

Etude de risques naturels pour la DAET concernant le TSD6 Comborcière

ADS Les Arcs



Réf affaire : 2016-SY-73-27

Contact : sebastien.yvart@arias-montagne.com / 06 51 50 34 63

INDICE	DATE	NATURE DU DOCUMENT	AUTEUR	VERIFICATEUR	APPROBATEUR
A	12/2016	Première édition	S.YVART	L.MUQUET	S.ALLAIN
B	12/2016	MAJ Plan MOA	S.YVART	L.MUQUET	S.ALLAIN

SOMMAIRE

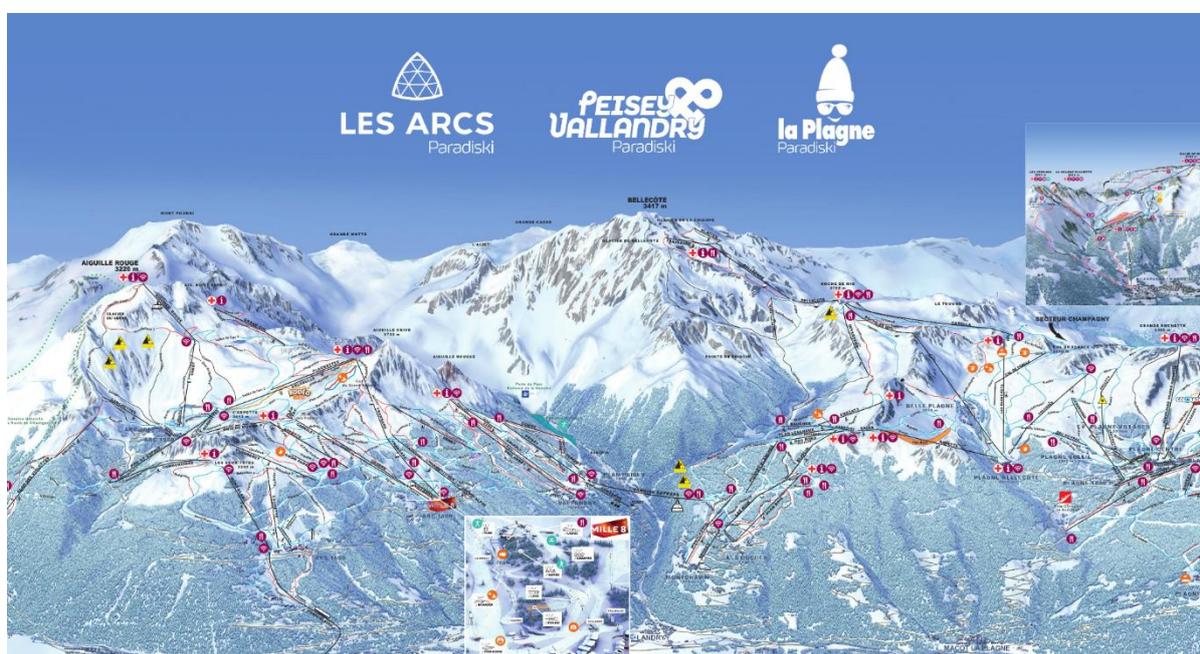
1	PREAMBULE.....	3
2	INDICATIONS TECHNIQUES PRELIMINAIRES.....	4
2.1	PERIMETRE DE L'ETUDE.....	4
2.2	SUPPORTS TOPOGRAPHIQUES.....	5
2.3	JALONNAGE.....	5
2.4	INDICATIONS GEOMETRIQUES.....	5
2.5	LOGICIEL DE TRAJECTOGRAPHIE.....	5
3	GEOMORPHOLOGIE.....	6
3.1	GEOLOGIE.....	6
4	TRACE ENVISAGE DU TSD COMBORSIERE.....	7
5	CHUTES DE BLOCS.....	9
5.1	GARES DE DEPART ET D'ARRIVEE.....	9
5.1.1	<i>Gare de départ.....</i>	9
5.1.2	<i>Gare d'arrivée.....</i>	10
5.2	PYLONES.....	11
5.2.1	<i>Le flanc Est de la Pointe du Four.....</i>	11
5.2.2	<i>Le flanc Nord de la crête Four – Fond Blanc.....</i>	18
5.2.3	<i>Le plateau des Deux Têtes.....</i>	19
5.2.4	<i>Le cas de la combe n°3 (piste Comborcière).....</i>	19
6	MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	20
7	CRUES TORRENTIELLES.....	21
8	CONCLUSIONS.....	22
8.1.1	<i>Chutes de blocs.....</i>	22
8.1.2	<i>Glissements de terrain.....</i>	22
8.1.3	<i>Crues torrentielles.....</i>	22
8.1.4	<i>Limites de cette étude.....</i>	23

1 PREAMBULE

La présente étude est réalisée à la demande et pour le compte de ADS Domaine Skiable des Arcs / Peisey Vallandry.

Dans le cadre de la construction d'un nouveau télésiège (TSD4 ou TSD6 Comborcière) en remplacement de l'actuelle remontée (TSF3 Comborcière), le domaine skiable des Arcs a confié à Arias Montagne l'étude des risques naturels concernant les chutes de blocs, les glissements de terrain et les crues torrentielles pour l'élaboration de la Demande d'Autorisation d'Exécution des Travaux (DAET) relative à ce projet.

A la date de la réalisation de cette étude, le tracé de la future ligne n'est pas définitif (ni au niveau de la position des gares de départ et d'arrivée, ni au niveau de l'axe de ligne, ni au niveau de la position des pylônes).



L'objectif de cette étude est donc de se prononcer sur la faisabilité du projet vis-à-vis des risques naturels suivants :

- Chutes de blocs rocheux,
- Glissements ou mouvements de terrain,
- Crues torrentielles.

A noter que la partie avalanches a été confiée à un bureau d'études spécialisé et fait l'objet d'un rapport indépendant.

Une visite de terrain a été réalisée le 02 novembre 2016 par le bureau d'études Arias Montagne.

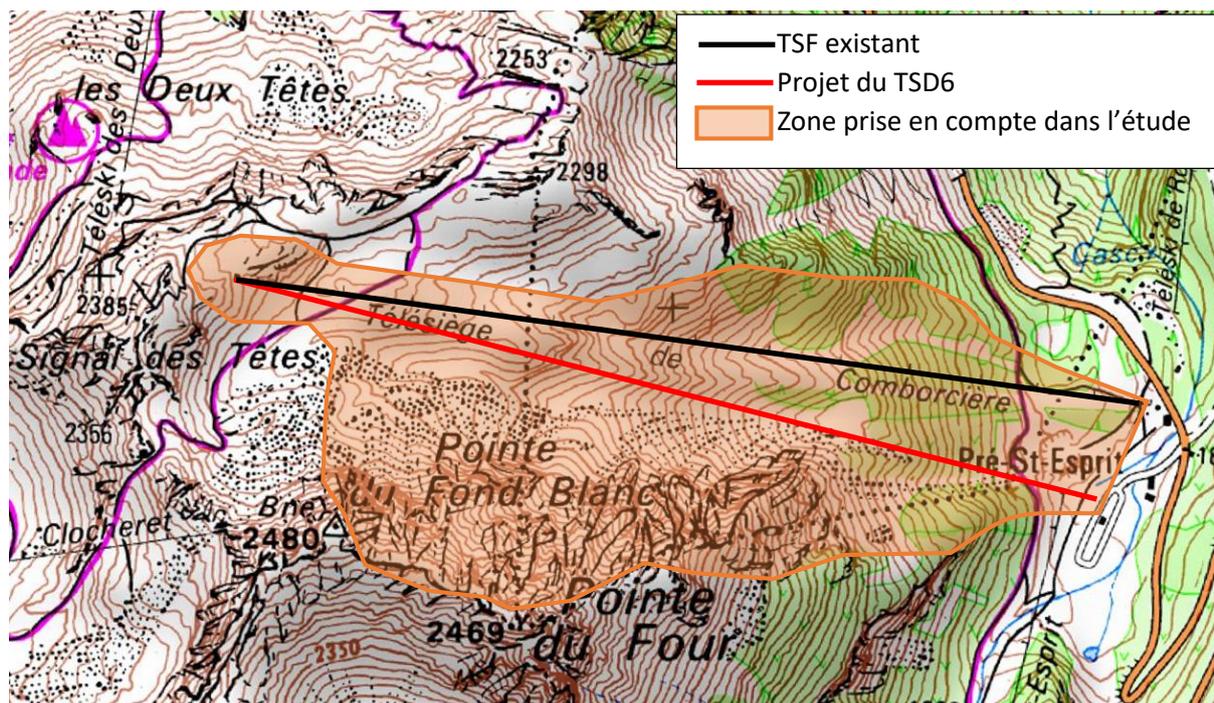
Ce document et ses annexes constituent un tout indissociable pour leur exploitation ; ils appartiennent au domaine skiable des Arcs / Peisey Vallandry.

2 INDICATIONS TECHNIQUES PRELIMINAIRES

2.1 Périmètre de l'étude

Notre étude concerne la combe (non nommée sur IGN mais appelée Comborcière dans ce rapport) qui remonte le versant sous la Pointe de Fond Blanc, depuis le Pré Saint Esprit jusqu'au replat à l'Est du Signal des Têtes.

Sont donc pris en compte la vaste paroi rocheuse qui soutient la Pointe du Four et la Pointe de Fond Blanc ainsi que les nombreux pointements rocheux sur les deux rives de la Comborcière.



Plan de localisation de la zone d'étude (source Géoportail)



2.2 Supports topographiques

Dans le cadre de cette étude, les services techniques des Arcs nous ont fourni un plan topographique couvrant le tracé actuel et le tracé projeté, établi par le cabinet de géomètres experts Géode. [réf : 22739, en date du 16/11/2016].

A la suite de l'indice A, les services techniques nous ont fourni un plan de masse de la piste de jonction entre le bas de Comborcière et la gare de départ du TSD6 Pré Saint Esprit [réf : Géode, plan 03-3, affaire 22823, ind A en date du 6/12/2016].

2.3 Jalonnage

Le projet est encore au stade esquisse. Il n'y a donc pas de jalonnage sur le terrain.

2.4 Indications géométriques

Les angles énoncés sont donnés en degrés par rapport à l'horizontale.

Les indications **droite et gauche** sont données en regardant le versant depuis le bas (ou lorsque l'on regarde la zone décrite depuis l'aval).

Le terme **largeur (Larg.)** est une mesure prise dans une direction parallèle aux courbes de niveau. Le terme **épaisseur (Epais.)** indique une mesure prise perpendiculairement à l'axe de la plus grande pente ou au plan de glissement de la zone étudiée.

Le terme **hauteur (Haut.)** correspond à la différence d'altitude entre la base et le sommet de la zone décrite ou une mesure prise parallèlement à l'axe de la plus grande pente ou au plan de glissement de la zone étudiée. Les termes rive droite (**RD**) et rive gauche (**RG**) correspondent au sens orographique.

2.5 Logiciel de trajectographie

Dans le cadre de cette étude, des modélisations trajectographiques 2D ont été réalisées.

Le logiciel utilisé est Drop2D, développé par Arias Montagne.

La notice technique du logiciel se trouve en annexe de cette étude.

