



RAPPORT

DIAGNOSTIC DES RISQUES AVALANCHES & CHUTES DE BLOCS

Projet de tapis pour le réaménagement des Planards

vo du 26/09/2023

Rédigé par : Philippe BERTHET-RAMBAUD (avalanches & rapport général)



+ 33 6 23 75 04 44



pbr@engk.fr

Visa :



Co-rédigé et validé par : Anne GUELA (partie chutes de blocs)



+ 33 6 31 44 61 44



Anne.guela@pyrite-ingenierie.com

Visa :



Ce rapport contient 54 pages et constitue un tout indissociable;
une utilisation partielle n'engage pas la responsabilité d'Engineerisk (partie avalanches) ou Pyrite Ingénierie (partie Chutes de blocs)
Sauf mention contraire : crédits photos Engineerisk-Pyrite Ingénierie / figures en plan orientées nord vers le haut/ Fond orthophoto Géoportail
Référence : FRA605 (Engineerisk) / 23-666 (Pyrite Ingénierie)
Version 0 du 26/05/2023 – niveau AVP (chutes de blocs)

REFERENCES

- [1] EPODE, Aménagement des Planards, plan (pdf & dwg) version du 20/09/2023
- [2] PPR, Plan de Prévention des Risques de Chamonix :
 - o A) partie avalanche, 2015
 - o B) partie Mouvements de terrain, crues torrentielles et inondations, 2002
- [3] Groupe BBCM, extrait concernant l'avalanche du Grépon, Dossiers Avalanches, G2 BR, Commune de Chamonix Mt Blanc, 25 juin 2013
- [4] G. Cachat, livre recueil de souvenirs, notamment partie avalanches, extraits transmis par la SAS des Planards
- [5a] couche shapefile de courbes de niveaux datant de 2002, source SIG de la Mairie, couvrant tout le versant
- [5b] relevé LIDAR 2010, réalisé par/à la demande du Cemagref en 2008, transmis par la Mairie de Chamonix mais ne couvrant qu'une partie des versants

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	5
	RISQUES AVALANCHES.....	7
II.	Etats des RISQUES CONNUS	8
A.	Historique compilé	8
B.	Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux (CLPA – www.avalanches.fr).....	15
C.	Plan de Prévention des Risques [2a]	17
D.	Etat des Protections.....	18
III.	ANALYSE DES PHENOMENES	19
A.	Scénarios de référence.....	19
B.	Quantification des phénomènes coulants.....	21
C.	Quantification des phénomènes aérosols.....	22
D.	Résultats numériques sur topographie LidarHD récente	23
IV.	ANALYSE CRITIQUE DU NIVEAU DE RISQUE	26
A.	Préambule	26
B.	Un site qui a largement évolué	26
C.	Un zonage PPR issu de résultats numériques erronés	29
V.	BILAN POUR LE PROJET DES PLANARDS	32
	RISQUES CHUTES DE BLOCS.....	34
VI.	CONTEXTE VIS-A-VIS DES CHUTES DE BLOCS	35
VII.	ETUDE DES CHUTES DE BLOCS.....	37

VIII.	ANALYSES DES RISQUES DE CHUTES DE BLOCS	39
A.	Généralités	39
B.	Probabilité d'atteinte	39
C.	Etude trajectographique	40
	Hypothèses et méthode de calcul	40
	Calage initial	42
	Résultats	42
	CONCLUSIONS GENERALES.....	43
	ANNEXES.....	45

I. INTRODUCTION

A la demande et pour le compte de la SAS des Planards dans le cadre du réaménagement de son site (principalement création de 4 tapis - Figure 1), le présent rapport fournit :

- L'étude des phénomènes avalancheux par Engineerisk (1^{ère} partie)
- l'étude géotechnique DIAG sur les problématiques chutes de blocs et AVP pour les travaux de sécurisation nécessaires Par Pyrite Ingénierie (2^{ème} partie).

Parmi les particularités du site vis-à-vis de ces risques naturels, peuvent d'ores et déjà être notées :

- Le versant de Blaitière partiellement déforesté par une tempête au début des années 2010 et qui domine directement le site (Figure 2)
- le thalweg du torrent du Grépon qui conditionne la canalisation des avalanches et/ou leur éventuel débordement sur le site (latéralement au niveau des pistes de ski et longitudinalement au niveau des parkings) - Figure 3
- Les escarpements rocheux au-dessus de la tête aval du tunnel du train du Montenvers - Figure 4

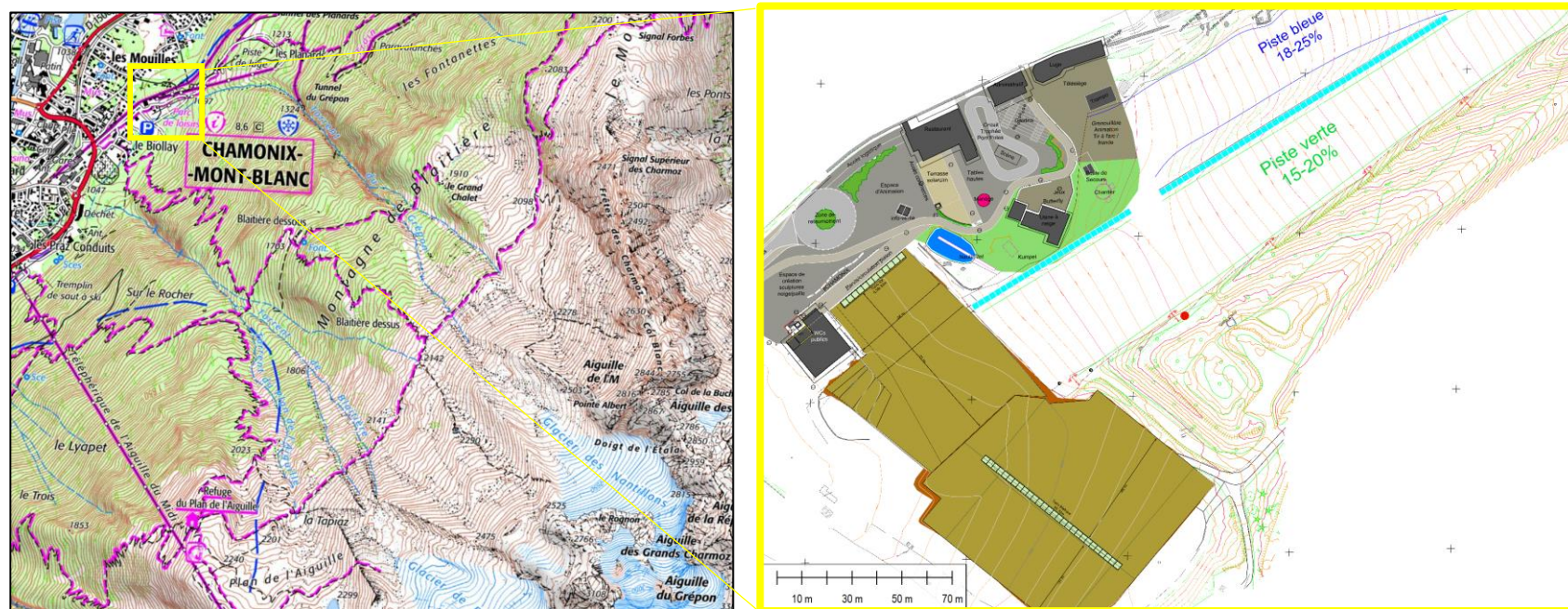


Figure 1 – Plan de situation (source Géoportail) et plan du projet [0]



Figure 2 – Vue de la partie aval du site des Planards sous le versant de Blaitière



Figure 3 – Vue du site dans l'enfilade du thalweg du torrent du Grépon



Figure 4 – Vue du principal escarpement rocheux au-dessus de la tête aval du tunnel du Montnervers

RISQUES AVALANCHES

II. ETATS DES RISQUES CONNUS

A. HISTORIQUE COMPILÉ

La chronique qui suit compile les différentes sources d'informations que sont le PPR de la Vallée de Chamonix ([2a] y compris la carte récapitulative ci-contre réalisée par le groupement d'experts internationaux dit "BBCM" à l'occasion de l'analyse approfondie du couloir du Grépon [3]), les fiches signalétiques de la Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux (CLPA – www.avalanches.fr), l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA), les souvenirs de G. Cachat ayant jalonné le développement du site des Planards [4] et différents éléments récents.

Les principaux événements avalancheux connus dans ce couloir du Grépon sont donc les suivants :

- **1812**, le 16 février, une avalanche emporte la maison de Michel Simond (Carnets de Cachat le Géant).
- **1817**, le 9 mars, l'avalanche détruit de nouveau la maison de Michel Simond (Carnets de Cachat le Géant).
- **1889**, le 4 mars, l'avalanche détruit une maison à La Frasse et fait une victime (archives départementales mentionnées par la Fiche Signalétique CLPA de 2004).
- **1908**, le 7 mars, une avalanche se déclenche à 2300 m, emporte 6 ouvriers avant de s'arrêter à la cote 1060 m (3 ouvriers sont sauvés d'après le carnet forestier).
- **1914**, le 27 mars, une avalanche part à 2300 m et se divise en deux : une langue de neige s'arrête pratiquement contre les maisons de La Frasse et une autre près du Biollay (PPR ; photos Tairraz du 2 avril). L'avalanche a endommagé 3 granges et un autre bâtiment au hameau des Planards (EPA). Les dépôts font chacun 80 m de largeur et de 10 à 18 m d'épaisseur (Figure 6 & Figure 32).

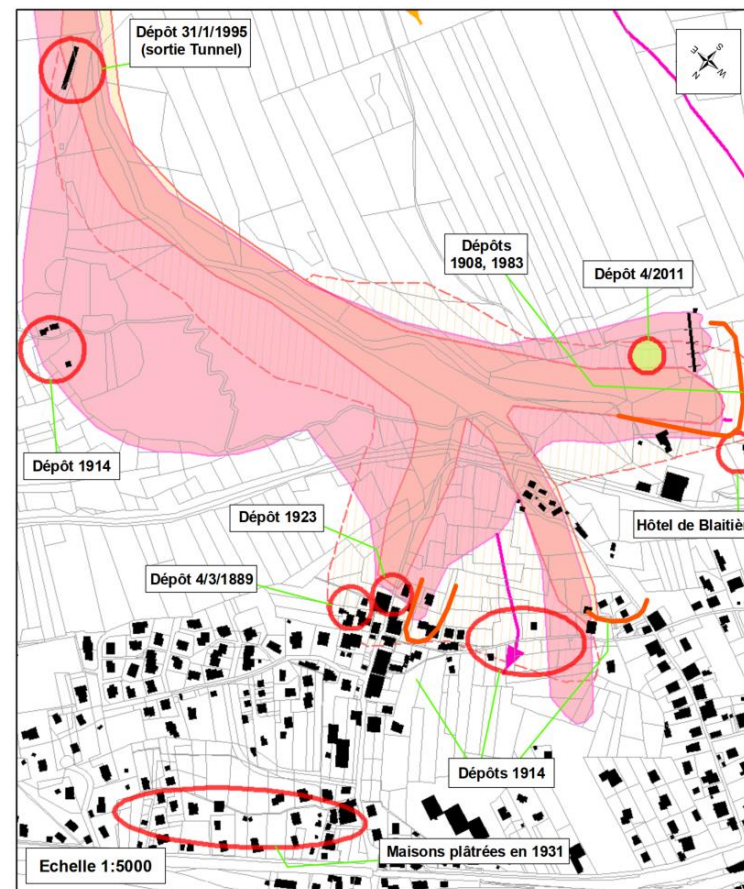


Figure 5 – Carte récapitulative des principaux événements avalancheux dans le couloir du Grépon jusqu'en 2014 réalisée par le groupement d'experts BBCM [3] dans le cadre de l'élaboration du dernier PPRA [2a]



Figure 6 – Dépôt de l'avalanche du Grépon de 1914 en direction du hameau de la Frasse (photo P. Tairraz)

- **1919**, le 27 mars, une avalanche de fond se déclenche vers 2300 m (EPA) et atteint la cote 1070 m en cassant des épicéas de 150 ans.
- **1931**, le 3 ou 9 mars, une grosse avalanche de neige humide se sépare en deux branches : l'une s'arrête à 30 m du hameau du Biollay et l'autre à 20 m des Mouilles (Figure 7).

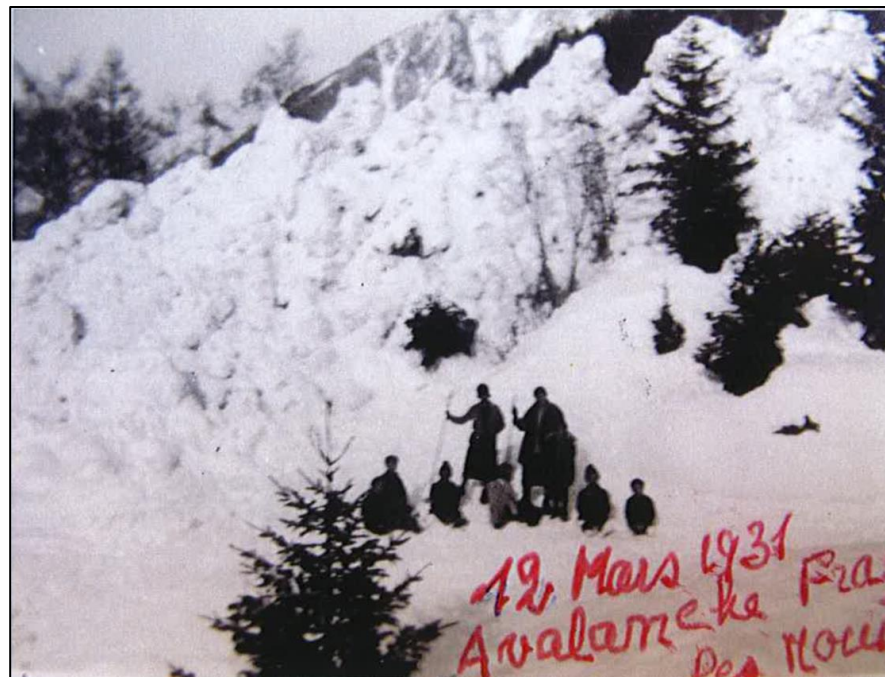


Figure 7 – Dépôt de l'avalanche du Grépon de 1931 vers les Mouilles – photo P. Tairraz prise quelques jours après [4]

- **1932**, le 17 mai, une avalanche se dirige vers le hameau de la Frasse (ancien PPR ; événement non signalé dans l'EPA).
- **1937**, le 28 février, une branche de l'avalanche s'arrête à 30 m du hameau de la Frasse (donc vers 1060 m d'altitude). La ligne téléphonique du Montenvers est emportée sur 100 m (EPA).
- **1944**, se produit une importante crue torrentielle qui "a eu pour effet de creuser profondément le thalweg [en bord de versant]. Le ravin qui était peu profond à cette époque et qui favorisait le débordement des avalanches sur la rive droite, est désormais de 15 à 20 mètres de profondeur avec une largeur d'environ 20 à 50 mètres". Cette

évolution est bien visible sur les photos aériennes IGN de l'époque (ci-dessous)



Figure 8 – Comparaison des photos aériennes IGN de 1939 (en haut) et 1949 (en bas).
Clichés disponibles dans "remonter le temps" du Géoportail et géo-rectifiés manuellement sur des éléments visuels remarquables pouvant conduire à des décalages de plusieurs mètres. Ici, la voie du Montvernès peut servir de repère.

