Mairie de la Bâthie
103 rue Alphonse De Lamartine
73540 LA BÂTHIE

Janvier 2019

Etude chutes de blocs

Modélisation trajectographique et dimensionnement d'un ouvrage pare-bloc
- secteur rue Pasteur et rue Commandant Bulle -

Office National des Forêts – Agence RTM Alpes du Nord
42, quai Charles Roissard
73026 Chambéry cedex

Etabli par :

Agence RTM Alpes du Nord
Office National des Forêts
42 quai Charles Roissard
73026 Chambéry cedex

Date du dernier enregistrement	Désignation du document	Numéro de devis	Nombre de pages
09/01/2019	*Modélisation trajectographique et dimensionnement d'un ouvrage pare-bloc - secteur rue Pasteur et rue Commandant Bulle -*	D9-01	28

	Nom Prénom	Fonction
Auteur	Pierre Dupire	Géologue RTM 73
Relu	Jérôme Liévois	Responsable pôle expertise RTM 73
Validation	David Binet	Chef de service RTM 73

Suivi des versions :

Version	Date	Observations
V1	9/01/2019	Pour observations

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES 3
I PREAMBULE 4
I.1 Contexte et objectifs 4
I.2 Périmètre d'étude 4
II INVESTIGATIONS PREALABLES 5
II.1 Evénements historiques 5
II.2 Documents disponibles 6
II.3 Contexte physique 6
III OBSERVATIONS DE TERRAIN 9
III.1 Zone de départ 9
III.2 Le versant 10
IV SYNTHESE ET CHOIX DU SCENARIO DE REFERENCE 11
V MODELISATIONS TRAJECTOGRAPHIQUES 12
V.1 Méthode mise en œuvre 12
V.2 Modélisations 12
VI PROPOSITIONS DE PROTECTION 14
VI.1 Stratégie proposée 14
VI.2 Aménagement d'un merlon 14
VII SYNTHESE 16
VIII ANNEXES 17
VIII.1 Annexe 1 : résultats modélisations via Rocfall 17
VIII.2 Annexe 2 : résultats modélisations via Propag 20
VIII.3 Annexe 3 : détails sur le logiciel Rocfall 22
VIII.4 Annexe 4 : Détail sur le logiciel Propag 26

I Préambule

I.1 Contexte et objectifs

La commune de La Bâthie a été affectée par un éboulement le 25/12/2018 au niveau de la rue du Commandant Bulle et de la rue Pasteur. Les trajectoires les plus extrêmes se sont approchées d'enjeux bâtis. Compte tenu de la situation, la commune a souhaité disposer rapidement d'une expertise des affleurements dominant le secteur et d'une étude d'une solution de protection du site.
L'objectif est donc de définir le dimensionnement d'un ouvrage pare blocs. La conception et la réalisation d'un tel ouvrage nécessite des modélisations trajectographiques qui apporteront l'information du dimensionnement fonctionnel.
Une nouvelle visite du site a été réalisée le 8/01/2019 par Didier Waszak (technicien du secteur) et Pierre Dupire (géologue).

I.2 Périmètre d'étude

La carte ci-après délimite la zone étudiée. Le périmètre se limite à la zone affectée par l'événement de Noël 2018. Signalons que l'ensemble du versant présente les mêmes caractéristiques géologiques et topographiques. Il est possible qu'une problématique similaire puisse concerner des secteurs voisins.

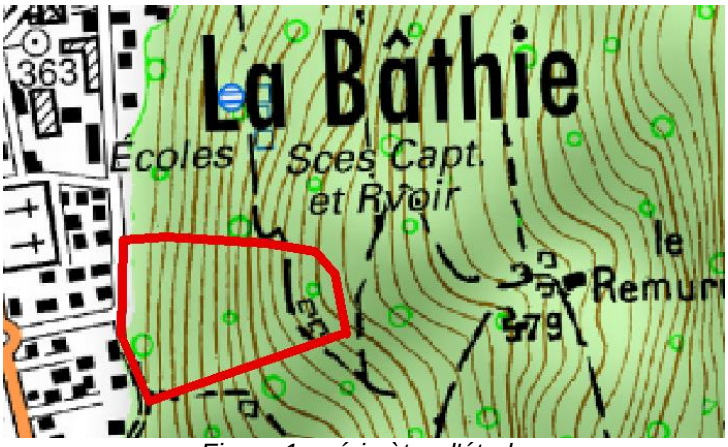


Figure 1 : périmètre d'étude

II Investigations préalables

II.1 Evénements historiques

En dehors de l'éboulement du 25 décembre 2018 (qui sera détaillé plus loin), le RTM n'a pas connaissance d'autre événement sur ce site précisément. En revanche, plusieurs chutes de blocs sont connues sur le versant :

- Le 2 mars 2017 : une chute de pierre a impacté une maison au niveau de Chantemerle (volume estimé à 30 l).
- Le 26 novembre 2018, un bloc de quelques dizaines de litres a traversé le mur d'une habitation rue Jean Moulin.

Il s'agit toutefois de chutes de deux blocs isolés, donc d'un phénomène d'origines et de mécanismes différents de ceux de l'éboulement du 25/12/2018.

Détails sur l'événement du 25/12/2018 (extraits du rapport RTM du 27/12/2018) :
Le volume total au départ est probablement d'une cinquantaine de m^3, constituées de plusieurs masses prédécoupés, et qui se sont fragmentés en cours de la propagation.
La nature très feuilletée du rocher produit des parallélépipèdes d'un volume unitaire variant du demi-mètre cube à plus de trois mètre cube. Certains se sont déplacés en roulant et rebondissant sur la dimension la plus petite, leur donnant une trajectoire oblique d'où une assez large dispersion latérale. Plusieurs masses ont été stoppées par des arbres mais la majorité a fini sa course en lisière de forêt avec une ligne d'énergie (pente de la droite reliant la zone de décrochement au point d'arrêt) calculée à 34°environ.
Une partie de ces blocs (un bloc de 6 m^3, plusieurs blocs de l'ordre du m^3, et de nombreuses pierres et petits blocs) s'est arrêté juste au pied de l'affleurement.

Photo 1 *– Bloc 1*

Photo 2 *– Blocs 2 et 3*

Photo 3 *– Replat du bloc 3*

Photo 4 *– Replat du bloc 2*

Figure 2 : clichés de l'événement du 25/12/2018 extraits du rapport RTM du 27/12/2018

II.2 Documents disponibles

La commune dispose d'un PIZ (carte des aléas annexée au PLU) réalisé par GIPEA en 2004 et repris ponctuellement par Alp'Géorisques en 2013, 2015 et 2016.
Ce document classe la zone en amont de la voirie en aléa moyen de chutes de blocs (indices M [moyen] et B [chute de blocs]), avec présence de protection « naturelle » de type couvert végétal (indice /p) dont l'efficacité est jugée insuffisante dans le catalogue de prescription (fiche 5).
En aval, une bande de 15 à 20 m de largeur, donne un aléa faible de chutes de blocs (indices f [faible] et B [chute de blocs]), avec présence de protection « naturelle » de type couvert végétal (indice /p) (fiche 7).
La définition des niveaux d'aléa moyen et faible retenus dans le PIZ n'est toutefois pas précisée.

Figure 3 : extrait du PIZ d'Alp'Géorisques 2016

II.3 Contexte physique

II.3.1 Géologie

Géologie locale :
Le versant tourné vers l'Ouest qui surplombe le chef-lieu est entièrement composé de micaschistes du rameau externe de Belledonne. Cette formation métamorphique présente une schistosité plongeant vers l'Est (45-55°). Elle présente des masses déstructurées ayant évoluées en paquets glissés distinctes des niches de décrochements d'où sont issues ces masses glissées.

Figure 4 : Extrait de la carte géologique du BRGM

Détails au droit de la zone éboulée le 25/12/2018 :

L'éboulement s'est produit à partir d'un affleurement de micaschistes situé à la cote 460m, découpés par un plan de schistosité et par plusieurs plans de fracturations anciens. Sur le versant, le rocher est affleurant ou sub-affleurant. Au droit de la paroi rocheuse principale (située quelques mètres au-dessus de la zone de départ de l'événement du 25/12/2018) se distinguent des vestiges de paquets glissés. A ce titre, l'affleurement à l'origine de l'événement est vraisemblablement une tranche frontale d'un paquet glissé.

Toute la zone de départ est parcourue de sentes de passage de gibier. La présence de plusieurs terriers de blaireaux permet d'affirmer qu'il existe des vides importants entre les blocs désolidarisés. Ces discontinuités sont colmatées de terre ocre-brune issue soit de la litière forestière, soit de l'altération des cristaux de micas. Elles sont également parcourus par le système racinaire des arbres présents (charmes, châtaigniers, chênes).

Les rochers mis à jour par cet éboulement présentent une déstructuration avec des déplacements relatifs d'une vingtaine de centimètres.

Ce paquet glissé (affleurement en place) n'a pas pu être mesuré en termes de volume mais il représente plusieurs centaines (voire milliers) de mètres cubes.

Figure 5 : Zone de départ : une des cicatrices (à gauche) et exemple de fracturation existante (à droite)

II.3.2 Contexte géomorphologique

L'expertise morphologique du versant permet d'appréhender le fonctionnement des éboulements. L'analyse des pentes (issue de traitement MNT) et les observations de terrain font ressortir les éléments constitutifs du versant et leur effet sur les chutes de blocs :

- Les affleurements (60 à 90°) qui correspondent aux principales sources de production d'éléments rocheux susceptibles de se propager.
- Les portions subaffleurantes qui peuvent être à l'origine d'accélération des chutes de blocs du fait de pentes soutenues (40- 60°) et d'une forte compacité du sol favorisant les rebonds.
- Les pentes modérées (20 à 40°) correspondent à des paquets éboulés ou glissés ainsi qu'à des éboulis. Ces dernières peuvent avoir un effet de dissipation des énergies du fait d'une compacité de sol moins marquée (les blocs s'enfoncent à leurs impacts).
- Les zones de replats (0 à 10°) qui sont des zones d'arrêts rapides des propagations et des zones qui pourront être propices à la réalisation d'un ouvrage.