3 GEOMORPHOLOGIE

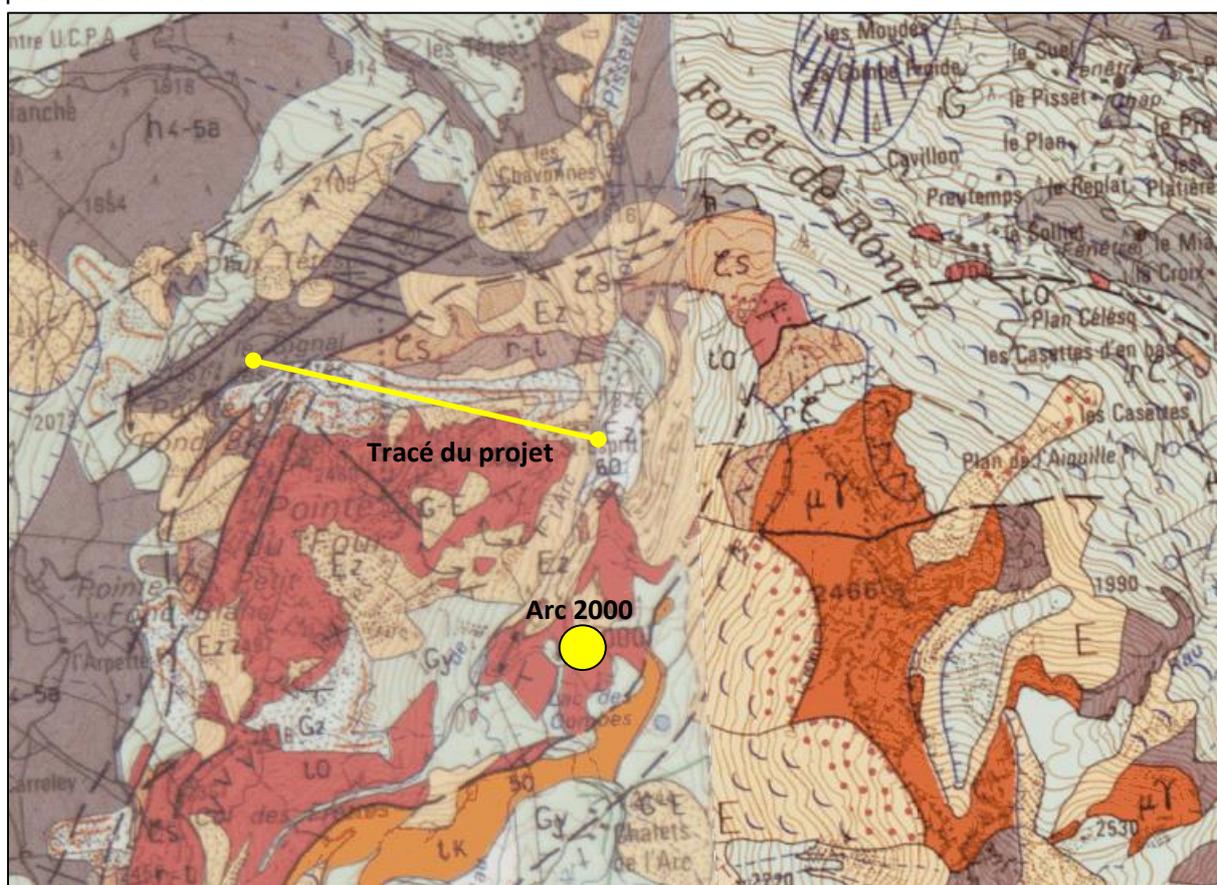
3.1 Géologie

Les terrains rencontrés le long du tracé sont influencés par deux unités géologiques issues de la Zone Briançonnaise.

A l'aval, et jusqu'à 2100 m, le tracé longe des falaises et des ressauts rocheux entrecoupés de couloirs issus de la Pointe des Fours. Il s'agit de Quartzite triasique (Ere secondaire) constitué par une roche claire et massive. Intensément fracturée, elle a donné naissance aux vastes dépôts d'éboulis qui longent le flanc Sud du tracé envisagé.

Au sommet, le tracé aboutit à des niveaux rocheux datant de l'Ere primaire, il s'agit de grès du Carbonifère supérieur formant des pointements rocheux avec un débit en gros blocs caractéristiques.

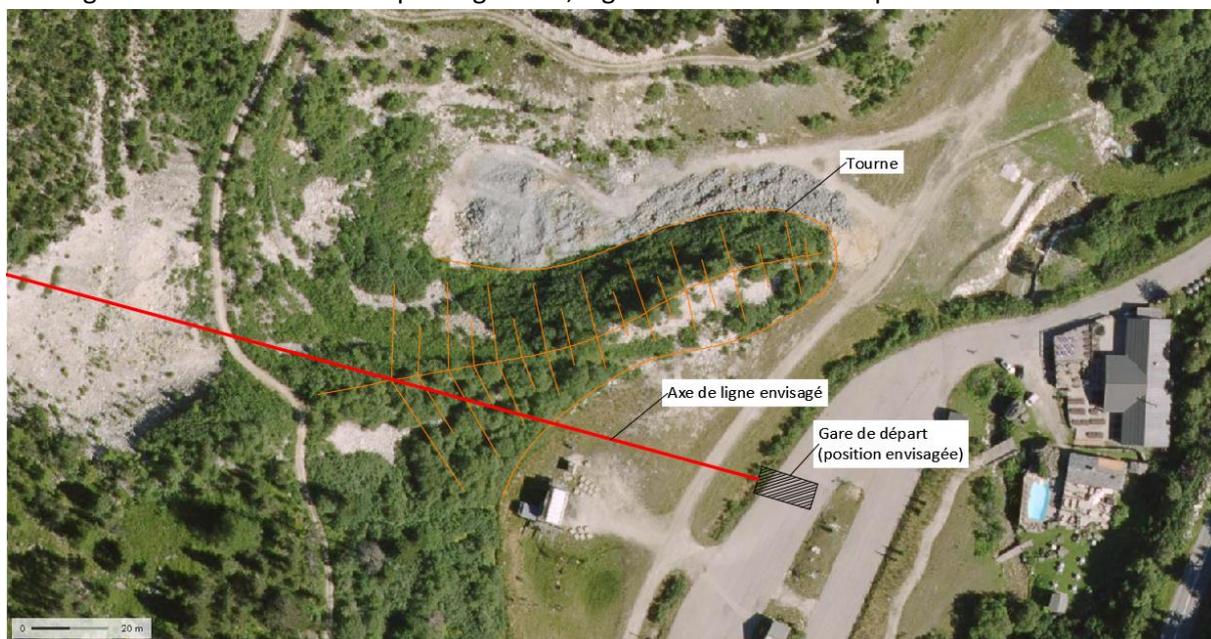
Localement, notamment vers le Pré Saint Esprit, le tracé recoupe des niveaux d'éboulis et de moraines peu consolidées.



Extrait de la carte géologique (source : Infoterre ©)

4 TRACE ENVISAGE DU TSD COMBORSIERE

La gare de départ du TSD est prévue au niveau du Pré Saint Esprit (altitude 1830 m). Son emplacement envisagé se trouve au niveau du parking actuel, à gauche de la tourne exploitée.



La gare d'arrivée se situera sensiblement au niveau de la gare du TSF existante, sur le replat rocheux du Signal des Têtes (alt. 2315 m).

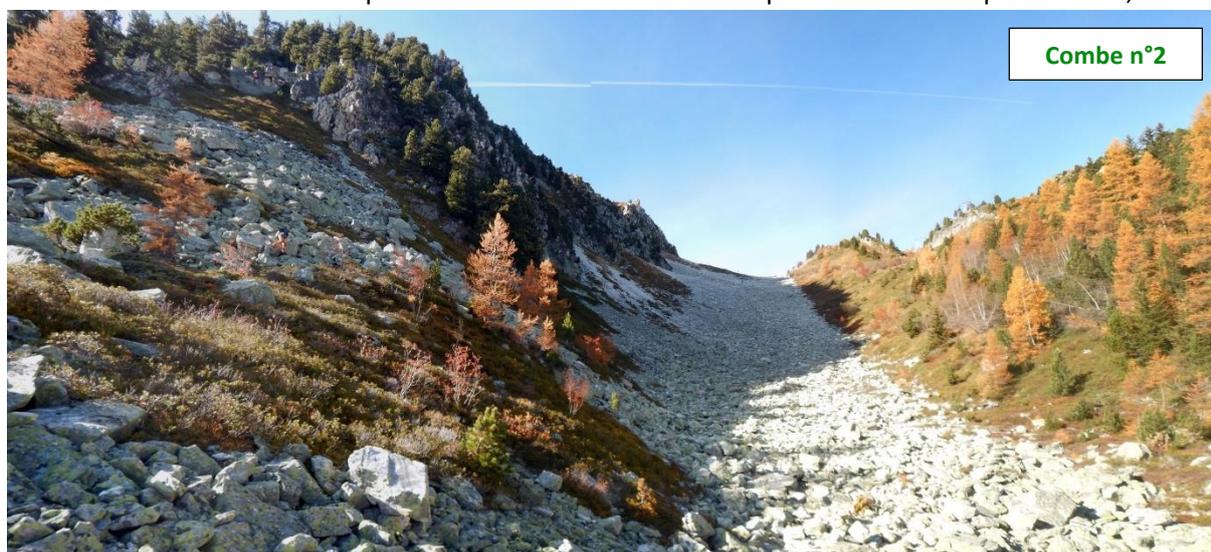


La ligne envisagée franchira ainsi successivement trois combes plus ou moins importantes :

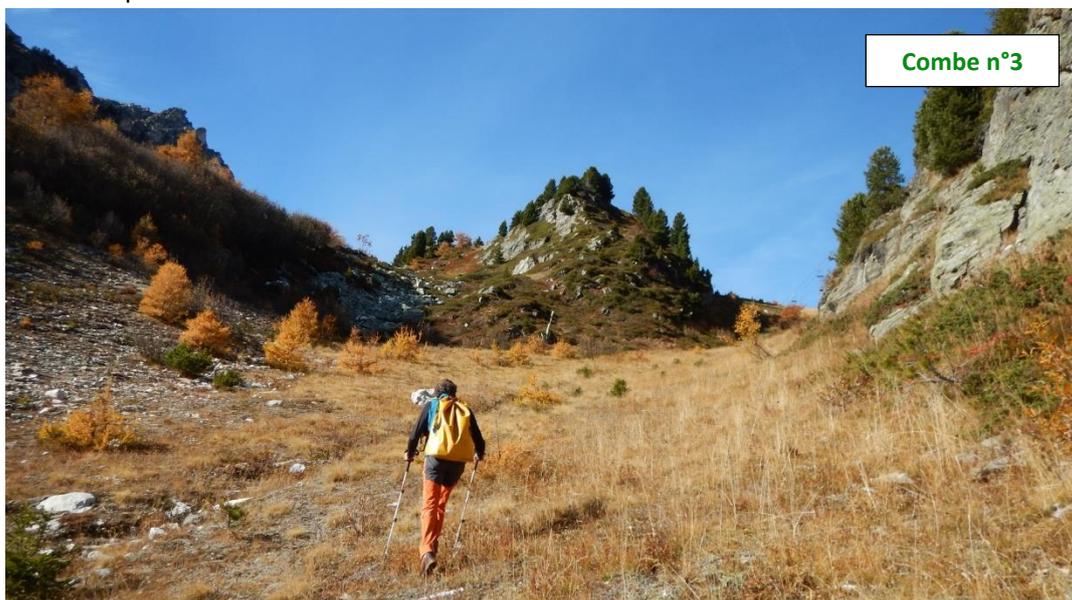
- La première démarre en haut du versant E-NE de la Pointe du Four et aboutit dans la tourne (sorte de « carrière » exploitée). Elle dénivelle sur près 500 m ;



- La seconde, la plus large, longe le pied des vastes parois rocheuses sous la Pointe du Fond Blanc : elle s'étend depuis le collu 2270 m et s'interrompt au niveau du replat 2000 m,



- La dernière, aux reliefs nettement plus adoucis, se situe sous le tracé du TSF actuel. En hiver, c'est la piste de ski de Comborcière.

