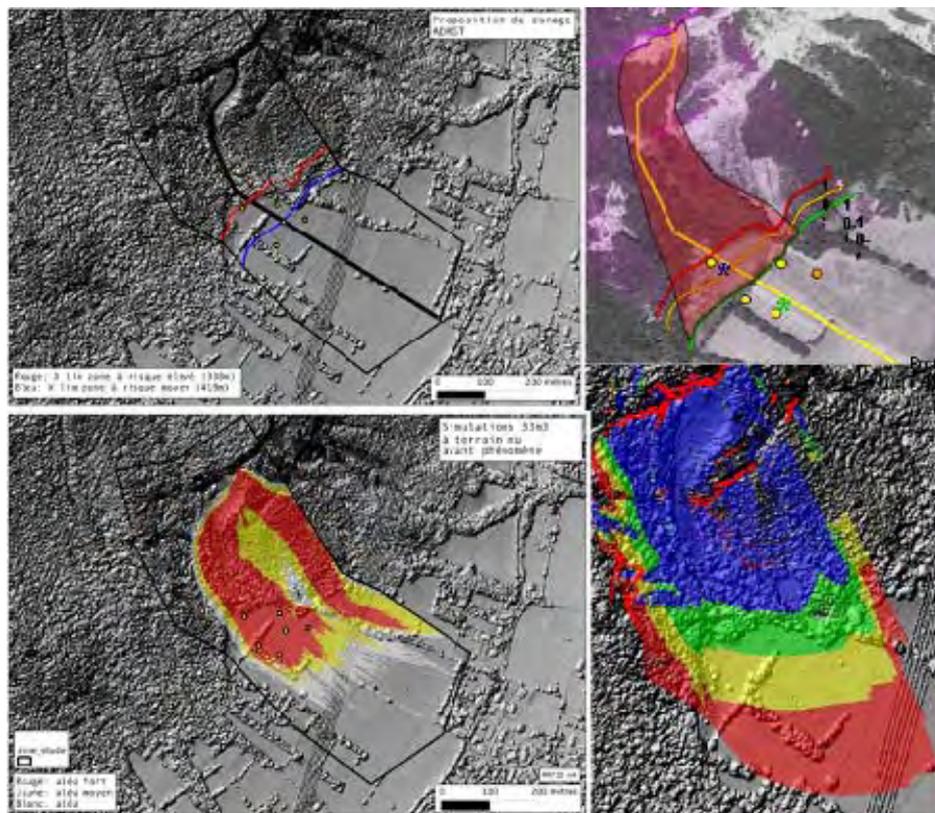


Etude comparative, en utilisant l'événement du 28 décembre 2008 à Saint Paul de Varces, du zonage de l'aléa chute de pierre avec différents outils de simulation trajectographique et différentes matrices d'aléa.



Programme : 2009 / 2010



Coordination

Frédéric Berger (Cemagref)

Auteurs :

**Frédéric Berger (Cemagref)
Rémy Martin et Bastien Auber (RTM)
Alexandre Mathy (ADRGT-SAGE)**

Janvier 2011



Etude comparative, en utilisant l'événement du 28 décembre 2008 à Saint Paul de Varces, du zonage de l'aléa chute de pierre avec différents outils de simulation trajectographique et différentes matrices d'aléa.

Résumé

Les études trajectographiques sont un des outils d'aide à la réalisation du zonage de l'aléa chutes de pierres lors de la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles. Mais dans le guide méthodologique PPR mouvements de terrain et compte tenu des connaissances à l'époque de sa rédaction, il n'y a aucune matrice d'aléa construite avec des valeurs seuils pour des paramètres pouvant être estimés avec des modèles de simulation trajectographique. De plus lors de l'utilisation d'un modèle de simulation en 2 dimensions, l'expert est confronté à la spatialisation de résultats obtenus pour un échantillonnage par profil en long de la zone étudiée. Les objectifs de ce projet ont été, à partir de la rétro analyse de l'événement du 28 décembre 2008 qui s'est produit sur la commune de Saint Paul de Varces, de : comparer les résultats obtenus avec 3 logiciels de simulation en 2d et un logiciel en 3D, comparer les résultats des zonages d'aléas obtenus avec une matrice d'aléa dérivée de celle actuellement utilisées en Suisse et en Autriche. A partir de l'analyse critique de la démarche et des outils utilisés une proposition de cahier des charges a été rédigée pour réaliser une analyse d'aléa rocheux avec un outil de simulations trajectographiques.

I Contexte et objectifs

La politique de prévention des risques naturels en France et dans la majorité des pays européens, est entre autre basée sur l'affichage du risque. En France, cet affichage est réalisé via les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles. L'établissement d'un PPR nécessite la réalisation d'une carte de zonage des aléas contenant des informations sur la qualification des aléas et leur quantification en fonction de leur intensité. Dans le contexte des chutes de pierres, la procédure de réalisation de cette carte de zonage peut être optimisée par l'utilisation d'un modèle de simulation trajectographique. Mais le recours à un modèle engendre un certains nombres de questions auxquelles l'actuel guide méthodologique PPR « mouvement de terrain », qui date de 1999, n'apporte pas de réponses satisfaisantes. A titre d'exemple on peut citer : quelle est la valeur des seuils des probabilités d'atteinte à utiliser pour délimiter les zones d'intensité forte, moyenne et faible ? Comment spatialiser les résultats d'une simulation en 2D sur profils en long ?

Au regard de ce constat, de l'absence d'un cahier des charges précis pour la réalisation des études trajectographiques et de l'absence d'une méthodologie nationale de réalisation d'un zonage à partir d'études de simulations trajectographiques, on observe de plus en plus de contestations des volets chutes de pierres des PPR.

Ainsi dans l'actuel guide méthodologique PPR mouvements de terrain et compte tenu des connaissances à l'époque de sa rédaction, il n'y a aucune matrice d'aléa construite avec des valeurs seuils pour des paramètres pouvant être estimés avec des modèles de simulation trajectographique. De plus lors de l'utilisation d'un modèle de simulation en 2 dimensions, l'expert est confronté à la spatialisation de résultats obtenus pour un échantillonnage par profil en long de la zone étudiée.

Les objectifs de ce projet ont donc été, à partir de la rétro analyse de l'événement du 28 décembre 2008 qui s'est produit sur la commune de Saint Paul de Varces, de : comparer les résultats obtenus avec 3 logiciels de simulation 3 en 2d et un logiciel en 3D, et les résultats des zonages d'aléas obtenus avec ces différents outils de simulation et en utilisant une matrice de seuillage construite à partir de celle initialement développé par la Confédération Helvétique.

II Méthodologie employée

Afin de mener à bien ce projet, le consortium de partenaires (Cemagref, ADRGT et RTM38) a élaboré un plan d'action comprenant 5 tâches distinctes ; à savoir :

1. L'acquisition des données nécessaires aux travaux de simulations trajectographiques. A l'occasion de ce projet nous avons testé l'influence de la résolution des modèles numériques de terrain sur les résultats des travaux de simulations. Pour ce faire nous disposions initialement d'un modèle numérique de terrain (MNT) de L'IGN au pas de 25m et le consortium a donc décidé d'acquérir les données LiDAR au pas de 1m sur le secteur d'étude. De plus, lors de cette phase de travail nous avons réalisé les relevés de terrain nécessaires à l'utilisation des différents modèles de simulations trajectographiques. Deux des modèles utilisés sont des modèles en 2 dimensions et nécessitent donc la mise en place à minima d'un profil en long. Le consortium a donc choisi les profils en long sur lesquels les analyses seraient menées.
2. Analyse de la qualité des sources de données topographiques (levés de terrain, IGN et LiDAR). Cette analyse a été menée en comparant le profil en long calculé avec les différentes sources de données topographiques.
3. Réalisation des travaux de simulations trajectographiques avec les différentes sources de données topographiques (IGN 25m, profil en long réalisé sur le terrain, profil en long Lidar et MNT Lidar au pas de 1m). le consortium a décidé

de travailler avec trois volumes de références pour les projectiles rocheux pour lesquels les propagations ont été simulées. Ces volumes ont été déterminés à partir des volumes observés sur le terrain et correspondant à l'évènement de décembre 2008. Ces trois volumes sont : 1m^3 , 8m^3 et 33m^3 .

4. Réalisation d'un zonage en utilisant la matrice de seuillage de l'aléa dérivée de la matrice suisse. A partir des résultats des différents travaux de simulation le consortium a proposé un zonage de l'aléa.
5. Synthèse et analyse critique des travaux réalisés. Lors de cette étape le consortium a plus spécialement porté ses réflexions sur l'apport de la matrice de seuillage lors de la réalisation d'un PPRn.
6. Rédaction du rapport final et proposition d'une ébauche de cahier de recommandations pour la réalisation et la présentation des résultats d'une étude de simulations trajectographiques.

III Outils et données employés

Chacun des membres du consortium de cette étude a rédigé un rapport présentant les travaux qu'il a réalisés ainsi que le ou les outils de simulations qu'il a utilisé. Dans le cadre de ce rapport de présentation des travaux réalisés et des résultats obtenus, chacun des rapports des partenaires a été utilisé in extenso dans les chapitres suivants dédiés à la présentation des résultats. Aussi, le coordinateur de ce projet a décidé de présenter, au sein du présent chapitre, brièvement et dans leurs grandes lignes les outils de simulations qui ont été utilisés dans le cadre de cette étude afin de permettre au lecteur de disposer d'un premier panorama des outils.

Dans le cadre de cette étude 4 modèles ont été utilisés.

III.1 Le modèle en deux dimensions du bureau d'étude ADRGT

Le code de calculs ADRGT est fondé sur une approche de type probabiliste et se caractérise actuellement par un calcul en deux dimensions. Ce logiciel tient compte du fait que dans la nature, il n'est pas réaliste d'avoir une approche déterministe, vue les innombrables possibilités de trajectoires et de variations des caractéristiques du terrain. Pour une zone de départ fixée et un volume au départ compris dans une fourchette de valeurs d'après les observations de terrain, le calcul consiste en une série de simulations de chutes de blocs laquelle est exploitée par une méthode probabiliste. Le logiciel prend en compte le mécanisme de fractionnement des blocs en cours de propagation. L'originalité de la méthode repose sur l'introduction d'un certain nombre de coefficients aléatoires sur la pente locale du versant au niveau point d'impact, les coefficients caractérisant les sols et la végétation, et les réductions des vitesses normales et tangentielles lors des rebonds. Ce jeu de coefficients aléatoires permet une infinité de trajectoires ce qui correspond bien à une approche « pseudo-tridimensionnelle ».

Ce bureau d'étude est à l'origine des seuillages utilisés, à partir des probabilités d'atteinte, dans le département de l'Isère pour les études de risques à savoir :

- zones très exposées : $p > 10^{-2}$
- zones exposées : $10^{-4} < p < 10^{-2}$
- zones moyennement à faiblement exposées : $10^{-6} < p < 10^{-4}$
- zones très peu exposées : $p < 10^{-6}$

III.1 Le modèle CRSP en deux dimensions utilisé par les services RTM

Ce code de calcul est un modèle commercialisé. Comme le logiciel ADRGT c'est un modèle probabiliste. Il permet de réaliser 10000 simulations par points de départ. Les extrapolations des résultats des distances d'atteinte pour les probabilités inférieures à 10^{-4} se font par une interpolation linéaire sur une échelle logarithmique (méthode initialement développés par l'ADRGT)

III.2 Le modèle en 2 dimensions RockforLIN développé par le cemagref et utilisant le principe de la ligne d'énergie.

Cette méthode développée par HEIM A. en 1932 repose sur un principe simple et trivial: un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide. Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal. Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie. Le cemagref a développé une application informatique sous Système d'Information géographique permettant de spatialiser les résultats obtenus avec ce principe d'analyse. Ce modèle est un modèle statistique qui pré-determine les distances d'arrêt maximal. Avec ce modèle le Cemagref utilise une matrice de qualification de l'aléa basée sur différentes valeurs d'angles.

III.3 Le modèle en 3 dimensions Rockyfor^{3D} développé au Cemagref en association avec L. Dorren.

Ce modèle est de type « probabilistic process based » et distribué spatialement ce qui lui permet de modéliser en 3 dimensions le déplacement d'un bloc rocheux sur une pente. Ce modèle couple des algorithmes mathématiques déterministes lui permettant de simuler le vol parabolique d'un bloc et les rebonds sur le sol avec une approche stochastique dans le choix des paramètres régissant les calculs des rebonds et d'impact avec des obstacles.

Il utilise une représentation en 3 dimensions du terrain sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT) de type raster (représentation du terrain sous la forme d'un maillage carré).

Le choix du pas du MNT est laissé à l'initiative de l'opérateur en fonction des données topographiques disponibles. La déperdition d'énergie lors des rebonds au sol est déterminée, comme dans les modèles de L'ADRGT et du RTM, par l'élasticité du sol, exprimée par un coefficient de restitution normal (rn), et par la rugosité du sol, exprimée par un coefficient de restitution tangentiel (rt).

III.4 Les matrices de seuillage

Deux matrices de seuillage ont été testées et ce en fonction des outils de simulations. Si la première matrice est adaptée à l'utilisation d'outils de simulations trajectographiques proprement dit, la deuxième quant à elle est adaptée à l'emploi des outils construits sur le principe de la ligne d'énergie.

La matrice de seuillage qui a été testée lors de cette étude a été construite en croisant la probabilité d'atteinte avec l'énergie moyenne développée par les projectiles au regard du point correspondant à cette probabilité d'atteinte. Les seuils de probabilité d'atteinte sont ceux utilisés par l'ADRGT-SAGE et les seuils d'énergie ceux de la matrice de zonage suisse à savoir : 30 et 300 kJ.