- **1955**, le 8 février, une avalanche de fond descend jusqu'à 1060 m. Le dépôt fait 60 m de largeur et 7 m d'épaisseur. Il n'y a pas de dégâts en forêt.
- **1962**, le 29 mars, une avalanche de fond descend jusqu'à 1070 m. Le dépôt fait 30 m de largeur et 5 m d'épaisseur. Il n'y a pas de dégâts en forêt.
- **1980**, le 4 février, une avalanche de neige humide obstrue la piste rouge des Planards et descend jusqu'à la cote 1060 m (photos suivantes). A cette époque, le thalweg a déjà été partiellement retravaillé (Cf. plus loin)



Figure 9 – Dépôt de l'avalanche du Grépon de 1980 sur les pistes des Planards [4]



Figure 10 – Dépôt de l’avalanche du Grépon de 1980 sur les pistes des Planards [4]

- **1983**, le 16 mai, une avalanche de neige humide se déclenche vers 2500 m sous l’Aiguille de l’M, puis suit le talweg jusqu’au bas des Planards à 1050 m, touche le téléski et s’arrête à 1050 m, tout près de l’hôtel de Blaitière construit à 80 m de la gare aval du téléski sur les parkings.



Figure 11 – Dépôt de l’avalanche du Grépon de 1983 jusqu’au parking [4]

D’après [4], ‘lundi soir, quelques heures après l’avalanche du Tunnel du Mont-Blanc, celle du Grépon est redescendue, doucement mais sûrement, comme un torrent de lave , recouvrant jusqu’en bas l’ancienne coulée vieille de quelques jours, débordant même, ici et là , et finalement s’étalant sur la vaste parking, en balayant au passage le téléski-école du lycée d’enseignement professionnel’

- **1990**, le 14 février, une avalanche accompagnée d’un aérosol (d’après les caractéristiques de l’EPA), descend jusqu’à la cote 1060 m. Il était tombé plus d’un mètre de neige en moins de 72h.
- **1995**, le 31 janvier, une avalanche accompagnée d’un aérosol endommage la galerie paravalanche du train du Montenvers et sort du talweg dans le virage en dessous de 1300 m en cassant des arbres (page suivante). L’EPA indique une altitude d’arrêt de 1100 m.
- **1996**, le 13 décembre, une avalanche se déclenche vers 1950 m et s’arrête à mi-longueur de la digue, vers 1150 m (une première avalanche le 2 novembre s’était arrêtée à 1350 m).
- **1999** : trois avalanches descendent en février :
 - o le 10, une avalanche déborde vers 1200 m la rive droite du chenal et suit la piste rouge jusqu’à sa jonction avec la piste bleue, vers 1150 m.
 - o le 22, une avalanche de fond se déclenche vers 2400 m, puis descend jusqu’à 1050 m.
 - o le 24, une nouvelle avalanche part de la même altitude et descend jusqu’à 1070 m.
- **2012**, une grosse avalanche se déclenche sur le glacier des Nantillons, vers 2650 m, à l’Ouest du Rognon. La cassure se voit de la vallée (elle fait 300 m de largeur). L’avalanche s’arrête dans la courbe du chenal vers 1200 m (A. Maffioli et David Cachat).



Figure 12 – Passage de l'avalanche de 1995 au niveau de la galerie en sortie aval du tunnel du Montenvers

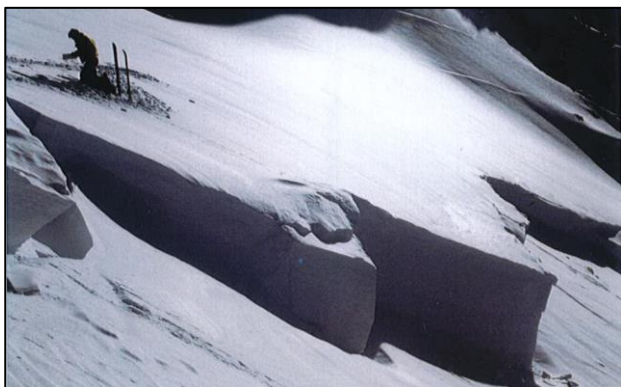


Figure 13 – Rupture de la plaque de 1995 sous l'Aiguille de l'M [4]



Figure 14 – Déblaiement des dépôts de l'avalanche de 1995 [4]

A cet inventaire, il convient donc d'ajouter les deux derniers événements remarquables qui ont la particularité de s'être produits à la même période des tous premiers jours de mai, respectivement en 2015 et 2023.

Le premier donnera lieu à quelques débordements (quelques centaines de m³) à la sortie de la courbe jusqu'aux pylônes du télésiège mais l'essentiel du volume suivra le thalweg presque jusqu'à son extrémité (photos de cette page).

Le second très récent recoupe des caractéristiques assez analogues mais avec des débordements minimes (boules sur la piste et sur la voie du Montenvers). D'après les observations rapportées par de S. Frendo, le phénomène est initié par des départs ponctuels et petites plaques de 20/30cm qui font partir une vaste plaque sous les Gazex (2500m) : largeur 350m, épaisseur 2m50. L'avalanche s'arrête à la cote 1060m en restant bien canalisée dans le thalweg mais dont elle peut dépasser la bordure en hauteur (photos page suivante).



Figure 15 – Dépôt de l'avalanche du Grépon de 2015 (source : blog Julotek)





Figure 16 – Différentes vues de l'avalanche de mai 2023 (clichés transmis par la SAS des Planards)

B. CARTE DE LOCALISATION DES PHENOMENES AVALANCHEUX (CLPA – WWW.AVALANCHES.FR)

Les extraits ci-dessous illustrent l'évolution (très limitée) du tracé de l'emprise de cette avalanche du Grépon (N°100) dans sa zone d'arrivée en rappelant que la CLPA récapitule les limites les plus étendues connues (témoignages sur la couche magenta). On retrouve clairement ici 3 langues bien distinctes depuis la version initiale (Figure 17):

- Vers la Frasse au nord
- Vers les Mouilles à l'ouest, ces 2 trajectoires correspondant plutôt aux événements anciens

- Vers le Biollay au sud-ouest. Pour cette dernière, on notera quand même l'élargissement rive gauche qui correspond en fait aux travaux de recalibrage du thalweg [4] qui font désormais couler les avalanches le long de cette bordure.

Aucune des extensions maximales n'a été modifiée depuis les années 1970. A l'amont (Figure 18), cette avalanche est d'abord issue des pentes sous l'Aiguille de l'M même si la CLPA photo-interprète (couche orange) une possible connexion/collaboration des pentes du glacier des Nantillons dont on peut désormais douter vu le recul glaciaire et la proéminence des moraines.

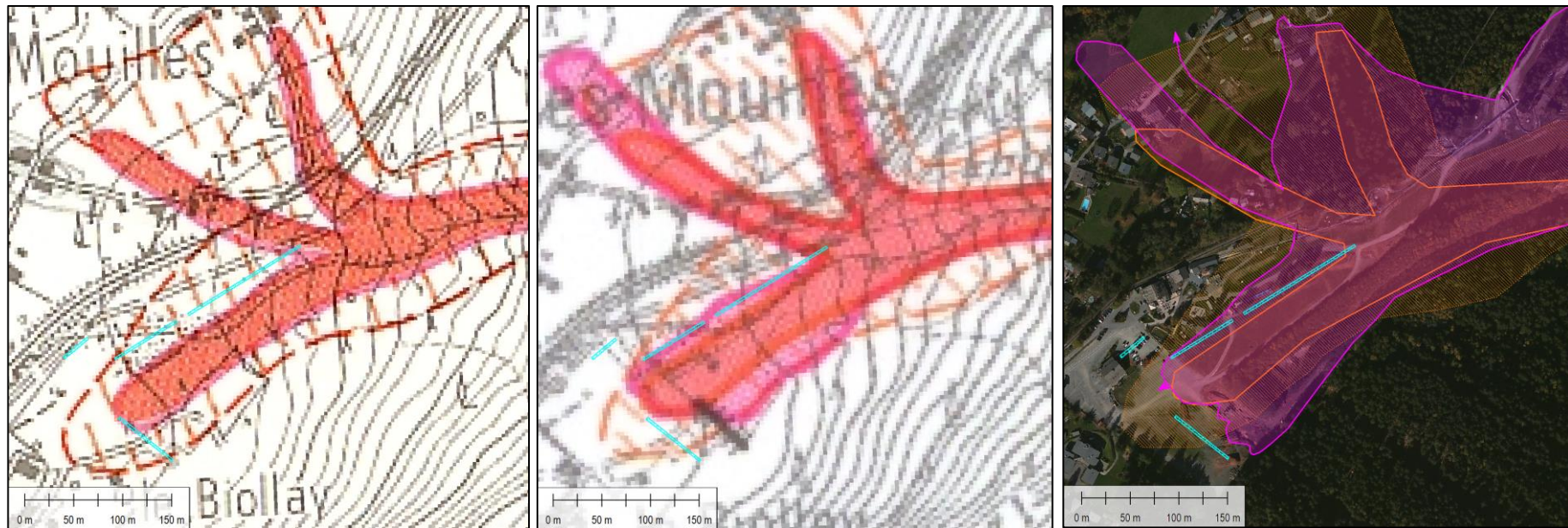


Figure 17 – Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux (CLPA) dans la zone aval : de gauche à droite, versions de 1971, 1991 et actuelle (emprises numérisées sur fond Géoportail)

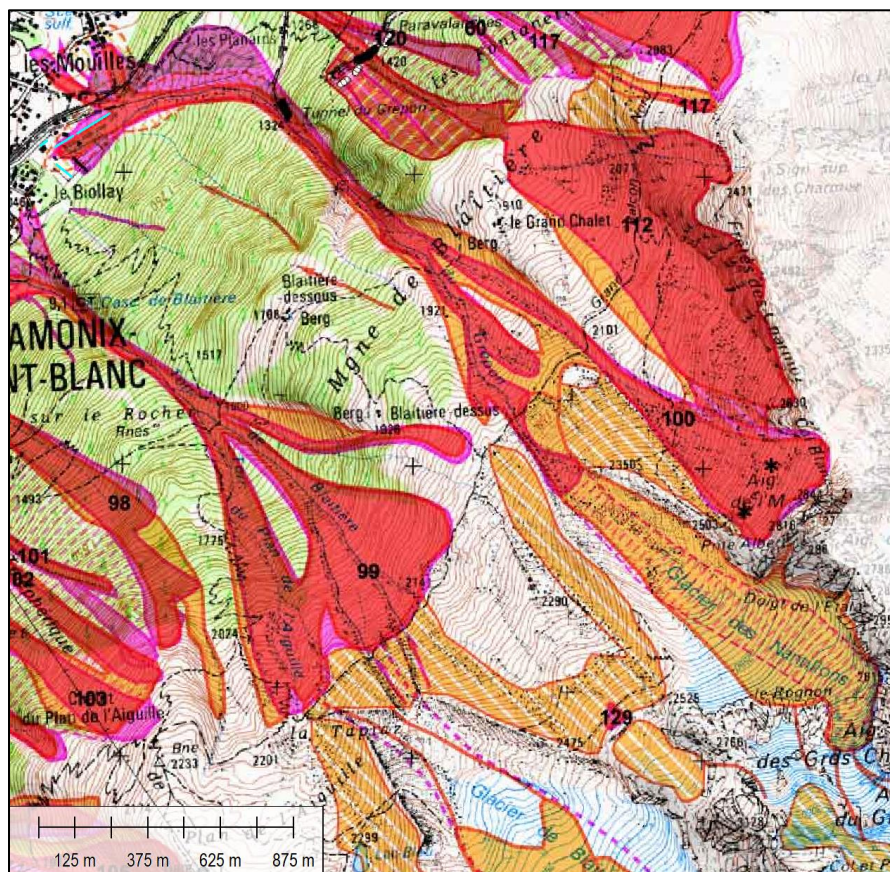


Figure 18 – Extrait de la Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux (CLPA) à l'échelle du versant

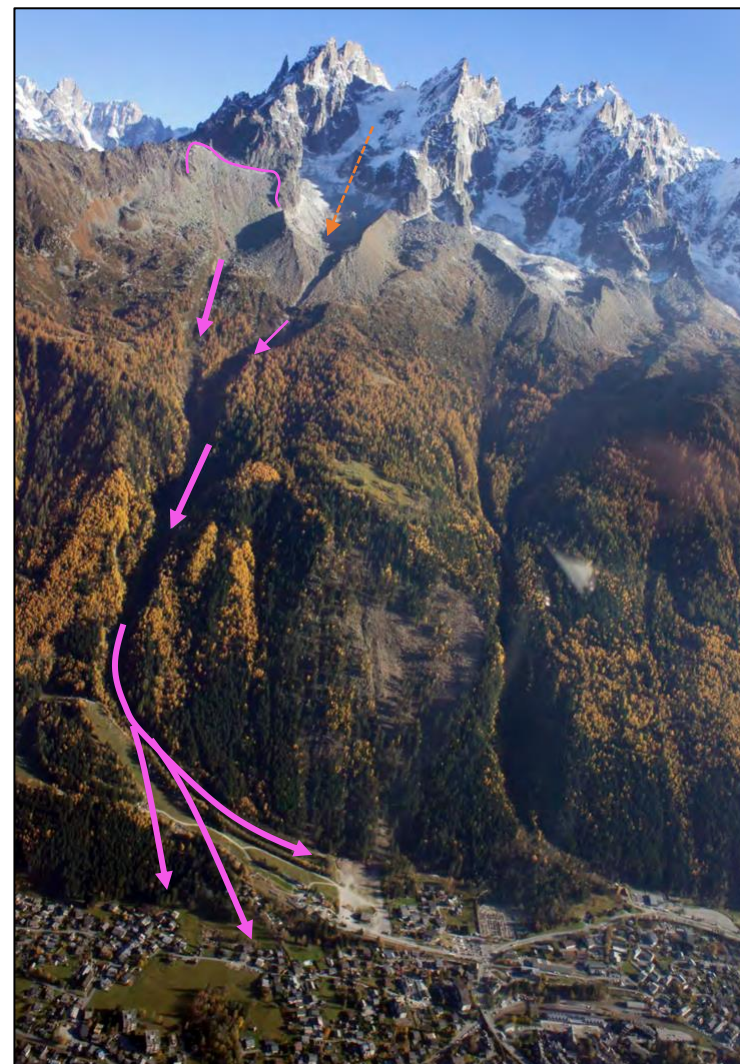


Figure 19 – Vue générale du versant (source [3]) et report des trajectoires indiquées sur la CLPA

C. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES [2a]

Suite à l'avalanche de Montroc de 1999 et à l'évolution correspondante de la doctrine dans les années qui ont suivi, le PPR de Chamonix [2a], déjà mis à jour en 2010, a donné lieu à une ré-analyse sur un certain nombre de couloirs (dont celui du Grépon) par le groupe d'experts internationaux dit "BBCM" [3].

Leurs travaux ont abouti à la nouvelle carte d'aléa ci-dessous dont on voit l'évolution par rapport à la version précédente 2010 qui a clairement privilégié / augmenté le risque vers la Frasse / les Mouilles alors que la zone d'aléa moyen est même réduite vers le Biollay.