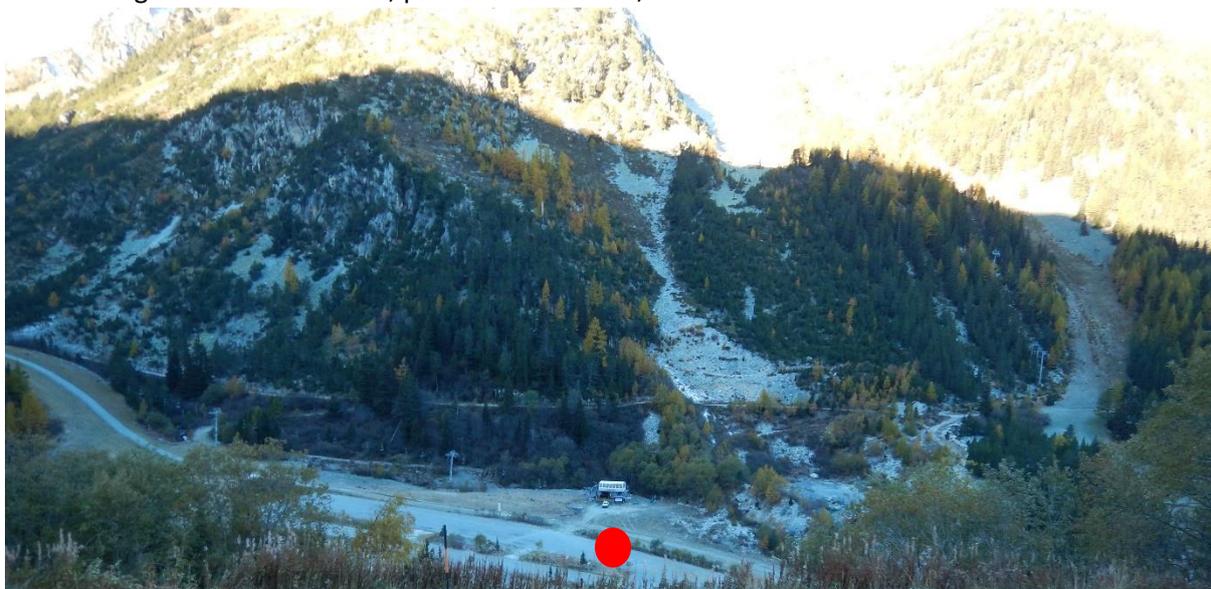


5 CHUTES DE BLOCS

5.1 Gares de départ et d'arrivée

5.1.1 Gare de départ

Elle est pressentie se situer sur le vaste replat (actuel parking) du Pré Saint Esprit, à l'altitude 1830 m. La formation rocheuse qui concerne potentiellement cette gare est le ressaut inférieur de la pointe du Four : il s'agit d'un raide versant, partiellement boisé, sous le flanc Est de la Pointe.



Vue du Pré Saint Esprit (gare de départ au niveau du point rouge)

La position envisagée de la gare de départ est située à près de 60 m du pied de ce versant et séparée de celui-ci par une zone quasi plate.

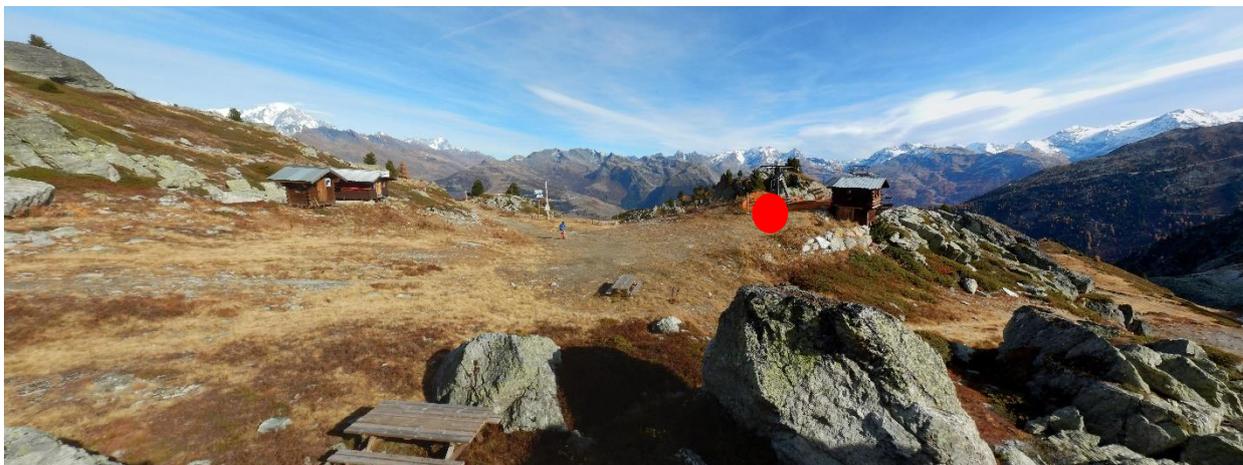
Au nord, la tourne la met à l'écart des trajectoires des blocs qui emprunteraient la première combe. Compte tenu de ces remarques, sur la position actuellement prévue, la gare de départ est à l'écart des chutes de blocs.

On peut envisager d'élargir ce périmètre où la gare n'est pas exposée : en direction de l'Est et du Sud, sans autre restriction que la place disponible, la limite sud étant la gare de départ du nouveau TSD6 Pré Saint Esprit. Vers le Nord, la tourne va jouer son rôle de protection, le déplacement de la gare est également possible.

Vers l'Ouest, la marge de manœuvre est plus restreinte. En effet en se rapprochant du versant on augmente le risque de se retrouver dans la zone de propagation des trajectoires ; par ailleurs, la tourne a ici un rôle paradoxalement défavorable sur sa partie haute : des trajectoires qui divergent depuis la combe n°1 peuvent bénéficier d'un « effet tremplin » et franchir ainsi la protection.

5.1.2 Gare d'arrivée

Elle est prévue, tout comme la gare d'arrivée de l'actuel TSD Comborcière, sous le Signal des Têtes : il s'agit d'un petit plateau rocheux, vers l'altitude 2315 m.



Vue du plateau sous le Signal des Têtes (gare d'arrivée au niveau du point rouge)

Le risque de chutes de blocs est ici limité aux ressauts rocheux qui parsèment le plateau. Comme il s'agit de ressauts de hauteur modérée, le risque de propagation est réduit. En conservant une distance raisonnable de l'ordre de 10 m par rapport aux pieds de ces petites parois, le risque est faible. En conséquence, la gare d'arrivée telle qu'envisagée est à l'abri des chutes de blocs.

5.2 Pylônes

Le tracé de la ligne n'étant pas connu et donc à fortiori la position des pylônes non plus, nous avons réalisé un zonage du risque de chutes de blocs tout au long des reliefs traversés par le projet de ligne.

On peut distinguer plusieurs zones de départ et de propagation qui concerne le tracé.

5.2.1 Le flanc Est de la Pointe du Four

Il s'agit du vaste éperon rocheux, raide, strié de nombreuses vives et couloirs qui domine directement le bas de la Comborcière, dans l'axe de la tourne. La zone de départ potentielle s'élève sur plusieurs dizaines de mètres de hauteur, dans un agencement complexe et très fracturé allant de la dalle inclinée aux ressauts verticaux.



Exemple de ressauts très fracturés



Bloc massif instable



Colonne en bascule

Deux axes de propagation préférentiels concernent potentiellement le projet :

- La combe ENE (que l'on a appelé combe n°1), qui aboutit à la tourne et dénivelé sur près de 500 m. Sur presque toute sa longueur, cette combe est encombrée de blocs de toutes tailles (de la pierre de quelques litres au bloc de 2 m³), qui témoignent du caractère actif de cette portion de falaise.



Deux visions des terrains de la combe n°1

- Un couloir plus court (mais également plus raide), qui aboutit au pied de la combe n°2, sur un vaste pierrier à gros blocs, assez plat.



Le couloir depuis le haut

On peut rencontrer ici deux problématiques liées aux chutes de blocs : une atteinte des pylônes s'ils sont dans l'emprise de la propagation mais aussi une atteinte du gabarit des sièges dans la partie basse de la combe n°1. La configuration du terrain peut laisser à penser que les rebonds très dynamiques des blocs à ce niveau peuvent atteindre des hauteurs conséquentes qui peuvent menacer la ligne et les sièges.

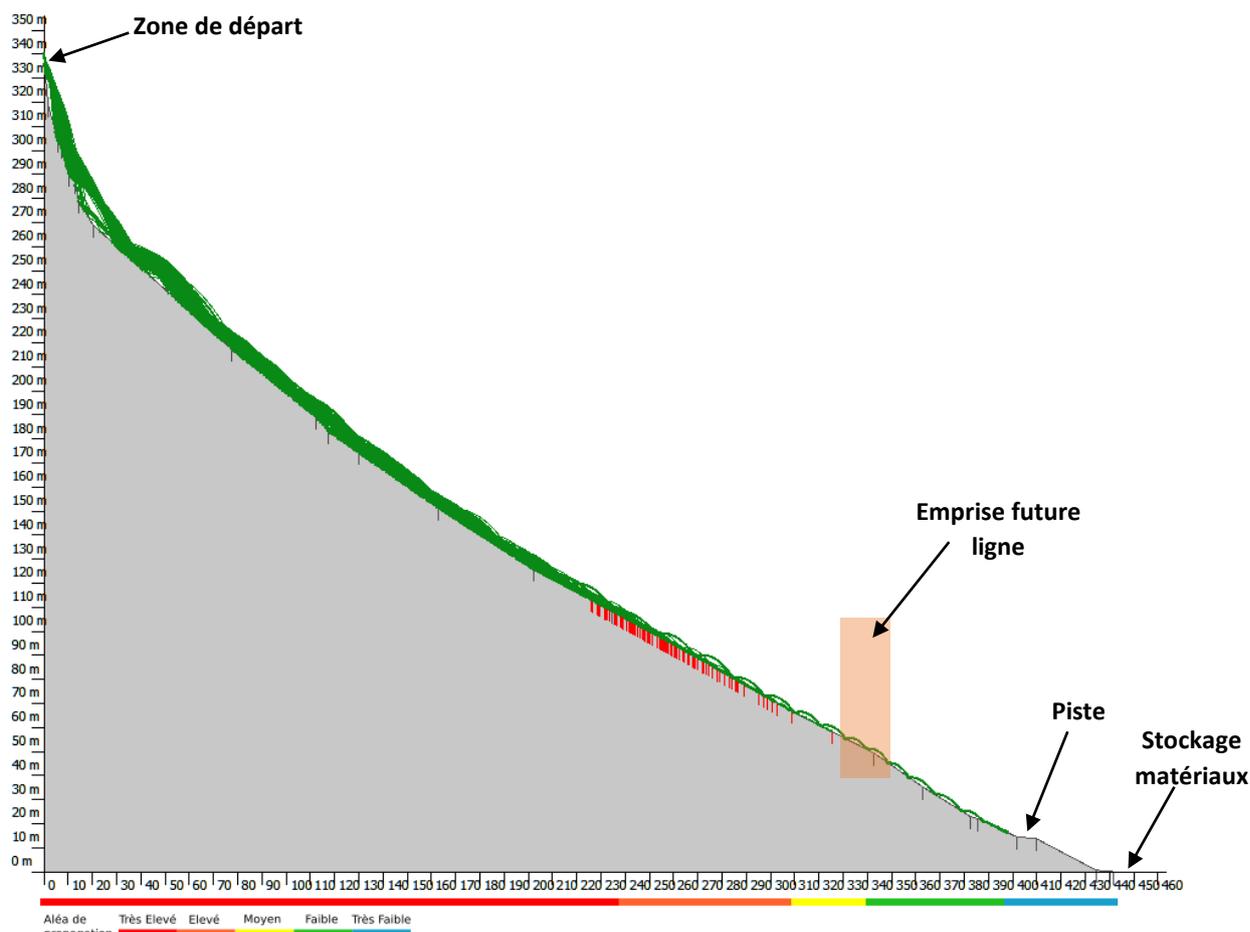
Plusieurs profils de terrain ont été relevés dans cette zone et ont été utilisés pour des modélisations trajectographiques. L'objectif est à la fois de définir la zone qui peut être atteinte par des blocs rocheux mais également d'avoir des hauteurs et des énergies de passage au long de la propagation pour également faire un « zonage vertical » du risque lié aux chutes de blocs.