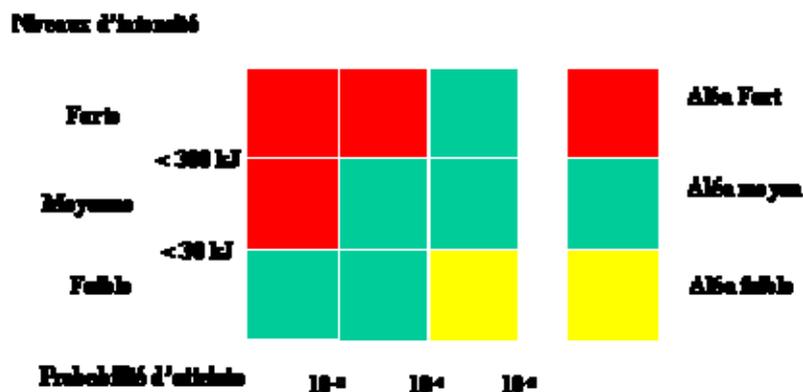


Fig 1 : La matrice de seuillage de l'aléa chute de pierre testée lors de cette étude. La matrice de seuillage de l'aléa utilisée avec le principe de la ligne d'énergie est la suivante :

- Pente $\geq 38^\circ$: zone très exposée
- $38^\circ >$ pente $\geq 35^\circ$: zone exposée
- $35^\circ >$ pente $\geq 32^\circ$: zone moyennement à faiblement exposée
- $32^\circ >$ pente $\geq 28^\circ$: zone très faiblement exposée (phénomène exceptionnel)

III.5 Localisation du site d'étude

Le 28 décembre 2008, un écoulement s'est produit au niveau du lieu dit « la Croupe de Plantin » situé sur le territoire communal de Saint Paul de Varces. Au final plusieurs blocs dont un bloc de 33m³ se sont arrêtés dans la zone agricole au pied de ce versant. Ce phénomène a fait l'objet de la rédaction, par le service RTM du département de l'Isère, d'une fiche évènement. De plus, les projectiles n'ont pas été déplacés depuis. Disposant d'une bonne documentation de cet évènement et ayant la possibilité de déterminer le volume exacte des projectiles s'étant propagés, nous avons décidé d'utiliser cette zone comme site support de nos travaux. Les figures suivantes présentes des la localisation de ce site d'étude ainsi que l'emprise de la zone de propagation de cet évènement du 28/12/2008.

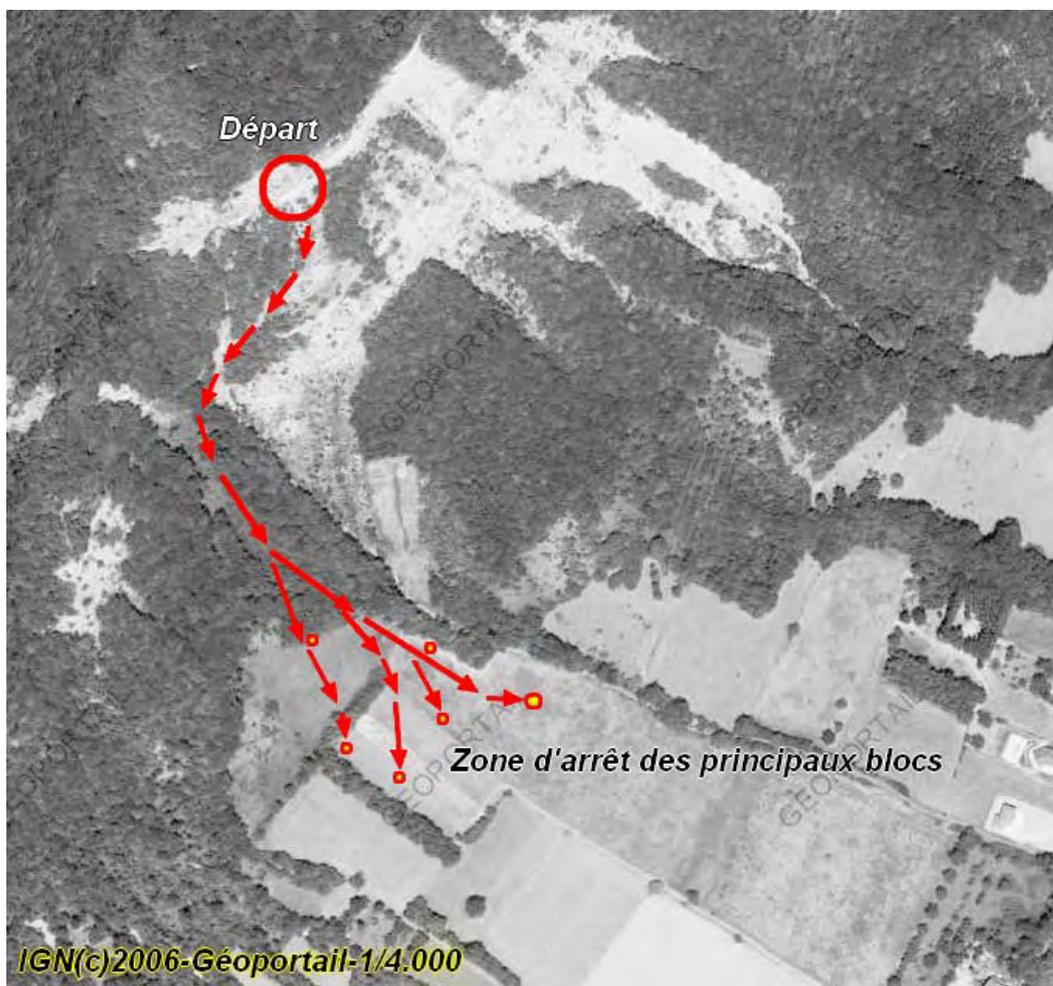


Fig 2 : Localisation sur photographie aérienne de la zone de départ, de l'axe de propagation principale et des points d'arrêts maximaux de l'évènement du 28/12/2008.

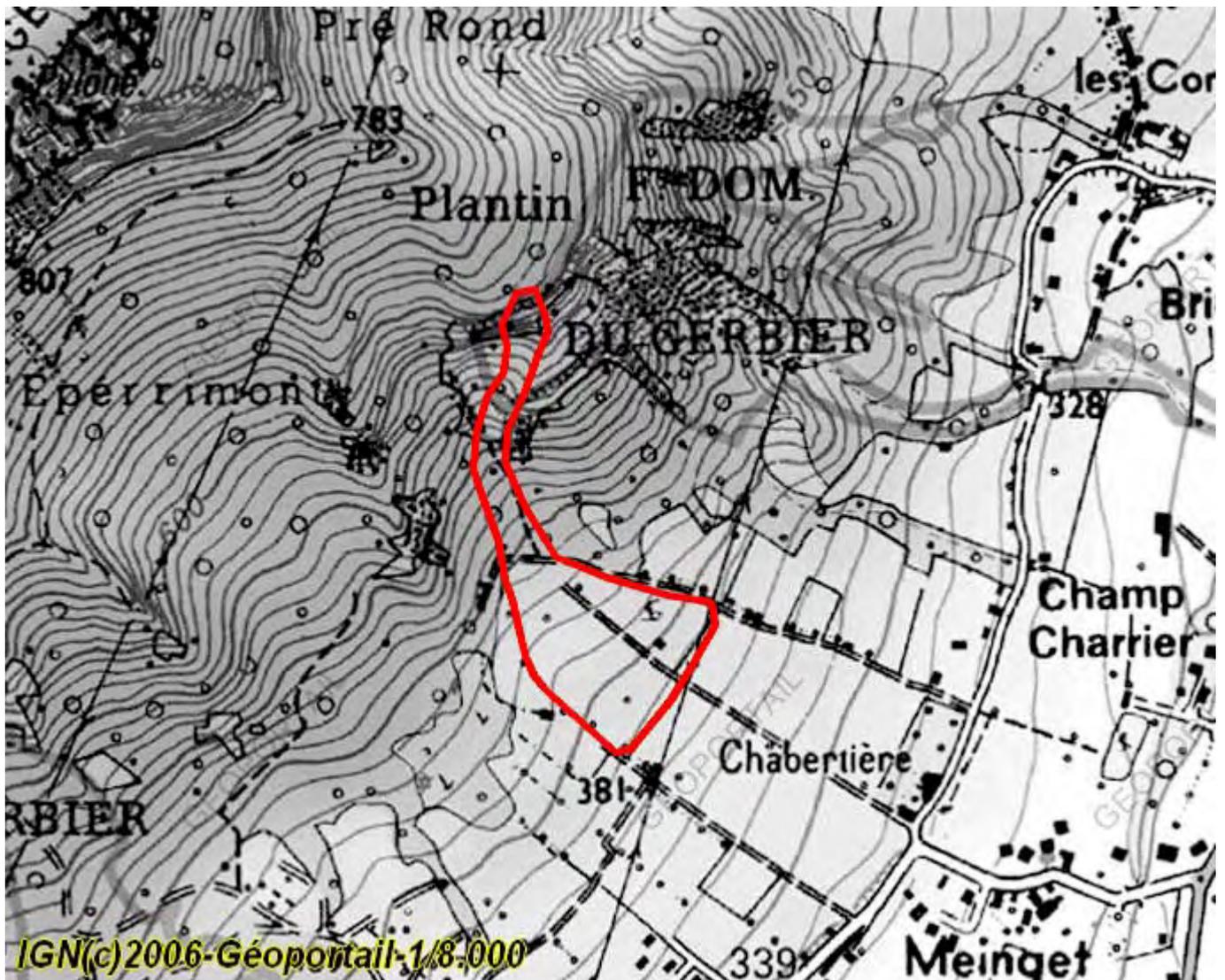


Fig 3 : Localisation sur fond de plan de l'IGN de l'enveloppe de propagation de l'évènement du 28/12/2008.

III.6 Les données topographiques

Les modèles de simulations de propagation de projectiles rocheux utilisent en premier lieu des données topographiques représentant la surface du sol. En fonction de la surface, des pentes, de la perturbation du relief, les propagations des blocs rocheux seront plus ou moins affectées. En règle générale, plus la donnée topographique est précise, meilleure sera prise en compte l'influence du relief sur la propagation.

Dans le cas de simulations numériques, les données topographiques se présentent sous la forme de Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les MNT sont des données numériques de type raster représentant la surface topographique du sol sous forme d'un maillage carré. Chaque carré, appelé pixel, comporte la valeur altitudinale moyenne sur ce pixel. Sa taille, donc sa précision, dépend de la précision des données sources.

Il est possible d'utiliser différents types de MNT : citons les MNT de la BD TOPO® de l'Institut Géographique National (IGN), ayant une résolution de 25m, ou encore les MNT LiDAR, ayant une résolution métrique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons acquis des données de type LiDAR, ayant une haute précision (acquisition de 5 à 20 points / m² avec une précision de l'ordre de 25cm en XY et de 15cm en Z).

III.6.1. Présentation des données LiDAR

Le scanner Laser aéroporté (également dénommé LiDAR pour Light Detection And Ranging) est une technique récente d'acquisition de données topographiques qui se développe de plus en plus compte tenu des progrès techniques réalisés dans les domaines des lasers et du GPS. Le principe général de cette méthode repose sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion lumineuse entre la source émettrice (l'avion dans lequel est embarqué le laser) et la surface interceptée. Pour chacun des points de mesure, le faisceau laser effectue un balayage latéral. Ainsi, compte tenu de la direction du vol et de ce balayage latéral, une grande surface de territoire est couverte en un passage.

Pour générer un MNT il est nécessaire de connaître, avec la plus grande précision possible, l'angle de balayage utilisé, ainsi que la position et l'altitude de l'avion. Ces deux derniers paramètres sont obtenus grâce au GPS embarqué et à la centrale inertielle de l'avion. Le grand nombre de points de mesure utilisé ainsi que leur distribution régulière font que cette technique se distingue des autres techniques classiques. Pour chacun des points de mesure, la différenciation du premier écho (point le plus haut de la surface balayée) et du dernier écho (point le plus bas de la surface balayée) permet d'identifier et de déterminer la nature et les propriétés du terrain. (cf. Fig. 4)

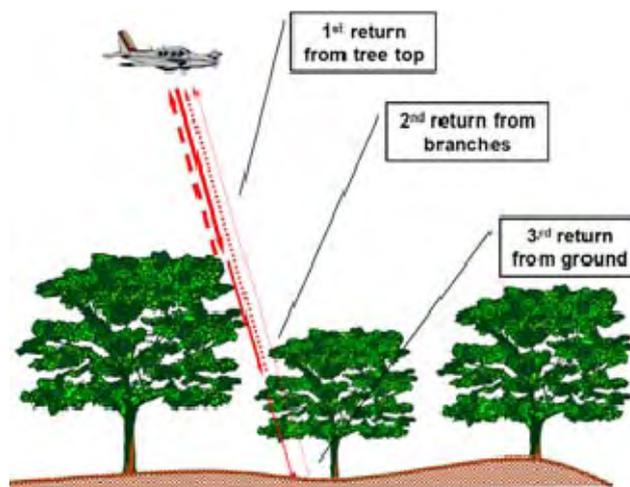


Fig 4 : Principe général de la discrétisation des échos lors de l'acquisition de données LiDAR

Ces différents échos sont utilisés pour générer deux types de modèle numérique :

- le modèle numérique de terrain (MNT) à proprement parler en ne conservant que les derniers échos ;
- le modèle numérique dit de surface (MNS) en ne conservant que les premiers échos.

A partir de ces deux modèles numériques, on peut calculer un modèle numérique dit d'élévation (MNE) qui est obtenu par différence entre le MNS et le MNT. Ce dernier modèle permet ainsi d'obtenir la hauteur des bâtiments et autres «obstacles» (arbres, pylônes, etc.). Ainsi, cette technique présente l'avantage de pouvoir acquérir en une seule fois une masse d'information considérable sur la topographie, et ce avec une maille de mesure constante.

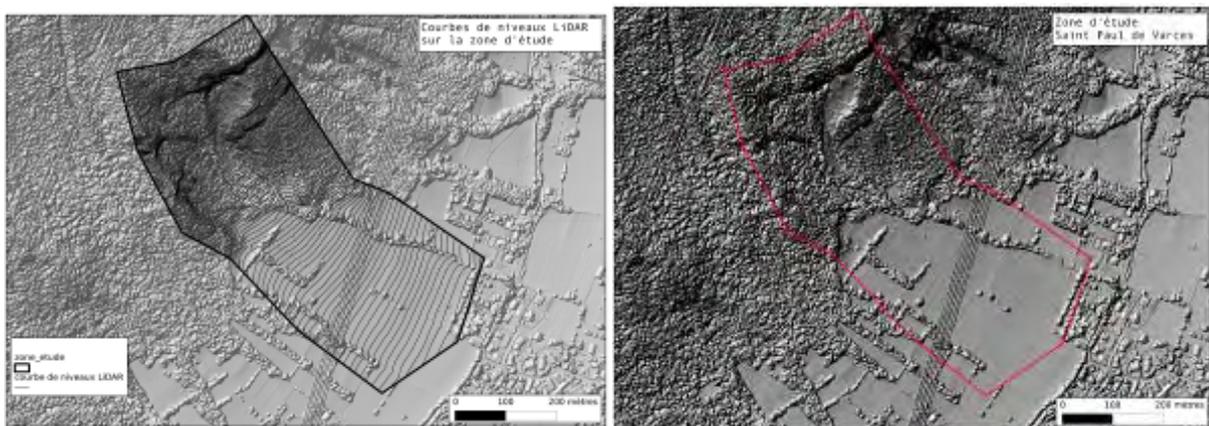


Fig 5 : MNT LIDAR au pas de 1m et MNS LIDAR au pas de 1m. En rouge est matérialisé le périmètre de la zone d'étude.

