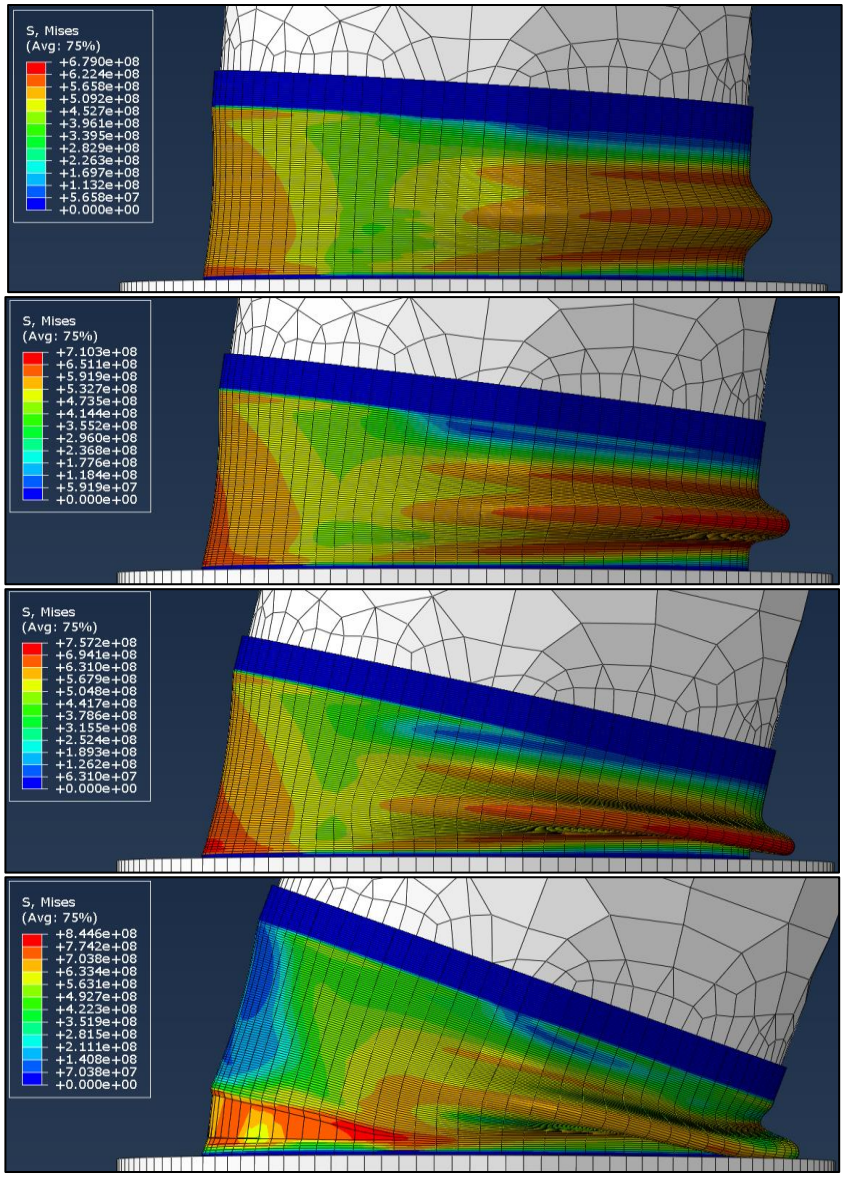

Figure 36 – Déformation progressive de la zone centrale du P17

© Engineerisk 2021

Comme le montre la séquence de la Figure 36 dans ces conditions, la pression sur la partie supérieure du pylône conduit naturellement au déversement transversal. Celui-ci crée à la liaison déformable une compression à l'aval avec un écrasement qui finit par venir en contact (le modèle gère également les non-interpénétrations) avec la surface de la partie inférieure avant une traction côté sollicité jusqu'à déclencher la déchirure du méta(croissant bien visible à gauche en rouge sur la dernière image).

Même si la présence de béton (non-prise en compte numériquement) à la base du fut supérieur (visible Figure 12) a certainement perturbé ce processus dans la réalité, on peut recouper un certain nombre d'éléments bien visibles également sur la figure ci-contre :

- Le tube apparait logiquement ovalisé
- Sa ''face'' exposée'' à l'avalanche, à gauche sur cette Figure 37 montre un aplatissement et une coupure franche alors que la face non exposée montre des lambeaux d'acier (également visibles sur le fut encore en place - Figure 12) qui correspondent bien aux restes des plis de compression.
- On peut également soupçonner un impact non parfaitement perpendiculaire à la ligne de la TC qui pourrait expliquer le différentiel de faciès entre le haut et le bas de cette section arrachée de pylône. En même temps, vu la distance de transport, ne peuvent être exclus des impacts intermédiaires notamment avec le sol pour cette (grosse) pièce globalement transportée par le bord de la partie la plus dense du phénomène (bonne correspondance de sa zone ''d'atterrissage'' avec les résultats de modélisation des Figure 31 & Figure 32)

Figure 37 – Vue de la zone où a eu lieu l'arrachement de la partie supérieure

© Engineerisk 2021

Quantitativement, la simulation conduit à un ordre de grandeur de pression généralisée d'environ 100-120 kPa nécessaire pour initier la déchirure (qui peut ensuite s'étendre même sous une action moindre vu la section globale alors affaiblie). Cette valeur est légèrement supérieure au calcul analytique simplifié de la section du tube considérée en cisaillement pur, possiblement par un effet de la vitesse de sollicitation (au-delà du ''statique'') mais aussi en allant chercher la limite du comportement réel avant déchirure dans le calcul éléments finis.