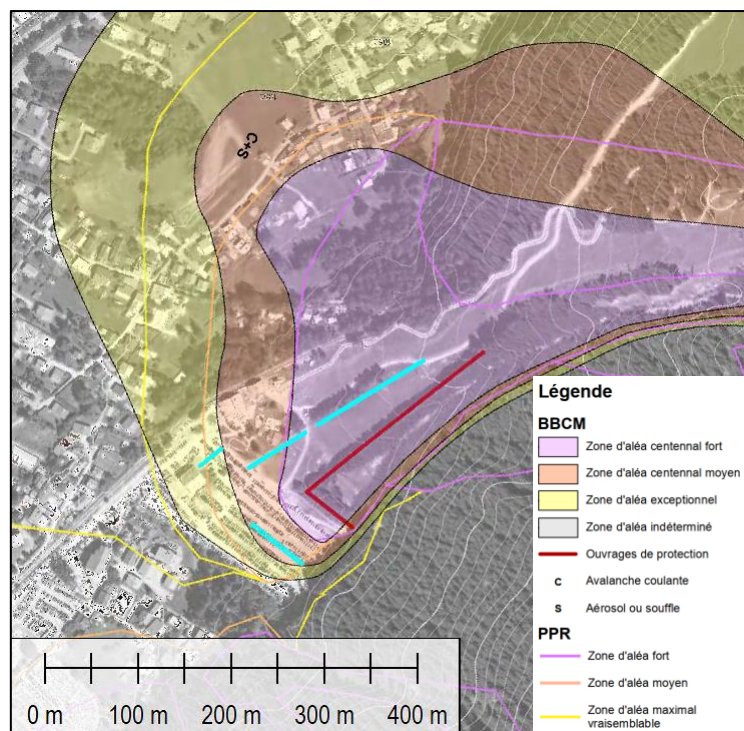


Figure 20 – Carte d'aléa issue des travaux du groupe d'experts BBCM [3] et superposition du projet de tapis [o] (en bleu clair)

Règlementairement (Figure 21), les tapis se retrouvent donc en zone rouge (tapis supérieur - règlement X) ou bleue (règlement AB) : cette dernière reste constructible moyennant les justifications correspondantes. L'enjeu est donc bien surtout sur l'alignement principal des 2 tapis et en particulier sur l'appareil supérieur et l'extrémité amont du tapis inférieur. Toutefois et s'agissant d'enjeux particuliers, on notera (alinéas 2.4 et 2.5) qu'y sont autorisés :

- "2.4. Les travaux, installations et ouvrages tels que lignes, pylônes ainsi que les bâtiments (gares) nécessaires au fonctionnement et à usage exclusif des remontées mécaniques
- 2.5. l'aménagement des terrains à vocation sportive ou de loisir, sans hébergement et sans construction dépassant 10m² au sol [2a]"

Ces dérogations ne sont admises que si "elles n'aggravent pas les risques et n'en provoquent pas de nouveaux, et qu'elles présentent une vulnérabilité restreinte [2a]"

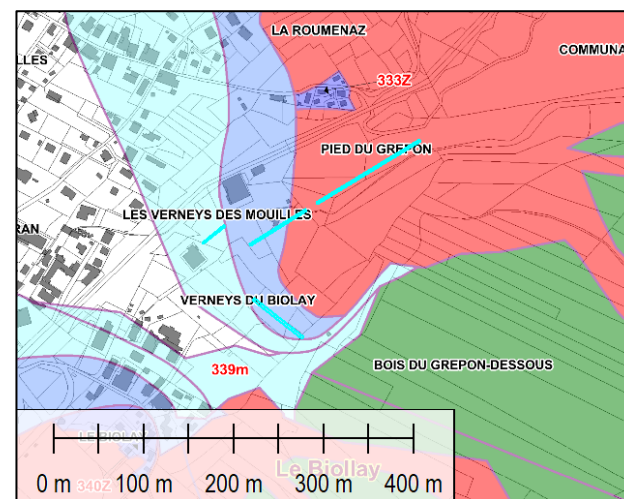


Figure 21 – Carte réglementaire du PPR de Chamonix [2a]

D. ETAT DES PROTECTIONS

En plus du thalweg précité et qui joue clairement le rôle de tourne, le site est équipé de 2 explodeurs Gazex® mis en place en 1998 dans les pentes sous l'Aiguille de l'M.

Ces deux appareils, activés à distance, s'inscrivent dans un Plan d'Intervention de Déclenchement des avalanches (PIDA - Figure 22) qui inclut également différents points de tirs DaisyBell®.

Ce dispositif est réputé efficace sur les neiges froides d'hiver mais peut connaître certaines limitations sur les neiges de printemps d'un manteau neigeux établi depuis toute une saison.

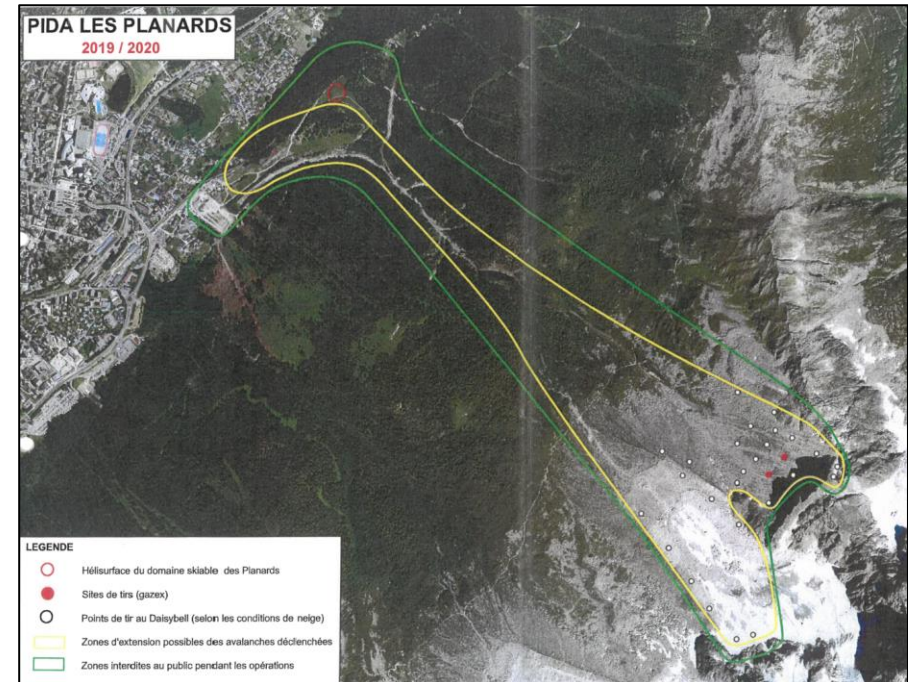


Figure 22 – Plan d'Intervention des Déclenchements d'Avalanches (PIDA) des Planards
(source : SAS des Planards)

III. ANALYSE DES PHENOMENES

A. SCENARIOS DE REFERENCE

Dans le cadre d'un enjeu de type remontée mécanique, il s'agit de formaliser les prescriptions concernant les risques nivologiques (avalanche – indice a et reptation – indice g) selon le cadre général de la NF EN 13107:2015¹. La problématique des avalanches et de la reptation y étant somme toute traitée succinctement, ce qui suit s'inspire également des pratiques suisses².

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 combine l'éventuel phénomène de reptation **REPT₃₀** (charge variable principale) avec l'avalanche **AVAL₃₀** (charge variable d'accompagnement). Par rapport aux précédentes pratiques, ce scénario reclasse l'avalanche en charge variable considérant les interactions régulières entre ce phénomène lorsqu'il est fréquent et/ou déclenché et les infrastructures de domaine skiable concernée. 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. Ici et vu les pentes en jeu au niveau des tapis, l'activité de reptation est nulle
- Le scénario **Acc100** de type ELU, centré sur la seule charge accidentelle d'une avalanche centennale **AVAL₁₀₀**. Ce scénario couvre les cas d'événements naturels par exemple avant la saison d'exploitation pour les emprises du PIDA ou pour une avalanche périphérique non déclenchée préventivement. Le cumul considéré est ici de 72 heures. L'application de ce scénario sur un enjeu de type tapis est

éventuellement discutable selon l'acceptation par son Maitre d'ouvrage du risque industriel correspondant.

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 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.

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 θ_x peuvent être différentes entre ces différentes charges puisque la trajectoire des avalanches

¹ NF EN 13107:2015 Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Ouvrages de génie-civil

² 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.

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 sur l'exemple d'une infrastructure de type pylône. Les hauteurs mesurées verticalement sont notées H et les épaisseurs correspondantes sont dénommées D.

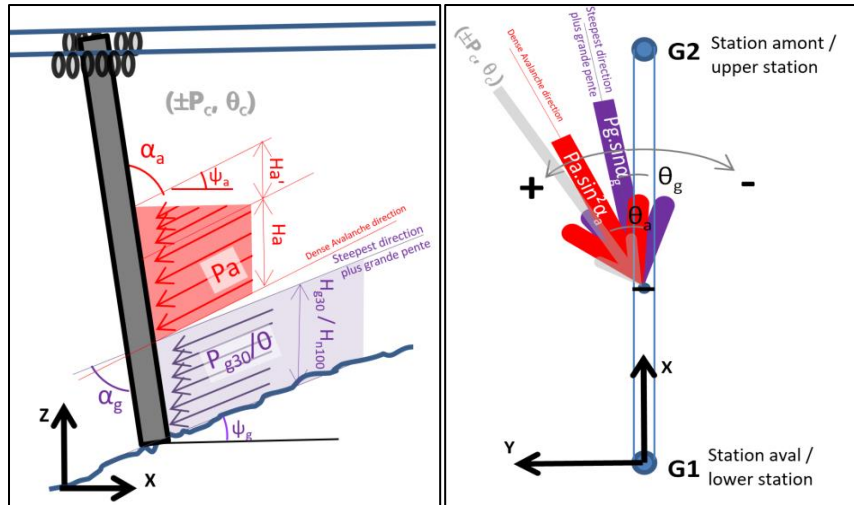


Figure 23 - Schéma type de coexistence des avalanches et de la reptation

A partir de là, la pression caractéristique de l'avalanche coulante P_a (kPa) est calculée par analogie hydraulique selon :

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

Avec :

- C_d : coefficient de trainée. Celui-ci dépend de la forme de l'obstacle et théoriquement des caractéristiques de l'écoulement. Sa valeur par défaut est fixée à 1 pour une section de pylône cylindrique (respectivement 1.5 pour une section triangulaire et 2 pour une section carrée et/ou un "gros" obstacle comme un tapis) mais qui est majorée lorsque le nombre de Froude diminue fortement (zone de ralentissement/arrêt de l'avalanche).
- ρ : densité (t/m^3) considérée classiquement de 0.3 dans les écoulements. A noter que cette densité n'est pas directement celle du manteau neigeux en place ni celle des chutes de neige fraîche mais cette valeur largement reconnue assure une cohérence globale des résultats avec le choix de C_d .
- V : vitesse moyenne sur la hauteur de l'écoulement (m/s).

S'agissant d'avalanches coulantes denses, une hauteur de refoulement supplémentaire (notée H_a' sur la Figure 23) générée par l'interaction avec l'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.

B. QUANTIFICATION DES PHENOMENES COULANTS

Comme illustré précédemment, la charge d'avalanche dense dépend donc principalement de la valeur de la vitesse qui est interprétée à partir de la reconnaissance de terrain et des résultats de modélisation : les scénarios listés précédemment sont évalués à l'aide du logiciel 2D de référence internationale RAMMS (v 1.8.0 - <http://ramms.slf.ch/ramms/>) de l'Institut Fédéral Suisse d'Etudes des Avalanches à Davos. Ce logiciel reste basé sur le modèle de Voellmy (1955) qui utilise une loi d'écoulement moyennée sur l'épaisseur : La masse de l'avalanche est entraînée par la gravité tout en subissant la résistance au sol d'un frottement combiné de type Coulomb 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.
- En s'inscrivant dans le contexte PPR [2a], les mêmes conditions de départ (zone, épaisseur...) que celles utilisées dans [3] sont appliquées ici. A noter que le groupe d'experts BBCM n'avait pas retenu la contribution des pentes du glacier des Nantillons et s'était concentré sur tout le pan sous l'Aiguille de l'M (surface cumulée de plus de 10 hectares à une pente moyenne de 35° - Figure 24).
- Densité : 300 kg/m³. Cette densité est celle de l'écoulement qui ne correspond pas à celle du manteau neigeux dans la zone de départ.
- Avec la mise à disposition des nuages classés de la nouvelle couverture nationale LidarHD de l'IGN, les calculs sont réalisés sur la grille correspondante filtrée de la végétation et ramenée au pas de 3m. Cette nouvelle source permet de disposer d'une couverture de référence récente sur toute la surface du couloir.
- Non prise en compte du couvert forestier pour son influence sur l'écoulement de sorte à évaluer uniquement le rôle de la topographie.

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" (<5000m³=T), "small" (<25000m³=S), "medium" (<60000m³=M) et "large" (>60000m³=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) ou dans la gamme des neiges humides (jusqu'à 300Pa).

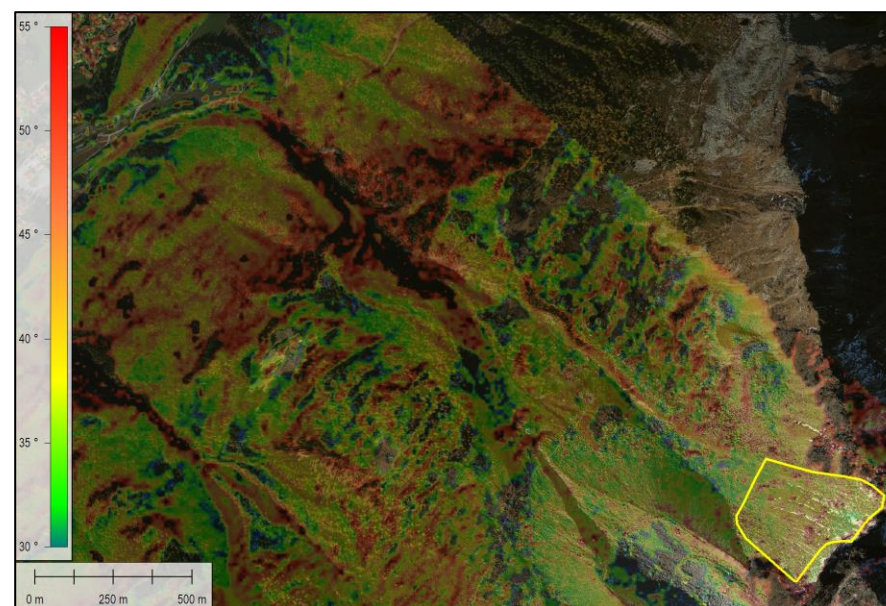


Figure 24 – Localisation de la zone de départ de référence utilisée par le groupe d'experts BBCM dans [3] sur fond de carte des pentes considérées comme propices aux avalanches (ie. entre 30 et 55°)

C. QUANTIFICATION DES PHENOMENES AEROSOLS

L'avancement de la version étendue (désormais 2.7.95) de RAMMS³ 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.

³ 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),

A ce stade, le paramétrage des calculs a encore progressé avec désormais la possibilité de choisir une période de retour, elle-même croisée avec le volume mobilisé au départ pour définir les valeurs maximums⁴ des coefficients μ , ξ et de la cohésion C.

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 et une couche érosive distribuée: à partir d'une valeur à une altitude donnée, le logiciel calcul sa distribution sur le domaine de calcul tenant compte du facteur de pente 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, 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).

179–187.