Les données LiDAR ont une précision nettement plus élevée que les MNT de l'IGN (résolution de 1m contre 25m pour l'IGN). Cette différence de précision et de résolution entraîne des différences non négligeables sur la topographie du terrain prise en compte dans la modélisation.

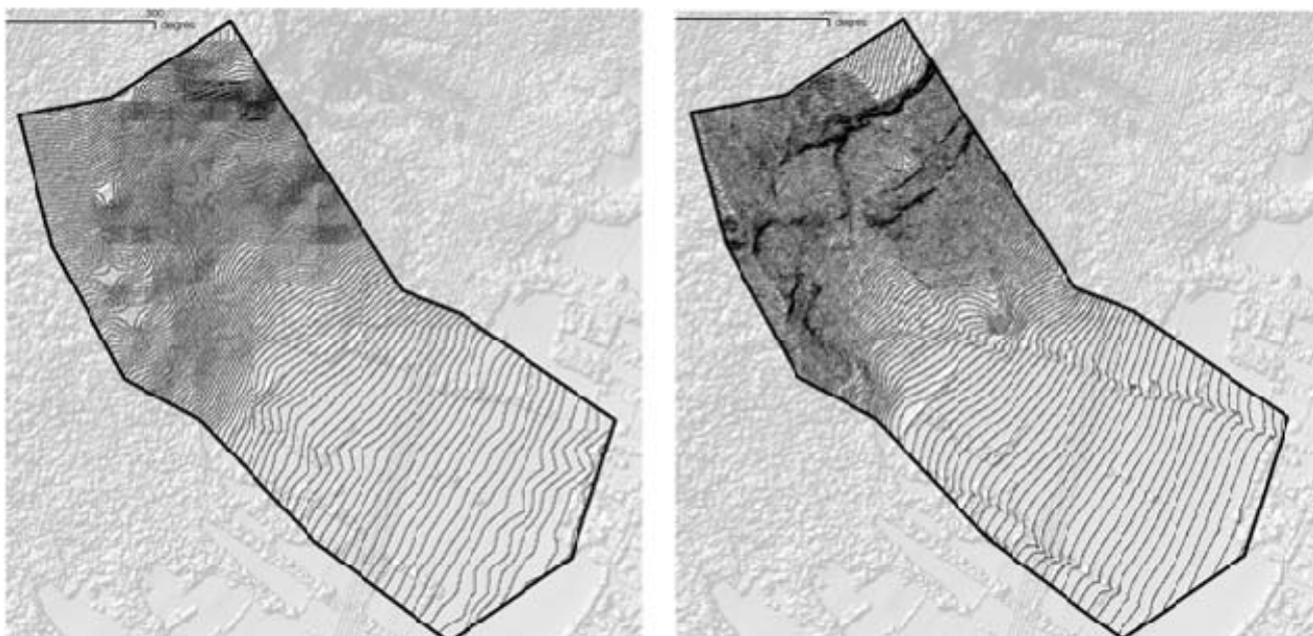


Fig. 6 : Représentation des courbes de niveau interpolées avec à gauche MNT IGN 25m, droite : MNT LiDAR, équidistance 2.5m

La représentation des courbes de niveau (cf. Fig. 6) ne sert ici qu'à illustrer la différence de précision entre les données LiDAR et IGN. En effet, les données ne possèdent pas le même système de projection spatiale, elles ne peuvent donc pas être superposées de manière exacte. En effet, les données MNT de l'IGN sont géoréférencés en Lambert 2 étendu, alors que les données LiDAR sont en Lambert 93, ce qui entraîne un décalage en altitude, mais aussi en X et Y :

- Décalage en X et Y
 - Le décalage provient des systèmes de projection qui n'utilisent pas les mêmes référentiels. Un système de projection permet de représenter la surface d'une partie de la Terre sur la surface plane d'une carte. Il s'appuie sur un système géodésique, lui-même fondé sur un ellipsoïde de référence, qui est un modèle plus ou moins proche de la forme de la Terre. Les systèmes de projection Lambert 2 étendu et Lambert 93 n'utilisent ni le même système géodésique, ni le même ellipsoïde de référence :

Système de projection	Système géodésique	Ellipsoïde de référence
Lambert 2 étendu (L2E)	NTF (nouvelle triangulation de la France)	Clarke 1880 - IGN
Lambert 93 (L93)	RGF93 (Réseau géodésique français 1993)	IAG GRS80

- De part ces différences de systèmes, il est difficile de caler les données L2E et L93 pour une parfaite superposition. De plus, les outils existants aujourd'hui sous SIG comportent quelques erreurs de traitement pour obtenir une superposition parfaite. Il en résulte sur Saint Paul de Varces un décalage vers le Sud-Est de quelques dizaines de mètres.
- Décalage en Z (altitude)
 - Ce problème est également dû aux différences de référentiels. Le Lambert 2 étendu utilise le système géodésique NTF. Ce système utilise pour la mesure de l'altitude le Nivellement général de la France (NGF). Il prend comme altitude zéro le niveau moyen de la mer observé par le marégraphe de Marseille sur la période 1884 - 1897. C'est cette altitude que l'on observe sur toutes les cartes IGN de France.
 - Le Lambert93, lui, est basé sur le RGF93, qui utilise l'ellipsoïde IAG GR80. Cet ellipsoïde donne, en plus des coordonnées géographiques, la troisième dimension: la hauteur ellipsoïdale, qu'il ne faut pas confondre avec l'altitude normale NGF. En effet, l'ellipsoïde est une représentation de la surface terrestre, lissant les reliefs les plus extrêmes. La hauteur ellipsoïdale est mesurée par rapport à l'ellipsoïde, qui ne coïncide pas avec le niveau moyen des mers.
 - Sur Saint Paul de Varces, Les données LiDAR nous ont été fournies en Lambert93, hauteur ellipsoïdale, alors que les données Lambert 2 étendu ont une altitude normale NGF. Cette différence de hauteur est de l'ordre de 50 à 60 mètres ce qui est cohérent avec le fait qu'en règle générale la hauteur ellipsoïdale est supérieure d'environ 50m par rapport à "l'altitude normale" NGF.

III.6.2. Le choix des profils en long pour les simulations en 2D

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec différents outils de simulation trajectographique, il faut certes disposer d'un principe commun d'expression et de représentation de ceux-ci mais il faut aussi déterminer le secteur sur lequel les travaux seront tous effectués. Ainsi le consortium a défini d'un commun accord l'emprise de la zone d'étude ainsi que la localisation des profils en long permettant de rendre compte de cette emprise.

La figure ci-dessous présente la délimitation de la zone d'étude ainsi que l'implantation des 3 profils en long utilisés.



Fig. 7 : Délimitation de l'emprise de la zone de simulation pour le modèle en 3D et implantation des profils en long pour l'utilisation des modèles en 2D.

IV Présentation de l'étude trajectographique réalisée par le RTM

Note au lecteur : afin de ne pas dénaturer la teneur des rapports d'étude de chacun des membres du consortium, ceux-ci sont présentés dans leur intégralité et en conservant la numérotation originelle des figures, tableaux, photos et cartes. Il en est de même de la numérotation des chapitres

L'objectif de ce travail étant d'améliorer les techniques ingénieries pour le zonage des aléas chutes de blocs, le RTM a fait un effort de transparence important. La démarche experte a été au mieux explicitée, les difficultés ont été signalées, et du coup les hypothèses faites pour surmonter « ou contourner » ces difficultés ont été précisées. Pour résumer, le RTM attire l'attention sur un certain nombre d'éléments :

1. le temps consacré à ce travail : dans le cadre d'une comparaison de travaux le facteur temps est primordial, il n'est pas possible de comparer les résultats d'une étude courte de quelques jours à ceux d'une étude approfondie de plusieurs jours. Le RTM a essayé de respecter la contrainte temps (moins de 5 jours),
2. les modèles utilisés : lors de la réunion du 19 octobre au CEMAGREF, les caractéristiques des différents modèles ont pu être abordées. Il est important de bien prendre en considération les approches que le RTM qualifie de statistique-dynamique (voir note du 9 février 2010 d'O. Marco). Ainsi la plupart des modèles intègrent un modèle de propagation déterministe, en chute de bloc ce sont essentiellement les équations d'échanges énergétiques entre le sol et le bloc lors des rebonds. Ces équations utilisent généralement 2 paramètres R_n et R_t et un certain nombre d'autres paramètres en fonction de la complexité du modèle. Mais en plus des calculs déterministes des approches probabilistes sont faites qui peuvent prendre plusieurs formes : il peut être choisi de faire varier les paramètres des équations déterministes dans des gammes de valeurs fixées, mais il peut aussi être possible de générer des scénarios différents, variations aléatoires des volumes au départ, variation des volumes en court de propagation (fragmentation). Le Modèle CRSP est un modèle extrêmement simple très proche des équations de propagation déterministe. Le seul paramètre pour lequel est réalisée une approche probabiliste est la surface de rebond par l'intermédiaire du coefficient S (Surface Roughness),
3. les données de modélisation : la donnée essentielle en dehors des hypothèses de calcul sur les volumes est la topographie. Le RTM tient à signaler l'écart important constaté entre le levé LIDAR et la BD Ortho, celui-ci apparaît assez important. CRSP est un outil qui ne permet pas un usage commode de données très fines de topographie. L'utilisateur doit faire des choix de segments homogènes de propagation.

4. le phénomène de décembre 2008 est un effondrement en masse, CRSP ne permet pas le calcul de ce type de phénomène. L'analyse de terrain ne permet pas de penser qu'il y avait suffisamment de signe annonciateur pour que ce phénomène ait été pris en compte dans une approche de zonage. En effet, l'élément essentiel du zonage est de définir le phénomène de référence, chute de un ou plusieurs blocs, chute de 1 m³ ou de 30 m³, effondrement en masse ou chute localisée.... Si le RTM avait eu dans le cadre d'une étude PPR à prendre en considération pour le zonage l'occurrence possible d'un éboulement en masse, il aurait privilégié l'utilisation de la méthode dite du cône.
5. Les hypothèses de la modélisation ont été « imposées » (*note du consortium : fixées d'un commun accord par les membres du consortium et à ce titre imposées*) : profils trajectographiques, volume des blocs, dans le cadre d'une approche PPR ces deux éléments sont une des parties essentielles de la réflexion. Le RTM dans son approche classique estime les zones de départ et les volumes au départ par une analyse historique et une analyse des affleurements. L'analyse historique tente d'approcher qualitativement le type de phénomène (chute isolée, effondrement de masse), la fréquence des phénomènes (période de retour) et leur ampleur (volumes), l'analyse des affleurements permet d'une part d'estimer la fréquence probable des départ de blocs (l'analyse historique met en avant les événements marquants, une falaise peut être à l'origine de chutes de blocs journalières sans pour autant avoir laissé de trace dans les mémoires), d'autre part les mécanismes et les volumes de ces départs. Si historiquement il n'est pas reconnu d'effondrement de masse, l'approche terrain peut conduire à retenir cette hypothèse comme probable ou encore diagnostiquer certains contextes particuliers tels que des blocs jonchant la pente mais en limite d'équilibre, des terrasses agricoles en cours de désagrégement...).
6. Ainsi la qualité de la réflexion RTM est directement proportionnelle à celle de l'expertise du terrain et donc à la compétence des agents ainsi qu'au temps consacré au parcours du terrain.

1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

L'étude est réalisée dans le cadre d'un projet du Pôle Grenoblois des Risques Naturels pilotés par le Cemagref.

Elle doit permettre de comparer 3 approches d'analyse de l'aléa chutes de blocs sur le site de Saint Paul de Varcès siège de l'événement du 28 décembre 2008.

Les 3 approches sont celles du :

- Cemagref
- bureau d'étude Sage
- de l'ONF service RTM

L'objectif plus large est la révision du volet chutes de pierres du guide méthodologique PPR mouvement de terrain.