Finalement, cette valeur est là aussi bien cohérente avec les résultats des modélisations numériques, notamment ceux de la Figure 31 dont le zoom montre une pression maxi brute du même ordre à l'emplacement de P17 mais également rapidement croissante en direction du cœur du phénomène (les 200 kPa sont atteints à une quinzaine de mètres) :

- Certes la section cylindrique du pylône ne ''voit'' en fait que la moitié de la pression brute (coefficient de trainée de ½)
- Mais en même temps, la tête beaucoup plus massive (et très simplifiée dans notre calcul) représente une section d'appui bien plus importante (coefficient de trainée plus proche de 1) a fortiori vu l'effet tremplin de la tourne juste à l'amont qui a pu y privilégier l'essentiel de l'impact (Figure 25)
- Enfin, il ne faut pas négliger les effets indirects induits et potentiellement majeurs[9] par l'application transitoire d'une partie de cette pression (par exemple via la couche de saltation de l'aérosol) sur les câbles dans lesquels vont ensuite circuler différentes ondes longitudinales à l'origine des dégâts sur les trains de galets et dans les gares mais donc aussi d'efforts parasites en tête de pylône.

© Engineerisk 2021

6. SYNTHESE YC AUTRES PENTES & CONCLUSIONS PRELIMINAIRES VS [2]

Les figures ci-dessous restituent les cartographies brutes avant interprétation des scénarios avalanches trentennaux et centennaux en agglomérant aux résultats précédents ceux obtenus pour les différentes pentes secondaires[10].

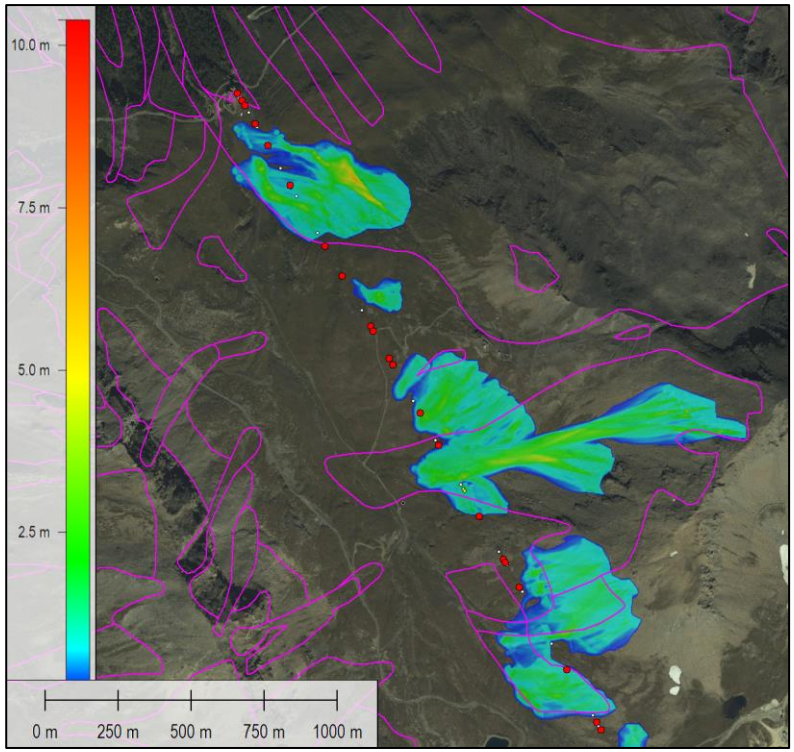

Figure 38 – Carte agglomérée brute des hauteurs max avalancheuses en trentennal

Ceci est ensuite retranscrit sous la forme du diagramme de la Figure 40 qui inclut également les sollicitations possibles de reptation.