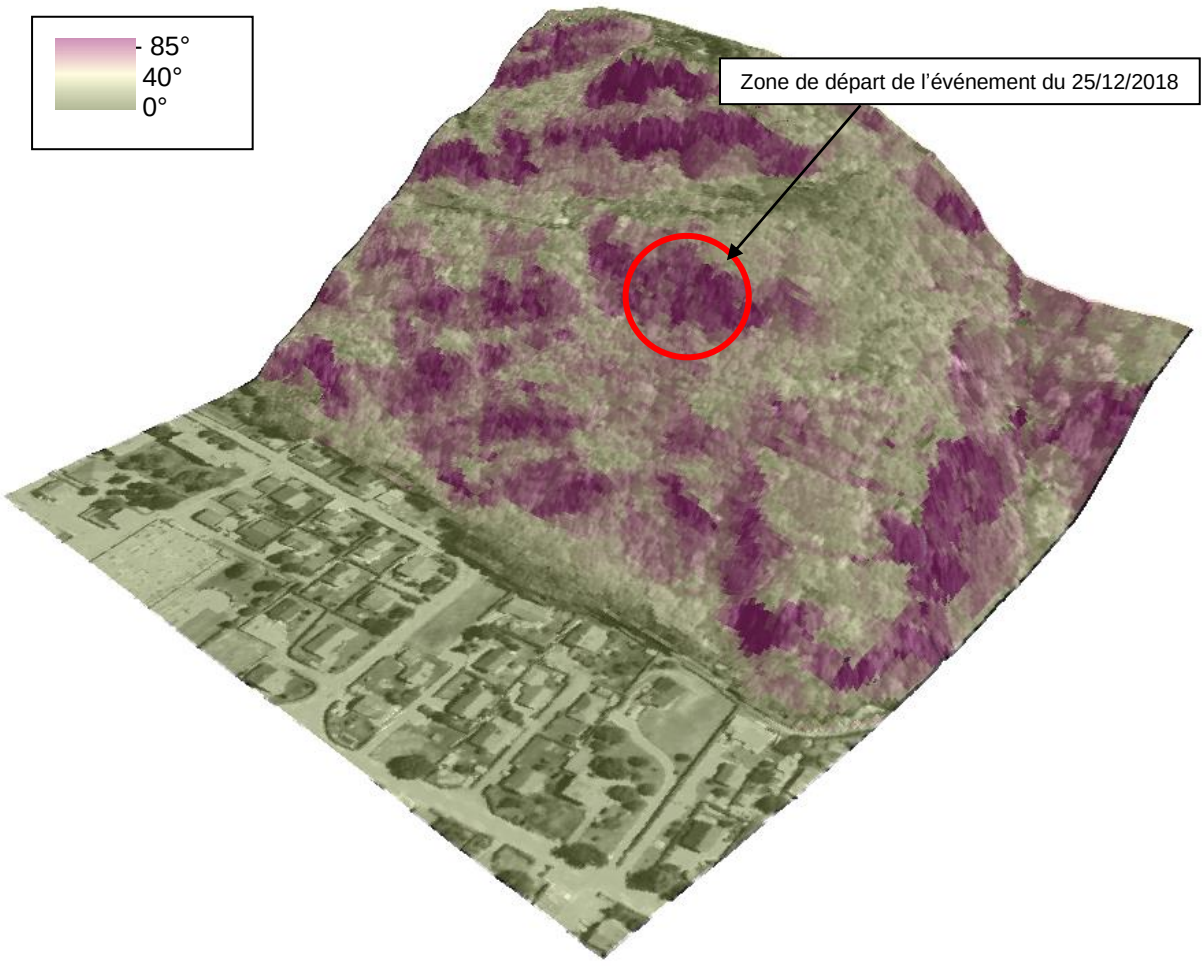


Figure 6 : Carte des pentes

III Observations de terrain

III.1 Zone de départ

Le versant dispose d'une multitude de zone d'affleurement (visibles en magenta sur l'illustration précédente). Ces dernières sont donc des zones de départs potentielles. Toutefois, l'expertise visuelle (pas de reconnaissance sur cordes) ne révèle pas d'instabilités notoires visibles.
En revanche, au niveau de la zone de départ de l'événement de Noël 2018, l'éboulement a fragilisé l'affleurement.
Les plus gros blocs décrochés et arrêtés en pied d'affleurement sont pour l'essentiel stabilisés et ne devraient pas se remobiliser. Toutefois, une multitude de blocs de volume inférieur à ½ m^3 pourraient assez facilement se remettre en mouvement avec le passage de gibier, ou par le biais de ruissellements qui pourraient éroder leur assise.
Il est également observé au droit de la cicatrice (côté Nord) un bloc découpé au sein de l'affleurement avec un plan ouvert à l'arrière (prolongement de la cicatrice vers le Nord) et une fissure, à priori mécanique, en base, dont le pendage est de 50° dans le sens de la pente (vers l'Ouest). Il y a fort à craindre qu'un mécanisme de glissement puisse mobiliser ce bloc. Celui-ci étant assez compact, il devrait peu se fragmenter (estimation de blocs résiduels de 3 à 6 m^3 environ).
Des masses plus restreintes sont également en équilibre assez précaire tout autour de la cicatrice. Leurs volumes sont inférieurs au m^3.

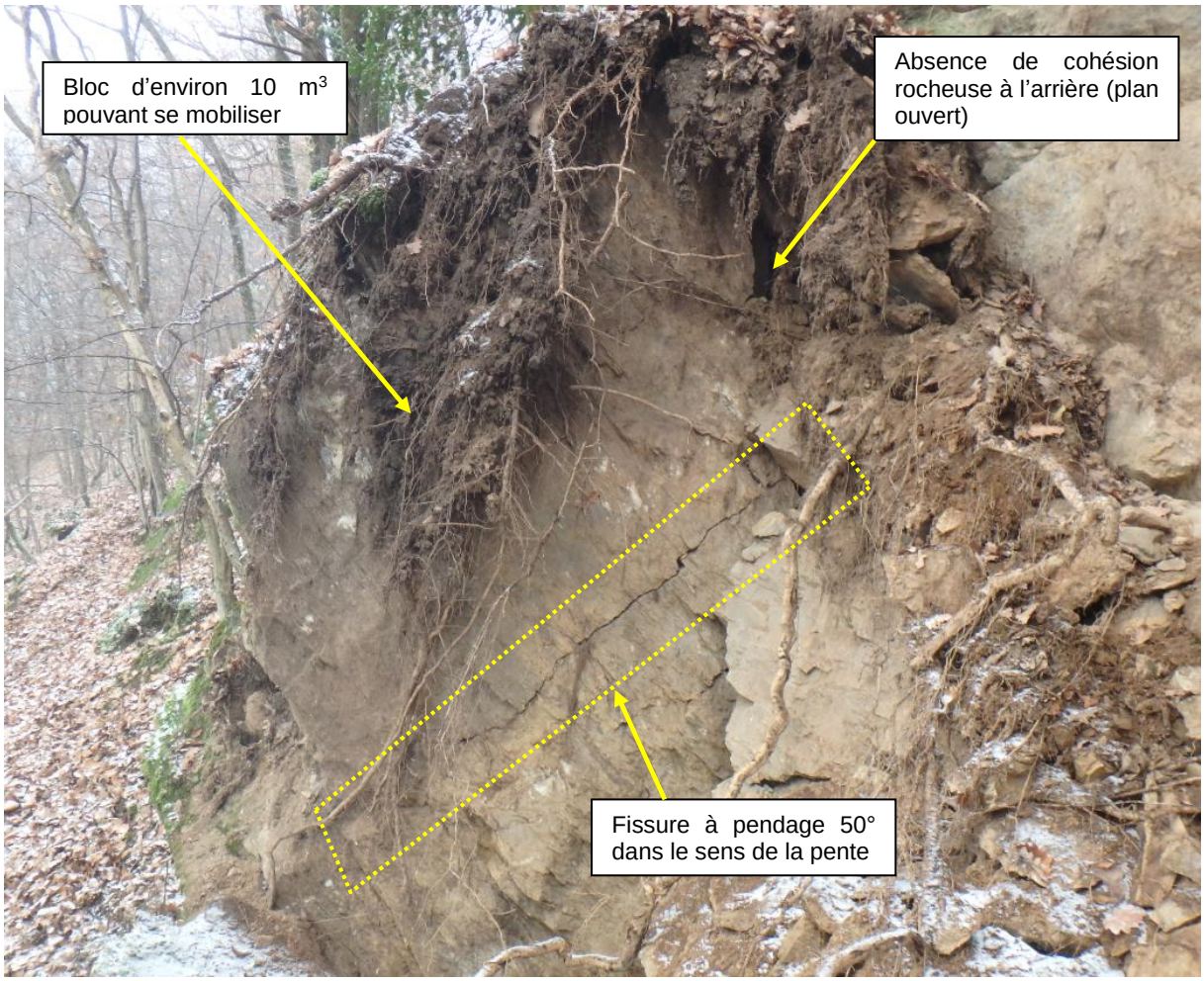


Figure 7 : bloc découpé au droit de la cicatrice

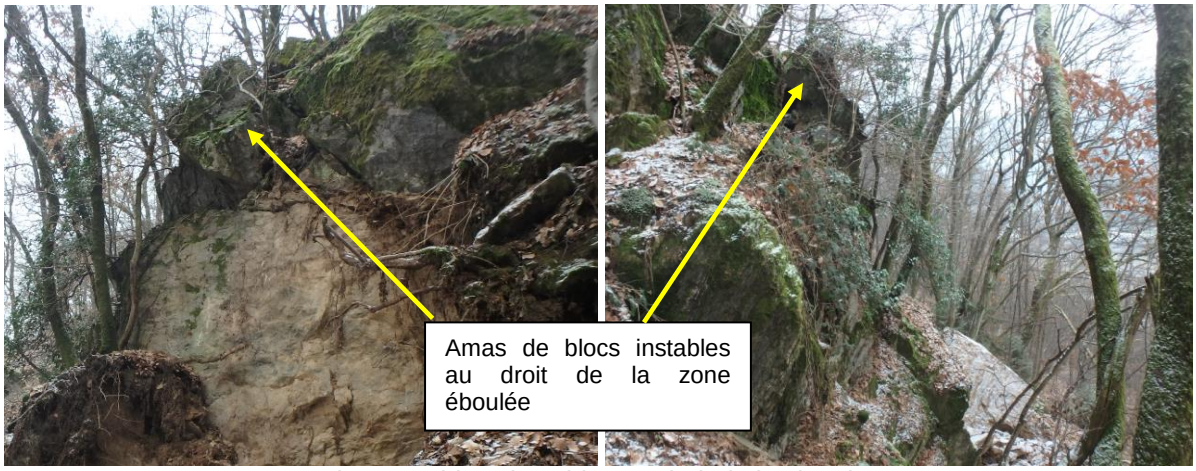


Figure 8 : blocs instables au droit de la cicatrice

III.2 Le versant

Le rocher est affleurant ou sub-affleurant sur tout le versant. Cette caractéristique lui confère une compacité certaine qui peut engendrer des rebonds importants à l'impact des blocs en propagation.
Signalons à ce titre un ressaut rocheux assez marqué (bien visible sur la figure 6) en pied de versant. Ce dernier peut freiner ou stopper les blocs, mais peut aussi avoir un effet tremplin en projetant les blocs relativement loin (impacts visibles à une vingtaine de mètres du sommet du ressaut).
Le pied du versant forme un replat sur une vingtaine de mètres avant les premiers enjeux.
Le versant est recouvert par un boisement de feuillus peu dense mais qui semble avoir eu une fonction de protection lors de l'événement de Noël 2018 (nombreux arbres cassés ayant ralenti ou arrêté des trajectoires).