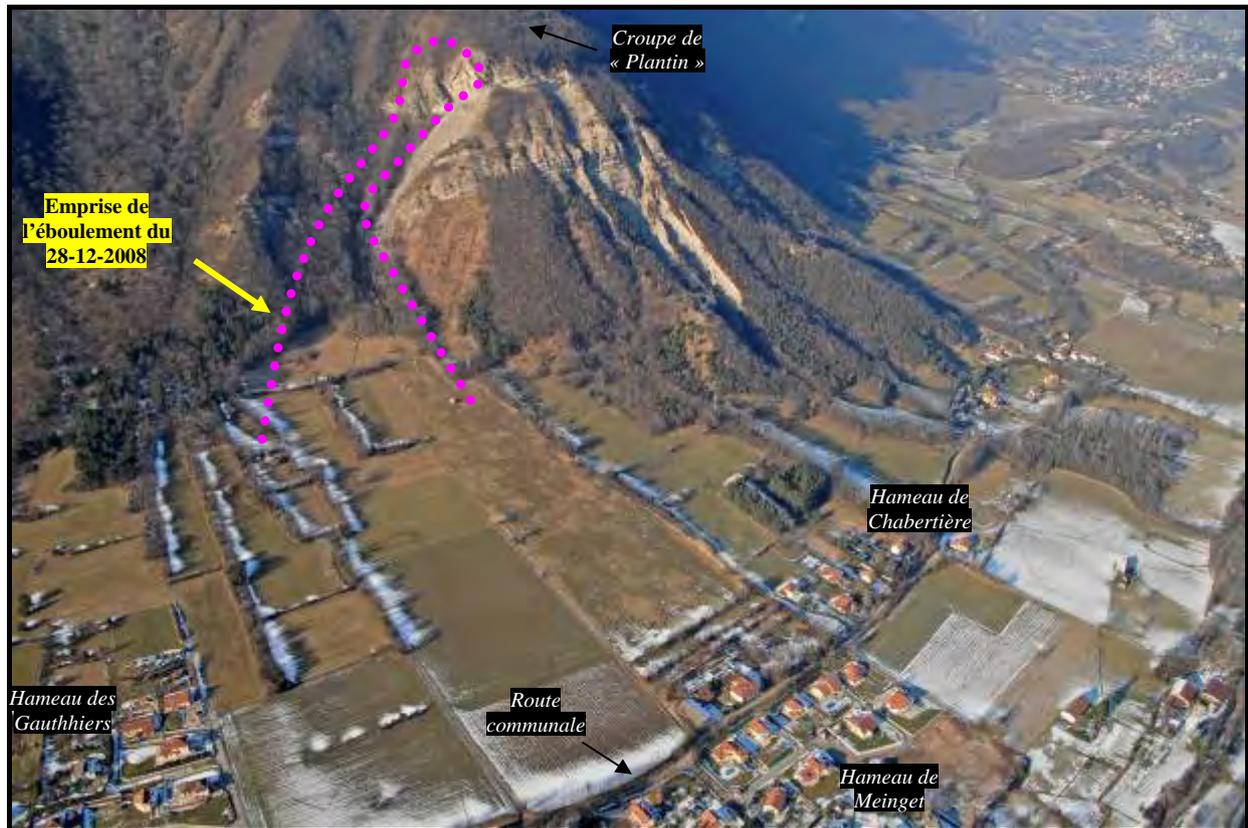


Figure 1 : Vue d'ensemble de la zone (secteur de l'éboulement du 28-12-2008 et hameaux sur la commune de Saint Paul de Varcès) - Source photo : IRMA du 15-01-2009

1.2 Démarche suivie

Pour satisfaire les objectifs du projet, la démarche suivante a été menée :

- Réunion de calage et recueil des données

Données issues du CEMAGREF :

- LIDAR : Extraction d'un modèle Numérique de Terrain
- Données SIG des courbes de niveau « équidistances = 2,5m »
- Données SIG des différents types de sol issu du levé LIDAR
- 3 profils : P1, P2 et P3

Données issues du RTM :

- Fiche événement du 31-12-2008 et rapport RTM Isère du 30-03-2009
- Données et observations de terrains faites dans le cadre de ce projet lors des investigations RTM (photos, analyse sur le phénomène de décembre 2008)

- Dossiers de clichés photographiques (dont celle de l'IRMA du 15-01-2009)

Sur la base de ces données le Cemagref a défini (*note du consortium : le consortium a validé les propositions du Cemagref*) un certain nombre de paramètres des études :

- le volume des blocs à prendre en considération,
- les profils trajectographiques 2 D,
- une proposition de type de zone de propagation homogène,
- le phénomène de décembre 2008 n'est pas celui que l'étude cherche à reproduire (voir 2.3).

Dans le cadre de l'objectif plus vaste du projet qui est la révision du guide méthodologique, il est important de noter que ces hypothèses doivent être argumentées.

- Reconnaissances de terrain

Elles ont eu pour but de définir le contexte naturel du site (caractéristiques géologiques, morphologiques, hydrogéologiques et hydrauliques) ainsi que de comprendre précisément la dynamique des phénomènes pouvant avoir lieu et/ou ayant eu lieu.

Cette phase a abouti à l'établissement d'une carte de synthèse de l'analyse naturaliste ainsi qu'à une carte de recensement des phénomènes rocheux s'étant produits par le passé.

Pour le RTM cette phase s'est traduite par 1 jour de terrain à deux (2 demi-journées d'ingénieur spécialiste). Elle a permis de noter la singularité de l'événement du 28 décembre 2008.

- Trajectographies - Analyse des résultats

Des modélisations trajectographiques ont été réalisées à l'aide du logiciel «CSRP».

Différentes hypothèses ont été prises en compte en se basant sur l'analyse de terrain ; sur un seul profil topographique (P2) issu du LIDAR ; sur des choix de coefficients selon la nature des terrains.

Les modélisations ont permis d'appréhender la propagation des éléments rocheux au niveau de : leurs distances d'arrêt, leurs énergies, et accessoirement leurs hauteurs de rebonds.

- Cartographie de l'aléa - Rapport de Synthèse

A la demande du Cemagref (*Note du consortium : conformément au texte de la réponse à l'appel à projet du PGRM*), la cartographie des aléas a été faite de 2 manières :

1. un zonage des distances de propagation, (10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-6}),
2. un zonage en application de la matrice suisse (énergie et probabilité d'atteinte)

Le rapport de synthèse RTM a pour but d'aider au développement des méthodes de prévision des aléas, il comprend donc l'exposé des difficultés rencontrées, des suggestions, des remarques diverses sur le déroulement de ce travail

Financement du projet :

- Part prévue par le Cemagref (*Note de la part du Cemagref : le plan de financement de l'étude a été élaboré en concertation avec l'ensemble des participants*) pour le RTM = 3300 € HT soit 3947 € TTC

- Avec 1 jour Ingénieur Géologue RTM = 600 € HT

- Soit $3300/600 = 5,5$ jours d'ingénieur

Chronogramme / répartition des tâches :

Réunion de calage		Reconnaisances de terrain		Trajectographie - Analyse des résultats		Cartographie - Rapport de synthèse	
0,5 jr BA 0,5 jr RM		0,5 jr BA 0,5 jr RM		1 jr BA 0,5 jr RM		1,5 jr BA 0,5 jr RM	
<i>Sous total</i>	<i>1 jr</i>	<i>Sous total</i>	<i>1 jr</i>	<i>Sous total</i>	<i>1.5 jr</i>	<i>Sous total</i>	<i>2 jr</i>
TOTAL DES JOURS = 5,5							

Le RTM a, dans le strict cadre de cette étude, essayé de respecter les temps attribués tout en réaffirmant qu'il était important de consacrer du temps aux réflexions et à la prospection du terrain.

2. Analyse naturaliste - Expertise terrain

2.1 Localisation du site d'étude

La zone du projet se situe sur la commune de St Paul de Varces à l'amont du hameau de Meinget. Plus précisément elle se situe entre la croupe de « Plantin » et le groupe de maisons de Chabertière.

La zone de départ des blocs est celle à l'origine du phénomène du 28 décembre 2008. Les départs d'éléments rocheux provenant des crêtes des rochers de la Bourgeoise ne sont pas analysés.

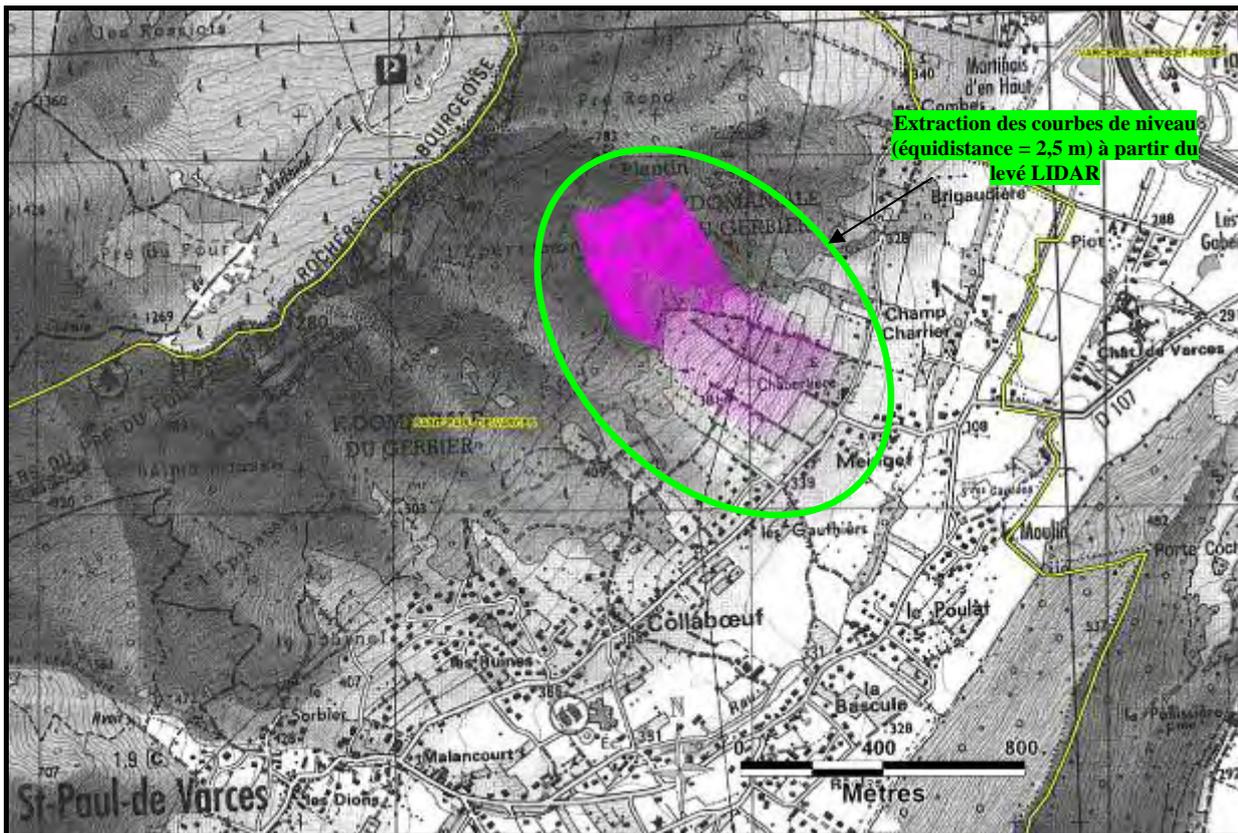


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude et du Levé LIDAR correspondant (extrait du Scan 25 - IGN et MNT en rose)

2.2 Cadre géomorphologique

Depuis l'aplomb rocheux de la zone de départ à la zone d'arrêt des blocs de l'événement du 28 décembre 2008 se succèdent :

- Un affleurement de calcaire massif du Valanginien (Crétacé inférieur) légèrement marneux formant une falaise d'une cinquantaine de mètres de hauteur
- Une zone de marnes altérées et d'éboulis en pied.
- Un resserrement au niveau d'un goulet rocheux
- Un éboulis grossier
- Une zone boisée sur un sol d'éboulis
- Champ agricole en pente douce

La zone de propagation emprunte un talweg naturel nettement marqué au niveau du resserrement rocheux.

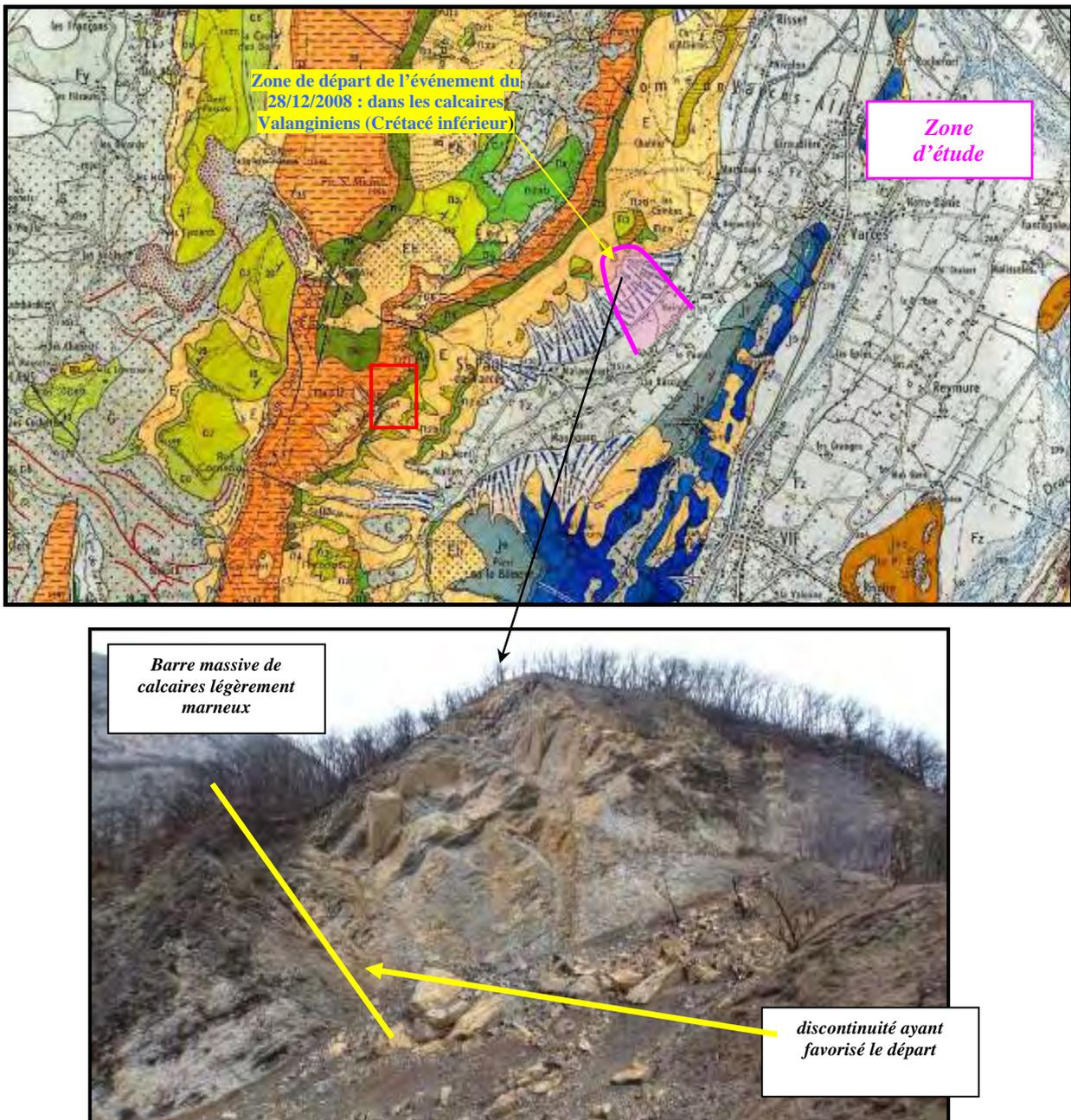


Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Vif (BRGM n°821- 1988) et photo de la zone sommitale de la falaise ayant produit l'événement du 28-12-2010

2.3 Analyse de l'événement du 28 décembre 2008

L'événement du 28 décembre 2008 est un éboulement en masse. La fiche événement RTM jointe en annexe 2 reprend les principales caractéristiques de celui-ci. Les investigations de terrain ont permis de mieux apprécier les caractéristiques de cet événement. La zone de départ montre une mobilisation d'une masse très importante selon une discontinuité marquée, un remplissage argileux et des venues d'eau sont notés lors de la visite de terrain au niveau de celle-ci (voir Figure 3). La

fragmentation de la masse mise en mouvement a été rapide et a conduit à des volumes allant de quelques litres à plusieurs dizaines de m³.