⁴ P. Bartelt, L. Stoffel, RAMMS Extended input parameters, Draft version 7 juillet 2021

D. RESULTATS NUMERIQUES SUR TOPOGRAPHIE LIDARHD RECENTE

Les figures suivantes récapitulent les résultats obtenus pour la phénoménologie coulante (Figure 26): pour cerner l'impact possible sur une infrastructure sans se focaliser uniquement sur la hauteur ou sur la pression, les valeurs max de ces deux grandeurs sont multipliées pour obtenir une carte "d'intensité avalancheuse" homogène à une force par unité de largeur d'obstacle (donc en kN/ml).

L'utilisation d'une catégorie de volume "Medium" avec une cohésion minimale comme dans [3] conduit en centennal à un léger débordement à l'aval (Figure 27). Or, ce choix peut être discuté vu l'importante chenalisation du phénomène sur l'essentiel de son linéaire (toute la portion sous 2000m) et qui aura largement tendance à allonger/contraindre l'écoulement par écrêtement/filtrage du débit possible (Figure 25) pour réduire numériquement le volume "qui interagit avec lui-même". L'utilisation de la catégorie "Small" réduit alors ce débordement qui n'atteint plus les tapis (Figure 28).

Par ailleurs, il faut aussi noter que ce couloir présente toutes les caractéristiques pour induire une transition de régime⁵ même en partant de neige froide en altitude : dénivelée important, chenalisation, arrivée à basse altitude. On trouve d'ailleurs des manifestations typiques des "warm plug regime" décrits dans ⁶: plans de cisaillement, zones d'élévations⁷... A ce titre l'augmentation de la cohésion ($C=300\text{Pa}$) limite là aussi le débordement qui n'atteint plus les tapis même en conservant la catégorie de volume la plus pénalisante (Figure 29).

Logiquement, la menace est encore plus faible à l'occurrence trentennale.



Figure 25 – extraits espacés de 18 secondes de la vidéo amateur de l'avalanche du 3 mai 2015 disponible sur Youtube confirmant l'étalement de l'écoulement et filtrant le débit écoulé

⁵ A. Köhler, J-T Fischer, R. Scandroglio, M. Bavay, J. McElwaine, B. Sovilla, *Cold to warm flow regime transition in snow-avalanches*, The Cryosphere, 12, 3759–3774, 2018,

⁶ A. Köhler, J.N. McElwaine, B. Sovilla, *GEODAR Data and the Flow Régimes of Snow-*

avalanches, Journal of Geophysical Research : Earth surface, 123, 2018

⁷ P. Bartelt, J. Glover, T. Feistl, Y. Bühler, O. Buser, *Formation of levees and en-echelon shear planes during snow avalanche run-out*, journal of glaciology, Vol n°58, N°211, 2012



Figure 26 – Vue globale d'une modélisation dense coulante à l'échelle du versant – Carte des intensités avalancheuses

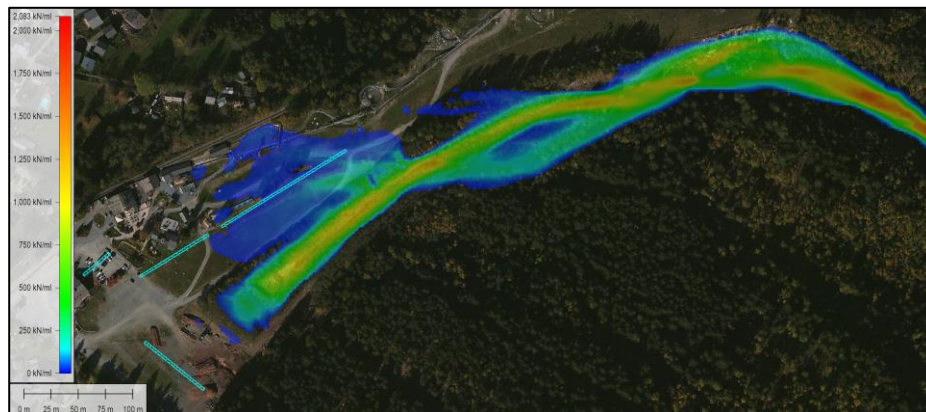


Figure 27 – Modélisation dense coulante : Catégorie de volume Médium, cohésion minimale – Carte des intensités avalancheuses dans la zone d'arrivée – tapis projetés en bleu clair

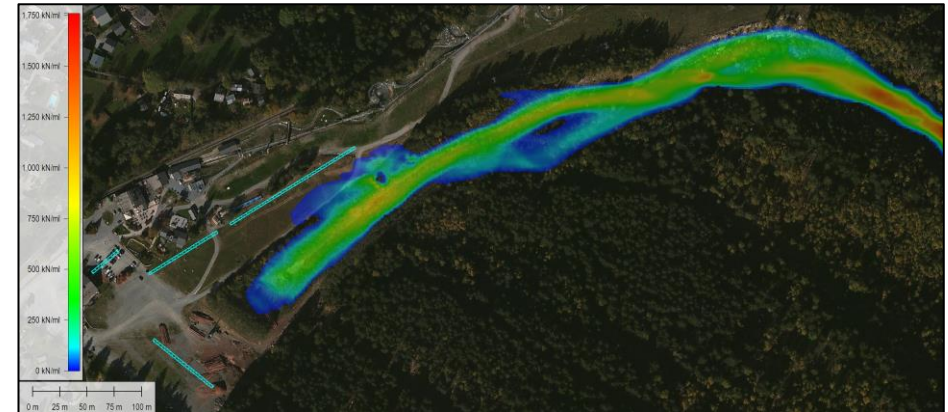


Figure 28 – Modélisation dense coulante : Catégorie de volume Small, cohésion minimale – Carte des intensités avalancheuses dans la zone d'arrivée – tapis projetés en bleu clair

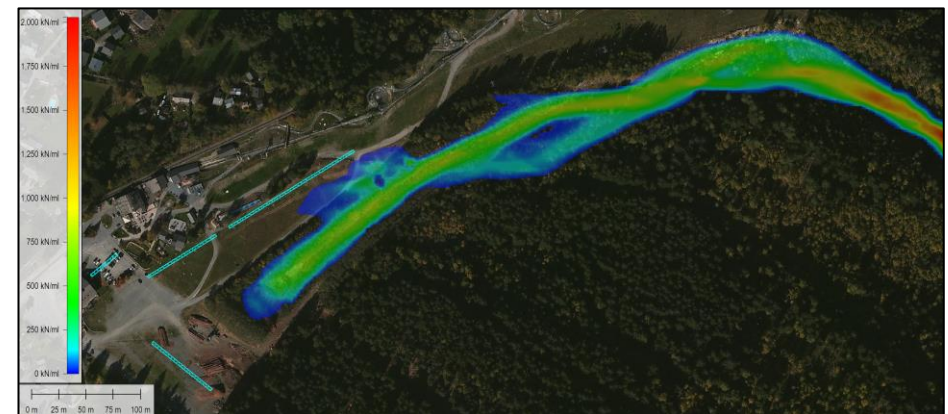


Figure 29 – Modélisation dense coulante : Catégorie de volume Médium, cohésion maximale – Carte des intensités avalancheuses dans la zone d'arrivée – tapis projetés en bleu clair

Le résultat aérosol est illustré ci-contre : logiquement, il montre une trajectoire principale qui s'affranchit assez largement du microrelief pour filer droit vers la Frasse. Une partie minime de la couche basale (également dite couche de saltation) est captée par le thalweg mais où s'éteint rapidement le phénomène sans toucher les tapis. Seule une pression aérienne du nuage s'applique mais limitée à quelques kPa, couverte par les hypothèses réglementaires de vent en montagne donc non préjudiciable pour le projet même selon les hypothèses conservatives utilisées ici.

En effet, il faut aussi remarquer que dans la réalité, le site est peu propice à la reprise de neige dans toute la partie inférieure du versant (chenal encaissé et boisé) a fortiori à ces altitudes où la tendance démontrée est déjà à une diminution drastique du nombre de phénomènes aérosol⁸ (d'ailleurs le terme apparaît pour la dernière fois en 1995 dans la chronique historique présentée au début de ce rapport)

Finalement, la grande majorité des phénomènes à attendre sur le site consiste donc en des avalanches de neige lourde, y compris en cas de conditions froides en altitude vu les transitions désormais habituelles de température. Pour cette phénoménologie, le thalweg a démontré, aussi bien en 2015 que cette année ou qu'au travers des résultats numériques précédents, son influence prépondérante et positive sur l'exposition du site.

⁸ Eckert N, Lavigne A, Castebrunet H, Giraud G & Naaim M, *Recent changes in avalanche activity in the French Alps and their links with climatic drivers: an overview*,

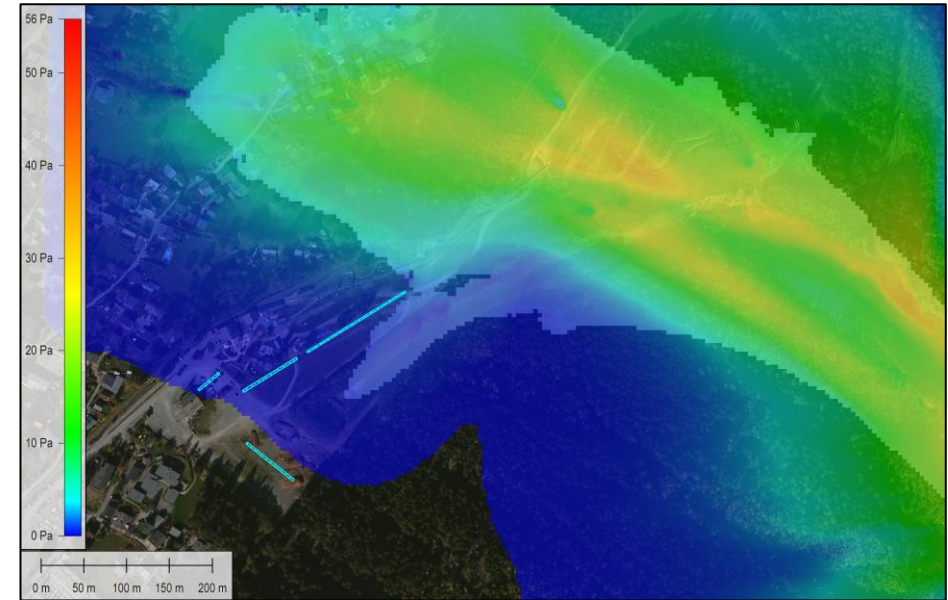


Figure 30 – Modélisation aérosol centennale : zone blanchie = cœur/core du phénomène, échelle de couleur = pression du nuage

International Snow Science Workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc - 2013

IV. ANALYSE CRITIQUE DU NIVEAU DE RISQUE

A. PREAMBULE

Les résultats qui précèdent apparaissent littéralement contradictoire avec les éléments [3] qui ont étayé le nouveau zonage du PPR [2a] : il convient donc d'éclaircir ce point ici pour expliquer cette différence

B. UN SITE QUI A LARGEMENT EVOLUE

Comme indiqué dans la chronique historique et démontré par les anciennes photos aériennes IGN (Figure 8), [4] situe à 1944 une première évolution majeure du thalweg avec son très fort creusement dû à une lave torrentielle.

Auparavant, et dès la sortie du virage supérieur qui est déjà confirmé sur la carte d'état major ci-contre, l'ensemble du versant montre certes une orientation vers le sud-ouest mais avec un déversement assez général vers la Frasse et les Mouilles (photos de la page suivante) favorisant clairement ces directions.



Figure 31 – Extrait de la carte d'état major du milieu du XIXème siècle



Figure 32 – Vue des débordements aval de l’avalanche de 1914 vers la Frasse et les Mouilles (photo : P. Tairraz)



Figure 33 – Vue du bas du couloir du Grépon au début des années 1930 (collection Cardoso)



Figure 34 – Vue du bas du couloir du Grépon a priori en 1924 (source web)

Surtout et avec la dynamisation du site des Planards, les propriétaires de l’époque (SA des Planards et SA Cachat) décident en 1982 de réaliser un vaste bassin de réception pour absorber et contenir les avalanches de ce couloir du Grépon dont ils sont bien conscients du risque : l’objectif est double “garantir la sécurité de notre clientèle de skieurs mais aussi pour protéger [les] installations” [4].

Cela conduit à un important chantier de terrassement consistant à déporter le chenal d’écoulement naturel contre le versant pour gagner en surface de piste (gommant le déversement précité) et surtout ménager un chenal maîtrisé et bien délimité (Figure 35 et vues suivantes des travaux)



Figure 35 – Comparaison des photos aériennes IGN de 1980 (en haut) et 1984 (en bas). Clichés disponibles dans “remonter le temps” du Géoportail et géo-rectifiés manuellement sur des éléments visuels remarquables pouvant conduire à des décalages de plusieurs mètres..



Figure 36 – Vue du chantier au début des années 1980, aussi bien à l’aval qu’à l’amont du thalweg (source : [4])

Cette modification a donc forcément une influence en comparaison notamment des événements qui ont pu approcher les secteurs des Mouilles ou de la Frasse dans le passé. D’ailleurs, ceux-ci ne l’ont plus jamais été depuis ces travaux.

C. UN ZONAGE PPR ISSU DE RESULTATS NUMERIQUES ERRONES

Contrairement aux éléments précédents, le PPR [2a] continue de privilégier des trajectoires déversantes vers la Frasse et les Mouilles au détriment de la trajectoire vers le Biollay et en étayant cela par différentes modélisations qui montrent des résultats totalement différents de celles figurées précédemment et obtenues sur la couverture topographique récente (a priori 2022) du LidarHD IGN.

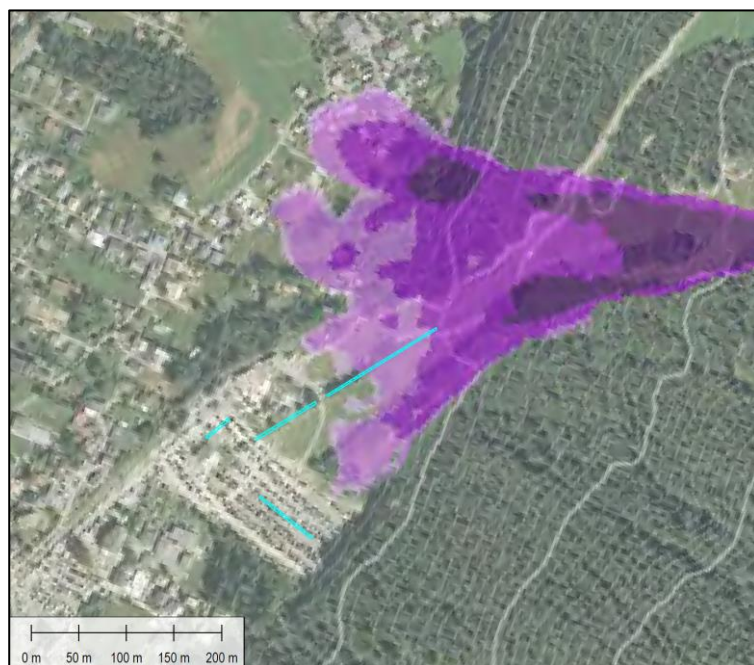


Figure 37 – Résultat de référence fourni par le groupe d’experts BBCM dans [3] pour des conditions équivalentes au calcul de la Figure 27 – superposition des tapis projetés [0] en bleu clair

⁹ Y. Bühler, M. Christen, J. Kowalski, P. Bartelt, Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution, Annals of Glaciology

En plus d’un vrai écart avec les limites de la carte d’aléa finalement émise (Figure 20), on constate un résultat très peu canalisé et assez diffus qui arrose plus ou moins toutes les trajectoires historiques de la CLPA. Ce résultat n’est pas du tout cohérent avec celui de la Figure 27 pourtant réalisé dans les mêmes conditions numériques.