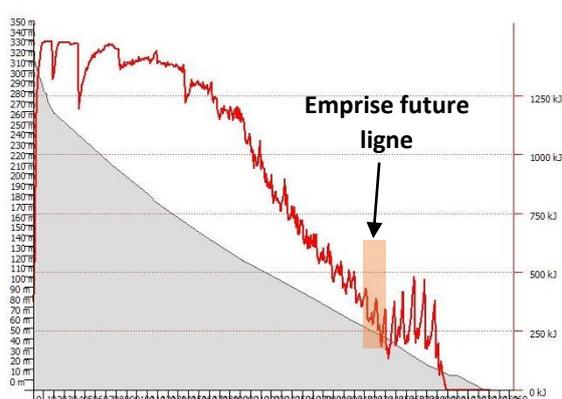
Positions des trois profils utilisés

P1 représente la combe n°1, P2 et P3 le couloir qui aboutit dans la combe n°2 (les trajectoires peuvent diverger en fin de parcours, c'est pourquoi nous avons distingué deux profils).

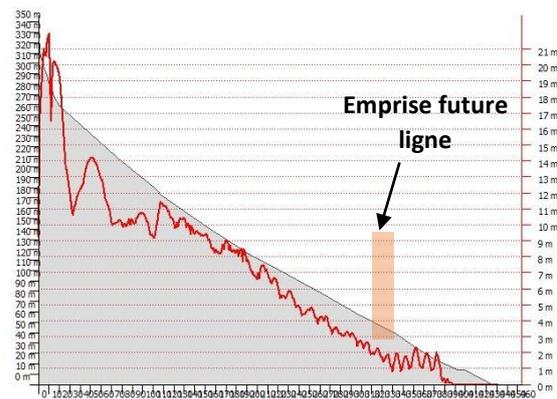
Profil P1 :



Les modélisations indiquent que les blocs peuvent atteindre la position de la piste horizontale juste en sommet de l'aire de stockage des matériaux (contenue dans la tourne). L'emprise de la future ligne est en zone d'aléa de propagation qualifié de moyen.



Graphe des énergies



Graphe des hauteurs

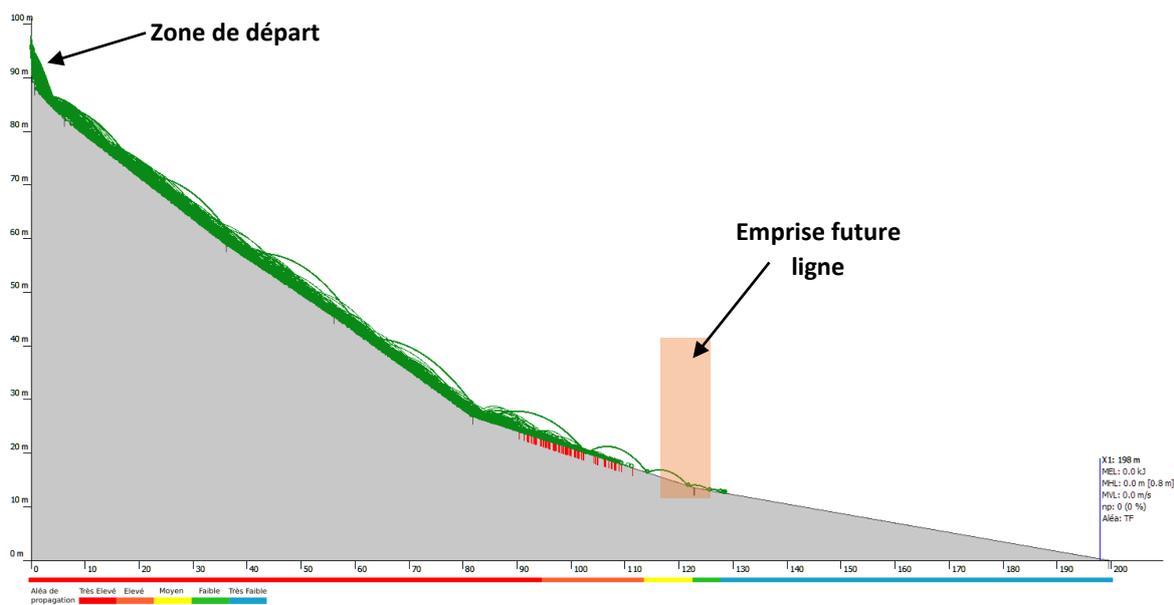
Les graphes de distribution indiquent que la position approximative de la future ligne est concernée par des énergies autour de 400 kJ maximum et des hauteurs de passage de l'ordre de 2 à 3 m.

Ces énergies sont déjà conséquentes et en cas d'impacts, les pylônes seront probablement fortement endommagés. En ce qui concerne les hauteurs de passage, la position des pylônes devra être définie

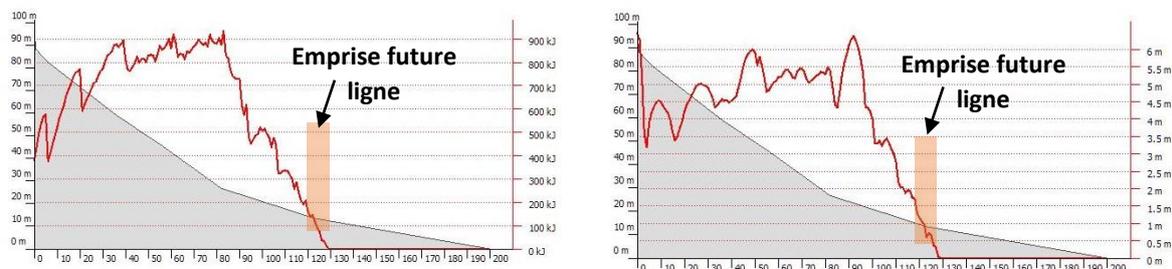
telle que le bas du gabarit des sièges se trouve toujours hors d'atteinte (soit plus de 5 m en tenant compte de la hauteur de passage, de la hauteur du bloc et d'une marge de sécurité de 1 m).

En conséquence, dans ce secteur (c'est-à-dire le bas de la combe n°1), l'implantation des pylônes est envisageable à condition de prévoir la réalisation d'ouvrages de sécurisation en amont et de respecter la hauteur de ligne par rapport au TN.

Profil P2 :



Le calcul montre que la position de la future ligne se situe en aléa de propagation moyen.



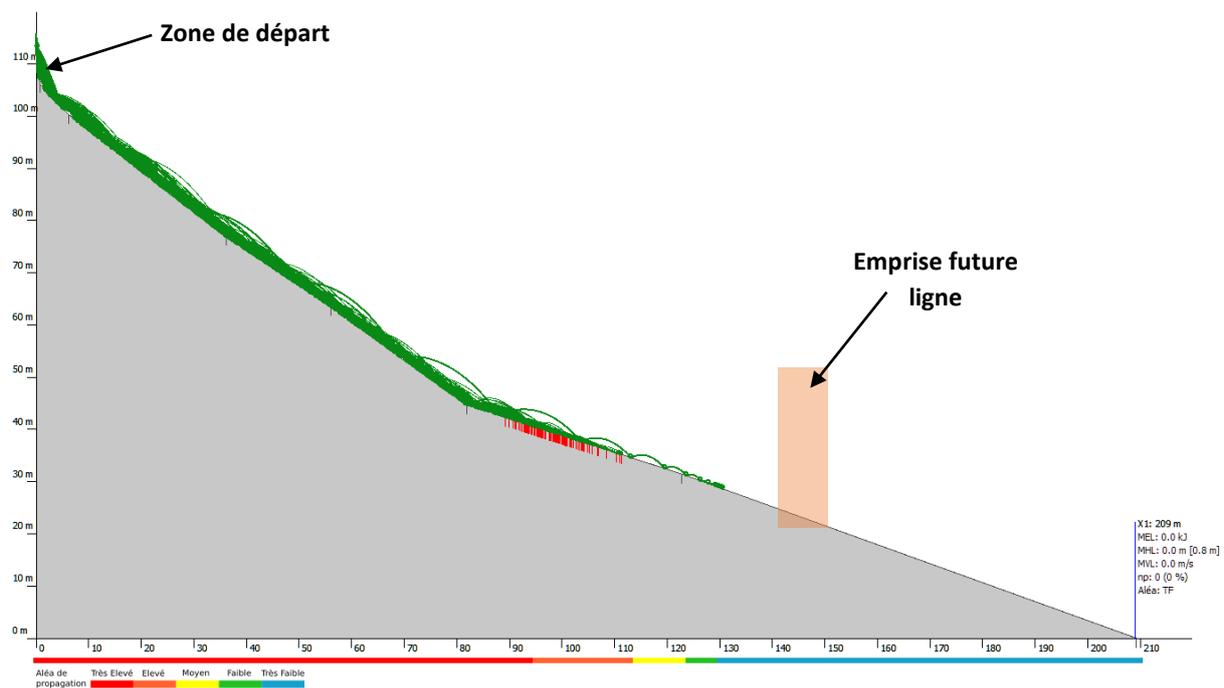
Graphe des énergies

Graphe des hauteurs

Les graphes de distribution indiquent que l'emprise de la future ligne est concernée par des énergies de l'ordre de 200 kJ et des hauteurs de passage de 2 à 2,5 m.

Ici également, ces énergies sont suffisantes pour générer des dommages importants en cas d'impact sur les pylônes. On veillera aussi à ce que la hauteur entre le terrain et le bas du gabarit des sièges soit au minimum de 4.5 m (hauteur de passage + hauteur des blocs + marge de sécurité).

En conséquence, le positionnement des pylônes est ici possible, sous réserve de prévoir des ouvrages de protection en amont.

Profil P3 :

Les simulations trajectographiques indiquent que l'emprise de la future ligne se situe en zone d'aléa de propagation qualifiée de très faible.

5.2.2 Le flanc Nord de la crête Four – Fond Blanc

On parle ici de l'imposante paroi rocheuse, longue de près de 800 m, qui forme le versant Nord de la crête Four – Fond Blanc. Haute en moyenne de 150 m, elle est bordée à son pied par un impressionnant pierrier concave. La blocométrie est assez homogène et de l'ordre du mètre cube.



Le pierrier depuis l'aval

Sur la falaise en elle-même on observe de très nombreuses cicatrices d'éboulements. Sur le pierrier, de nombreux cônes de déjection plus clairs indiquent aussi une activité importante en terme de chutes de blocs.