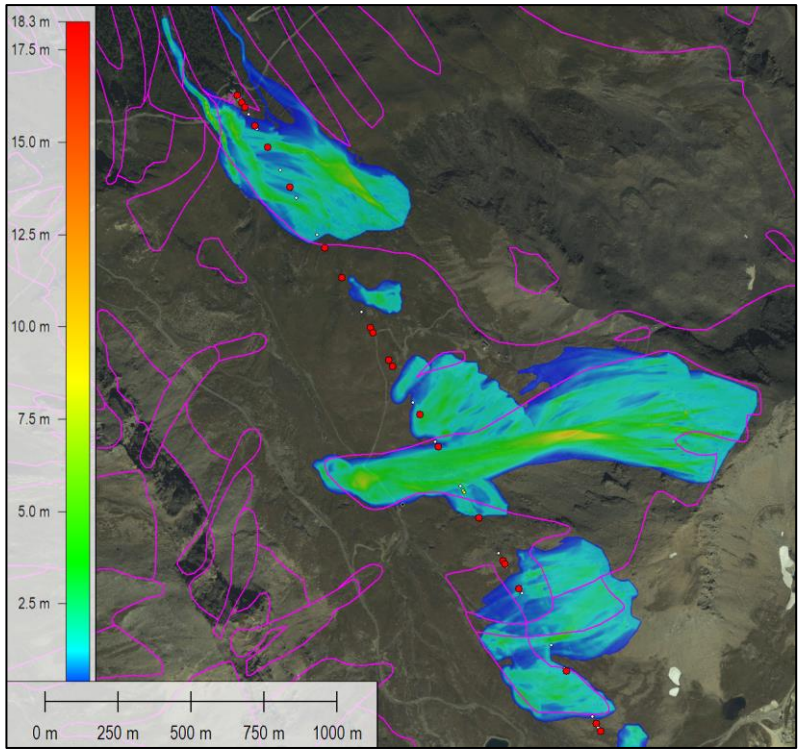

Figure 39 – Carte agglomérée brute des hauteurs max avalancheuses en centennal

[10] En général en utilisant une catégorie de volume Tiny sauf pour la CLPA 74 en centennal : small

Si la faisabilité du nouvel appareil n'est aucunement remise en cause (comme le prouve d'ailleurs l'existence de la TC actuelle), un certain nombre de points peuvent être soulignés notamment pour ajuster la distribution des pylônes proposée par [2] (qui évite déjà la zone la plus critique – en rougeâtre ci-dessous et qui correspond au seuil mécanique au-delà duquel il devient très compliqué ''d'auto-protéger'' un pylône par son dimensionnement) :

- En trentennal (scénario var30), la grande majorité des pylônes projetés échappe aux phénomènes hormis un peu de pression avalancheuse sur P5 (≈30 kPa), P12 & P18 (potentiellement quelques kPa), ce dernier subissant aussi un peu de reptation (≈25 kPa). Dans tous les cas, ces valeurs ne sont pas vraiment préjudiciables d'autant qu'elles sont associées avec des épaisseurs limitées pour les avalanches.
- En centennal, l'exposition est forcément plus étendue en concernant directement P3, P4, P5, (P12), P13, (P17) mais ce qui reste une proportion minime pour 21 supports en tout. Les plus sollicités sont :
  - P4 qui gagnerait à être décalé idéalement d'une trentaine de mètres vers l'amont mais sans bouger P3 ni remonter P5 de plus de 30m.
  - P13 qui reste dans l'emprise CLPA n°72 et devrait être ramené au moins au niveau du P16 actuel.
- Logiquement la nouvelle section P13 – P14 devra être la plus ''haute'' pour limiter les effets toujours possibles des aérosols. Par référence aux valeurs dimensionnantes des vents transverses hors exploitation, les câbles devraient être à 25m (au moins, idéalement 30m) du sol sur la section de 100m de long à l'aval du P17 actuel.
- A noter enfin que les 2 gares ne sont pas concernées

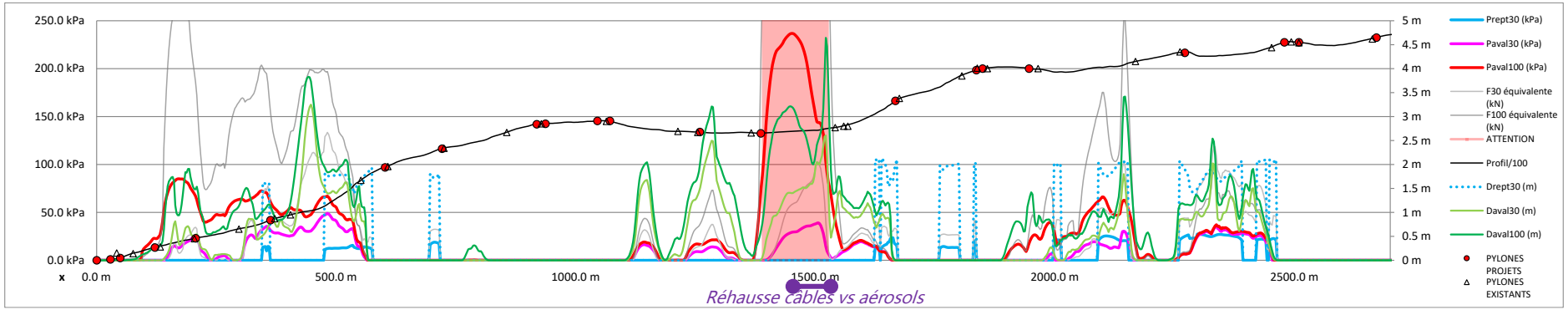

Figure 40 – Diagramme général