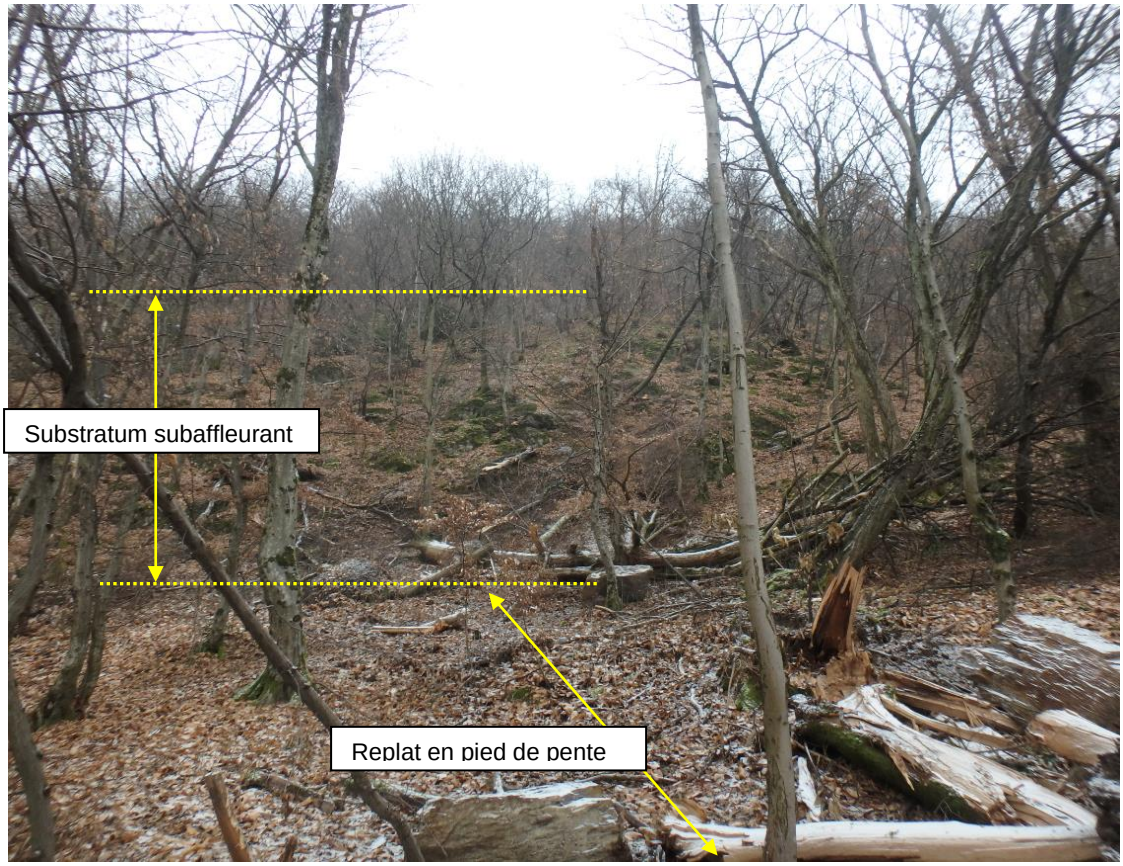


Figure 9 : vue en pied de versant

IV Synthèse et choix du scénario de référence

Deux scénarios se dégagent de ces investigations préalables :

- Le premier, est une remobilisation des blocs éboulés dans le versant ou une mise en mouvement des blocs instables au droit de la cicatrice. Ces derniers disposent de volumes inférieurs au m^3. Leur probabilité de départ est considérée comme élevée.

- Le second correspond à la mobilisation du bloc d'environ 10 m3 identifié au contact de la cicatrice (cf. figure 7). Celui-ci devrait peu se fragmenter compte tenu de sa compacité. Il devrait produire des blocs pouvant atteindre un volume de 6 m^3 (volume d'ailleurs relevé sur un bloc éboulé et stabilisé en pied d'affleurement).

Compte tenu des enjeux forts situés en pied de versant, il est proposé de retenir une hypothèse plutôt sécuritaire donc la propagation d'un bloc de 6 m^3.

V Modélisations trajectographiques

V.1 Méthode mise en œuvre

Il est proposé une approche par modélisations sur profils (2D) permettant de disposer des valeurs quantitatives de probabilité d'atteinte, de hauteur de passage et d'énergie, utiles au dimensionnement fonctionnel d'ouvrages.
Deux modèles, dont les algorithmes diffèrent, sont utilisés afin d'obtenir une certaine fiabilité des résultats.

Limites sur les calculs trajectographiques
1) Il n'existe à ce jour aucun logiciel trajectographique permettant de considérer correctement un éboulement supérieur à 10 m^3. Au-delà de cette valeur la réponse des sols n'est plus adaptée aux algorithmes utilisés.
2) Par ailleurs, très peu d'algorithmes de calculs sont capables de retranscrire correctement un replat rapide ou une contre pente. Cette limite nécessite d'adapter les paramètres de sol en conséquent ou d'avoir recours à des algorithmes spécifiques à ces niveaux.
3) Il existe autant de résultats que de logiciels et d'opérateurs. Pour afficher une totale transparence, nous proposons l'utilisation de logiciels libres ou du commerce dont les algorithmes de calculs sont connus et les paramètres d'entrées sont calés sur retours d'expériences (pas de recours à des logiciels internes de type « boite noire »). Tous les paramètres utilisés sont par ailleurs décrits. Enfin, comme évoqué précédemment, nous avons recours à 2 logiciels différents permettant de confronter les résultats.

V.2 Modélisations

V.2.1 Description des modèles

Les modélisations sur profils ont été réalisées avec les logiciels RocFall® développé par Rocsciences et Propag® développé par le Céréma (les modèles sont détaillés en annexes).

V.2.2 Acquisition topographique

Deux profils ont été retenus au sur la base des trajectoires observées lors de l'événement de Noël 2018. Ces profils sont extraits d'un MNT de résolution 1m.

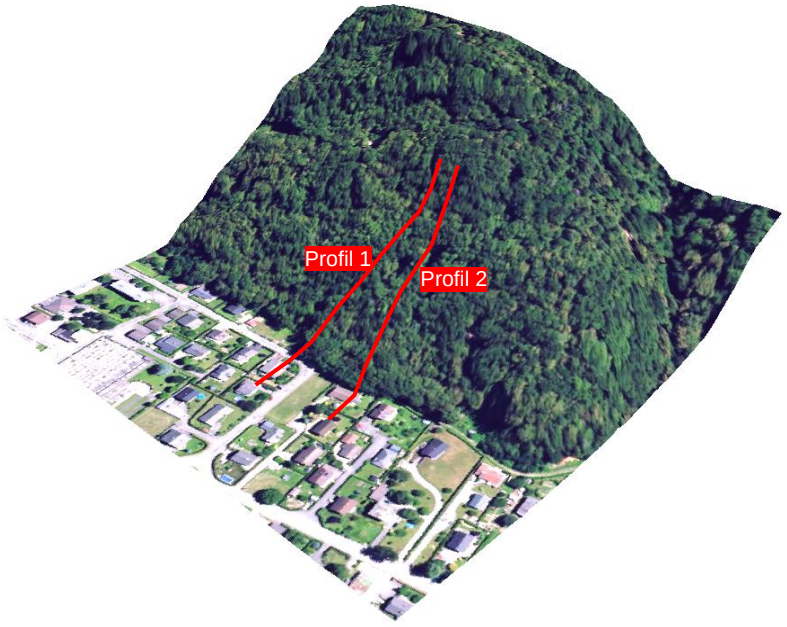


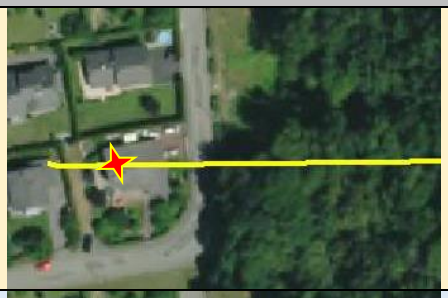
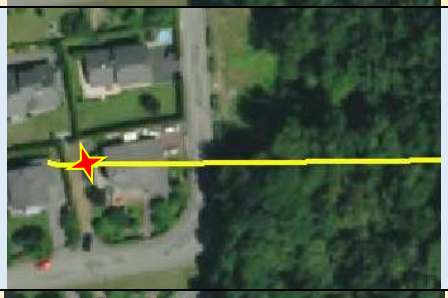
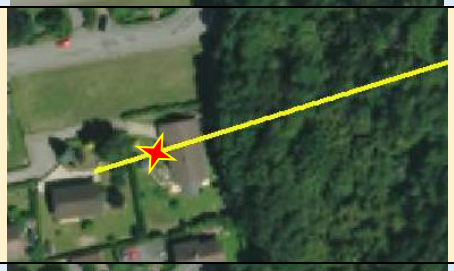
Figure 10 : implantation et désignation des profils

V.2.3 Hypothèses de départ

Les paramètres de sols sont propres à chaque logiciel. Ils sont détaillés en annexes. Les points de départ sont fixés entre les cotes 460 et 470 m. Le volume des blocs modélisés est calé à 6 m^3.

V.2.4 Résultats

Les résultats sont détaillés en annexes 1 et 2. Le tableau suivant les synthétise.

	Atteinte maximale		Valeurs au point d'analyse (= zone du merlon projeté)			
Profil / Logiciel	Valeur abscisse	Correspondance terrain	Hauteur maximale	Hauteur retenue	Energie maximale	Energie retenue
P1 / Rocfall	181 m		2,8 m	2,3 m	5100 kJ	3200 kJ
P1 / Propag	185 m		2 m	2 m	3500 kJ	3500 kJ
P2 / Rocfall	186 m		2,8 m	1,5 m	5500 kJ	2900 kJ
P2 / Propag	193 m		2,5 m	2,5 m	3800 kJ	3800 kJ

Interprétation des résultats

Les modélisations montrent que tous les blocs atteignent le pied de versant ce qui n'est pas surprenant au regard de la forte pente du versant et de la compacité des sols. **L'essentiel des blocs (90%) s'arrête sur le replat en amont des enjeux (ce qui est cohérent avec l'événement du 25/12/2018). En revanche, une part non négligeable des trajectoires modélisées atteint les enjeux bâtis (et même au-delà).**

Les énergies au droit du point d'analyse oscillent entre 3000 kJ et plus de 5000 kJ (excluant la protection de filet pour cette dernière valeur).