Cônes (à gauche) et cicatrices (à droite)

Dans cette zone, l'extension du pierrier est un excellent indicateur de la zone concernée par les chutes de blocs.

Il faudra donc s'abstenir d'y positionner des pylônes.

Le tracé envisagé traverse ce pierrier à l'extrémité de sa partie inférieure et exploite la crête herbeuse qui forme la rive gauche de cette combe, il est donc, si ce tracé est conservé, à l'écart de l'aléa rocheux.

5.2.3 Le plateau des Deux Têtes

A partir de l'altitude 2200 m environ (c'est-à-dire à l'extrémité de la crête herbeuse mentionnée au-dessus), le tracé traverse un vaste plateau herbeux, aux reliefs adoucis. Le dernier pointement rocheux qui pourrait intéresser le tracé du TSD6 est le rognon qui se situe sous la gare d'arrivée.



Le pointement vue depuis l'aval

Haut d'une douzaine de mètres, il domine une petite pente peu raide et un replat, ce qui limite fortement la propagation. Par ailleurs, la gare d'arrivée se situera sur son faîte, le pylône qui la précédera sera donc à priori à bonne distance de cette menace.

5.2.4 Le cas de la combe n°3 (piste Comborcière)

Si la remontée actuelle TSF3 en longe actuellement et alternativement la rive droite puis la rive gauche, le tracé envisagé s'en tient assez largement à l'écart. Les quelques ressauts rocheux qui parsèment son flanc gauche sont donc hors de portée du futur tracé.



Rive gauche de la combe n°3

6 MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les mouvements de terrains (à l'exclusion des chutes de blocs) sont très limités sur l'emprise du tracé.

Nous n'avons relevé aucun indice ou signe d'évolution du terrain dans ce sens.

On peut cependant assimiler à cette problématique la reptation des pierriers rocheux, due à la conjonction de plusieurs facteurs : poussée due à la neige, gravité, surcharge des pierriers par le haut... Sur la partie haute, vers le collu 2270 m, ces langues de pierres peuvent atteindre quelques mètres d'épaisseur et le phénomène « d'écoulement » est nettement visible.

Les pylônes peuvent être concernés s'ils sont implantés sur ces zones de pierriers. Les fondations seront complexes à réaliser (le terrain non mouvant est parfois loin en profondeur) et nécessiteront des massifs d'appuis conséquents pour ne pas être influencés par l'évolution de ces pierriers.

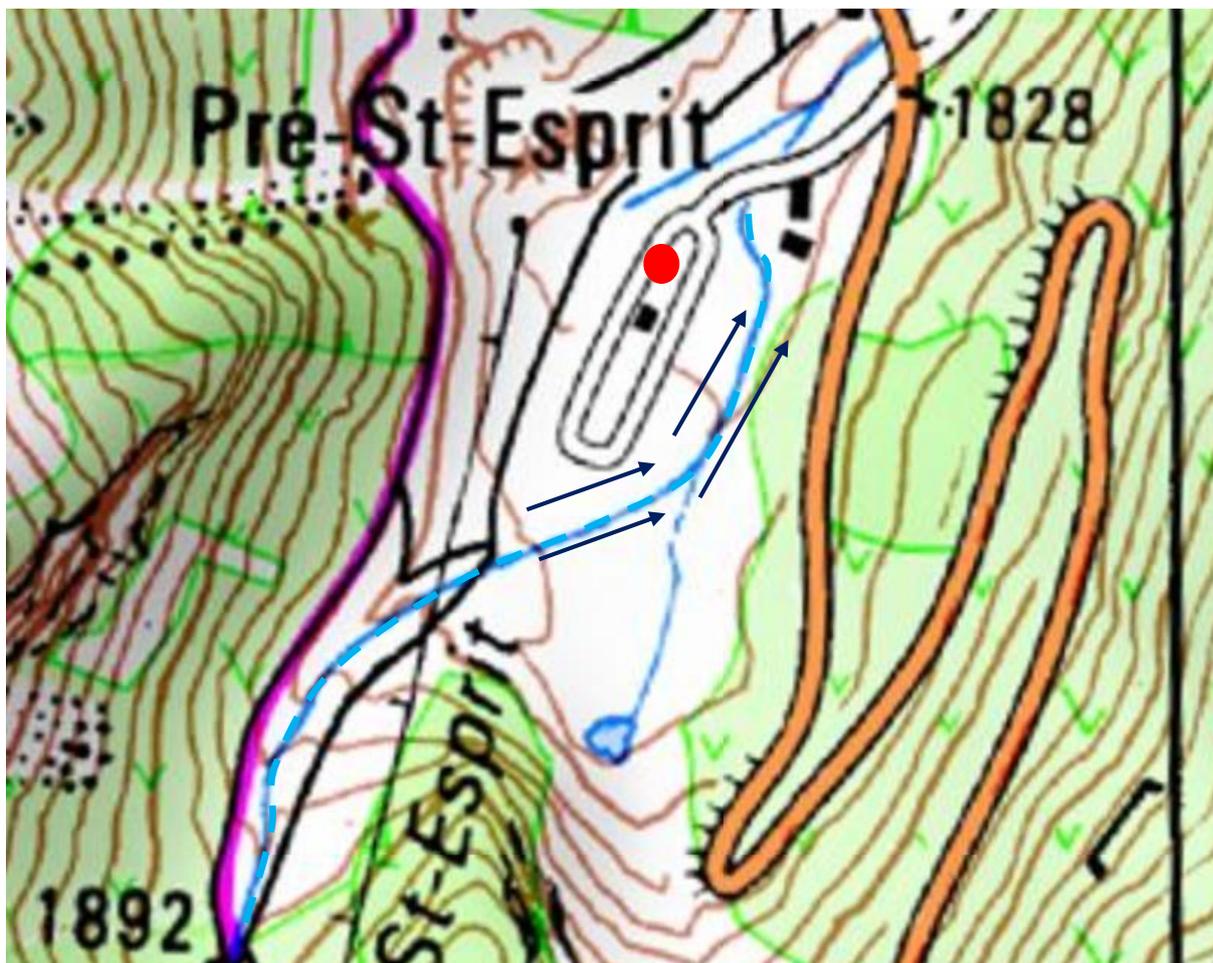


Exemple de pierrier rocheux étendu par reptation

En conséquence, si le tracé de la ligne n'est pas concerné par des glissements de terrains à proprement parler, ces zones particulières doivent être prises en compte : soit elles sont exclues pour les emplacements des pylônes, soit il faudra réaliser des aménagements spécifiques pour assurer la stabilité des pylônes à long terme.

7 CRUES TORRENTIELLES

Seule la gare de départ pourrait être concernée par un risque de crues torrentielles. Sa situation sur le vaste replat du Pré Saint Esprit, parcouru au Sud par le ruisseau de l’Arc, l’expose potentiellement en cas de crues de ce ruisseau. Cependant, celui-ci est canalisé dans un lit aux berges renforcées et la faible pente naturelle existante a tendance à favoriser un écoulement qui passe plus à l’Est de la position de la gare (c’est d’ailleurs le tracé du lit actuel du ruisseau de l’Arc).



Position de la gare de départ en amont du lit du ruisseau de l’Arc

Plus en amont, les terrains sont bien trop raides et drainants pour qu’ils soient concernés par un risque de crue torrentielles.

En conséquence, en limitant l’extension vers l’Est de la gare de départ, le projet n’est pas concerné par le risque de crues torrentielles.

8 CONCLUSIONS

L'étude réalisée vis-à-vis des chutes de blocs, mouvements de terrain et crues torrentielles sur le tracé envisagé du nouveau TSD4 (ou TSD6, non encore défini) Comborcière et ses aménagements (gares et supports) aboutit aux conclusions suivantes :

8.1.1 Chutes de blocs

Le tracé prévu (et par extension un périmètre de part et d'autre compte tenu du caractère non définitif du tracé proposé) est exposé aux chutes de blocs surtout sur sa partie inférieure.

Les zones de départs sont étendues et conséquentes et les trajectoires sont canalisées par les vastes combes et couloirs qui organisent le versant.

Une partie de la ligne est en zone exposée, avec des énergies et hauteurs de passage assez importantes qui peuvent avoir des conséquences sur la structure du TSD.

On reste cependant sur des gammes qui peuvent être contenues par des ouvrages de sécurisation (écrans pare-blocs ou merlons, à définir suivant la position définitive des pylônes et les conclusions de l'étude avalanche pour éventuellement combiner les solutions).

Une hauteur minimale entre le terrain naturel et le bas du gabarit des sièges doit également être respecter dans ces zones (de l'ordre de 5 m).

Plus haut, mis à part immédiatement sous la position de la gare d'arrivée, le tracé s'éloigne des zones de départs potentielles et traverse des étendues herbeuses peu raides.

En ce qui concerne la gare d'arrivée elle-même, le petit plateau rocheux sur laquelle elle est prévue n'est pas exposé aux chutes de blocs, à condition de rester à l'écart des pointements rocheux qui se trouvent au sud.

8.1.2 Glissements de terrain

Les glissements de terrains à proprement dit ne concernent pas le projet qui n'y est pas exposé.

En revanche, un phénomène de reptation rocheuse, en limite d'extension des vastes pierriers qui couvrent une partie du versant, peut avoir un effet déstabilisant à moyen/long terme sur les pylônes. Des aménagements sont possibles (principalement par des massifs béton ancrés implantés après avoir décapé les terrains) mais ils seront coûteux et nécessiteront un entretien régulier.

Ces zones, finalement assez peu impactantes pour le projet (celui-ci passe assez généralement au large), sont donc à prendre en compte.

Sur ce point, il est possible, suivant la position des pylônes, qu'il existe un point dur au niveau du replat ...

8.1.3 Crues torrentielles

Le projet et ses aménagements ne sont pas exposés au risque de crues torrentielles. La seule zone potentiellement concernée est celle de la gare de départ ; la configuration du terrain (légère pente vers l'Est) et les aménagements des berges du ruisseau de l'Arc favorisent un écoulement à l'écart de la gare.

8.1.4 Conséquences

Une carte du zonage des différents aléas est présentée en page suivante. Elle indique les limites des différentes zones sous l'influence d'un risque naturel.

Le tracé envisagé se trouve en partie sur ces zones à risques. Cependant, comme mentionné plus haut, à proximité du tracé proposé il n'y a pas de surface où la construction d'un pylône est à proscrire : à chaque fois, il existe des protections possibles qui sont à l'échelle de l'intensité des phénomènes qualifiés.

Il faut donc voir ces limites comme des zones nécessitant des aménagements (qui seront à dimensionner ultérieurement mais qui pourront être des massifs renforcés, des ouvrages pare-blocs, des tournes déviateurs...) et non comme des zones d'exclusion.

Nous avons cependant fait figurer, à l'intérieur même de ces limites, un périmètre que l'on peut qualifier « d'inconstructible », dans lequel la réalisation de parades deviendrait complexe.