Des matériaux issus de la fragmentation se sont déposés immédiatement (blocs en pied de falaise) d'autres se sont propagés jusqu'au pied du versant.

Plusieurs éléments semblent indiquer un comportement de type « coulée de matériaux ». En effet on observe un dépôt de matériaux en cordon en bordure de trajectoires dans la partie haute. On observe un premier dépôt dans le resserrment rocheux suivi d'un nouveau dépôt grano classé à l'aval de celui-ci.

Ce comportement a conduit à des interactions entre blocs en cours de propagation très fortes, l'énergie en front de coulée était considérable (poussée par chocs et conservation de la quantité de mouvement par les blocs à l'arrière). Ces interactions ont probablement conduit à l'éjection de blocs du front que l'on observe aujourd'hui dans le champ. D'ailleurs les distances d'arrêt des blocs de décembre 2008 sur un terrain aux caractéristiques très amortissantes traduisent une énergie forte voir exceptionnelle.

Cet événement est jugé exceptionnel. L'analyse des éboulis existants dans la zone boisée montre des traces de blocs anciens témoins d'une activité régulière et historique et pourtant il n'existe pas de trace de blocs dans la zone d'arrêt de blocs de décembre 2008.

Le logiciel CRSP du RTM permet la modélisation de chute de blocs isolés, l'interaction entre blocs lors de la chute n'est pas prise en compte. Il n'est donc pas possible de réaliser un calcul déterministe reproduisant l'événement de décembre 2008 avec CRSP.

Ce point illustre une première difficulté dans le cadre de la réalisation d'un PPR, doit on considérer tous les événements s'étant produit ? Doit-on se limiter aux événements correspondant à des périodes de retour arrêtees ?

Dans le cadre du zonage proposé par la suite, l'hypothèse sous jacente est l'exclusion du phénomène de décembre 2008. D'une part CRSP ne permet pas une représentation de celui-ci, d'autre part pour des éboulements en masse le service RTM aurait choisi une approche experte basée sur la méthode des cônes, le choix de l'angle aurait été fait par retro-analyse d'événement similaire (contexte alpin, roche calcaire, pente peu boisée), un angle de 28° à 32° eut été retenu.



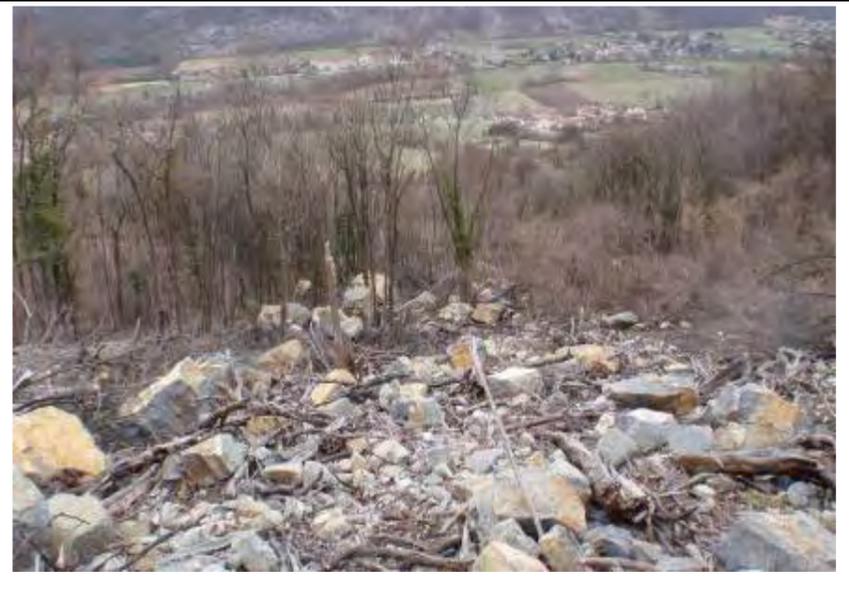
Figure 4 : Evénement du 28-12-2010 : zones d'arrêt maximale des blocs : - Source photo : IRMA du 15-01-2009

2.4 Caractérisation et localisation des types de sols

L'analyse de terrain a permis de distinguer 5 types de sol (mis à part la zone d'affleurement rocheux de la zone de départ).

La description et la caractérisation de chacun d'eux sont présentées dans le tableau de la page suivante (fig.5)

Une localisation de ces 5 types de sols est également représentée sur photographie prise d'ULM en figure 6.

N° du sol	Description	Photo 1	Photo 2
1	<p>Eboulis à éléments de taille hétérogène (très gros blocs à petits blocs voir sables) existence de secteur à matériaux très fins</p> <p>Sans boisement / terrain nu</p>		
2	<p>Eboulis à gros blocs et moyens blocs avec un peu de matrice terreuse</p> <p>Sans boisement / terrain nu</p>		
3	<p>Eboulis à moyen blocs et petits blocs dans une matrice terreuse</p> <p>Sans boisement mais avec une frange de sol meuble</p>		

4	<p>Terre végétale (argilo-humique) à cailloutis pouvant contenir quelques gros blocs épars (en surface ou en profondeur)</p> <p>Avec boisement peu dense</p>		
5	<p>Terre végétale-agricole (argilo- humique) sans éléments rocheux</p> <p>Sans boisement</p>		

Nb : L'affleurement rocheux (falaise de la zone de départ) a été assimilé dans la modélisation au type de sol 2. Dans la trajectographie, il représente seulement un tronçon de propagation qui est quasiment vertical. Cela n'influence donc quasiment pas sur la modélisation trajectographique

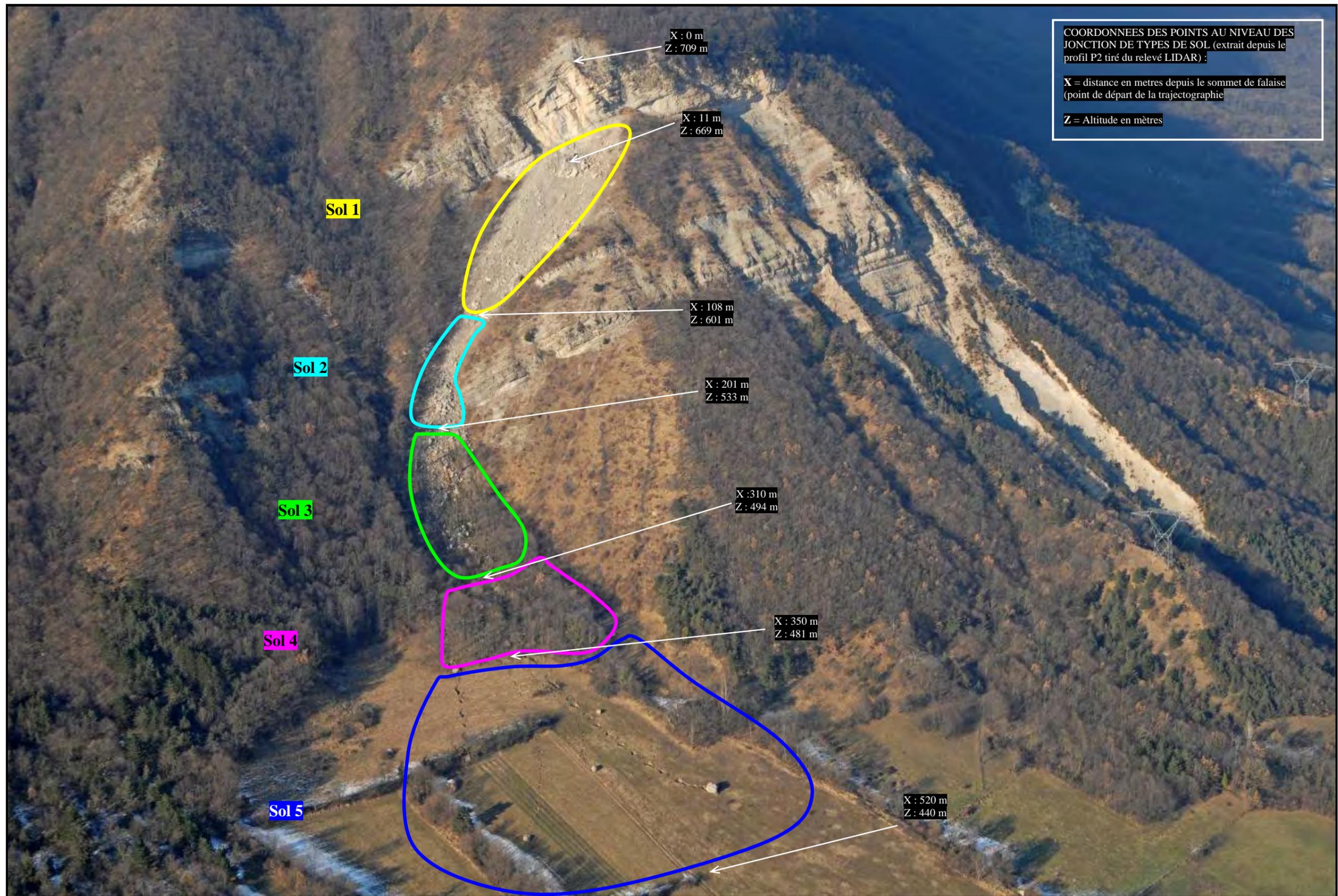


Figure 5 : Vue générale sur les différentes sections de types de sol : - Source photo : IRMA du 15-01-2009

3. Trajectographie : hypothèses de la modélisation

Le logiciel utilisé pour ces calculs est CRSP, il est présenté en annexe 1.

3.1 Phénomène de référence - volume

Celui-ci a été défini en concertation avec le Cemagref qui a choisi de retenir, la chute d'élément de volume :

- 1 m³ (taille éléments courant pouvant se détacher de la falaise)
- 8 m³ (taille des éléments moyens qui se trouvent en pied de versant)
- 33 m³ (taille du plus gros et lointain élément rocheux de l'événement du 28-12-2008)

Le nombre de calcul itératif sera de 10 000 trajectoires par modélisation.

Difficultés associées à ce choix : Les événements sont très différents. En effet la chute d'un bloc de 33 m³ met très vraisemblablement en œuvre des phénomènes d'interactions beaucoup plus considérable que pour un bloc de 1 m³.

3.2 Choix du profil

Le Cemagref a défini (*note du consortium : le Cemagref a proposé, proposition qui a été par la suite validée*) 3 profils P1, P2 et P3.

Ces trois profils ont pu être réalisés à l'aide des données issues :

- De la BD alti issu du Scan 25 de l'IGN
- De la Bd Topo
- Du MNT issu du Lidar (les trois profils sont ceux fournis par le Cemagref : P1, P2 et P3)

Le profil P2 est présenté sur la figure suivante avec les données du LIDAR et les données de l'IGN. Il existe un décalage très important. Les éléments qui ont une influence sur les calculs de CRSP sont, l'existence d'un replat sur le profil IGN qui aurait favorisé l'arrêt des blocs, une zone après le replat plus pentue qui aurait conduit à l'absence d'arrêt.

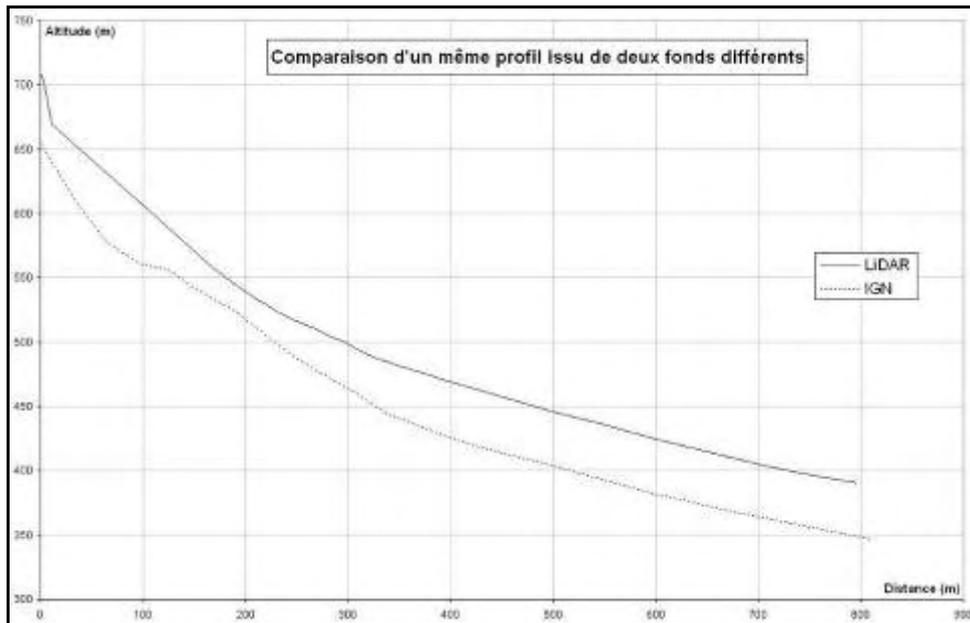


Figure 6 : Comparaison du profil P2 issu du fond LIDAR ou du fond de la BD Alti de l'IGN

Au vu de la similitude des profils et pour respecter le temps d'étude, il est choisi de se limiter à un seul profil de pente pour les calculs CRSP. C'est le profil P2 (le plus long et le plus central)