Les hauteurs de passage au droit du point d'analyse sont relativement modestes puisqu'inférieures à 2,5 m. Cela s'explique notamment par le replat en pied de versant qui « casse » les rebonds.

VI Propositions de protection

VI.1 Stratégie proposée

Le traitement en parade active (type clous, filet plaqué, etc.) n'apparait pas être un choix judicieux au regard de la configuration rocheuse des affleurements. De plus, la durée de vie de tels ouvrages est limitée.
Les énergies potentiellement élevées (bloc de 6m^3 et énergies max > 5000 kJ) excluent également le recours à des écrans de filets (ces derniers étant par ailleurs relativement onéreux et disposent d'une durée de vie fixée à 25 ans par les fournisseurs).
Par conséquent nous proposons l'aménagement d'un merlon pare-bloc qui sera facilement mis en œuvre compte tenu de l'espace disponible en pied de versant. Ce type d'ouvrage présente de surcroit des avantages considérables : coût, pérennité, efficacité, rapidité de mise en œuvre, insertion paysagère, entretien limité, etc.

Les paragraphes suivants abordent les points techniques plus en détail.

VI.2 Aménagement d'un merlon

VI.2.1 Principe et description

Le merlon forme un obstacle massif, mais suffisamment déformable pour absorber l'énergie des masses en mouvement, et donc les arrêter. On entend par obstacle une levée topographique ayant un parement amont à forte pente (70°) (pour éviter que les masses rocheuses ne remontent le talus en rotation) et possédant une masse propre suffisante pour résister aux impacts.
Le merlon devra être couplé à une fosse qui intercepte et stocke des pierres, des blocs isolés ou des éboulements plus importants. Il s'agira de l'aménagement d'un volume de réception. La géométrie de la fosse doit être telle que les masses éboulées y soient piégées et stockées. Sur le site d'étude, le terrain naturel étant relativement plat : il se prête particulièrement bien à ce rôle. Ce type d'ouvrage peut contenir des évènements d'énergie élevée.

VI.2.2 Dimensionnement fonctionnel

Le linéaire est estimé à environ 120 m. D'amont en aval, l'ouvrage se décomposera de la façon suivante :

- Le talus du versant devra être mis à une pente inférieure ou égale à 37°.
- La fosse devra avoir au minimum 5 m de largeur. Cette valeur pourra être revue à la hausse en fonction de la configuration du terrain afin de fournir suffisamment de remblai à l'ouvrage.
- La hauteur utile (hauteur verticale entre la fosse et la crête du merlon) est définie par les hauteurs de passage des modélisations trajectographiques auxquelles il a été ajouté le rayon du bloc (r= 1,12 m pour un bloc de 6m^3). Il est proposé de retenir 2,5 m.
- Le parement amont du merlon sera raidi à 70°. Plusieurs techniques existent, nous préconisons ici un enrochement sec (facilité et rapidité de mise en œuvre, prix avantageux).
- La crête du merlon devra au minimum être de 2,5 m de largeur (idéalement 3 m pour le passage d'engin de compactage).
- Le parement aval du merlon sera en remblai compacté sur une pente de 35°.

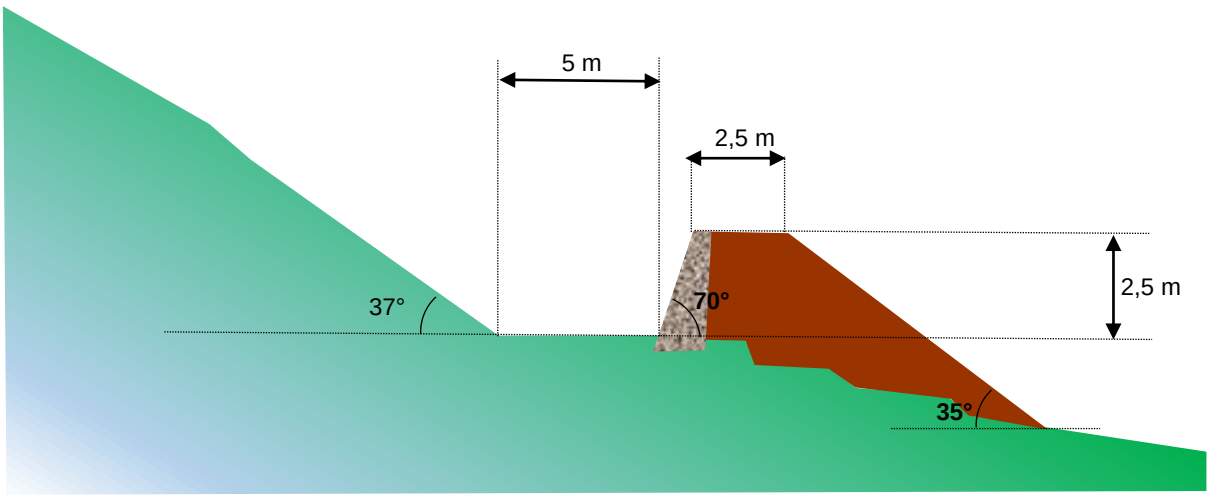


Figure 11 : schéma de principe de l'ouvrage proposé

VI.2.3 Implantation

Les modélisations montrent que la rupture de pente située en pied d'éboulis joue un rôle important de frein, voire d'arrêt des blocs. Il apparaît donc opportun d'utiliser ce replat.
Idéalement l'ouvrage sera d'autant plus efficace qu'il sera situé en aval. Il semble donc judicieux de positionner l'ouvrage juste au-dessus de la voirie communale ainsi que du chemin qui se dirige vers le Sud. Il sera cherché un terrassement en déblais de la fosse de façon à fournir suffisamment de remblais pour ériger l'ouvrage. Toutefois, un apport de matériaux pour le raidissement du parement amont sera indispensable (blocs ou autre technique).
L'illustration suivante présente l'implantation (représentation schématique) qui semble la plus adéquate.

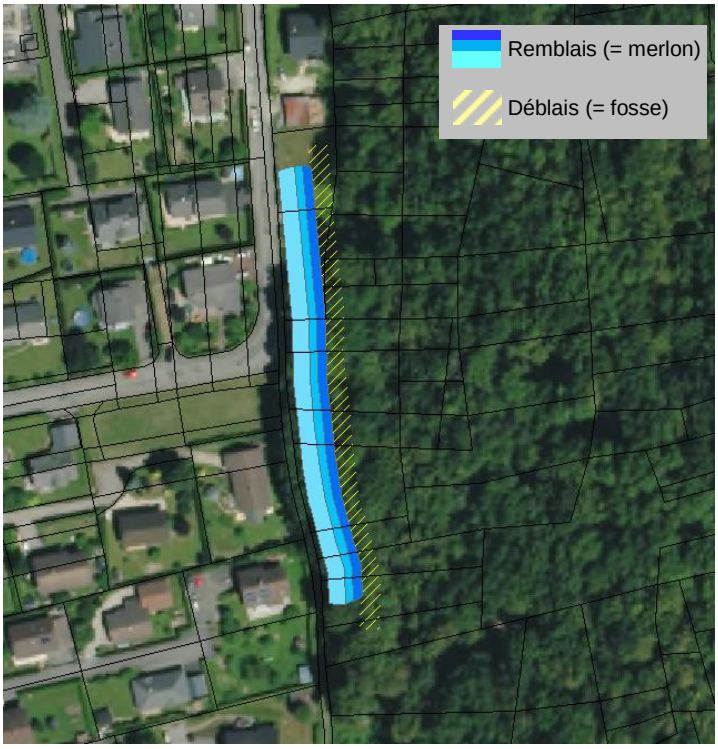


Figure 12 : Implantation projetée du merlon

Notons qu'il est possible de décaler l'ouvrage vers l'Ouest sur le chemin actuel et de faire transiter ce dernier dans la fosse. L'implantation exacte devra être précisée par le maitre d'ouvrage.

VI.2.4 Estimation financière

Les montants donnés ci-après sont indicatifs et non contractuels. Ceux-ci peuvent être très aléatoires en fonction de la période projetée des travaux, de la charge de travail des entreprises, des coûts variables de matières premières (fuel notamment), des contraintes liées au site (foncières par exemple), de la technique de raidissement du parement amont, etc.

poste	quantité	prix unitaire	Montant HT
Préparation du chantier (installation, bucheronnage, etc.)	forfait		10000 €
Enrochement sec avec approvisionnement de blocs	Estimation sommaire 380 m^3	100 €/m^3	38000 €
Terrassement déblai/remblai	Estimation sommaire 1050 m^3	7 €/m^3	7350 €
Divers (≈20%)			10000 €
		TOTAL HT	65350 €
		MONTANT TTC	78420 €

VII Synthèse

La présente étude confirme l'existence d'un risque de chutes de blocs pour une portion de la voirie communale et les habitations en contrebas de l'éboulement du 25/12/2018. Etant donné l'état déstructuré de l'affleurement, ce risque est avéré et nécessite une intervention rapide pour assurer la sécurité des habitations et la remise en service de la voirie.

La construction d'un merlon aux dimensions relativement modestes (longueur 120m, hauteur 2,5m) constituerait une solution rustique, pérenne, très adaptée au site et permettant de contenir même des phénomènes très peu probables.

VIII Annexes

VIII.1 Annexe 1 : résultats modélisations via Rocfall

VIII.1.1 Données d'entrées

Les paramètres de sols correspondent aux rugosités des terrains et leurs coefficients de restitution. Afin d'être ajustées aux calages du modèle, ces valeurs ont été définies conformément au tutoriel du logiciel et ajustées à la réalité terrain. Les paramètres intégrés dans le modèle sont les suivants :

Type de sol	Coefficient de restitution normal Rn	Coefficient de restitution tangentiel Rt	Angle friction Phi en °	Rugosité de pente (variation pente en ° par rapport au segment)
Affleurement	0,53	0,99	30	2
Formation de versant	0,35	0,85	30	7
Pied de versant	0,32	0,82	30	0

Afin de disposer d'une probabilité la plus exhaustive possible, nous avons considéré le départ de 10 000 blocs permettant de calculer ensuite les probabilités d'atteinte.