Cela amène surtout à examiner la couverture topographique digitale utilisée pour les analyses BBCM, support forcément crucial pour la qualité des résultats⁹. A l’époque 2 sources sont disponibles [5a] et [5b] qui montraient déjà des différences substantielles :



Figure 38 – Comparaison des courbes de niveau issues du MNT de 2002 [5a] (en rouge) et du LIDAR [5b] de 2010 (en blanc) sur fond orthophoto

Par ailleurs, [5a] (couche shapefile de courbes de niveaux datant de 2002) couvre effectivement tout le versant jusqu’au glacier des Nantillons alors que [5b] (relevé LIDAR datant de 2010) est malheureusement coupé une centaine de mètres sous l’Aiguille de l’M... dans la zone de départ d’avalanche utilisée dans [3] et donc sans pouvoir couvrir toute la trajectoire ni pouvoir être utilisé tel quel.

52(58) 2011

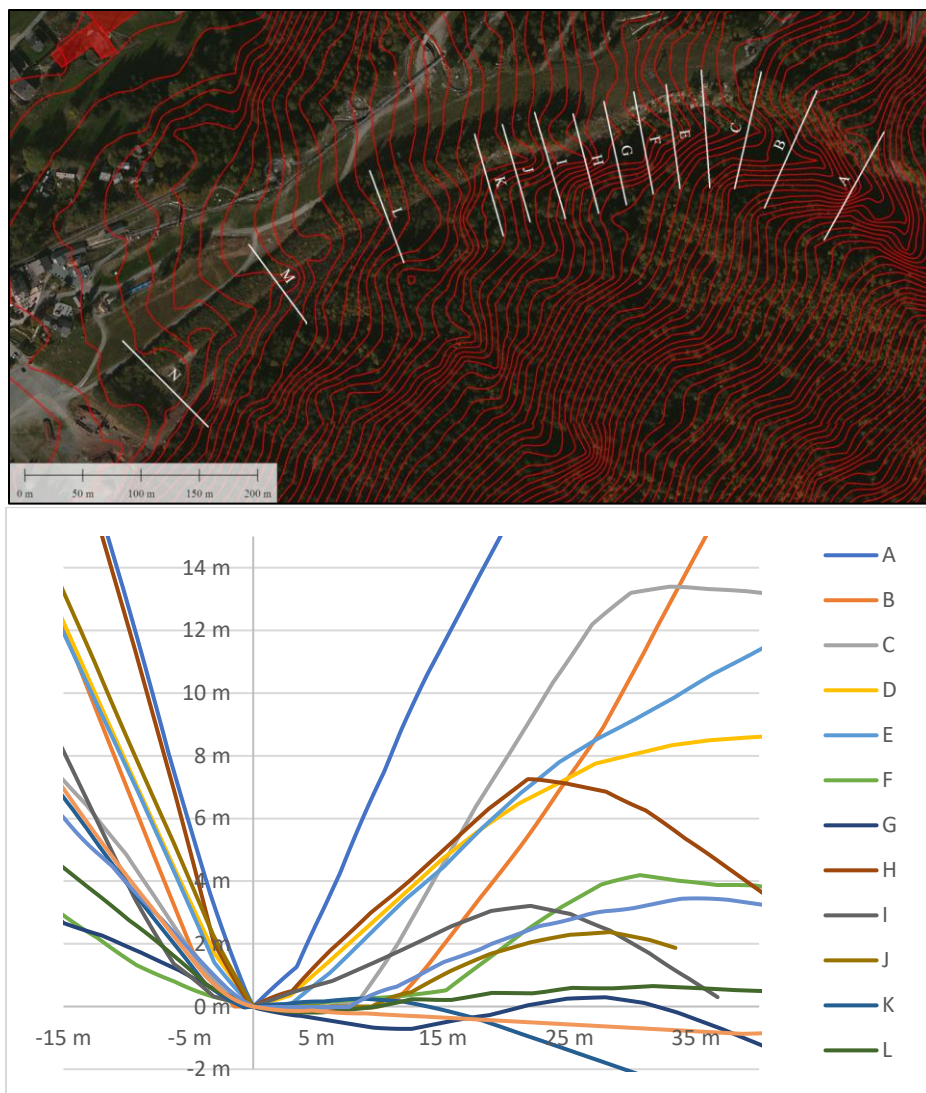


Figure 39 – Courbes de niveau du MNT [5a] et profils d'analyse de la forme du thalweg (en blanc, de A à N, de l'amont vers l'aval) et profils correspondants sur le graphe en dessous

Ensuite et en comparaison de la performance d'un relevé LIDAR, le MNT [5a] apparaît aussi bien moins précis et représentatif du terrain. Au niveau de la bordure externe du thalweg, il est même largement erroné par rapport à la réalité : la génération de la grille ASCII correspondante au pas de 3m et le tracé de différents profils (Figure 39) dans la partie intermédiaire du virage et à l'aval confirme cette insuffisance : dès le profil D (et hormis vers H), la bordure externe numérique du thalweg ne fait que quelques mètres, très en deçà de la réalité, voire est complètement inexistante.

Or, les courbes de niveau du MNT [5a] correspondent justement à celles qui sont visibles sur les rendus BBCM (Figure 40) de même que la carte des pentes ne montrant pas de raideur réaliste au niveau de la bordure externe du thalweg (Figure 41).

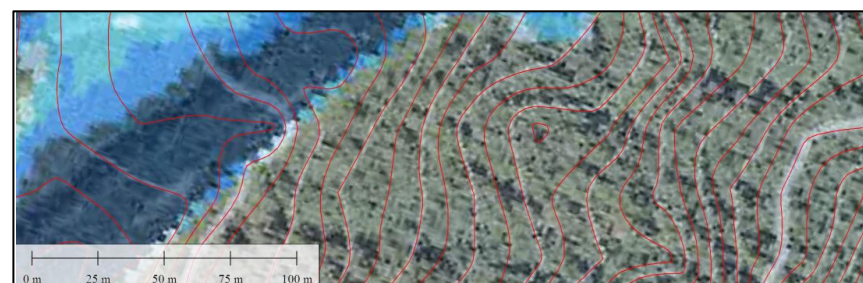


Figure 40 – Correspondance de la superposition des courbes de niveau (couche shp [5a]) numériques (tous les 5m en rouge) sur un extrait de rendu BBCM [3] (courbes blanches tous les 10m)

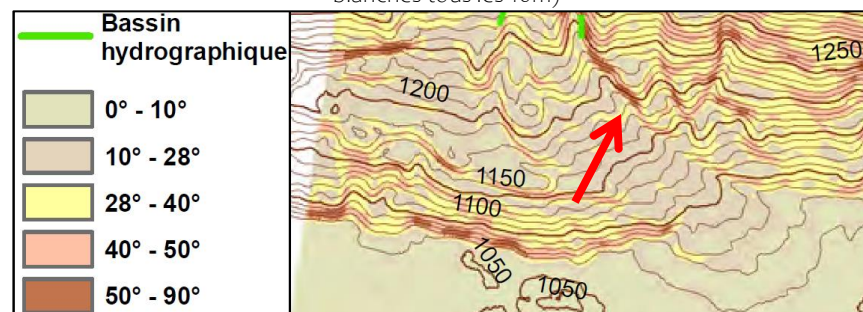


Figure 41 – Absence de pentes "fortes" au niveau de la bordure externe du virage du thalweg – carte des pentes BBCM [3]

Enfin, l'utilisation du support [5a] pour de nouvelles modélisations réalisées ici permet de retrouver des résultats analogues à ceux de BBCM (Figure 42), confirmant que c'est bien cette couverture topographique de très mauvaise qualité de 2002 [5a] qui a été utilisée pour les analyses [3] étayant directement le dernier PPR [2a].

De même la simulation test d'un "petit" écoulement montre des possibilités de "divagation" au-delà du thalweg dès des vitesses très faibles de quelques mètres par seconde sur [5a] (Figure 43) ce qui n'est absolument pas le cas avec un support Lidar... ou même dans la réalité.

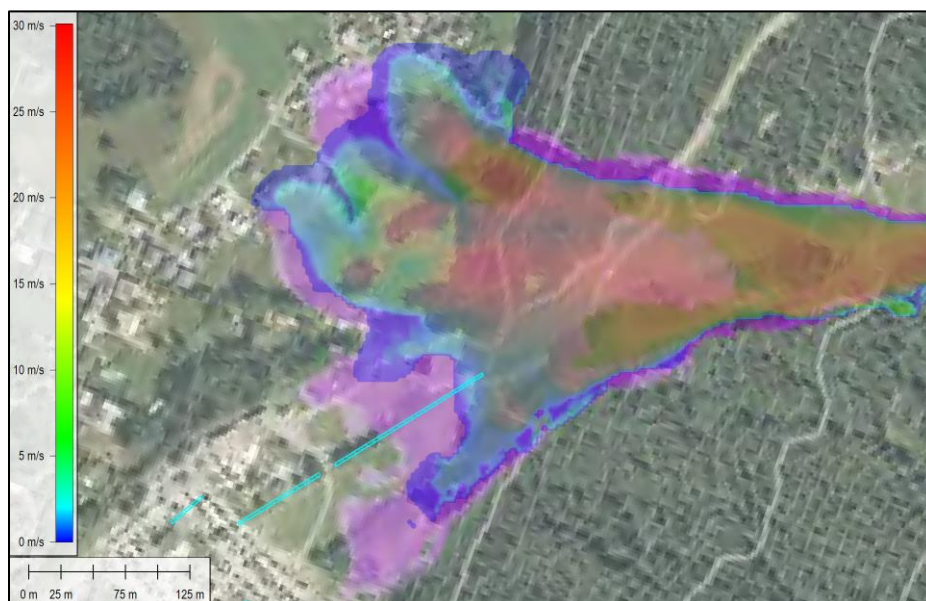


Figure 42 – superposition de la simulation équivalente à celle du rendu BBCM correspondant [3] en utilisant le MNT [5a] de 2002 et non plus le relevé Lidar

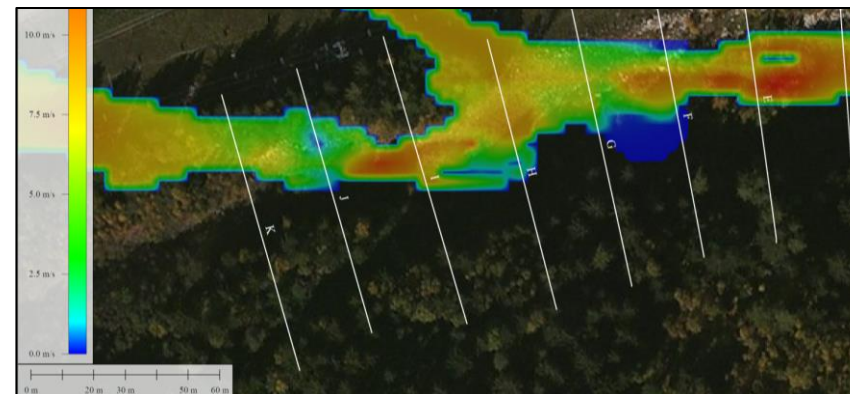


Figure 43 – Simulation test confirmant le non-confinement du thalweg numérique [5a] même pour un faible volume d'avalanche et à vitesse faible.

De ce point de vue et en s'étant servi de résultats eux-mêmes issus d'une couverture topographique erronée [5a], le zonage du PPR est ici très discutable : les résultats précédents fournis sur le LidarHD sont à la fois bien plus logiques et fiables par rapport à la configuration actuelle du terrain.

V. BILAN POUR LE PROJET DES PLANARDS

Si le PPR [2a] place une bonne partie du projet de nouveaux tapis [o] en zone d'aléas fort (Figure 20), il est assez évident qu'une partie au moins des analyses qui ont conduit à ce zonage est basée sur des éléments erronés qui ne correspondent pas/plus à la réalité du terrain et à son évolution proactive depuis plusieurs décennies [4].

Aujourd'hui, le thalweg existant constitue clairement l'élément central de la protection du site et permet de correctement canaliser les avalanches de référence à prendre en compte (Figure 27 à Figure 29): les éventuels débordements sont suffisamment limités pour justifier la dernière version du positionnement des tapis [o] qui ne sont globalement pas atteints directement et ne nécessitent donc aucune prescription particulière.

Bien sûr, d'autres débordements parasites peuvent avoir lieu car dépendant éventuellement d'un point de concentration des flux que la modélisation ne peut pas reproduire. Mais le positionnement au maximum d'éloignement vers l'ouest de ces infrastructures est de toute façon la meilleure garantie possible.

En revanche, cela induit un point d'attention particulier, à savoir le maintien à minima (voire l'amélioration vu la recrudescence attendue des phénomènes de neige lourde/de printemps) des caractéristiques de canalisation et stockage de ce thalweg qui est en fait un véritable ouvrage ("artificiel") de protection (d'ailleurs bien identifié comme tel sur la carte d'aléa du PPR - Figure 20). Or, par exemple à l'heure d'écrire ces lignes, les dépôts de matériaux (terre, roche, bois) mais aussi une partie de la neige de l'avalanche de mai 2023 sont toujours en place/n'ont pas encore complètement fondus, obérant le volume disponible (Figure 44).



Figure 44 – Reste du dépôt de l'avalanche de mai 2023 plusieurs mois plus tard (source : SAS des Planards)

En fait, une rapide comparaison des couvertures topographiques fiables (donc en éliminant [5a]) disponibles depuis 2010 permet de constater un comblement global qui finit par représenter plusieurs milliers de mètres cubes (environ 6000 entre 2023 et 2010): comme le montre le graphe ci-après qui récapitule les différences d'altitude par rapport au premier LIDAR [5b] disponible le long de l'axe du thalweg, certaines zones ont perdu 50cm à 1m de profondeur et donc autant de hauteur efficace de la tourne que représente le parement latéral du thalweg. On note aussi le pic vers l'abscisse 50m qui correspond au dépôt

neigeux de l'avalanche de mai 2023 non encore fondu à la fin de l'été au moment du dernier relevé Lidar, pour environ 1000m³ (figure précédente).

Ce comblement est d'autant plus pénalisant qu'il privilégie les zones d'écoulement et dépôt maximum dans le thalweg. Certes ces volumes rapportés semblent minimes par rapport à la totalité en jeu et ne remettront effectivement pas complètement en cause le fonctionnement du thalweg. Sauf que localement, ils peuvent induire un débordement parasite plus important et potentiellement préjudiciable pour une (partie d') infrastructure.