8.1.5 Modification du bas de piste de Comborcière pour liaison avec le TSD6 Pré Saint Esprit

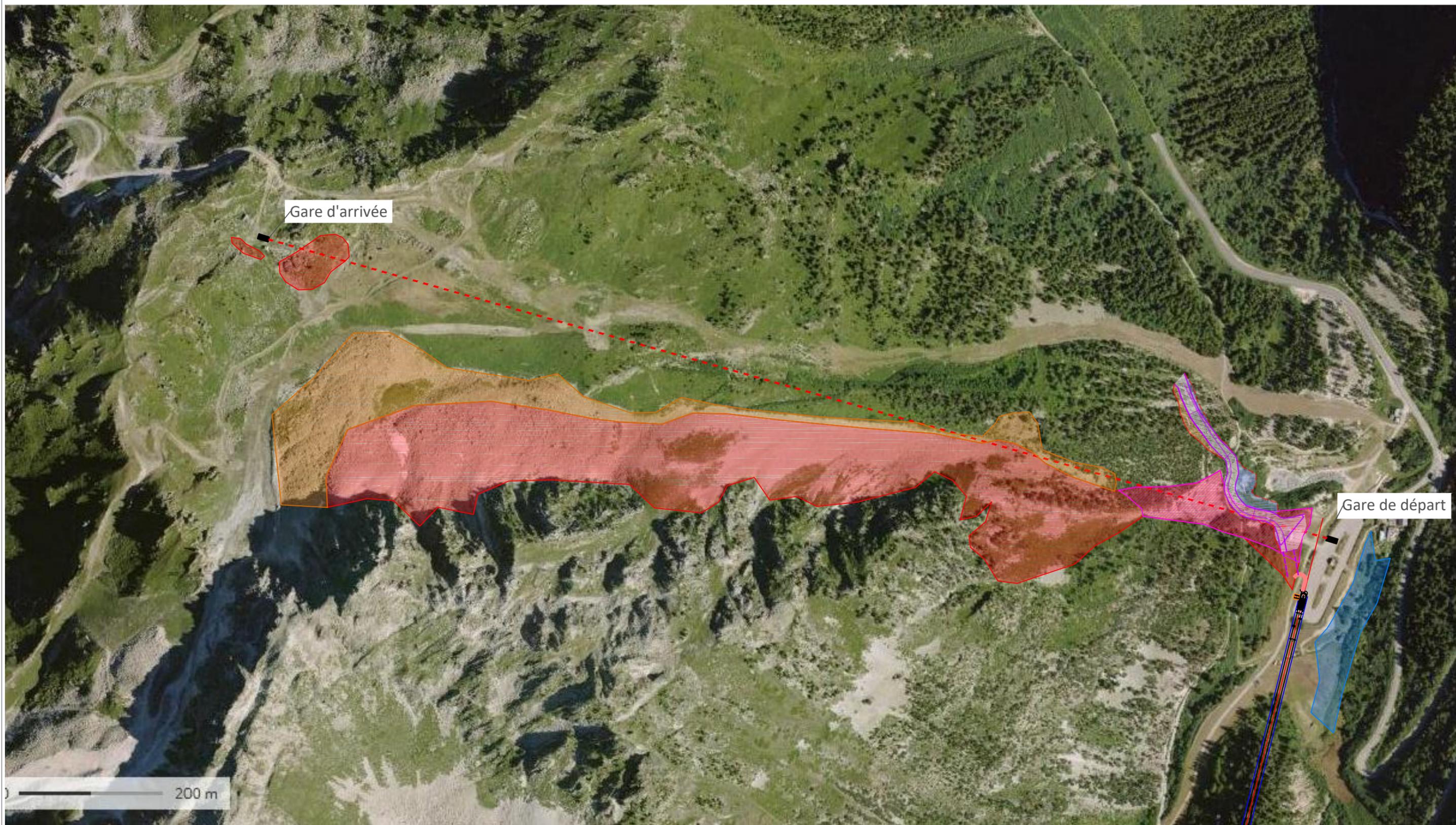
La modification de la topographie en partie basse de la combe n°1 (dont la prise en compte justifie l'indice B de ce rapport) ne modifie pas les conclusions de ce rapport. En effet, le remodelage de la piste forestière existante n'aura pas d'impact sur le mode de propagation des blocs, qui se trouvent à ce niveau en fin de course et avec une probabilité de passage assez réduite.

8.1.6 Limites de cette étude

Les observations réalisées lors de cette étude ne concernent que les mouvements de surface. Il conviendra de prendre les mesures nécessaires pour s'assurer localement des caractéristiques des terrains au droit de chaque aménagement (gares et pylônes).

Par ailleurs, une fois le tracé définitif et la position des pylônes matérialisée, une mise à jour de ce rapport devra être effectuée pour qualifier les risques liés aux aléas naturels, gare par gare et pylône par pylône.

- Zone soumise à un aléa "chute de blocs"
- Zone soumise à un aléa "mouvement de terrain"
- Zone soumise à un aléa "crue torrentielle"
- Zone constructible moyennant des ouvrages de protections



ANNEXE :

Annexe 1 : Notice du logiciel de trajectographie Drop2D

Annexe 2 : Norme NF P 94-500

ANNEXE 1

Notice du logiciel de trajectographie Drop2D

LOGICIEL DE TRAJECTOGRAPHIE

DROP 2D

Notice technique



1 LES OBJECTIFS DU LOGICIEL DROP 2D

Le logiciel de trajectographie DROP 2D est un programme de calcul développé par ARIAS Montagne. Il permet de simuler des trajectoires de chutes de blocs de volumes variables sur la base de profils topographiques en deux dimensions. DROP 2D est destiné à prédire les points d'arrêt ultimes des trajectoires ainsi que leurs caractéristiques cinétiques (hauteur par rapport au sol, énergie de translation, vitesse) en tous points d'un profil. Basé sur le calcul d'un grand nombre de trajectoires dont les paramètres de modélisations sont calés sur des événements réels de chutes de blocs, mais aussi affectés de variables aléatoires, le logiciel DROP 2D fait partie des logiciels déterministes et probabilistes à la fois. L'objectif final est de modéliser un échantillon représentatif de trajectoires pour une chute de blocs, de façon à déterminer les limites d'une surface au sol concernée par un phénomène de chutes de blocs ou de dimensionner au plus juste un ouvrage de protection.

Le logiciel de trajectographie est ainsi un programme prédictif d'aide à la décision, il ne saurait remplacer l'expérience personnelle du chargé d'étude qui reste déterminante.

2 DU TERRAIN A LA MODELISATION

La base d'une modélisation de trajectographie est la retranscription en termes de paramètres numériques des caractéristiques propres au terrain. Ainsi, la qualité du calcul exécuté dépend étroitement de la connaissance du site étudié dont découlera le caractère réaliste de ces paramètres. Si le travail de modélisation se déroule au bureau, les reconnaissances de terrains sont indispensables. Elles sont destinées à déterminer la topographie et la nature des sols sur lesquelles les trajectoires se propageront, ainsi que le volume des masses rocheuses au départ.

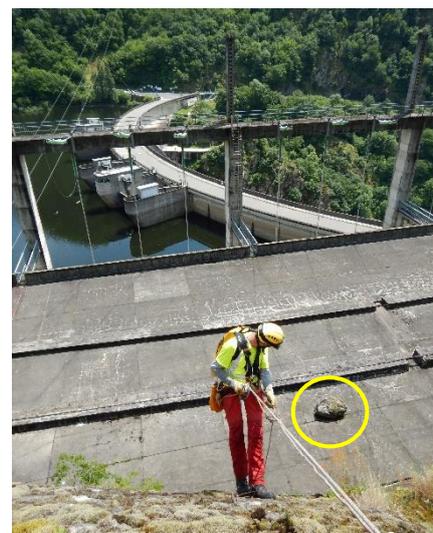
2.1 La topographie

Un calcul de trajectographie en deux dimensions utilise comme support topographique un profil en travers. Plusieurs techniques de relevé topographique existent :

La méthode la plus simple consiste à parcourir le versant depuis la zone de détachement du bloc jusqu'au niveau des enjeux. Cette méthode rapide est utilisée notamment en cas d'urgence ou lorsque la végétation masque totalement le relief et la nature du sol. Le levé s'effectue à l'aide d'un télémètre laser, ou au décamètre / clisimètre.



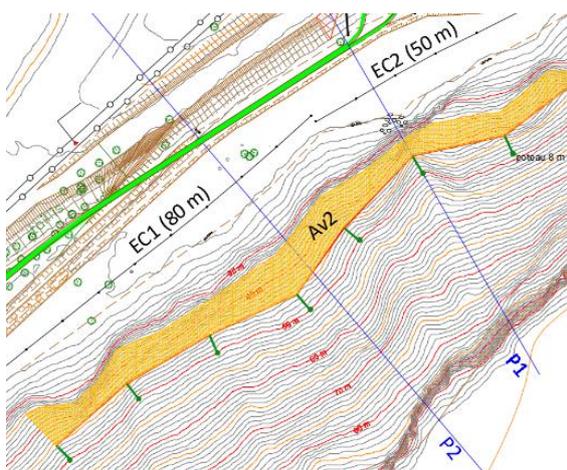
*Télémètre laser précision
+/- 1cm et +/- 1°*



*Levé d'un profil sur corde
jusqu'au bloc arrêté*

Une méthode plus précise consiste à parcourir le versant avec un GPS de haute précision et de relever un nombre suffisant de points pour modéliser le terrain le long du profil de propagation.

Enfin, le profil peut être tracé à partir d'un plan provenant d'un levé photogrammétrique, d'un lidar ou d'un plan topographique traditionnel. Dans ces derniers cas, l'utilisation des données doit être accompagnée d'une visite de terrain pour vérifier la conformité du plan avec la réalité et relever les caractéristiques du sol.



Tracé de profils sur un plan topographique



Levé d'un profil au GPS GNSS RTK

2.2 La nature des terrains

La topographie étant acquise, il reste à déterminer la nature des sols sur lesquelles les trajectoires rebondiront lors de la modélisation. Cette acquisition se fait lors du parcours à pied le long du profil de travail.

Dans le cas d'une chute de blocs ayant déjà eu lieu, on profite de ce parcours, pour positionner tous les indices visibles sur le terrain (positions et volumes des blocs arrêtés, cratères d'impact, traces de passage sur les arbres ...).

Le chargé d'affaire va alors noter en premier lieu la qualité du sol en terme de compacité, qui correspond à la capacité qu'aura un bloc à s'enfoncer dans le sol lors de l'impact. Cette capacité est nulle pour un sol rocheux et bien évidemment importante pour un sol meuble, de type éboulis vif.

Dans un second temps, les micros reliefs, à l'échelle du profil, vont être également répertoriés : il s'agira de qualifier la régularité du terrain qui évolue considérablement entre un enchevêtrement de gros blocs et un pré d'alpage par exemple.

Enfin, le couvert forestier est estimé en termes de nombre de tiges au m² et en diamètre moyen des troncs.

La campagne de terrain étant terminée, chaque segment du profil topographique va être affecté d'un coefficient dépendant des paramètres suivants :

- Un coefficient de restitution : il traduit la capacité du sol à se déformer lors de l'impact. Lorsque le bloc touche un sol (avec une vitesse incidente), une partie de l'énergie est absorbée par la déformation du sol, une autre est restituée au bloc sous forme d'énergie "élastique" qui va conditionner la vitesse réfléchi du bloc. Ce coefficient varie de façon croissante en fonction de la compacité du sol. Il est appliqué à la vitesse incidente du bloc pour déterminer sa vitesse réfléchi après le rebond.

- Un coefficient de rugosité : il traduit le micro relief du sol, c'est-à-dire la présence d'obstacles pouvant soit stopper les trajectoires (en tenant compte bien sûr de la taille du bloc par rapport à ces obstacles), soit influencer l'angle réfléchi du rebond. Exprimé en degrés, il sera quasiment nul pour un sol lisse et plus important dans le cas d'un sol tourmenté, comme un éboulis parsemé de gros blocs.

Ces différents paramètres sont déterminés par rétro calage sur des cas de chutes de blocs existants dont l'ensemble des paramètres sont connus, dans le cas d'une démarche déterministe.



A gauche : un sol tendre avec un coefficient de restitution faible favorise un arrêt rapide des trajectoires

A droite : un sol rugueux piège les trajectoires et à tendance à redresser l'angle réfléchi.