VIII.1.2 Résultats

Les illustrations suivantes représentent :

- les profils avec les trajectoires des 10000 blocs (en rouge).
- La localisation du point d'analyse permettant d'extraire les résultats de la modélisation sur un axe qui est positionné sur l'emplacement approximatif de l'implantation adéquate d'un projet de protection (axe vertical rouge).
- un tableau avec les valeurs au point d'analyse essentielles au dimensionnement.
- un graphique des statistiques des hauteurs de passage au point d'analyse est également proposé. Celui-ci permettra au maitre d'ouvrage d'ajuster le niveau de sécurisation souhaité.

Pour le dimensionnement fonctionnel d'un ouvrage d'interception, les hauteurs données correspondent aux résultats des modélisations augmentés de la valeur du rayon du bloc (rayon pour un bloc de 6 m^3 = 1.12 m).

Remarque : dans le tableau des valeurs, il est indiqué la hauteur maximale (max) ainsi que les 90, 95 et 99^{ièmes} percentiles. Ces 3 dernières valeurs sont données car les résultats maximaux (max) correspondent la plupart du temps à des artéfacts des logiciels probabilistes qui tendent à simuler des trajectoires irréalistes. Cette problématique bien connue des spécialistes incite à retenir des quantiles inférieurs. Compte tenu d'enjeux forts (bâti), il est donné dans le tableau, en encadré rouge, la valeur retenue par le RTM (H99). En connaissance de cause, le maitre d'ouvrage est libre de choisir une valeur supérieure (Hmax) ou inférieure (H90 ou H95).

Profil 1

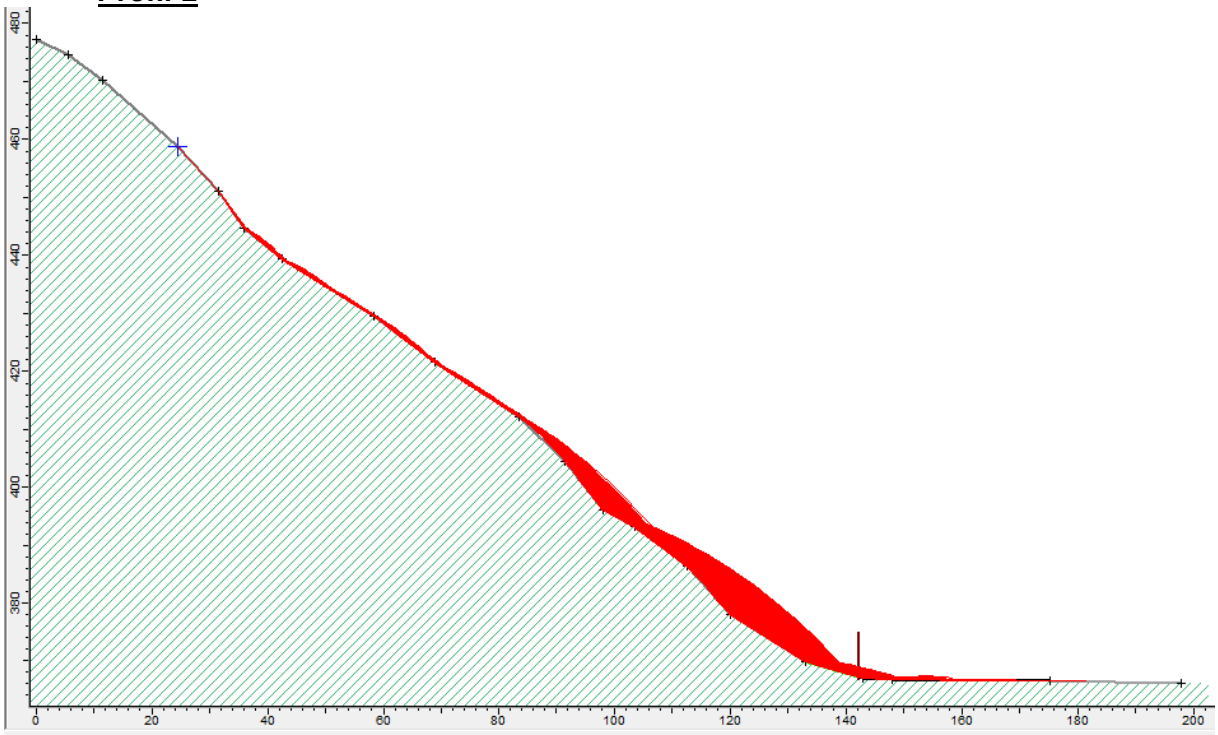


Figure 13 : modélisation sur le profil 1

Nombre de blocs atteignant le point d'analyse sur 10000 lancés				9990	
	max	moyenne	90ième percentile	95ième percentile	99ième percentile
NRJ (en kJ)	5100	1700	2500	2700	3200
Hauteur (en m) + rayon bloc	2,8	1,3	1,8	2	2,3

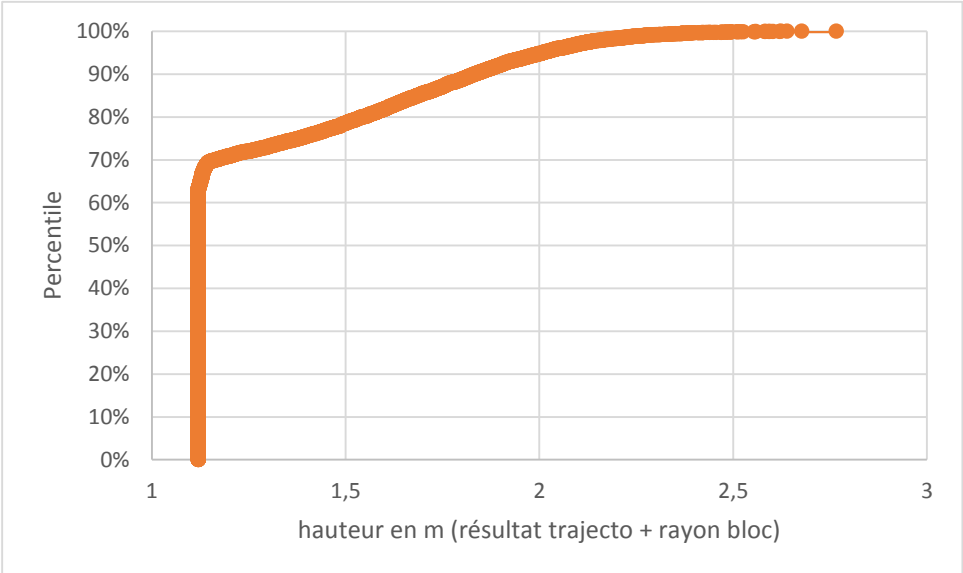


Figure 14 : graphique des statistiques des hauteurs de passage au point d'analyse

Profil 2

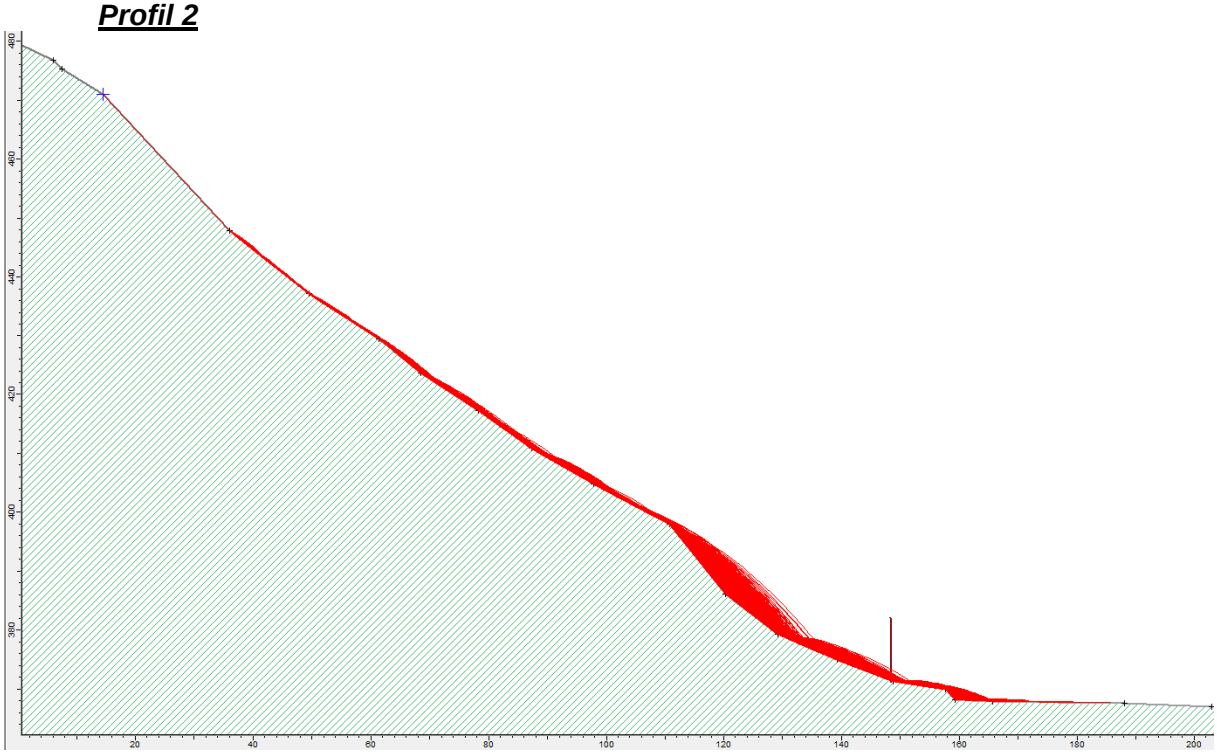


Figure 15 : modélisation sur le profil 2

Nombre de blocs atteignant le point d'analyse sur 10000 lancés				7606	
	max	moyenne	90ième percentile	95ième percentile	99ième percentile
NRJ (en kJ)	5500	740	1400	1600	2900
Hauteur (en m) + rayon bloc	2,8	1,127	1,2	1,3	1,5