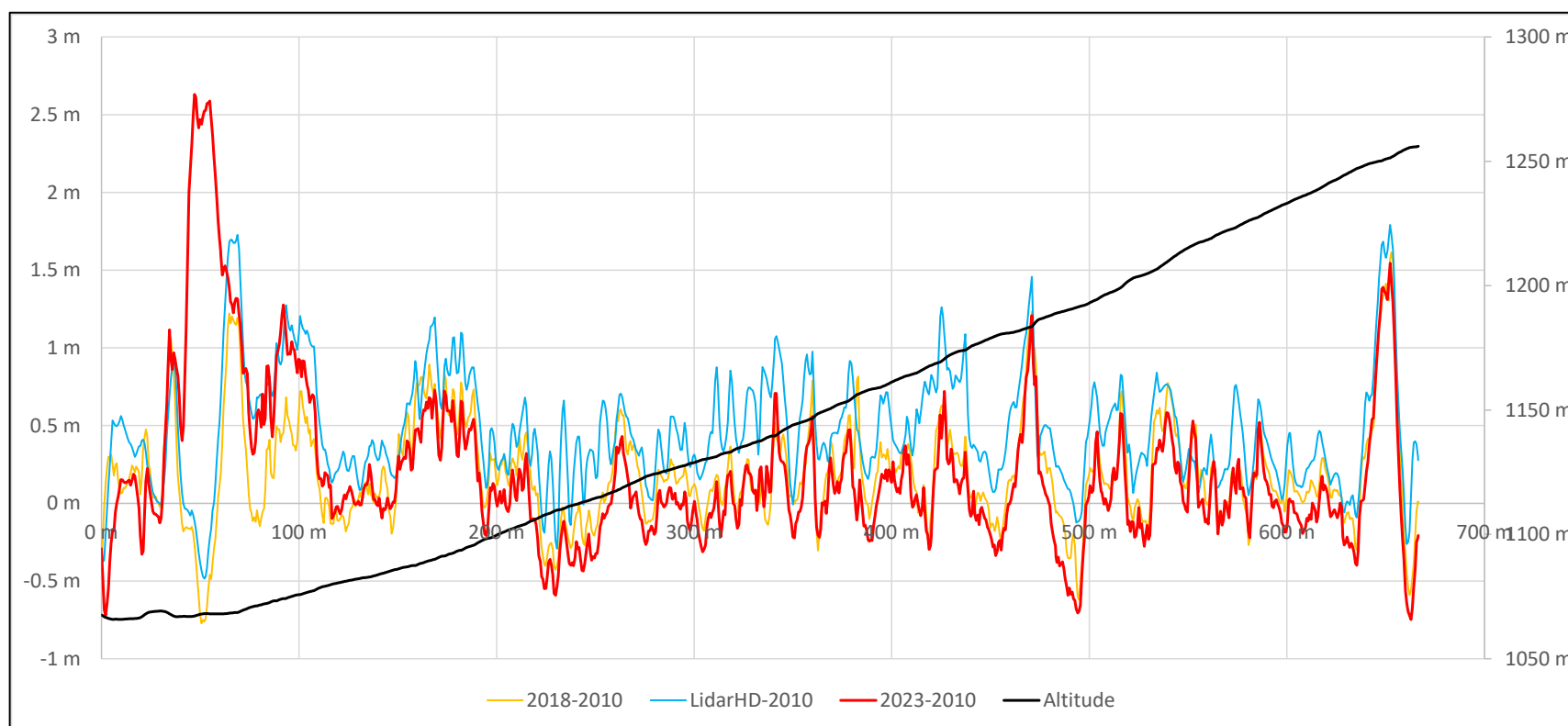


Figure 45 – Evolution de l'altitude à l'axe du thalweg en fonction des relevés Lidar successifs disponibles par rapport à la configuration la plus ancienne connue (2010 [5b])

RISQUES CHUTES DE BLOCS

VI. CONTEXTE VIS-A-VIS DES CHUTES DE BLOCS

L'objectif de la mission est, après la visite des lieux, de prescrire les protections et confortement au stade AVP à mettre en œuvre pour assurer la sécurisation du domaine.

En référence à la norme NF P 94-500 – Classification des missions types d'ingénierie géotechnique – qui figure en annexe 1 de ce rapport, notre mission est de type G5 DIAG, diagnostic puis G2 AVP, étude géotechnique de conception en phase avant-projet

D'après la carte géologique de Chamonix du BRGM (Figure 46), le site est constitué de formations superficielles, comme des éboulis ou des cônes de déjection, issues de l'érosion du versant au droit du site ainsi qu'aux différentes cycles glaciaires. Le versant présentant des risques de chutes de pierre, notamment au-dessus du Tunnel du train du Montenvers est quant à lui composé de gneiss du socle préalpin.



Figure 46 – Carte géologique extraite du rapport du BRGM

Le domaine des Planards et le versant présentant des risques sont séparés par l'important thalweg déjà décrit dans la partie avalanche précédente. Ce thalweg est susceptible de prolonger des chutes de blocs qui pourraient provenir de la falaise à proximité du tunnel du train de Montenvers.

D'après le Plan de prévention des Risques dédié aux problématiques géologiques [2b], le risque de chute de pierre au droit des zones citées précédemment existe mais il est faible (P1), seul le risque de lave torrentielle existe au droit des thalwegs présents sur le versant avec un aléa fort (T3) notamment celui du torrent du Grépon.

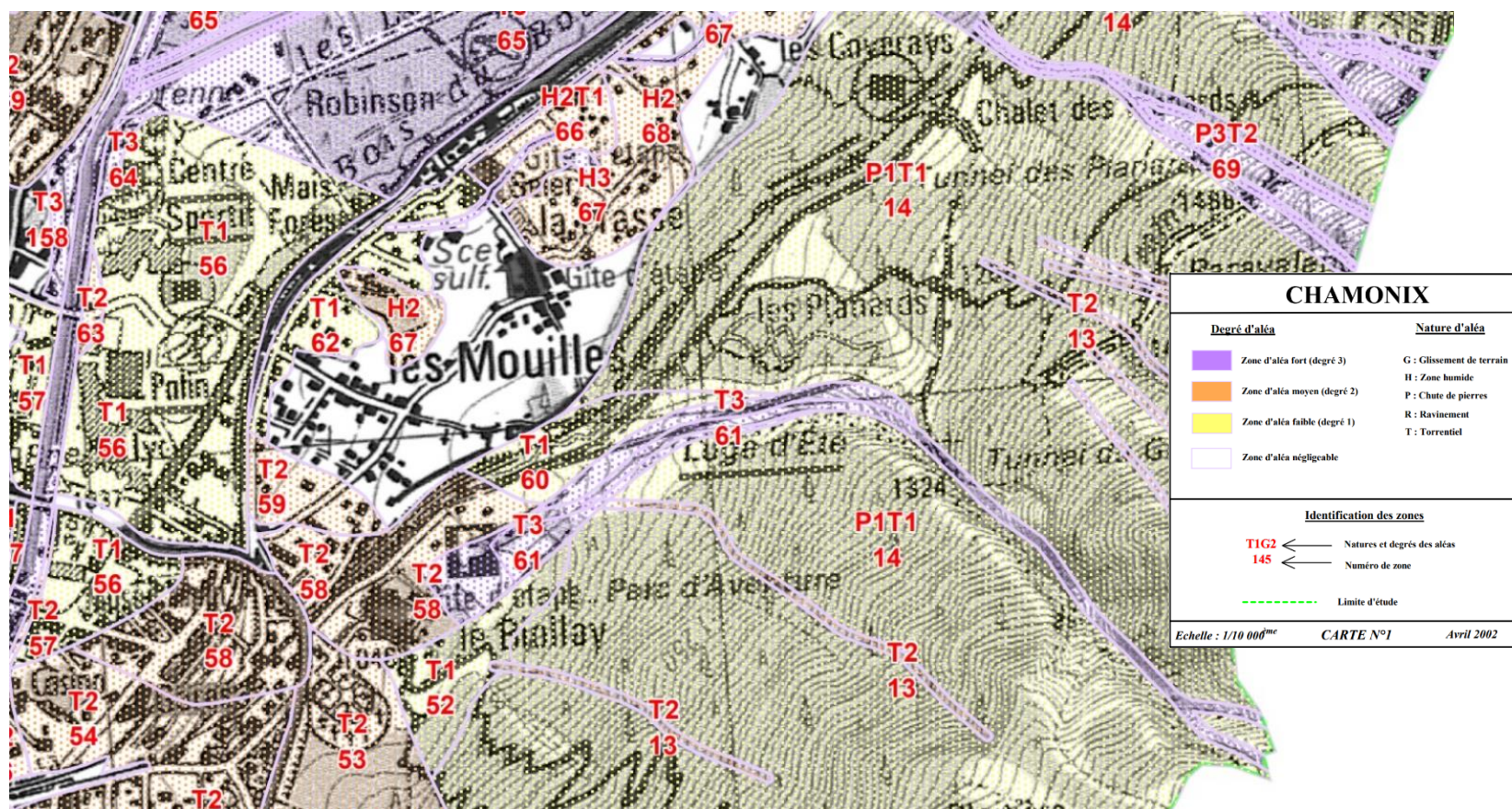


Figure 47 – Extrait du PPR dédié aux phénomènes géologiques [2b]

VII. ETUDE DES CHUTES DE BLOCS

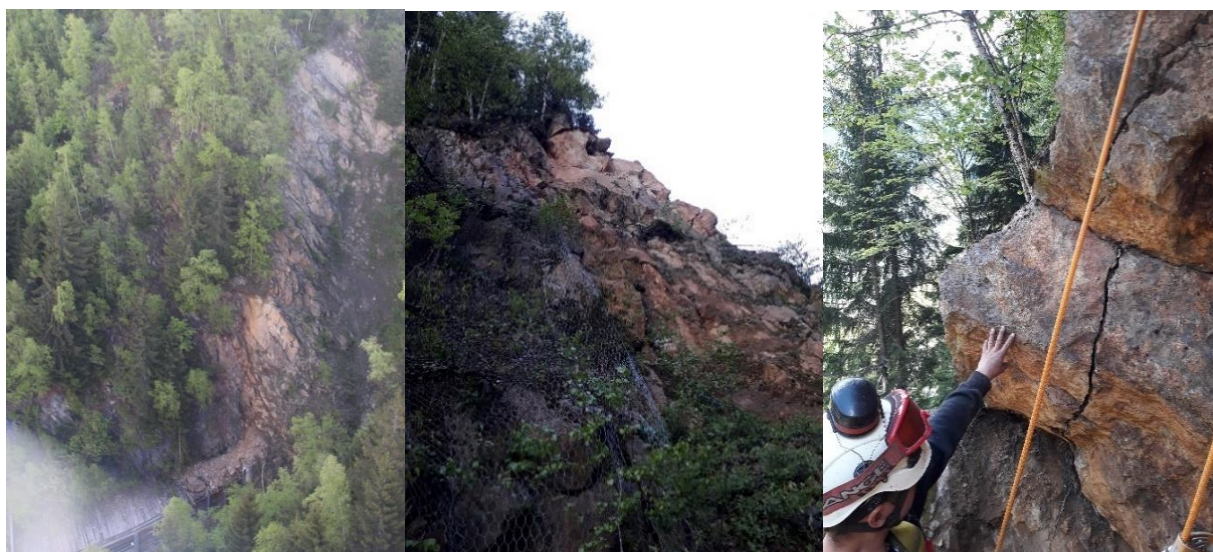
- Visite du site au niveau du couloir du Grépon :



- Visite du site au-dessus du parking dans le bas du versant de Blaitière



- Visite du site au niveau de la tête aval du tunnel du Grépon :



VIII. ANALYSES DES RISQUES DE CHUTES DE BLOCS

A. GENERALITES

Le risque lié aux instabilités recensées sur le site résulte du croisement de deux composantes :

$$\text{Risque} = \text{Aléa de Rupture} \times \text{Vulnérabilité}$$

L'**aléa de rupture** d'un compartiment est défini en fonction de la probabilité d'occurrence du phénomène et de son imminence.

La **vulnérabilité** résulte du croisement entre l'exposition des enjeux aux trajectoires avec les dommages potentiels associés.

Le **niveau de risque** s'exprime selon cinq niveaux, la plage d'intensité allant de très faible à très fort.

L'ensemble de la méthode d'analyse est détaillé en **annexe 2**.

ALEA DE RUPTURE

Les compartiments recensés ici ont de manière générale un aléa de rupture « **Fort** » à l'exception du compartiment sud qui présente un aléa de rupture plutôt « **modéré** » à court terme.

L'ensemble du site est concerné par un aléa de rupture « **Fort** » à court terme pour ce qui est des chutes de pierres.

VULNERABILITE

En raison du futur aménagement en aval des affleurements rocheux pour des activités récréatives d'extérieurs accueillant du public, nous avons choisi de considérer une vulnérabilité « **très forte** ».

N.B : La notion de vulnérabilité est un critère qualitatif qui peut être soumis à l'appréciation du Maître d'ouvrage.

B. PROBABILITE D'ATTEINTE

Une rapide analyse selon la méthode des lignes d'énergies utilisée par l'IRSTEA permet de définir les niveaux d'atteinte selon des critères purement géométriques.

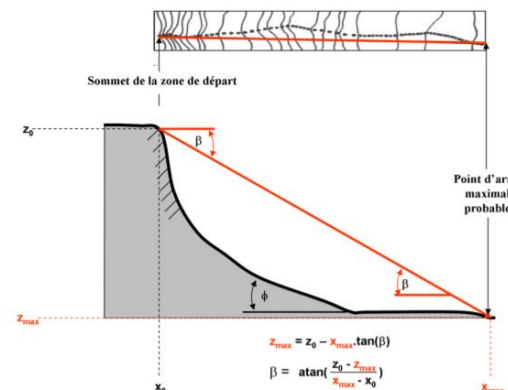


Figure 14 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

Niveau de probabilité d'atteinte d'un point	Angle de la ligne d'énergie sans prise en compte de la forêt	Angle de la ligne d'énergie avec prise en compte de la forêt	Différence d'angle : avec forêt – sans forêt
Fort	33,88°	37,86°	3,99°
Moyen	30,22°	34,13°	3,91°
Faible	27,67°	31,32°	3,65°

Valeur des angles géométriques pour le calcul de la ligne d'énergie obtenus par la rétro analyse de phénomènes passés et du zonage de 2 PPRn.

Figure 48 – Extrait www.forespir.com sur la méthode des lignes d'énergie de l'IRSTEA

Compte tenu de nos observations de terrain, nous avons considéré 2 zones de départ, sur lesquelles nous récapitulons les données :

Zone de départ	Altitude	Dénivelé (m)	Distance falaise site aval (m)	Angle d'atteinte (°)	Niveau d'atteinte
Sommet tunnel	1400	350	700	30 °	Moyen
Sommet parking	1100	45	30	35 °	Moyen

⇒ Dans tous ces cas, la probabilité d'atteinte de la futur zone demeure MOYEN

C. ETUDE TRAJECTOGRAPHIQUE

Afin d'analyser plus finement l'aléa chutes de blocs, nous avons procédé à des modélisations trajectographiques en 3D sous le logiciel ROCPRO3D.