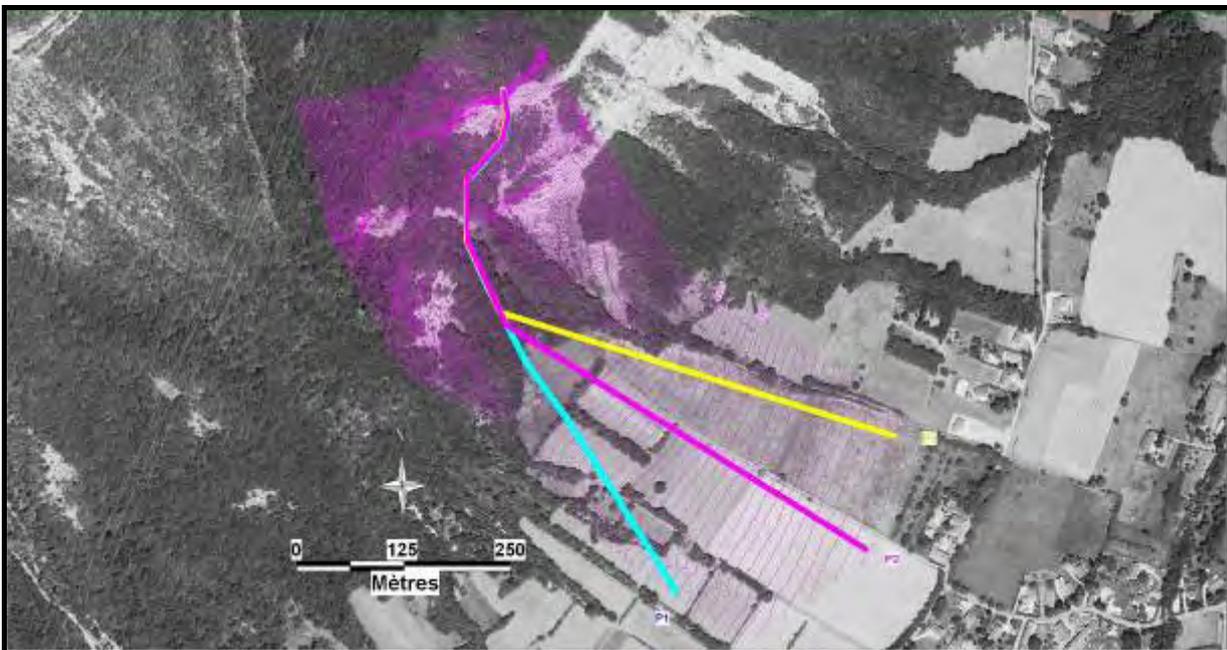


Figure 7 : Localisation des trois profils P1 - P - P3 issu du fond LIDAR

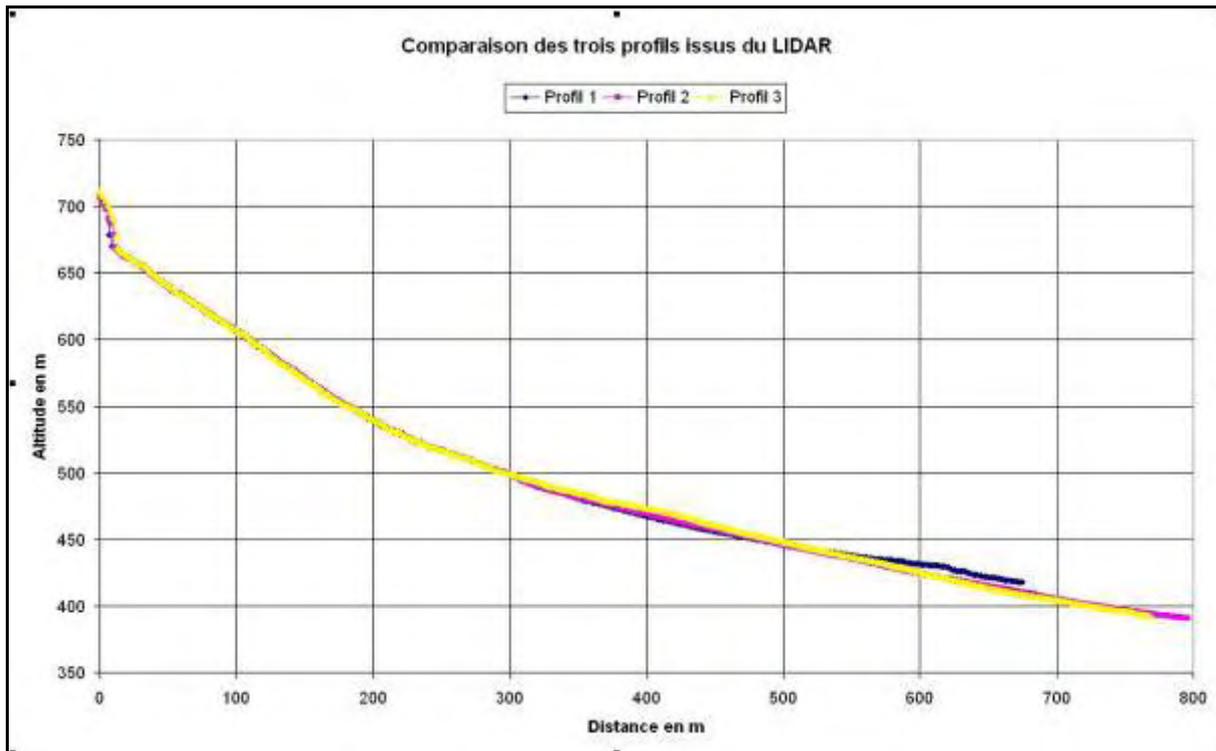


Figure 8 : Comparaison des trois profils P1 - P2 - P3 issu du fond LIDAR

Difficultés associées à ces profils : CRSP ne permet pas d'entrer d'une part le profil topographique et d'autre part les caractéristiques de sol. Sur la base du levé LIDAR nous disposons d'une information trop riche, Il a fallu par commodités créer des segments de pente et de sol homogène. D'une manière générale, dans l'usage de CRSP les profils issus de la BD Alti sont utilisés et modifiés à partir des observations de terrain (notamment dans le cas de profil en escalier ou de falaise intermédiaire). Des essais ont été réalisés lors du calage en interne de CRSP, sur des distances de propagation longue (plus de 200 mètres), ce sont les singularités topographiques nettes qui ont une influence (succession de terrasse, falaise ...), sur des pentes homogènes augmenter le nombre de segment n'améliore pas le résultat.

3.3 Coefficients de sol

Les coefficients de sol dans CRSP varient en fonction de la nature du sol mais aussi en fonction du couvert forestier (pour R_t), de la taille des blocs (pour R_n essentiellement et R_t), des irrégularités de la zone d'affleurement (S).

Pour les 3 gammes de volume, nous précisons le comportement prévisible du bloc.

Bloc de 30 m^3 : le volume et la masse de ces blocs les rendent peu sensibles aux irrégularités de terrain lorsque celle-ci est inférieure au mètre. La masse de ces blocs fait qu'il sollicite une tranche de sol plus importante, cela se traduit par une influence importante du substratum.

Ces blocs ont plutôt une tendance au roulement, les hauteurs de rebond sont surtout liées à la variation de la topographie.

Ainsi pour ces blocs :

- S est toujours faible car les obstacles rencontrés sont de faible dimension sauf pour le type de sol 3 où des blocs de plus de 10 m³ sont présents dans l'éboulis,
- R_n est majoré dans le type de sol 1, de manière à prendre en considération la présence du substratum rocheux sous les dépôts de l'événement du 28 décembre.

Bloc de 8 m³ : le volume et la masse de ces blocs les rendent sensibles aux irrégularités de terrain dans les zones d'accumulation de blocs (resserrement rocheux et pied d'éboulis). La masse de ces blocs fait qu'ils sollicitent une tranche de sol importante, cela se traduit par une influence de la nature du sol en profondeur. Ces blocs peuvent avoir des rebonds importants, les trajectoires peuvent varier considérablement comme le montre le bloc reconnu en bordure nord de l'événement du 28 décembre 2008.

Ainsi pour ces blocs :

- S est faible uniquement en zone d'arrêt, en zone de propagation il varie de 0.3 à 0.45, il est plus fort dans les sols de type 3 et 4 où l'on observe les plus gros volumes sur la pente,

Bloc de 1 m³ : le volume et la masse de ces blocs les rendent très sensibles aux irrégularités de terrain dans les zones d'accumulation de blocs (resserrement rocheux et pied d'éboulis). La masse de ces blocs fait qu'il sollicite une tranche de sol faible, cela se traduit par une influence forte des zones de sables superficielles. Ces blocs peuvent avoir des rebonds très importants qui favorisent les sorties de trajectoire.

Ainsi pour ces blocs :

- S est fort sur tout le profil saut en zone d'arrêt, en zone de propagation il varie de 0.3 à 0.45, il est plus fort dans les sols de type 3 et 4 où l'on observe les plus gros volumes sur la pente,
- Le coefficient R_t joue un rôle plus important (pris en compte par l'algorithme)

Rôle de la forêt : le seul coefficient dans CRSP qui permet de prendre en considération le rôle de la forêt est R_t . Dans le type de sol 4, il a été choisi à 0.1. Pour les volumes de 8 m³ à 30 m³, le RTM juge de toutes les manières que la forêt ne joue aucun rôle.

Les coefficients de sol retenus sont présentés dans le tableau de la Figure 10.

		VOLUMES DES BLOCS					
		1 m ³		8 m ³		33 m ³	
TYPE DE SOL	1 - Eboulis de taille hétérogène (très gros blocs à petits blocs) Sans boisement / terrain nu	Rn = 0,2 Rt = 0,7	S = 1,05	Rn = 0,25 Rt = 0,7	S = 0,3	Rn = 0,6 Rt = 0,7	S = 0,1
	2 - Eboulis à gros blocs et moyens blocs avec un peu de matrice terreuse Sans boisement / terrain nu	Rn = 0,6 Rt = 0,8	S = 1,05	Rn = 0,6 Rt = 0,8	S = 0,3	Rn = 0,8 Rt = 0,8	S = 0,1
	3 - Eboulis à moyen blocs et petits blocs dans une matrice terreuse Sans boisement mais avec une frange de sol meuble	Rn = 0,25 Rt = 0,4	S = 0,85	Rn = 0,25 Rt = 0,75	S = 0,45	Rn = 0,25 Rt = 0,75	S = 0,4
	4 - Terre végétale (argilo-humique) à cailloutis pouvant contenir quelques gros blocs épars (en surface ou en profondeur) Avec boisement peu dense	Rn = 0,15 Rt = 0,1	S = 0,7	Rn = 0,15 Rt = 0,1	S = 0,45	Rn = 0,15 Rt = 0,1	S = 0,1
	5 - Terre végétale-agricole (argilo-humique) sans éléments rocheux Sans boisement	Rn = 0,05 Rt = 0,5	S = 0,1	Rn = 0,05 Rt = 0,5	S = 0,1	Rn = 0,05 Rt = 0,5	S = 0,1

Figure 9 : Choix des coefficients de sol en fonction des types de sol et des volumes choisis pour la trajectographie

Difficultés rencontrées : la zone de propagation choisie est très remarquable de part son hétérogénéité. La zone 1 présente à la fois des secteurs de rocher (les gros blocs présents dans l'éboulis) et des secteurs de sable, il en est de même pour la zone 3. Dans les zones 1 à 3, il existe une rugosité forte à très forte. Ces observations sont à mettre en relation avec l'événement du 28 décembre 2008 qui est encore frais. Ainsi un bloc peut de manière assez aléatoire rebondir deux fois successives dans des zones amortissantes mais aussi bien deux fois successives dans des zones énergisantes (sur un bloc). Or sur CRSP, il est fait le choix de coefficient moyen, ainsi le Rn choisi pour le sol 1 doit permettre de représenter le comportement moyen du bloc (rebond à la fois sur du dur et sur du mou). Dans le cas de Saint Paul de Varcès, le nombre de rebond calculé et la distance de propagation assez longue plus de 200-300 m nous permettent de valider les résultats, d'autant plus que les zones d'arrêt final sont elles assez homogènes (sol 4 et 5). Dans le cas d'une trajectoire plus courte avec peu de rebond, il nous aurait fallu tenir compte du cas le plus négatif, rebond uniquement sur du dur et l'ensemble des Rn eut été majoré.