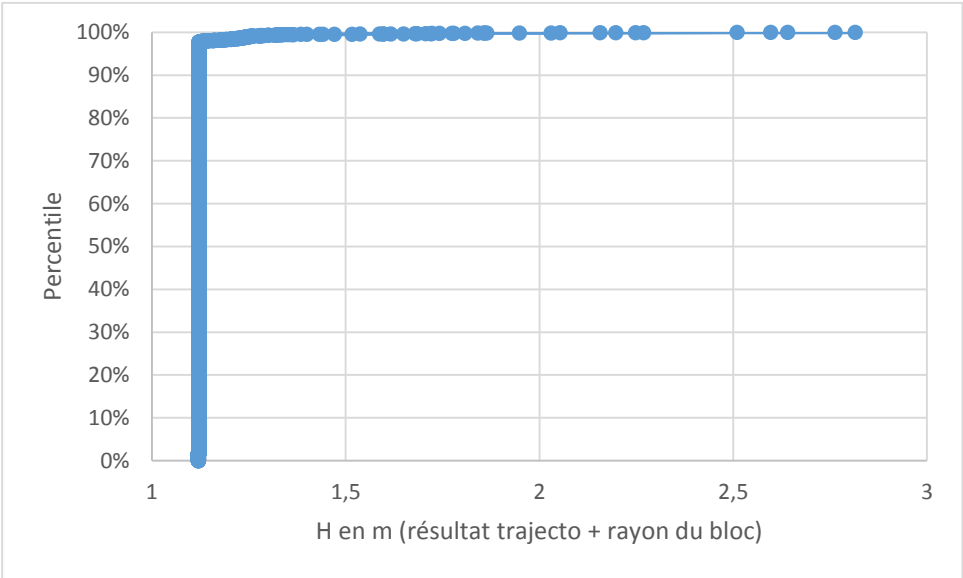


Figure 16 : graphique des statistiques des hauteurs de passage au point d'analyse

VIII.2 Annexe 2 : résultats modélisations via Propag

VIII.2.1 Données d'entrées

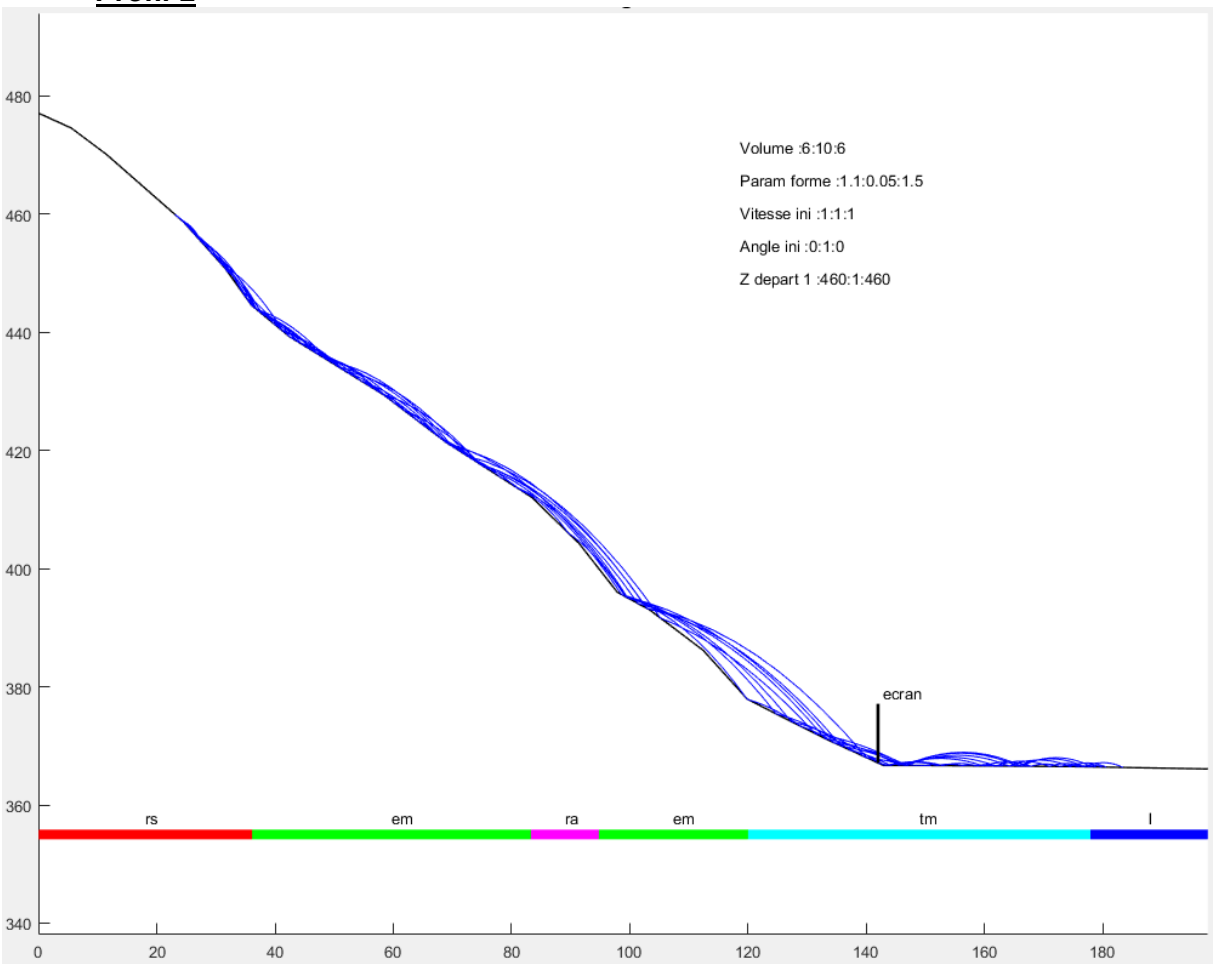
6 types de sols sont proposés par le logiciel.
La vitesse initiale est calée à 1 m/s.
Les paramètres de forme varient entre 1,1 et 1,5

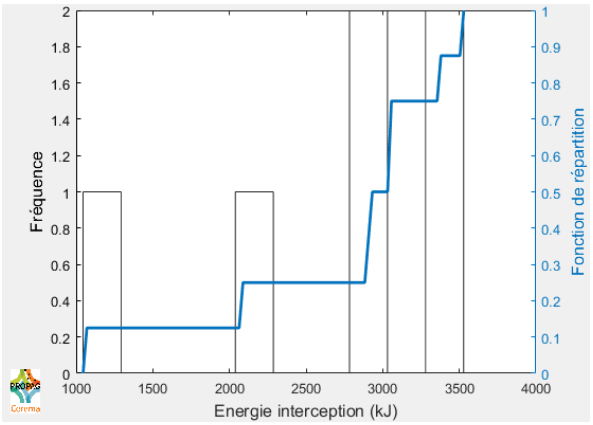
VIII.2.2 Résultats

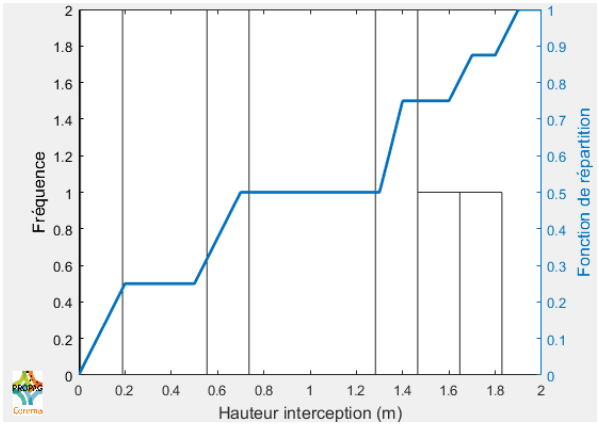
Les illustrations suivantes représentent :

- les profils avec les différentes trajectoires du bloc modélisé. Le modèle étant déterministe, il considère 1 seul bloc mais fait varier les paramètres (d'où plusieurs trajectoires).
- La localisation du point d'analyse permettant d'extraire les résultats de la modélisation sur un axe qui est positionné sur l'emplacement approximatif de l'implantation adéquate d'un projet de protection (axe vertical noir).
- un graphique des fréquences des hauteurs de passage et des énergies au point d'analyse est également proposé.