Hypothèses et méthode de calcul

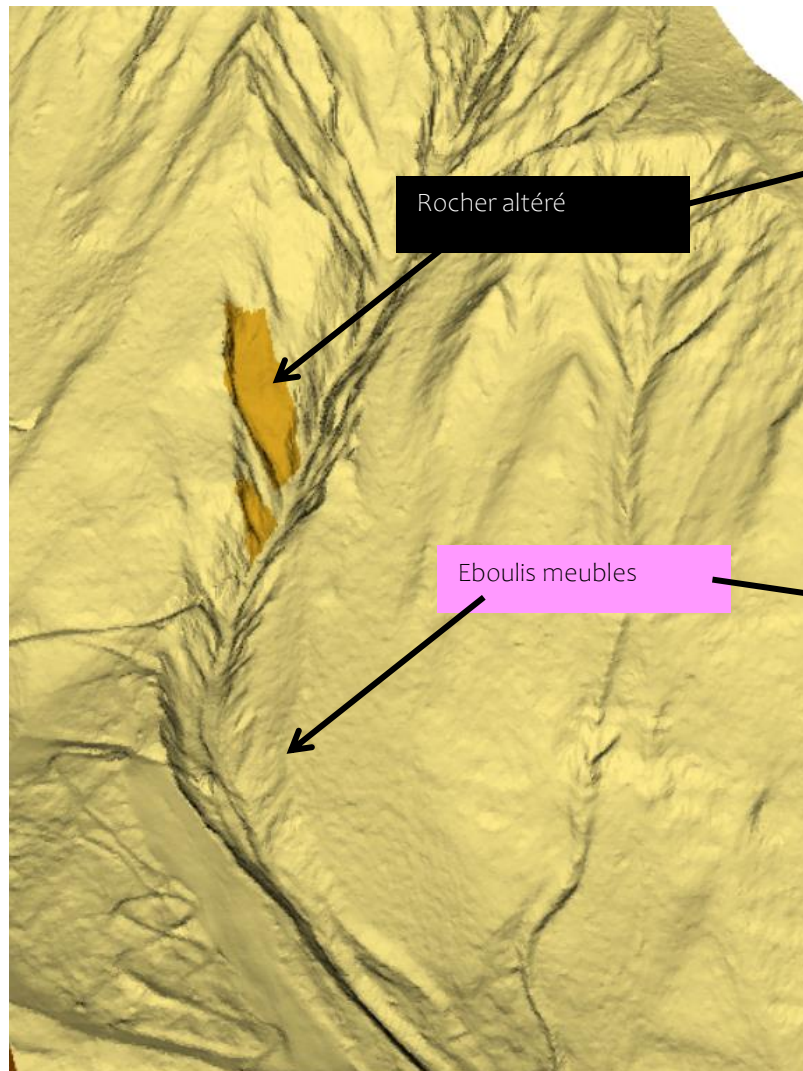
Ces modélisations permettent de préciser les trajectoires des blocs, les énergies, hauteurs de rebond, et les hauteurs de protection éventuellement utiles.

Les paramètres de sol permettent de prendre en considération :

- Les rebonds qui se définissent par des coefficients variables de restitution des vitesses et d'angle de rebond horizontal et vertical ;
- Le glissement qui se définit en coefficients de glissement et l'angle limite de rebond au-dessous duquel le bloc ne rebondit plus et se met à rouler.

Nous avons pris le soin de caler notre modèle avec les caractéristiques d'amortissement des sols étalonnées avec les observations de terrain.

Deux types de sols ont ensuite été créés, rocher altéré et éboulis meuble (en adaptant les paramètres pour tenir compte des phénomènes d'amortissement très importants dans cette dernière formation) dont les caractéristiques trajectographiques sont calées sur des données issues de la bibliographie et de l'expérimentation du CEREMA (ancien CETE) - Page suivante :



Rocher altéré

Eboulis meubles

Propriétés des sols

Type de sol : Rocher altéré Couleur : Sol n° : 1

Surface

Développée : 12891 [m²] Projétée (X-Y) : 6732 [m²]

Type de variables probabilistes

☒ Uniformes ☐ Gaussiennes

Propriétés du sol (distribution uniforme) | Propriétés du sol (distribution Gaussienne)

Paramètres des rebonds

Coefficients de restitution (indépendants)

Valeur normale R_n : 0.5 [-] Variabilité Δ_R : 5 [%]

Valeur tangentielle R_t : 0.85 [-] Vitesse limite $V_{R(lim)}$: 10 [m/s]

Variabilité limite $\Delta_R(lim)$: 3 [%]

Déviations latérales

Variabilité $\Delta_{\theta h}$: 17.5 [°] Variabilité $\Delta_{\theta v}$: 2 [°]

Vitesse limite $V_{\theta h(lim)}$: 10 [m/s] Vitesse limite $V_{\theta v(lim)}$: 10 [m/s]

Variabilité limite $\Delta_{\theta h(lim)}$: 8.75 [°] Variabilité limite $\Delta_{\theta v(lim)}$: 4 [°]

Paramètres du roulement

Coefficient de frottement

Valeur k : 0.5 [-] Variabilité Δ_k : 15 [%]

Vitesse limite $V_{k(lim)}$: 10 [m/s] Variabilité limite $\Delta_k(lim)$: 10 [%]

Paramètres des transitions

Transitions FF \rightarrow R et R \rightarrow FF (cas aigu)

Angle β_{lim} : 3 [°]

Transition R \rightarrow FF (cas obtus)

Angle $\beta_{lim'}$: 30 [°]

Propriétés des sols

Type de sol : Eboulis meuble Couleur : Sol n° : 0

Surface

Développée : 1683284 [m²] Projétée (X-Y) : 1305425 [m²]

Type de variables probabilistes

☒ Uniformes ☐ Gaussiennes

Propriétés du sol (distribution uniforme) | Propriétés du sol (distribution Gaussienne)

Paramètres des rebonds

Coefficients de restitution (indépendants)

Valeur normale R_n : 0.4 [-] Variabilité Δ_R : 3 [%]

Valeur tangentielle R_t : 0.85 [-] Vitesse limite $V_{R(lim)}$: 10 [m/s]

Variabilité limite $\Delta_R(lim)$: 1 [%]

Déviations latérales

Variabilité $\Delta_{\theta h}$: 12.5 [°] Variabilité $\Delta_{\theta v}$: 2 [°]

Vitesse limite $V_{\theta h(lim)}$: 10 [m/s] Vitesse limite $V_{\theta v(lim)}$: 10 [m/s]

Variabilité limite $\Delta_{\theta h(lim)}$: 6.25 [°] Variabilité limite $\Delta_{\theta v(lim)}$: 4 [°]

Paramètres du roulement

Coefficient de frottement

Valeur k : 0.65 [-] Variabilité Δ_k : 12 [%]

Vitesse limite $V_{k(lim)}$: 10 [m/s] Variabilité limite $\Delta_k(lim)$: 10 [%]

Paramètres des transitions

Transitions FF \rightarrow R et R \rightarrow FF (cas aigu)

Angle β_{lim} : 5 [°]

Transition R \rightarrow FF (cas obtus)

Angle $\beta_{lim'}$: 40 [°]

Figure 49 – Modèle trajectographique : à gauche, distribution des types de sol, à droite caractéristiques correspondantes

Calage initial

Le modèle a tout d'abord été calé avec les observations de terrains

Zone de départ	Simulations Nombre de blocs générés	Altitude ligne de départ des blocs	Volume considéré	Hauteur initiale de chutes de blocs
Zone de départ éboulement	10000	1 400	3 m ³ forme cylindrique	3 m

Résultats

Les résultats donnent une limite de blocs aval s'arrêtant toujours and le thalweg sans menace directe pour les différents tapis :

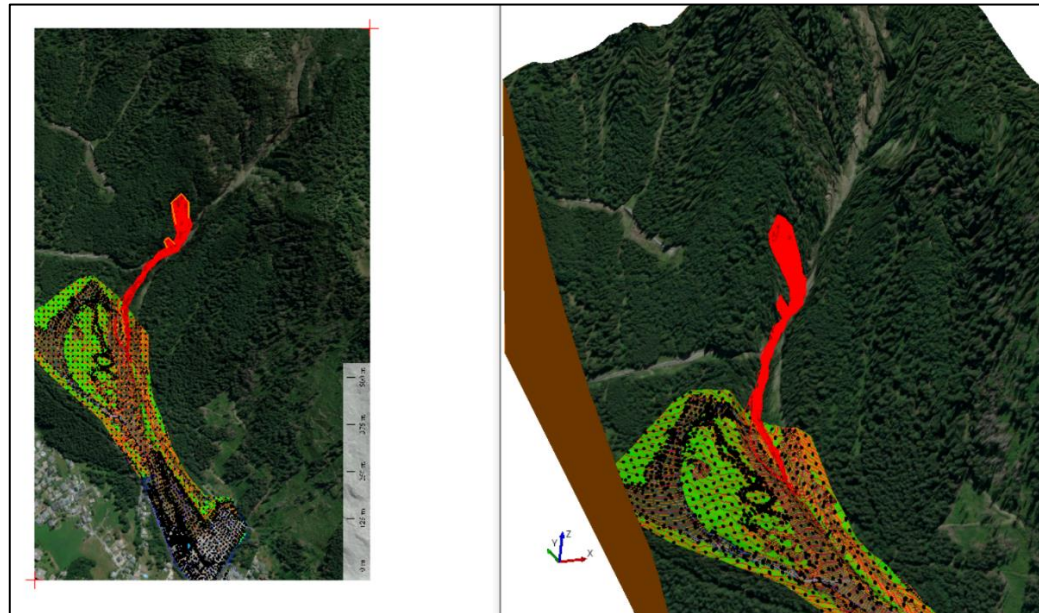


Figure 50 – Vue des différentes trajectoires calculées

CONCLUSIONS GENERALES

Comme indiqué précédemment concernant les avalanches et les chutes de blocs, aucune prescription particulière n'est directement nécessaire quant à la conception des tapis projetés [o] dont la faisabilité n'est donc pas remise en cause de ces points de vue.

En revanche, un certain nombre de mesures d'accompagnement sont conseillées :

Tout d'abord, il est important que ce thalweg, clairement identifié comme ouvrage de protection dans le PPR puisse faire l'objet d'un programme d'entretien régulier pour évacuer les volumes parasites et maintenir la raideur du parement extérieur, paramètres principaux de son efficacité. Ceci inclut également l'ouvrage de fermeture à l'extrémité aval du dispositif. Ce point est primordial pour les avalanches mais aussi pour les autres écoulements gravitaires : laves torrentielles, phénomènes mixtes.

Comme le montrent les événements récents mais aussi les modélisations présentées précédemment, des débordements localisés/parasites sont toujours possibles qu'il s'agit donc de limiter par cet entretien régulier en gardant à l'esprit qu'au-delà des infrastructures, finalement peu menacées, ce site est aussi largement parcouru par le public.

A ce titre et même si les phénomènes avalancheux de printemps constatés parmi les derniers événements remarquables sont potentiellement mal influencés par le déclenchement préventif (en plus d'être "hors saison"), il n'en reste pas moins qu'ils sont issus du manteau neigeux accumulé tout au long de l'hiver, qui, lui, dépend directement des accumulations et donc des purges tout au long de l'hiver : l'activation du PIDA ne doit pas seulement viser la sécurité des jours ou heures suivantes mais bien la minimisation du manteau neigeux tout au long de la saison. Une gestion proactive des déclenchements reste donc nécessaire dans tous les cas.

Enfin, une attention particulière, sûrement conjointement avec la commission de sécurité communale, est à porter au versant de Blaitière dont la problématique dépasse les seuls enjeux des Planards. Ce versant est désormais assez largement déboisé (Figure 2) suite à la tempête de 2012 et au nettoyage qui a été opéré qui

a en plus gommé l'essentiel de la rugosité : les pentes correspondantes sont marquées (Figure 24) et si elles ne sont pas encore spécialement manifestées du point de vue avalancheux, elles sont potentiellement propices à des écoulements plus ou moins importants qui atteindraient la partie est du parking. Dans les périodes particulièrement instables, ce secteur sud-est est donc à surveiller de près voire à fermer tant que la situation reste sensible.

Concernant les chutes de blocs à cet endroit, l'érection d'un petit merlon de 1m50 de haut au bord du parking permettra de capter les quelques blocs roulant qui peuvent ici atteindre le bas du versant.

ANNEXES

ANNEXE 1 - CONDITIONS GENERALES DE VENTE

NORME NF P 94-500 – MISSIONS TYPE D'INGENIERIE

GEOTECHNIQUE



CONDITIONS GENERALES DE VENTE

OBLIGATIONS CONTRACTUELLES

Les obligations contractuelles des parties sont régies par les présentes conditions générales applicables à toutes les prestations effectuées par PYRITE INGENIERIE.

La signature par le Client du présent contrat implique son adhésion à l'ensemble des clauses sans réserve, comme indiqué dans le cadre « signature ».

Obligations du BET

PYRITE INGENIERIE est tenu à une obligation de moyens et réalisera les missions décrites dans le présent contrat, en respectant les documents contractuels et les règles de l'art.

Obligations du client

- le Client remettra à PYRITE INGENIERIE les documents sollicités et nécessaires au bon accomplissement de sa mission.
- l'étude sera réalisée sur la base de ces documents. Ainsi, le client s'engage à signaler à PYRITE INGENIERIE tout changement dans l'implantation, la conception, l'importance des constructions. De même il informera PYRITE INGENIERIE tout incident survenu en cours de chantier susceptible de relever d'une problématique géotechnique.
- le Client paiera le prix des missions conformément aux modalités définies dans le présent contrat.

Le présent contrat pourra être résilié par l'une des parties, dans le cas où l'autre partie est défaillante dans l'exécution de ses obligations, à l'expiration d'un délai de deux semaines après l'envoi d'une mise en demeure par courrier recommandé, demandant la réparation de la défaillance, et restée sans effet.

En cas de résiliation par le Client, non justifiée par une défaillance du BET, le Client est engagé à indemniser PYRITE INGENIERIE de la totalité des prestations débütées suivant le détail des postes portés dans la décomposition financière.

EXECUTION DES INVESTIGATIONS DE TERRAIN

Accès au site

L'acceptation de notre proposition comprend l'autorisation d'accès au site ainsi que l'autorisation d'effectuer les investigations de terrain.

Sauf stipulation contraire portée dans la proposition technique et financière, le site est réputé accessible.

La remise en état des terrains à l'initial n'est pas incluse. Pour les puits à la pelle, il est prévu le remblaiement au mieux avec les matériaux extraits, dès la fin de cette prestation.

La responsabilité de PYRITE INGENIERIE ne saurait être engagée pour des retards consécutifs à des faits qui ne lui sont pas imputables (terrain impraticables par exemple).

Réseaux et ouvrages enterrés

Le Maître d'Ouvrage s'engage à fournir avec la commande, les plans complets de réseaux et de tout ouvrage souterrain sur la parcelle étudiée; cette recherche n'entre pas dans notre proposition, s'agissant de servitudes et non de données géologiques. Notre assurance pour dégâts accidentels à ces ouvrages et réseaux ne peut intervenir qu'à cette condition.

Le Maître d'Ouvrage conserve la charge de la réparation des désordres occasionnés en cours de sondages aux ouvrages (réseaux, canalisations...) enterrés non répertoriés ou mal implantés sur les plans fournis.

DOCUMENTS CONTRACTUELS

Les documents contractuels applicables sont :

- le présent contrat,
- la décomposition financière,
- la norme NF P4-500 dans son intégralité.

LE RAPPORT

Le rapport géotechnique constitue le compte rendu de la mission d'ingénierie défini par la commande ou le contrat. Le rapport géotechnique et ses annexes constituent un ensemble indissociable. Son utilisation même partielle par un autre maître d'ouvrage ou par un autre constructeur, ou pour un autre ouvrage que celui objet de la mission confiée, ne pourra engager la responsabilité de PYRITE INGENIERIE.



LE PRIX

Contenu du prix et validité

Le prix est établi sur la base des informations transmises au moment de l'établissement du contrat. Ce prix est valable pour une durée de 3 mois à compter de la date d'envoi du contrat.

Paiement

Le paiement se fera l'issue de chaque étape de la mission, avec un délai de paiement de 30 jours.

Les retards de paiement ouvrent droit au paiement d'intérêts moratoires au taux de l'intérêt légal augmenté de sept points.