Un sol rocheux aura un paramètre de restitution élevé et une rugosité limitée

3 LA SIMULATION

3.1 Représentation du bloc

Le bloc est représenté par une sphère rigide affectée d'un rayon (dépendant du volume du bloc considéré) et du poids volumique de la roche mère.

Le volume du bloc au départ peut être fixe pour l'ensemble des simulations, ou alors choisi aléatoirement dans une gamme de volume, paramétrable par l'opérateur.

3.2 Conditions de départ

Pour permettre un départ des blocs, chaque trajectoire débute sa course avec une vitesse horizontale comprise aléatoirement entre 0,1 et 0,5 m/s.

Dans certains cas, pour initier la chute, l'ajout d'une hauteur de chute initiale est nécessaire.

Les zones de départs peuvent être soit ponctuelles (le sommet du profil ou un point défini par l'opérateur, y compris hors du profil), soit réparties sur la surface d'une partie du profil, pour simuler des chutes depuis l'ensemble d'une paroi rocheuse par exemple.

3.3 Le calcul du rebond

Le segment concerné par le rebond est affecté d'un paramètre dépendant du coefficient de restitution (R_s) et de rugosité (R_u).

Lors d'un impact au sol, ces deux coefficients sont successivement appliqués aux données de la trajectoire incidente :

- La vitesse de la trajectoire réfléchie est déterminée par l'application du paramètre R_s ,
- L'angle de la trajectoire réfléchie est déterminé par l'application du paramètre R_u .

La dimension probabiliste est obtenue en faisant varier, pour un même type de sol, les paramètres R_s et R_u dans un intervalle de valeurs possibles (Δ_{R_s} et Δ_{R_u}), selon une loi de distribution normale.

Il est important de noter que ces jeux de paramètres (R_s, R_u) ont été déterminés sur des cas réels et qu'ils ne sont pas modifiables par l'opérateur. Celui-ci dispose d'une gamme de type de sol (et donc de couple (R_s, R_u)) qui lui permet de caractériser chaque segment.

3.4 Le bloc en vol

La trajectoire du bloc en vol suit les équations classiques de la chute libre soumise à la gravité, avec une vitesse de départ donnée. Un paramètre ralentisseur, proportionnel à la vitesse du bloc, est néanmoins affecté à la vitesse en cas de phase de vol de grande hauteur. Il permet de prendre en compte les frottements du bloc dans l'air et de limiter les phénomènes d'accélération « infinie » (et les aberrations qui en résultent).

3.5 Le point d'arrêt

La propagation du bloc s'arrête pour une vitesse sur trajectoire inférieure à 0.5 m/s.

Il est cependant possible, pour un segment ponctuel, d'empêcher l'arrêt du bloc (qui entre alors dans une phase de successions de rebonds de faible ampleur).

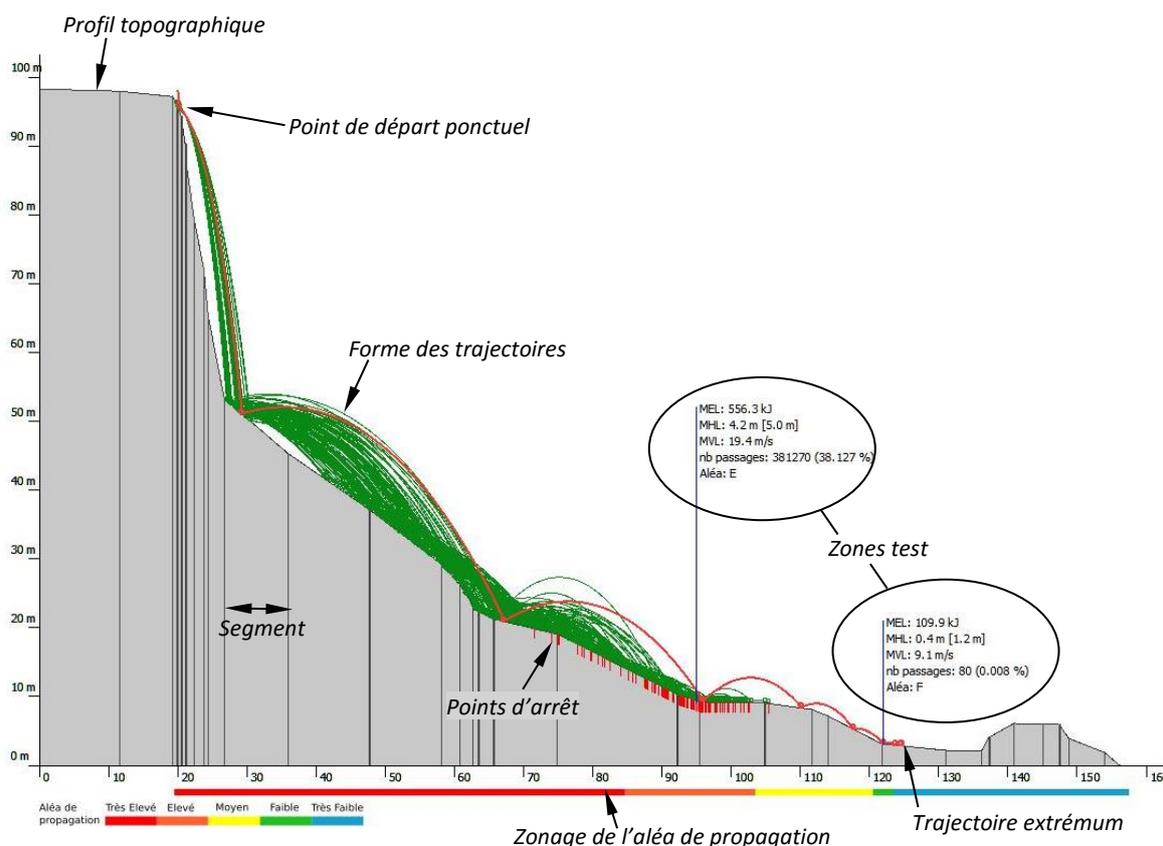
3.6 Le nombre de simulations

Le nombre de simulations possibles est théoriquement illimité, mais est en pratique borné par le temps de calcul.

Cependant, pour que le calcul probabiliste s'exprime pleinement, de façon à obtenir l'enveloppe des trajectoires et des informations statistiques significatives, un nombre minimum de 100 000 trajectoires est appliqué pour la détermination des ouvrages pare-blocs et 1 million pour le calcul des zones d'aléa.

3.7 La sortie d'écran

Le résultat de la simulation est disponible sur une sortie d'écran :



Les zones de test sont pré-positionnées avant le calcul. Il s'agit le plus souvent de la position d'une future protection pare-blocs (écran ou merlon). Sur la sortie d'écran, les informations suivantes sont disponibles :

- L'abscisse du test,
- L'énergie maximale du bloc au niveau de la zone de test (MEL),
- La hauteur maximale de passage du bloc (MHL) avec indiquée la hauteur du centre d'inertie et la hauteur nominale (c'est-à-dire en tenant compte du rayon du bloc),
- La vitesse maximale du bloc au niveau de la zone de test,
- Le nombre de trajectoires atteignant la zone de test comptabilisé ainsi que le pourcentage d'atteinte par rapport au nombre de simulations totales.
- Le niveau d'aléa de propagation (TF=très faible, F = faible, M = moyen, E = élevé, TE = très élevé) >> voir § 4.1).

Pour éviter la surcharge de la partie graphique, le ratio de trajectoires représentées est paramétrable. Le faisceau des trajectoires est ainsi indiqué (en vert) ainsi que la trajectoire extrema (en rouge), c'est-à-dire celle atteignant l'abscisse maximale.

Il est également possible de représenter les trajectoires au niveau du centre de gravité du bloc ou alors de son point haut (pour obtenir une enveloppe des trajectoires calées sur la hauteur nominale de passage).

Le zonage de l'aléa de propagation est indiqué sous l'axe des abscisses, par une barre de couleurs.

4 LES FONCTIONS DU LOGICIEL

4.1 Déterminer des zones d'aléas

La détermination des zones d'aléa est obtenue en calculant la probabilité d'atteinte par une trajectoire, d'un point donné du profil, qui correspond la plupart du temps à l'enjeu étudié ou à la position d'une protection. En simulant au moins 1 million de trajectoires, la valeur de l'aléa de propagation est obtenue à partir des seuils suivants :

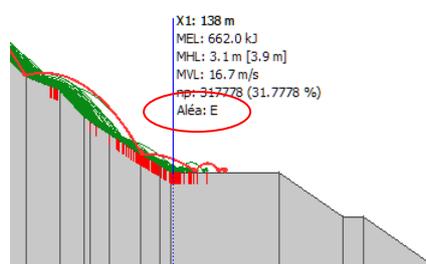
Probabilité d'atteinte d'un enjeu par trajectographie :	Pourcentage de blocs atteignant un enjeu par trajectographie :
Très faible	$< 10^{-4} \%$
Faible	De 10^{-4} à $10^{-2} \%$
Moyen	De 10^{-2} à 1 %
Elevé	De 1 à 80 %
Très élevé	$> 80 \%$

Les limites de probabilité $10^{-4} \%$, $10^{-2} \%$ et 1 % proviennent de la méthode ADRGT (1994). Le Cemagref recommande cette méthode de détermination des classes de probabilités pour les études de propagation de chutes de blocs dans le cadre de l'élaboration des PPR (F. BERGER 2009).

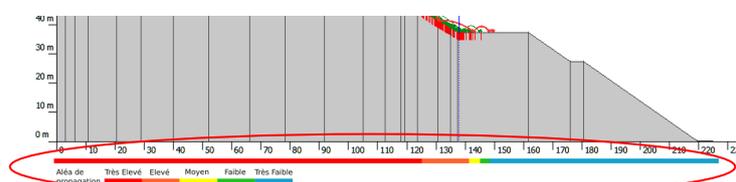
Néanmoins, ces limites transcrites sous forme de limites d'aléa ne sont pas figées, elles peuvent être adaptées en fonction des habitudes de travail des différents Maîtres d'ouvrages.

La définition des zones d'aléas par trajectographie est valable pour des trajectoires ponctuelles (bloc isolé dont la propagation est indépendante d'autres blocs c'est-à-dire sans contact ni interaction entre les blocs). Cette définition des aléas de propagation ne prend pas usuellement en compte les phénomènes d'éboulements en masse qui pourraient modifier les conditions de propagation des blocs.

Dans Drop2D, ce zonage peut être obtenu soit de manière ponctuelle, à partir des données restituées au niveau des abscisses tests, soit de manière plus globale par le biais de l'affichage du niveau d'aléa de propagation. Dans ce cas, la lecture est directe sur l'axe des abscisses, indiquant la distance planimétrique, en mètre, depuis le sommet du profil.



Lecture ponctuelle à l'abscisse test



Zonage de l'aléa en abscisse du profil

4.2 Dimensionner un ouvrage de protection

Lorsque la position d'un ouvrage de protection de type écran ou merlon est pressentie sur un profil, deux méthodes existent pour déterminer la nature de l'ouvrage en terme de hauteur et de capacité énergétique. La méthode de détermination est généralement donnée par le Maître d'ouvrage.

4.2.1 Le calcul aux Limites Ultimes de l'ouvrage

Il s'agit de la méthode la plus courante. Les informations fournies par la zone de test servent ici directement au dimensionnement de l'ouvrage (voir § 3.1.7). Les données calculées de l'énergie maximale (MEL) et de la hauteur nominale maximale (MHL), toutes deux obtenues pour les blocs franchissant la zone de test, sont directement appliquées pour déterminer les caractéristiques de l'ouvrage.