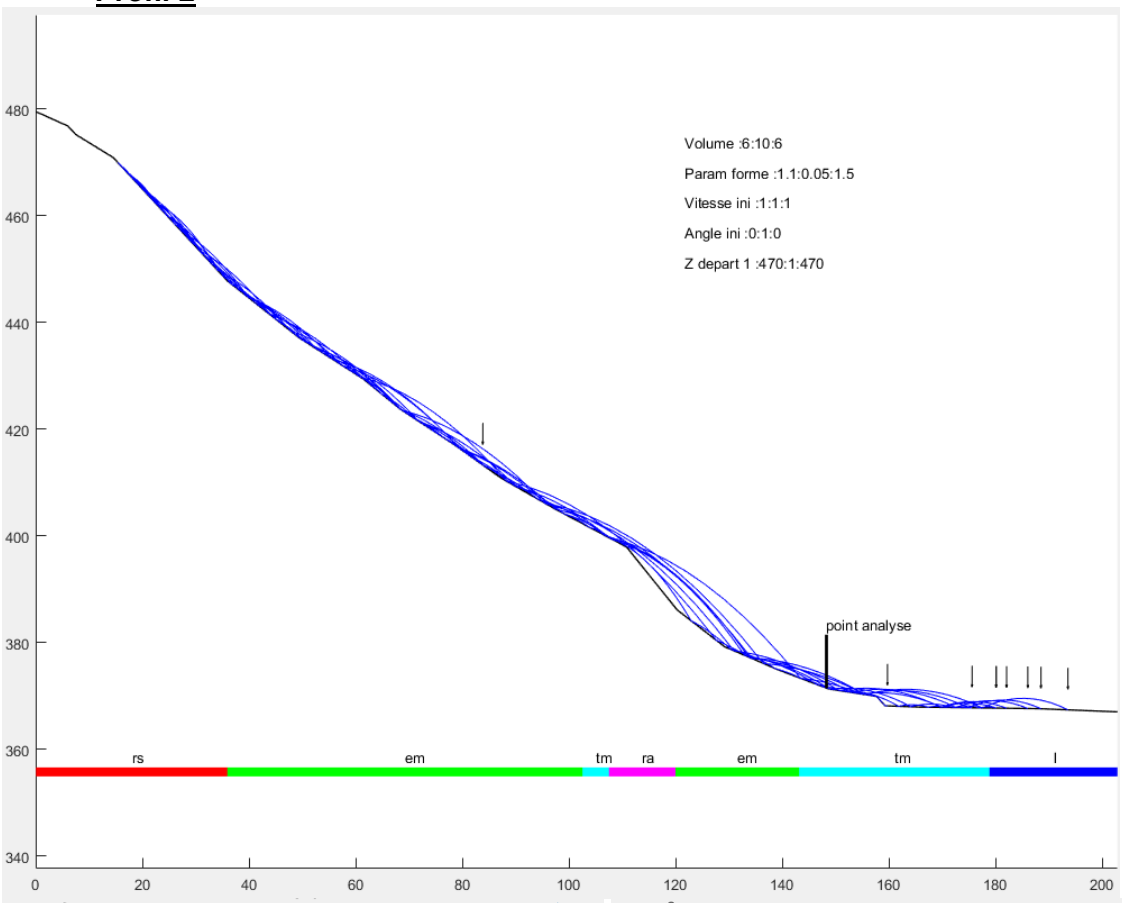
Profil 1

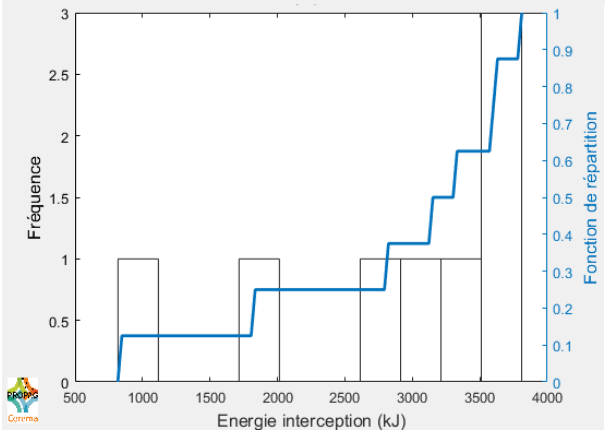


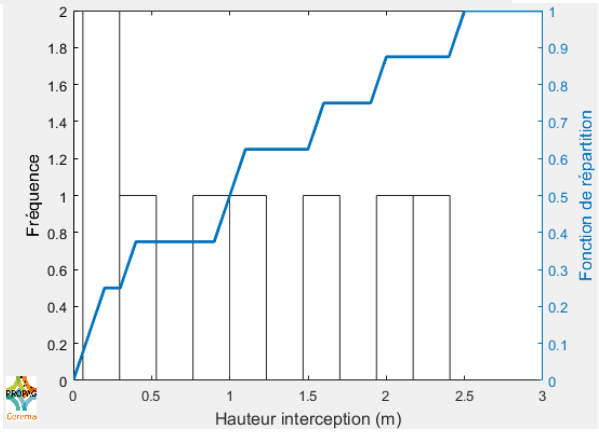

Fréquence
Fonction de répartition
Energie interception (kJ)


Fréquence
Fonction de répartition
Hauteur interception (m)

Profil 2


Volume :6:10:6
Param forme :1.1:0.05:1.5
Vitesse ini :1:1:1
Angle ini :0:1:0
Z depart 1 :470:1:470
point analyse
rs
em
tm
ra
em
tm
l


Fréquence
Fonction de répartition
Energie interception (kJ)


Fréquence
Fonction de répartition
Hauteur interception (m)

VIII.3 Annexe 3 : détails sur le logiciel Rocfall

VIII.3.1 Présentation

Développement : Rocscience Inc. (https://www.rocscience.com)
Type de modèle : probabiliste à trajectoire enveloppe, deux dimensions.
Les variables aléatoires du modèle, qui peuvent être initialisées par des valeurs constantes ou des distributions aléatoires, sont :

- La masse du bloc ;
- Sa position initiale ;
- Sa vitesse ;
- La position des ruptures de pente ;
- Les coefficients de restitution des sols/roches ;
- Les angles de friction des sols/roches.

Le modèle permet d'obtenir en sortie les distributions des éléments suivants :

- Énergie cinétique des blocs ;
- Vitesse ;
- Hauteur de passage ;
- Positions des points d'arrêt.

RocFall permet aussi d'intégrer la présence de barrières pour vérifier leur influence sur la trajectoire des blocs, ou bien dans une optique de dimensionnement.
Le logiciel, codé en langage C++, est composé de trois algorithmes principaux :

- Le « particle algorihtm », qui permet de vérifier la validité des paramètres de simulation et d'initialiser les conditions des algorithmes suivants ;
- Le « projectile algorithm », qui calcule les mouvements dans l'air et les rebonds tant que la vitesse du bloc est supérieure à une vitesse V_{min} ;
- Le « sliding algorithm », qui calcule les mouvements de glissement (contact continu avec le sol) lorsque la vitesse du bloc est inférieure à V_{min}.

VIII.3.2 Hypothèses de calcul

RocFall est basé sur la propagation d'une masse ponctuelle, c'est-à-dire qu'il néglige les effets de la taille, de la forme et du moment angulaire des blocs. Cependant, les équations utilisées dans le « sliding algorithm » impliquent une forme circulaire. Chaque bloc étant représenté comme un point infinitésimal, il n'y a pas d'interactions entre les particules, mais seulement avec la topographie ou les barrières.
La masse des blocs n'intervient dans aucune équation de mouvement, mais seulement dans le calcul de l'énergie cinétique en sortie du modèle.
La résistance aux frottements dans l'air est négligée.
La topographie est modélisée comme une succession de segments rectilignes. Les barrières de protection sont modélisées par un segment rectiligne le cas échéant.

VIII.3.3 Principes de calcul

a. « projectile algorithm »

L'algorithme, basé sur le mouvement parabolique des blocs dans l'air, consiste à trouver l'intersection entre la parabole définissant la trajectoire du bloc et un segment rectiligne (topographie ou barrière). Cette intersection définira ainsi le point d'impact du bloc. Cela revient, pour chaque incrément de calcul, à vérifier la validité de la solution vérifiant à la fois les équations paramétriques de la parabole et du segment.
Équations paramétriques d'un segment (topographie/barrière) :

$$x = X_1 + (X_2 - X_1)u$$
$$y = Y_1 + (Y_2 - Y_1)u$$
$$u \in [0,1]$$

Avec : (X_1, Y_1) et (X_2, Y_2) les extrémités du segment

Équations paramétriques de la parabole :

$$x = V_{X0}t + X_0$$
$$y = \frac{1}{2}gt^2 + V_{Y0}t + Y_0$$
$$t \in [0,\infty]$$

Avec : (X_0, Y_0) : la position initiale du bloc
(V_{X0}, V_{Y0}) : la vitesse initiale du bloc
g : l'accélération de la pesanteur (-9,81 m.s^{-2})

Équations paramétriques de la vitesse du bloc :

$$V_{XB} = V_{X0}$$
$$V_{YB} = V_{Y0} + gt$$

Avec : (V_{XB}, V_{YB}) : la vitesse du bloc en tout point avant impact
Une fois le point d'impact trouvé, la vitesse avant impact est calculée à partir des équations ci-dessus, et la vitesse après impact est calculée en utilisant les coefficients (normal et tangentiel) de restitution des sols.

Relations entre les coefficients de restitution des sols et les vitesses avant et après impact :

$$V_{NA} = R_N V_{NB}$$
$$V_{TA} = R_T V_{TB}$$

Avec : (V_{NB}, V_{TB}) et (V_{NA}, V_{TA}) les couples de vitesses normales et tangentielles avant (*before*) et après (*after*) impact.
R_N et R_T : les coefficients de restitution normal et tangentiel, compris entre 0 et 1.
La vitesse après impact est ensuite comparée à V_{min} afin de déterminer s'il faut continuer à utiliser le « projectile algorithm » ou s'il faut passer au « sliding algorithm ».

b. « sliding algorithm »

Le principe de cet algorithme est de calculer pour chaque segment la vitesse finale des blocs (V_{EXIT}), jusqu'à ce qu'elle soit nulle. Dans cet algorithme, les segments (topographie ou barrières) sont caractérisés par leur pente (θ) et leur angle de friction (φ). Seule la composante tangentielle de la vitesse est considérée dans les équations. L'algorithme présente deux variantes selon que le déplacement est dans le sens de la pente ou à contre-pente :

Glissement dans le sens de la pente :

Le comportement du bloc dépend de la relation entre la pente et l'angle de friction :

- θ = φ : si la pente est égale à l'angle de friction, les forces de gravité et de frottements se compensent, et le bloc conserve sa vitesse initiale : $V_{EXIT} = V_0$.
- θ > φ : si la pente est supérieure à l'angle de friction, la vitesse du bloc augmente et atteint la vitesse de sortie V_{EXIT} selon la relation suivante :

$$V_{EXIT} = \sqrt{V_0^2 - 2sgk}$$

Avec : $k = \sin(\theta) - \cos(\theta).\tan(\phi)$
s : la distance de déplacement sur le segment

- θ < φ : si la pente est inférieure à l'angle de friction, la vitesse du bloc diminue. L'algorithme calcule alors la distance d'arrêt du bloc ($V_{EXIT} = 0$) dans le cas où le segment aurait une longueur infinie, afin de la comparer à la longueur réelle du segment :

$$s = \frac{V_0^2}{2gk}$$

Si cette distance s est inférieure ou égale à la distance réelle du segment, l'algorithme est arrêté, sinon la vitesse de sortie est calculée selon la relation.

Glissement à contre-pente :

Dans ce cas, la vitesse du bloc diminue, et l'algorithme utilise le même principe que dans le cas du glissement dans le sens de la pente lorsque la pente est inférieure à l'angle de friction ($\theta < \varphi$). Dans le cas où la distance s calculée par l'équation précédente est supérieure à la distance du segment, la vitesse de sortie est calculée selon la relation précitée en remplaçant k par :

$$k = -\sin(\theta) - \cos(\theta) \cdot \tan(\phi)$$

VIII.3.4 Paramètres de sols

Les paramètres de sols ont été renseignés au moyen d'une application du logiciel Rocfall. Les valeurs renseignées correspondent aux rugosités des terrains et leurs compacités. Afin d'être ajusté aux calages du logiciel, ces valeurs ont été définies conformément au tutoriel du logiciel exposé ci après.