Le donneur d'ordre se libérera des sommes dues par lui, en faisant crédit au compte ouvert au nom de PYRITE INGENIERIE.

RESPONSABILITE ET ASSURANCE

Responsabilité de PYRITE INGENIERIE

PYRITE INGENIERIE assume les responsabilités qu'elle engage par l'exécution de sa mission telle que décrite au présent contrat.

A ce titre, PYRITE INGENIERIE est responsable de ses prestations, dont la défecüoüité lui est imputable. Sa responsabilité ne saurait être engagée en dehors du cadre de la mission géotechnique objet de la présente proposition financière et technique.

Il est expressément convenu que pour les dommages autres que les dommages à la construction engageant la responsabilité décennale de PYRITE INGENIERIE, notre responsabilité sera limitée dans les conditions suivantes :

- la responsabilité de PYRITE INGENIERIE ne serait être engagée au delà des montants de garantie fixés à son contrat d'assurance. En outre, PYRITE INGENIERIE sera garanti par le Client, contre les conséquences de toute recherche en responsabilité de la part de tiers au présent contrat,
- dès lors qu'elles dépasseraient les montants de garanties visées ci-dessous.
- en l'absence de faute du BET, le Client assume le risque inhérent à son projet. Le Client relèvera en garantie PYRITE INGENIERIE contre les recours de tiers dans le cas de désordres sur réseaux si leur implantation ne correspondait pas aux indications renseignées par les concessionnaires.

Toute modification apportée ultérieurement à l'étude, objet du présent contrat, nécessite une nouvelle étude de faisabilité. Si la modification apparaît en phase projet, il conviendra de confier à un bet une mission comportant la faisabilité d'avant-projet et l'étude du nouveau projet. Dans ces cas de modification, l'étude, objet du présent contrat est réputée caduque. Toute utilisation de cette étude est faite sous l'entière responsabilité du Client.

Assurances

Responsabilité Civile Professionnelle et Décennale de PYRITE INGENIERIE

PYRITE INGENIERIE a souscrit un contrat d'assurance de responsabilité professionnelle auprès de QBE. Ce contrat couvre le BET sur :

- toutes les opérations de génie civil dont le coût global reste inférieur à 6 000 000 € HT
- toutes les opérations de bâtiment dont le coût global reste inférieure à 15 000 000 € HT

Montants de garantie:

➤ Dommages matériels engageant la responsabilité décennale de PYRITE INGENIERIE :

- Ouvrage de bâtiment : Coût de la construction
- Ouvrage de génie civil : Compris en dommages matériels
- Autres dommages Responsabilité civile professionnelle : 1 000 000 € / an dont
- Dommages corporels : 1 000 000 € / an
- Dommages matériels et immatériels consécutifs : 750 000 € / an
- Dommages immatériels non consécutifs : 250 000 € / an

Extension des garanties du contrat RCPro/Déc et attestation nominative de chantier

Le Client informera PYRITE INGENIERIE du cas où le coût prévisionnel de l'ouvrage est supérieur aux seuils définis ci-dessus (honoraires de maîtrise d'œuvre et bureau de contrôle compris). Si tel est le cas, l'avis de la Compagnie d'assurance devra être demandé pour validation de l'extension de garantie, et détermination de la surprime correspondante.

Le Client s'engage à prendre en charge cette surprime.

En cas de demande d'attestation nominative de chantier dans le cadre d'une opération normalement couverte par le contrat, le Client s'engage à indemniser PYRITE INGENIERIE d'une somme forfaitaire de 500 € HT.

4.2.4 - Tableaux synthétiques

Tableau 1 – Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission	Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Étude géotechnique préalable (G1)		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Étude de Site (ES)	Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisse, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)	Première adaptation des risques pour les futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)	Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)	Conception et justifications du projet	avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT	Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Études géotechniques de réalisation (G3/G4)		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage		
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Étude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)
	DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Étude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage	Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)	Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

Tableau 2 – Classification des missions d'ingénierie géotechnique

<p>L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.</p> <p>ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)</p> <p>Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :</p> <p><u>Phase Étude de Site (ES)</u></p> <p>Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.</p> <ul style="list-style-type: none"> Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours. Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs. <p><u>Phase Principes Généraux de Construction (PGC)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.</p> <ul style="list-style-type: none"> Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols). <p>ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)</p> <p>Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :</p> <p><u>Phase Avant-projet (AVP)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.</p> <ul style="list-style-type: none"> Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques. <p><u>Phase Projet (PRO)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.</p> <ul style="list-style-type: none"> Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités. <p><u>Phase DCE / ACT</u></p> <p>Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.</p> <ul style="list-style-type: none"> Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel). Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

Tableau 2 – Classification des missions d'ingénierie géotechnique

<p>ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G 4, distinctes et simultanées) ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)</p> <p>Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT. Elle comprend deux phases interactives :</p> <p><u>Phase Étude</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. • Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles). • Élaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi. <p><u>Phase Suivi</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase Étude. • Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats). • Établir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO) <p>SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)</p> <p>Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :</p> <p><u>Phase Supervision de l'étude d'exécution</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils. <p><u>Phase Supervision du suivi d'exécution</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3). • donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis pour le DIUO. <p>DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)</p> <p>Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. • Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant. • Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

ANNEXE 2 - METHODOLOGIE D'EVALUATION DU RISQUE

EVALUATION DES RISQUES D'ÉBOULEMENTS ROCHEUX (Selon les directives du LCPC)

Un risque naturel résulte du croisement de deux composantes :

Aléa de rupture x vulnérabilité = risque

1 - L'ALÉA DE RUPTURE

Le niveau **d'aléa de rupture** concerne un phénomène naturel rocheux répertorié par **classe**. On le définit à partir de la conjonction entre **l'occurrence** de déclenchement du phénomène et le **délai** dans lequel le phénomène peut se produire.

- **la classe** des instabilités (identifiée en falaise) est caractérisée par les volumes rocheux mis en jeu lors de la phase d'écroulement, conformément à la grille suivante :

Classe	Description
Chutes de pierres	Volumes unitaires inférieurs à 200 litres
Chutes de blocs	Volumes unitaires métrique à plurimétriques (dans le cas de formations massives, certains blocs peuvent dépasser les 50 m³)
Eboulements en masse limitée	Volume total en jeu inférieur à quelques centaines de m³
Eboulements en grande masse	Volume total en jeu pouvant dépasser le millier de m³
Eboulement catastrophiques	Volume total pouvant atteindre et dépasser le million de m³

Tableau 1: Définition des classes d'instabilités rocheuses et classes retenues pour le site

- L'**occurrence** est définie à la date de l'étude et concerne une probabilité de déclenchement du phénomène considéré, induit par les facteurs déterminants mesurés sur site. On distingue :

Occurrence	Notation	Description
Très élevée	TE	Tous les facteurs déterminants et de forte intensité (Occurrence du phénomène est normale, sa non occurrence serait exceptionnelle)
Elevée	E	Tous les facteurs déterminants mais de faible intensité (L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non occurrence)
Modérée	M	Tous les facteurs déterminants, sauf un. Le facteur non répertorié peut apparaître dans le temps. (L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non occurrence)
Faible	F	Les facteurs déterminants sont diffus et / ou mal définis (La non occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence)
Très faible	TF	Aucun facteur déterminant n'est visible (La non occurrence du phénomène est normale, son occurrence serait exceptionnelle)

Tableau 2: Définition des niveaux d'occurrence et niveau retenu pour le site

Les **facteurs déterminants**, pour l'étude d'un compartiment rocheux particulier concernent sa géométrie (et notamment la position de son centre de gravité par rapport à l'axe principal de la paroi), son niveau de fracturation, des données structurales telles que le pendage de la surface de décollement potentielle, le mécanisme de rupture envisagé mais aussi l'exposition aux intempéries de la zone étudiée, les indices d'évolution, la présence de végétation déstabilisante.

➤ Le délai à l'intérieur duquel le phénomène a une probabilité considérée de se produire est défini ainsi :

Délai	Notation	Description
Long terme	LT	Supérieur à 30 ans et de l'ordre du siècle
Moyen terme	MT	De l'ordre de 10 à 30 ans
Court terme	CT	De l'ordre de 2 à 10 ans
Très court terme	TCT	De l'ordre de plusieurs mois à 2 ans
Imminent	I	Prise en compte immédiate (le délai se compte en heures, jours, semaines ou mois)

Tableau 3 : Définition des niveaux de délais et niveau retenu pour le site (conformément au guide technique du LCPC)

Le délai à long terme caractérise la dérive maximale pour laquelle l'aléa est qualifiable.

Les délais sont des appréciations qui peuvent être sensiblement modifiées par des phénomènes naturels imprévisibles (événements climatiques, incendies, séismes...).

⇒ Le niveau d'aléa de rupture pour une classe de phénomène rocheux sera exprimé suivant cinq niveaux issus des combinaisons des tableaux détaillés ci-avant :

Tableau 4 : Matrice de définition de l'aléa de rupture pour les classes concernées

Aléa de rupture		Probabilité d'occurrence				
		TE = Très élevée > 90 %	E = Elevée > 70 %	M = Modérée > 50 %	F = Faible > 30 %	TF = Très faible < 30 %
Délai d'occurrence	I = Imminent < 1 mois	TE Très élevé	TE Très élevé	E Elevé	E Elevé	M Modéré
	TCT = Très court terme < 2 ans	TE Très élevé	E Elevé	E Elevé	M Modéré	M Modéré
	CT = Court terme < 10 ans	E Elevé	E Elevé	M Modéré	M Modéré	F Faible
	MT = Moyen terme < 30 ans	E Elevé	M Modéré	M Modéré	F Faible	F Faible
	LT = Long terme > 30 ans	M Modéré	M Modéré	F Faible	F Faible	TF Très faible

2 - LA VULNERABILITE

La **vulnérabilité** exprime le niveau de conséquences envisageables du phénomène naturel sur les enjeux. Elle résulte du croisement entre **l'exposition aux trajectoires** et **les dommages potentiels**.

- **L'exposition aux trajectoires** de l'enjeu est caractérisée par la probabilité d'atteinte de l'enjeu lors de la propagation des éléments rocheux.

Elle tient compte des conditions de départ, de la topographie du site, de la proximité de l'enjeu par rapport à la zone d'initiation, des obstacles naturels et artificiels pouvant être rencontrés, et des éventuels indices d'anciennes propagations.

Sa définition est basée sur les résultats d'une simulation trajectographique ou, le cas échéant, sur l'appréciation d'un expert (approche qualitative). Elle est définie de la manière suivante :

	Classe d'exposition
Très faible	<i>Approche qualitative</i> : L'atteinte de l'enjeu par une trajectoire semble impossible <i>Approche trajectographique</i> : Inférieur à 1 bloc sur 1 000 000, soit $<10^{-6}$
Faible	<i>Approche qualitative</i> : L'atteinte de l'enjeu par une trajectoire serait considérée comme exceptionnelle <i>Approche trajectographique</i> : De 1 bloc sur 10 000 à 1 bloc sur 1 000 000, soit de 10^{-4} à 10^{-6}
Moyenne	<i>Approche qualitative</i> : La probabilité d'atteinte de l'enjeu par une trajectoire est plus faible que la probabilité de ne pas l'atteindre <i>Approche trajectographique</i> : De 1 bloc sur 100 à 1 bloc sur 10 000, soit de 10^{-2} à 10^{-4}
Importante	<i>Approche qualitative</i> : La probabilité d'atteinte de l'enjeu par une trajectoire est plus forte que la probabilité de ne pas l'atteindre <i>Approche trajectographique</i> : De 1 bloc sur 2 à 1 bloc sur 100, soit de 50% à 1% (10^{-2})
Très importante	<i>Approche qualitative</i> : L'atteinte de l'enjeu par une trajectoire semble garantie <i>Approche trajectographique</i> : Supérieur à 1 bloc sur 2, soit $> 50\%$

Tableau 1: Définition des classes d'exposition et classe retenue pour le site

- **Les dommages potentiels** sont les dommages associés pouvant être subis par les enjeux, et dépendent donc de la classe de l'instabilité.

Il existe différents enjeux susceptibles d'être touchés par des trajectoires de blocs, on distingue :

- les infrastructures (routes, voies ferrées, réseaux divers...),
- les bâtiments (maisons individuelles, lotissements, immeubles...),
- les personnes (accès bâtiments, jardins, cheminement piéton, GR...).

Remarque : ce dernier enjeu doit être pris en compte lorsque des personnes peuvent être directement exposées aux trajectoires.

Les dommages potentiels seront exprimés suivant quatre niveaux d'intensité (cf. tableau page suivante).

Enjeux			Dommages potentiels
Infrastructures	Bâtiments	Personnes	
Le phénomène conduirait à des dégâts limités (endommagement de la structure, impact de faible intensité sur une partie de l'ouvrage sans coupure à prévoir).	Endommagement de toitures, impact de mur sans perforation.	Hors du cas de figure de passages ponctuels sous une zone concernée par des phénomènes de chutes de pierres et de blocs, les dommages potentiels seront toujours <u>très importants en cas d'exposition directe et prolongée de personnes.</u>	Limités
Le phénomène conduirait à une destruction partielle (endommagement et/ou percussion sans destruction complète). Il peut conduire à la coupure ponctuelle d'un axe à caractère économique important.	Percussion avec destruction <u>d'une petite partie</u> du bâtiment (perforation du toit ou du mur)		Modérés
Le phénomène conduirait à la destruction de l'enjeu (destruction ou écrasement complet, impacts multiples de pierres ou destruction complète de la structure). Le phénomène peut avoir des répercussions économiques très importantes (fermeture sur une longue période).	Destruction ou écrasement complet ou en grande partie de bâtiments, impacts multiples de pierres ou de blocs sur un mur avec perforation certaine.		Importants
	Le phénomène conduirait à la destruction de l'enjeu et concerne plusieurs bâtiments (plusieurs parcelles) ou des constructions à forte densité de population (immeubles...)		Très importants

Tableau 2: Définition des classes d'enjeux et classe retenue pour le site

⇒ La **vulnérabilité** pour un enjeu donné sera exprimée suivant cinq niveaux issus des combinaisons des tableaux détaillés ci-avant :

Vulnérabilité		Exposition aux trajectoires				
		Très importante	Importante	Moyenne	Faible	Très faible
Dommages potentiels	Très importants	TF Très forte	TF Très forte	F Forte	M Moyenne	FA Faible
	Importants	TF Très forte	F Forte	F Forte	M Moyenne	FA Faible
	Modérés	F Forte	M Moyenne	M Moyenne	FA Faible	TF Très faible
	Limités	M Moyenne	M Moyenne	FA Faible	TF Très faible	

Tableau 7– Matrice des niveaux de vulnérabilité

3 – DETERMINATION DU RISQUE

Le niveau de risque est déterminé par croisement entre la vulnérabilité et le niveau d'aléa de rupture.

Il est exprimé suivant cinq niveaux d'intensité :

Risque résultant		Aléa de rupture				
		TE = Très élevé	E = Elevé	M = Modéré	F = Faible	TF = Très faible
Vulnérabilité	TF = Très forte	Très fort	Très fort	Fort	Moyen	Faible
	F = Forte	Fort	Fort	Fort	Moyen	Faible
	M = Moyenne	Fort	Moyen	Moyen	Faible	Très faible
	FA = Faible	Moyen	Moyen	Faible	Très faible	
	TF = Très Faible	Faible	Faible	Très faible		

Tableau 8 – Matrice du risque résultant