Pour un écran, la classification ETAG 027 du guide d'agrément technique européen de 2008 complétée par la note d'information du CEREMA d'août 2014, permettent de rattacher ces données à un modèle d'écran testé en grandeur réelle (et marqué CE pour des performances choisies par le fabricant).

4.2.2 Le calcul aux Limites de Services de l'ouvrage

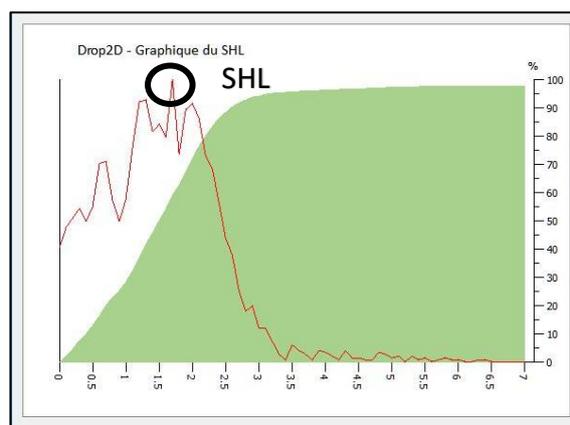
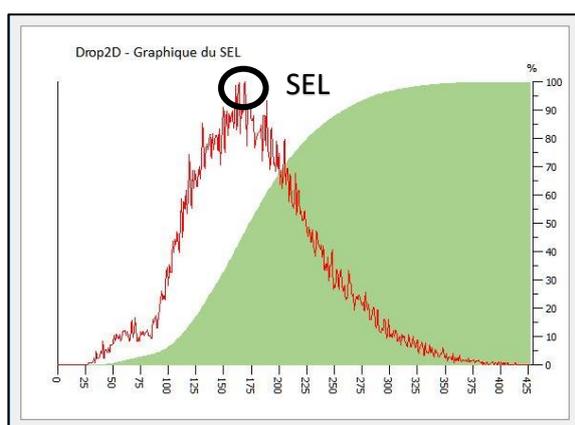
Sur demande du Maître d'ouvrage et en fonction du type d'enjeu à protéger, la démarche peut consister à ne pas retenir les caractéristiques ultimes des trajectoires pour dimensionner l'ouvrage, mais plutôt les valeurs de hauteur et d'énergie les plus probables, autrement dit les valeurs les plus communément observées.

On parlera ici de hauteur de service (SHL) et d'énergie de service (SEL).

Ces dernières sont déterminées graphiquement, pour une abscisse test donnée, sur un histogramme des énergies et des hauteurs.

Le pic le plus important en énergie et en hauteur permet d'estimer précisément les valeurs du SEL et du SHL.

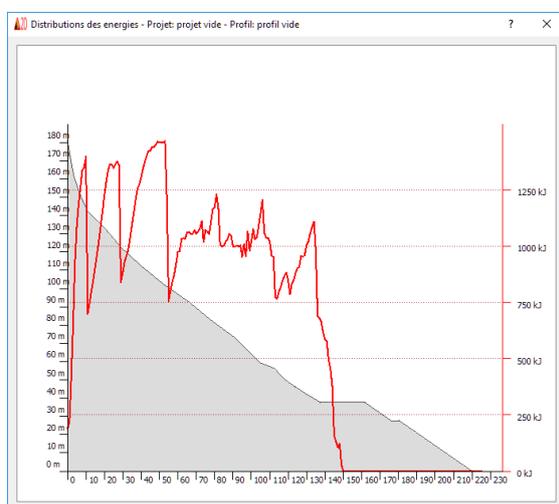
L'interface de cet outil, dans Drop2D, permet également de déterminer, pour un ouvrage donné (et présentant des caractéristiques techniques existantes sur le marché), l'aléa résiduel au-delà de l'ouvrage, permettant de dimensionner au plus juste les protections.



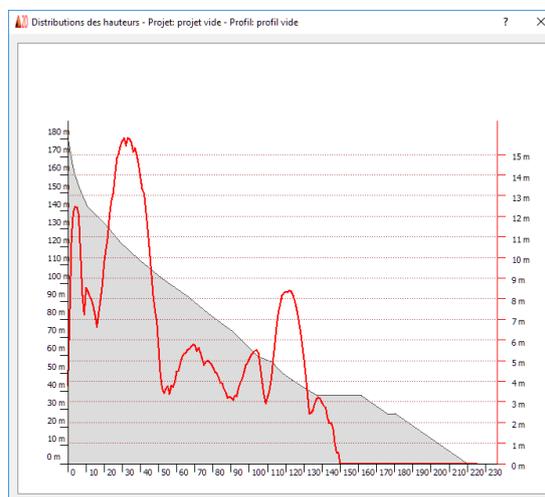
4.3 Distribution des énergies et des hauteurs le long du profil

Après simulations, Drop2D offre la possibilité d'obtenir graphiquement la distribution des énergies et des hauteurs maximales le long du profil.

Cette fonctionnalité permet de localiser les emplacements les plus favorables pour les protections (zones d'énergies et de hauteurs moindres).



Distribution des énergies

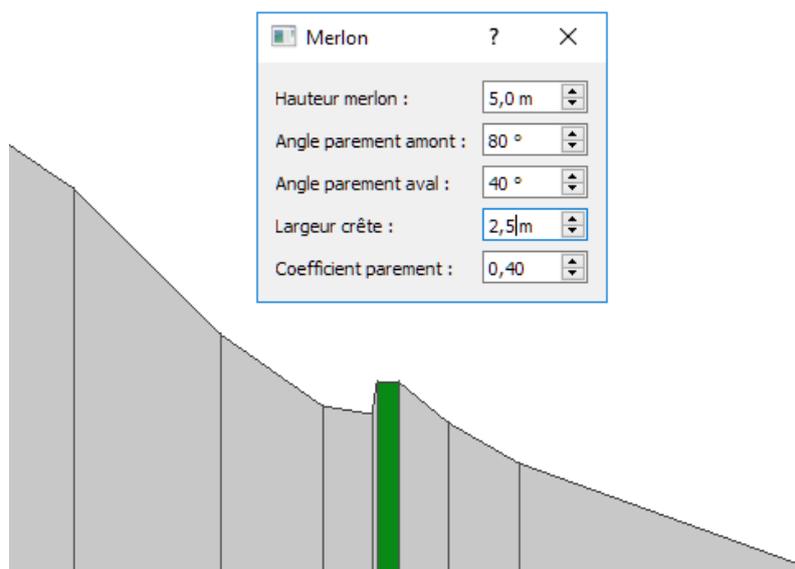


Distribution des hauteurs

4.4 Aménagement de merlon

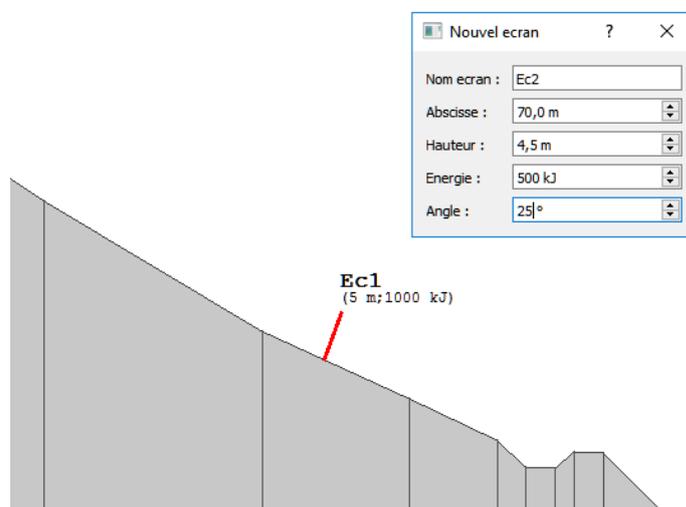
A une abscisse donnée, le logiciel permet de modéliser le terrain pour simuler l'action d'un merlon sur les conditions de propagations.

Une interface permet de choisir la hauteur de l'ouvrage, l'inclinaison des parements amont et aval, la largeur en crête ainsi que la nature du parement (par le biais du coefficient de parement).



4.5 Ecrans pare-blocs

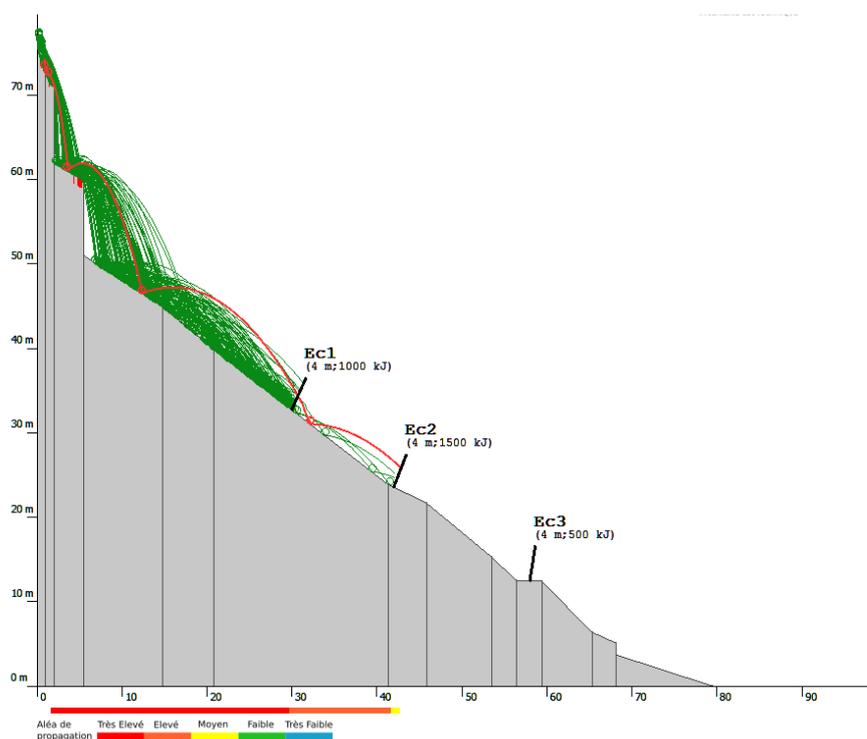
Drop2D permet d'intégrer des écrans pare-blocs sur le profil et de prendre en compte leurs effets sur les conditions de propagations des blocs rocheux.



L'interface d'édition permet de définir (et modifier) le nom de l'ouvrage, l'abscisse du pied, la hauteur nominale de l'ouvrage, sa capacité MEL ainsi que son angle par rapport au terrain naturel. Plusieurs lignes d'écrans peuvent se succéder au long du profil.

Lors de l'impact du bloc dans l'ouvrage, deux situations peuvent se produire :

- Si l'énergie à l'impact est inférieure à la capacité de l'ouvrage, le bloc est arrêté,
- Dans le cas contraire, l'ouvrage est considéré comme détruit et le bloc continue sa propagation. Cependant, le rôle frein de l'écran est pris en compte en modifiant la vitesse (et donc l'énergie) de sortie du bloc après son impact.



ANNEXE 2

Norme NF P 94-500

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'avoisnants 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 avoisnants), 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 avoisnants), 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 (suite)

ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G 4, distinctes et simultanées) ÉTUDE ET SUIVI

GÉOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)

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 :

Phase Étude

- 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.

Phase Suivi

- 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)

SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)

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 :

Phase Supervision de l'étude d'exécution

- 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.

Phase Supervision du suivi d'exécution

- 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.

DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)

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.

- 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'état 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