Rocscience Coefficient of Restitution Table

RN (Normal)				RT (Tangential)				Type	Verification	Location	Reference
Min	Max	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Mean	Standard Deviation				
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving	Tested using simulated rockfalls of similar size and shape of a previous rockfall.	Glenwood Canyon, Colorado, USA	Pfeiffer, T.J., and Bowen, T.D., "Computer Simulation of Rockfalls." Bulletin of Association of Engineering Geologists. Vol. 26, No. 1. 1989. pp135-146
0.330	0.370			0.830	0.870			Bedrock or boulders with little soil or vegetation			
0.300	0.330			0.830	0.870			Talus with little vegetation			
0.300	0.330			0.800	0.830			Talus with some vegetation			
0.280	0.320			0.800	0.830			Soft soil slope with little vegetation			
0.280	0.320			0.780	0.820			Vegetated soil slope			
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face	Tested on restoration-blasting slopes made of four types of materials; blast-generated rock fragments, partially vegetated scree on berms, uncovered blast piles, and vegetated quarry waste.	Limestone quarry in England	Robotham, M.E., and Wang, H., and Walton, G., "Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes." Institution of mining and Metallurgy, Section A. 1995.104(Jan-April), pp A25-A33
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree			
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile			
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile			
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face		Chalk quarry in England	
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree			
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.	Tested as control parameters	Western North Carolina for Interstate 40.	Wu, Shie-Shin "Rockfall evaluation by computer simulation" Transportation Research Records. Vol. 1031 pp 1-5, 1985.
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus despositis	Consisted of hand made throws and free fall tests by fragmentation of rock using explosives, of dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus deposit of the landslide fans. Also used back-analysis, and information from Urciuoli.	Atrani, Campania, Southern Italy	Budetta, P., and Santo, A. "Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania(southern Italy)." Engineering Geology. Vol.36 pp197-210.
		0.100				0.200		Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff			
		0.000				0.240		Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff			
		0.393				0.567		Soil	Tested by dropping 3 to 5 cm cuboid and angular granite rock fragments onto slopes	Hong Kong	Chau, K.T., and Wong, R.H.C., and Lee, C.F. "Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution" International Journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics. Vol. 35, Section 4-5. 1996. pp662-663
		0.453				0.737		Shotcrete			
		0.487				0.910		Rock slope			
		0.500				0.950		Bedrock	Referenced from tests carried out by Barbieri et al.	Italcementi works at Castellammare di Stabia(northern slope of the Sorrentine Peninsula), and the area of Atrani.	Giani, G.P. "Rock Slope Stability Analysis" Rotterdam, Balkema 1992.
		0.350				0.850		Bedrock covered by large blocks			
		0.300				0.700		Debris formed by uniform distributed elements			
		0.250				0.550		Soil covered by vegetation			
		0.530				0.990		Clean hard bedrock			Hoek, Evert. "Unpublished notes" NSERC Industrial Research Professor of Rock Engineering, Department of Civil Engineering, University of Toronto, St George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4
		0.400				0.900		Asphalt roadway			
		0.350				0.850		Bedrock outcrops with hard surface, large boulders			
		0.320				0.820		Talus cover			
		0.320				0.800		Talus cover with vegetation			
		0.300				0.800		Soft soil, some vegetation			

0.370	0.420						Smooth hard surfaces and paving	Developed by observation and literature review	Colordado, USA	Pfeiffer, T.J., and Higgens, J.D., "Rockfall Hazard Analysis Using the Colorado Rockfall Simulation." Transportation Research Record 1288, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp117-126.
0.330	0.370						Most bedrock and boulder fields			
0.300	0.330						Talus and firm soil slopes			
0.280	0.300						Soft soil slopes			
				0.870	0.920		Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces			
				0.830	0.870		Most bedrock surfaces and talus with no vegetation			
				0.820	0.850		Most talus slopes with some low vegetation			
				0.800	0.830		Vegetated talus slopes and soil slopes with spares vegetation			
				0.780	0.820		Brush covered soil slope			
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	a) rolled many rocks down the slope to verify used values b) comparison to historical rockfall events at site	Mountain road, near Bolzano, Sothtyrol, Italy	feedback from user of RocFall version 3
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outkrop			
		0.320	0.040			0.820	0.040	Talus cover			
		0.320	0.040			0.800	0.040	Talus with vegetation			
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving			
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	default program values used	170m deep open pit, Tasmania, Australia (overall pit angle between 55 and 65 degrees)	feedback from user of RocFall version 3
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop			
		0.480	0.190			0.530	0.170	Concrete	inverse calculation of paths - standard deviations seemed to large	Takamatsu, Japan	feedback from user of RocFall version 3
		0.470	0.300			0.550	0.230	Weathered Rock			
		0.480	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths, roughness of 7.9 degrees for concrete, 9.3 for rock		
		0.470	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock			
		0.850	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths		
		1.000	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock			
		0.530	0.040			0.990	0.040	Bedrock	Estimation, block diameters 10 to 30 cm	Fjord valley, State of Sogn og Fjordane, Norway	feedback from user of RocFall version 3
		0.500	0.060			0.700	0.060	Blockfield			
		0.500	0.060			0.650	0.060	Blockfield with bushes and small trees			
		0.500	0.060			0.500	0.060	Blockfield with forest			
		0.300	0.060			0.800	0.060	Top-soil with vegetation			
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving			
		0.350	0.040			0.850	0.040	Gravel road			
		0.500				0.800		Sparsley forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.	Calculated from historic rockfall	Sunnybrae, (interior of)British Colombia, Canada	Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lusanne. July 1988, Vol. 1, pp. 685-690.
		0.500				0.800		Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.	Calculated from historic rockfall	Hedley, (southern interior of) British Colombia, Canada	
		0.700				0.900		rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.	Calculated from historic rockfall	Squamish Highway, north of Vancouver British Colombia, Canada	

VIII.4 Annexe 4 : Détail sur le logiciel Propag

Le logiciel utilisé pour l'étude trajectographique réalisée par le Cerema Centre-Est est Propag. Ce logiciel a été développé par Louis Rochet (Rochet, 1987) et calé à partir d'expériences de terrain. Propag permet de simuler la trajectoire d'un bloc en 2D en calculant une succession de séquences de chute libre dans l'air et de rebonds sur le terrain naturel jusqu'à l'arrêt du bloc. Pour la phase de chute libre, le frottement de l'air est négligé.
Le modèle est basé sur l'observation du mécanisme de la propagation des éboulements qui met en évidence le rôle essentiel de la rotation des blocs. En effet, la forme des blocs, en général anisotrope, induit, sous l'action de la rotation, un relèvement de la trajectoire et son rallongement jusqu'à l'impact suivant. Ce phénomène est prédominant dans les zones peu pentues qui sont proches de la zone d'arrêt du bloc.

Hypothèses et notations
Le bloc est un point sans dimension, animé d'une vitesse de translation. Le bloc est caractérisé par son volume V en m^3 et un paramètre de forme e .

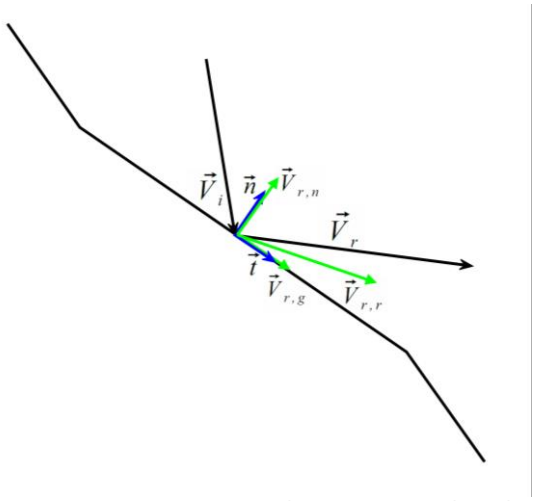


Figure « a » : Notations adoptées pour le rebond

La vitesse incidente se décompose suivant des composantes normale et tangentielle à la surface du sol : $\vec{V}_i = V_{in}\vec{n} + V_{it}\vec{t}$. Il est postulé [Rochet 1987] que la composante tangentielle de la vitesse incidente est générée par deux phénomènes :

- glissement ou translation tangentielle,
- rotation du bloc.

Un facteur, K_ρ , facteur de roulement, est introduit pour définir l'influence relative des mécanismes de rotation et de glissement. La composante tangentielle de la vitesse incidente s'écrit donc :

$$V_{it} = \underbrace{K_\rho V_{it}}_{\text{composante liée à la rotation}} + \underbrace{(1 - K_\rho) V_{it}}_{\text{composante liée au glissement}}$$

K_g est actualisé avant chaque rebond et dépend de la topographie locale (dénivelé entre le rebond précédent et le rebond actuel noté Δy). Ainsi, selon cette convention, la vitesse incidente s'écrit : $\vec{V}_i = V_{in}\vec{n} + K_\rho V_{it}\vec{t} + (1 - K_\rho) V_{it}\vec{t}$

Le modèle d'impact, présenté ci-après, permet de calculer la vitesse après rebond notée V_r qui se décompose en trois composantes selon les directions indiquées sur la Figure « a » :

$$\vec{V}_r = \vec{V}_m + \vec{V}_{rg} + \vec{V}_{rr}$$

Modèle d'impact

Le modèle d'impact utilisé dans Propag [Rochet 1987] définit les relations entre énergies cinétiques incidentes et après impact par trois fonctions de transfert :

- fonction de transfert normale Ψ_n, traduisant la partie élastique du rebond :

$$\Psi_n = \frac{\frac{1}{2} m v_m^2}{\frac{1}{2} m v_{in}^2} = \left(\frac{v_m^2}{v_{in}^2} \right) \quad \text{d'où} \quad v_m = -\sqrt{\Psi_n} v_{in}$$

- fonction de transfert de glissement Ψ_g :

$$\Psi_g = \frac{\frac{1}{2} m v_{rg}^2}{\frac{1}{2} m ((1 - K_\rho) v_{it})^2} = \left(\frac{v_{rg}^2}{((1 - K_\rho) v_{it})^2} \right) \quad \text{d'où} \quad v_{rg} = \sqrt{\Psi_g} (1 - K_\rho) v_{it}$$

- fonction de transfert de rotation Ψ_p :

$$\Psi_\rho = \frac{\frac{1}{2} m v_{rr}^2}{\frac{1}{2} m K_\rho v_{rr}^2} = \left(\frac{v_{rr}^2}{(K_\rho v_{it})^2} \right) \quad \text{d'où} \quad v_{rr} = \sqrt{\Psi_\rho} K_\rho v_{it}$$

Par ailleurs, la direction du vecteur $\mathbf{V_{rr}}$ est définie par l'angle $\delta(\mathbf{e})$ entre la vitesse incidente et le vecteur $\mathbf{t}$. $\delta(\mathbf{e})$ est une fonction du paramètre de forme du bloc : plus le bloc est élancé, plus la trajectoire se redresse. $\delta(\mathbf{e})$ augmente donc avec le paramètre de forme.

Critère d'arrêt du bloc

Le bloc s'arrête lorsque la vitesse réfléchie après le rebond est inférieure à une vitesse seuil fonction du volume du bloc, de l'élancement du bloc et de la pente locale du terrain au point d'impact.

ONF / Agence RTM Alpes du Nord
9 Quai Créqui - CS 20028
38026 GRENOBLE cedex 1

PEFC 10-4-4 / Promouvoir la gestion durable de la forêt / pefc-france.org

rtm
restauration des terrains en montagne

Office National des Forêts