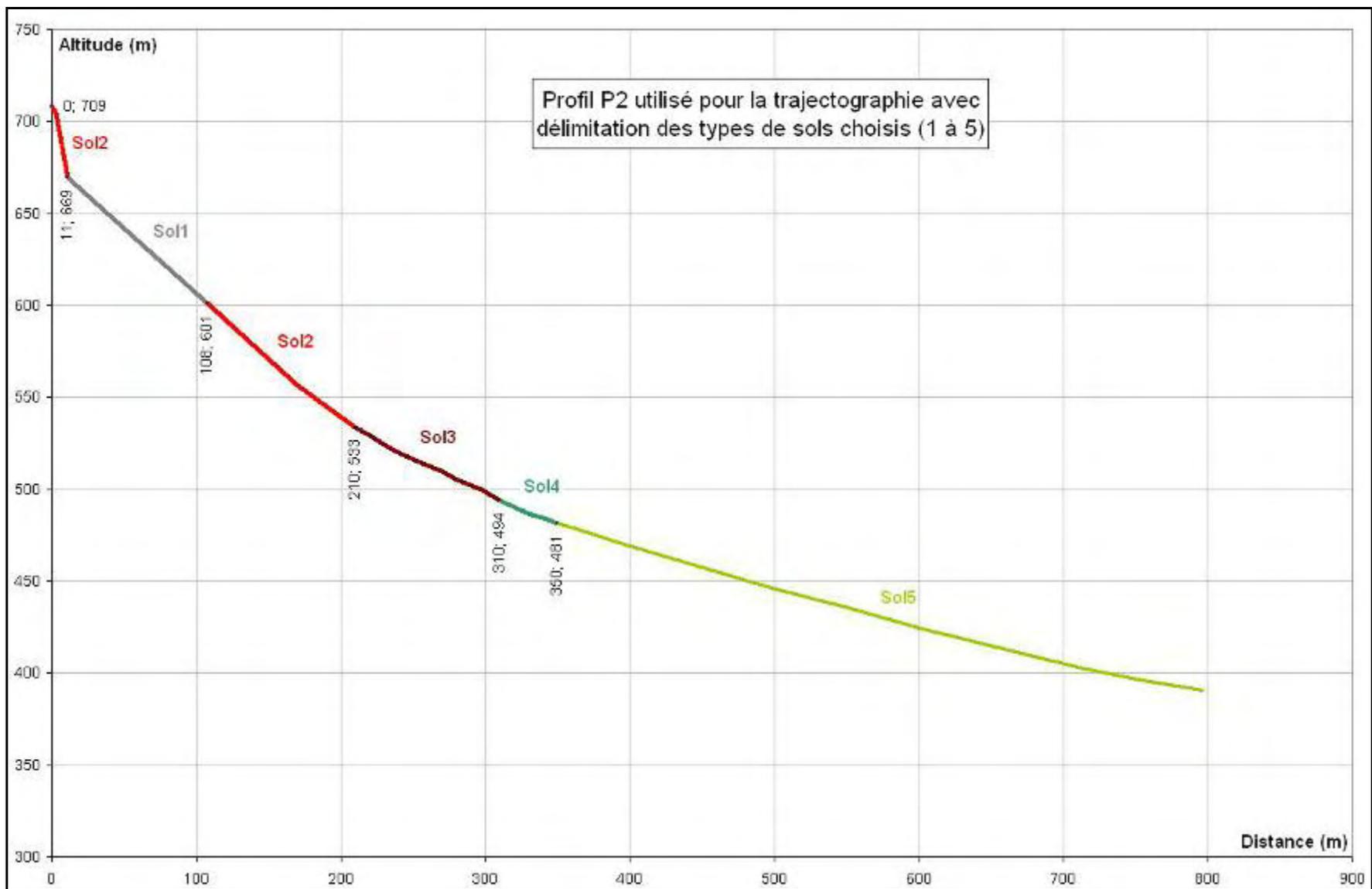
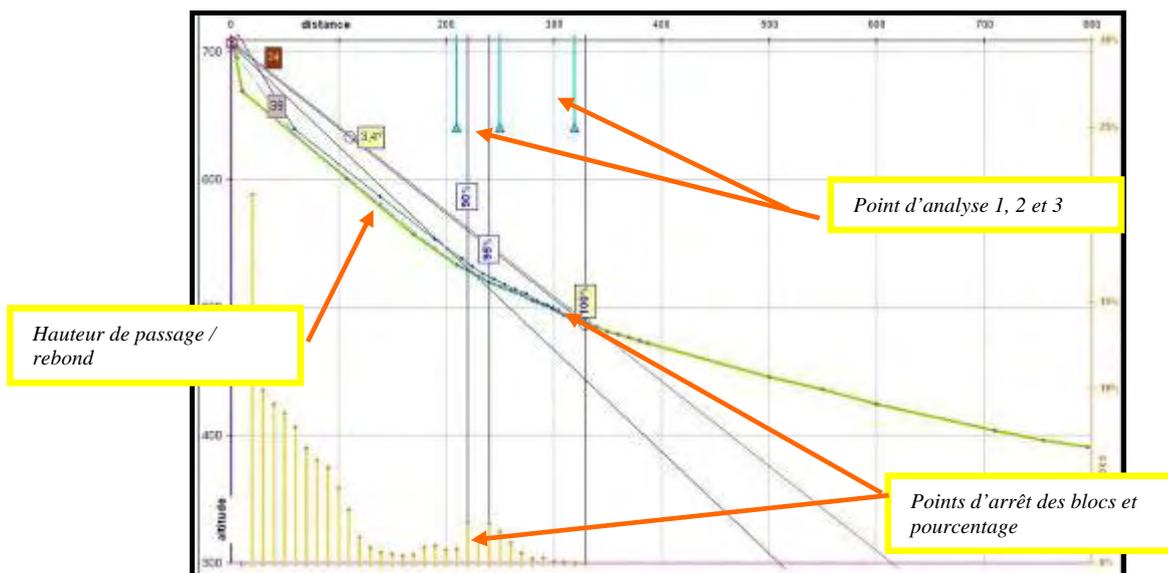


Figure 10 : Comparaison du profil P2 issu du fond LiDAR ou du fond de la BD Alti de l'IGN

4. Trajectographie : résultats de la modélisation

Les résultats ci-dessous donnent :

1. Les résultats de calcul sur 3 points d'analyse, les abscisses varient pour chaque volume, car ces points ont été positionnés de manière à localiser les gammes d'énergie utiles au zonage type matrice Suisse (0-30 kJ, 30-300 kJ, plus de 300 kJ) - (Figure 14, Figure 16 & Figure 18). Ces tableaux présentent les résultats bruts du logiciel CRSP. Le tableau des probabilités est à prendre avec réserve, les extrapolations réalisées sur les hauteurs de rebond notamment sont très pessimistes et liés aux choix de loi d'ajustement logarithmique.
2. Les résultats de distance d'arrêt sur le profil (Figure 15, Figure 17, & Figure 19), la Figure 12 récapitule les infos données par profil
3. L'extrapolation des distances d'arrêt pour les probabilités d'atteinte inférieure à 10^{-6} (Méthode ADRGT pour l'estimation des probabilités faibles par régression linéaire sur une échelle logarithmique)



* cette information permet à l'utilisateur de vérifier la cohérence des résultats

Figure 11 : Présentation du rendu des calculs sur profil graphique

4.1 Pour 1 m³

Pour le profil P2 les résultats sont présentés dans les figures 14 et 15. (pour 10 000 trajectographies)

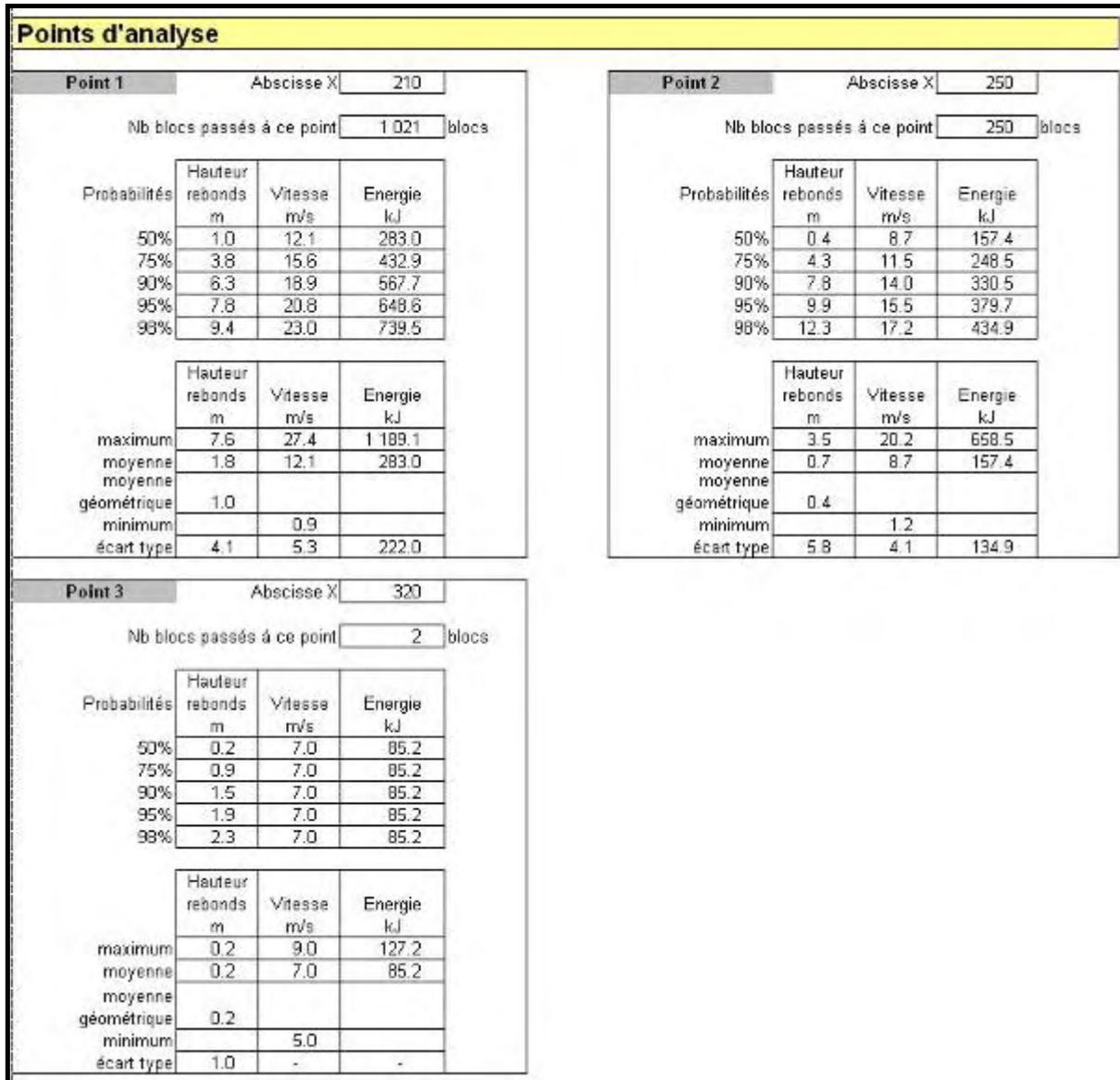


Figure 12 : Résultats numériques de la trajectographie pour un volume de 1 m³ pour trois points d'analyse

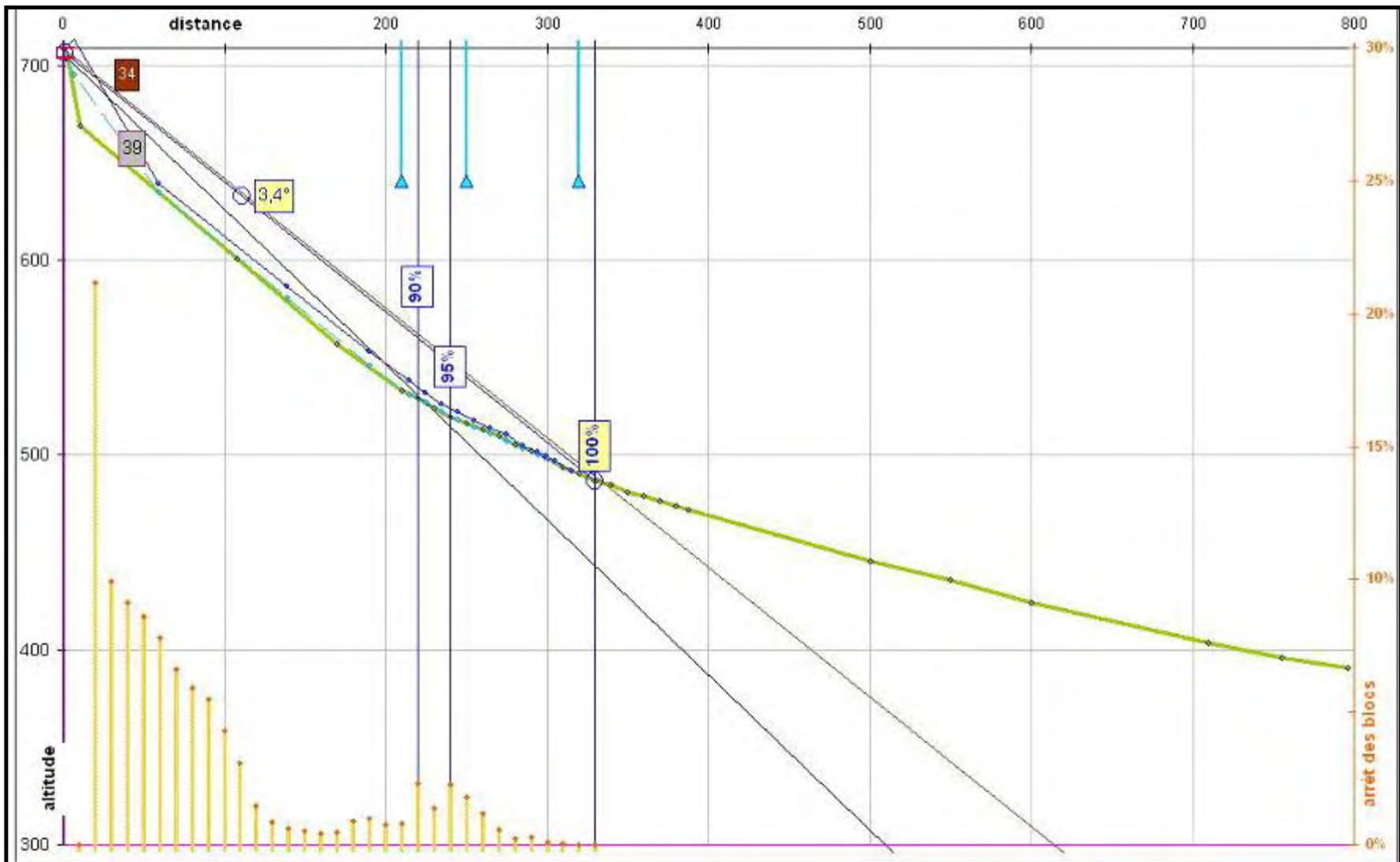


Figure 13 : Résultats graphiques (arrêt des blocs) de la trajectographie pour un volume de 1 m³

4.2 Pour 8 m³

Pour le profil P2 les résultats sont présentés dans les figures 16 et 17 (pour 10 000 trajectographies).

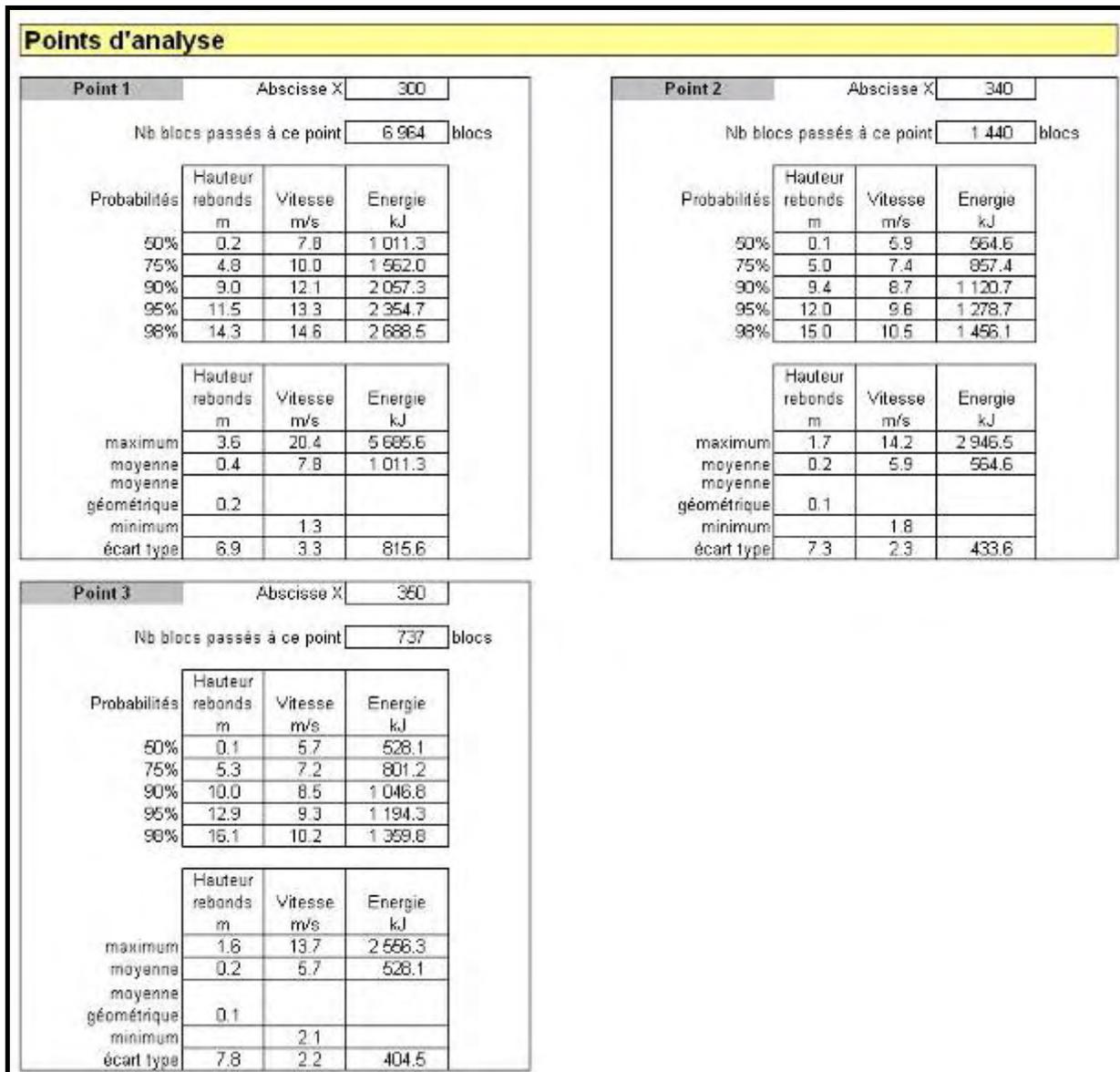


Figure 14 : Résultats numériques de la trajectographie pour un volume de 8 m³ pour trois points d'analyse

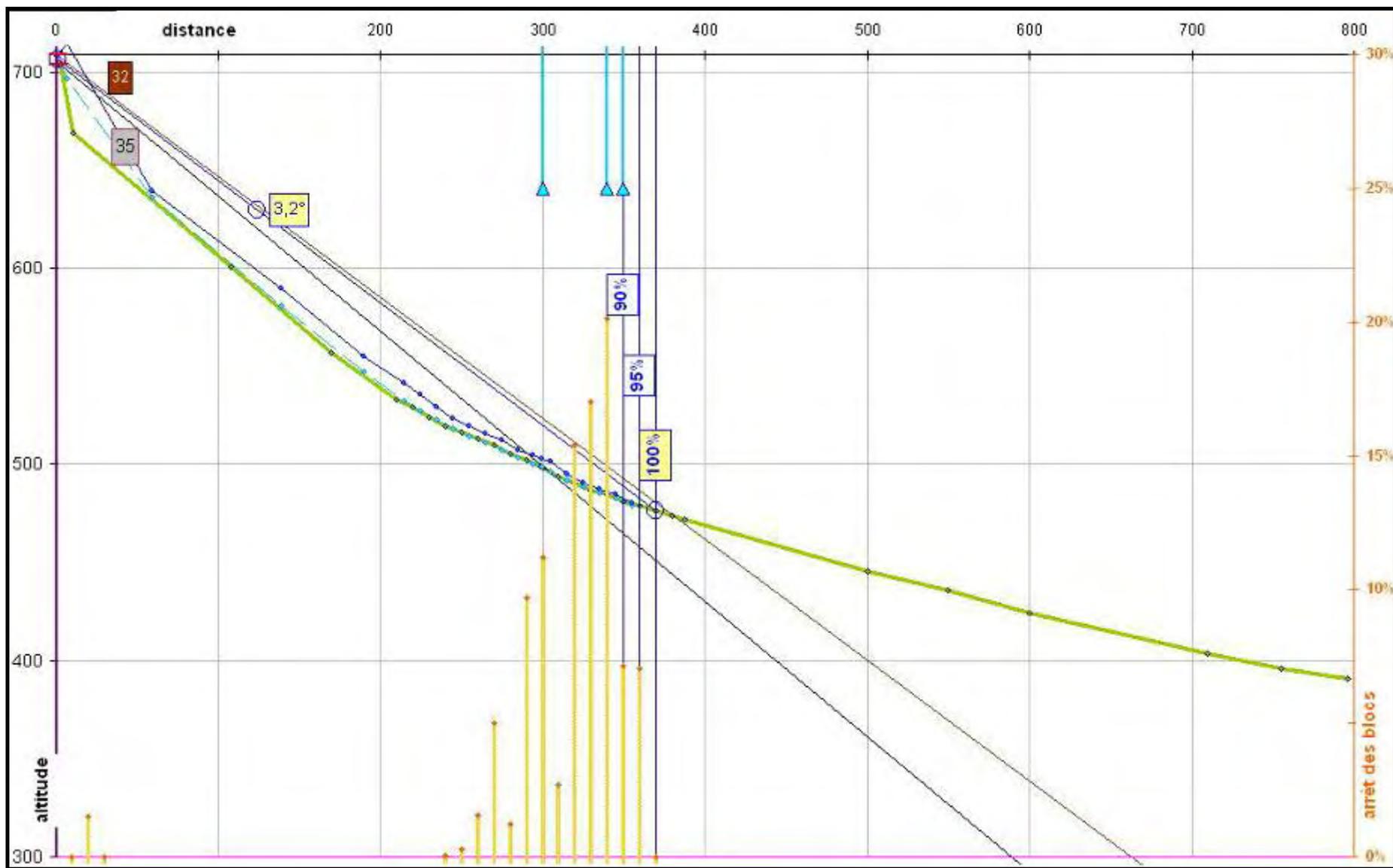


Figure 15 : Résultats graphiques (arrêt des blocs) de la trajectographie pour un volume de 8 m³

4.3 Pour 33 m³

Pour le profil P2 les résultats sont présentés dans les figures 18 et 19 (pour 10 000 trajectographies).

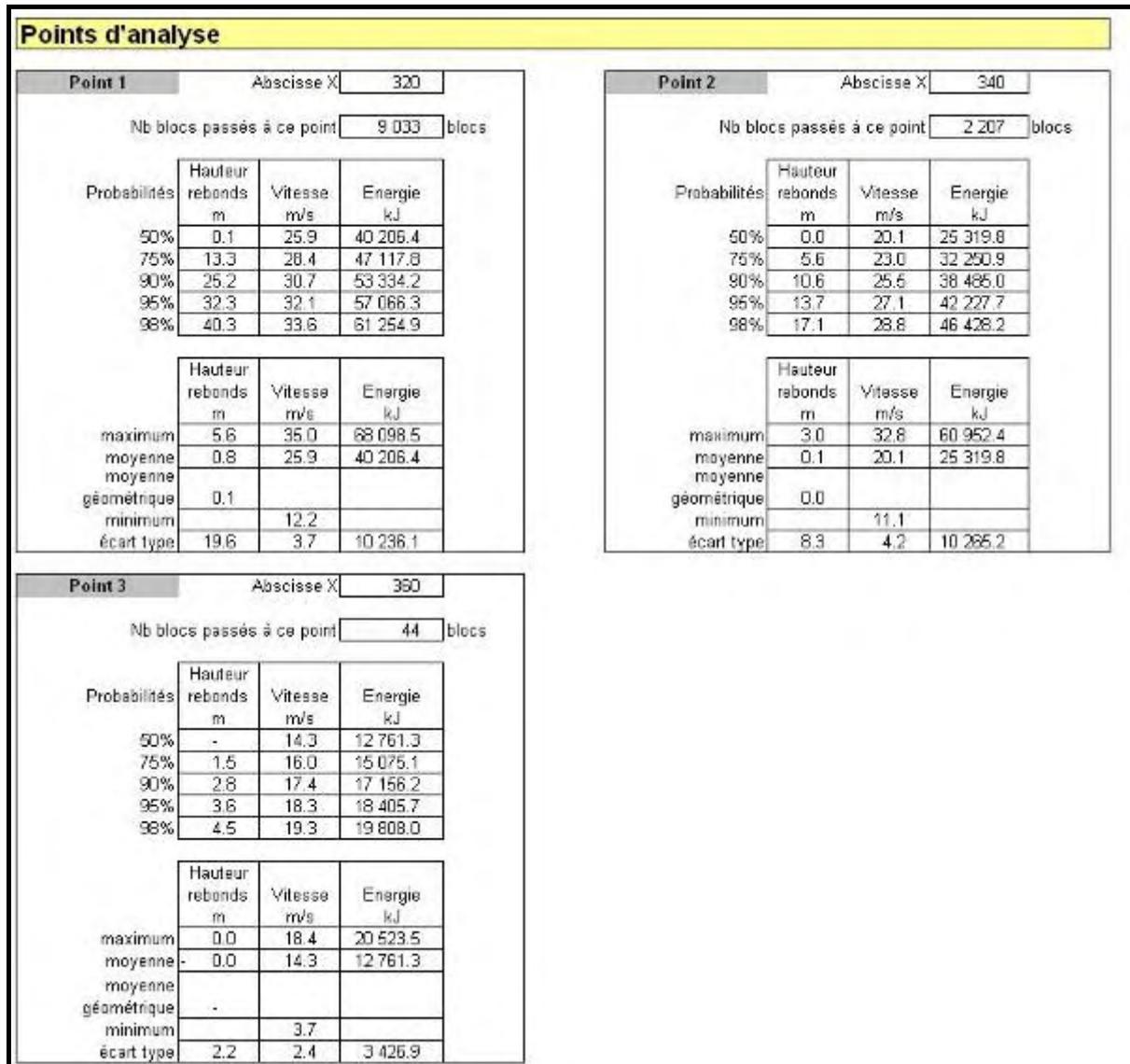


Figure 16 : Résultats numériques de la trajectographie pour un volume de 33 m³, pour trois points d'analyse

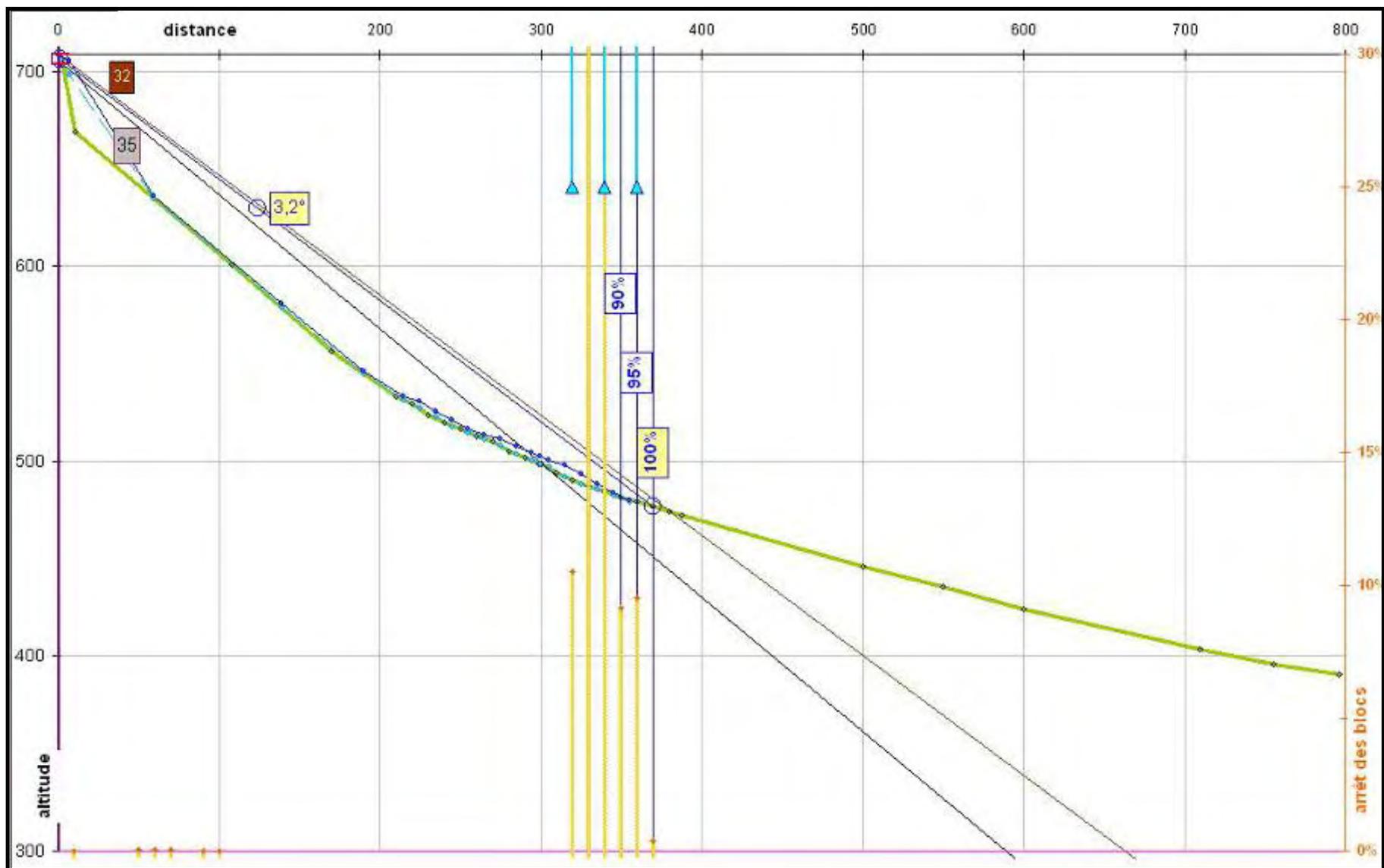


Figure 17 : Résultats graphiques (arrêt des blocs) de la trajectographie pour un volume de 33 m³

4.4 Synthèse des données pour les 3 volumes

Le tableau de la figure 20 reprend les principaux résultats. Sont représentés :

- les abscisses linéaires des probabilités d'atteinte à 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} ,
- les résultats sur les 3 points d'analyse en nombre de blocs ayant dépassés le point d'analyse et en énergie moyenne des blocs passant le point d'analyse

PROFIL P2	Bloc de 1 m ³			Bloc de 8 m ³			Bloc de 33 m ³		
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻²	x : 265 m z : 510 m			x : 347m z : 482 m			x : 353m z : 480 m		
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻⁴	x : 330 m z : 485 m			x : 371 m z : 475 m			x : 379 m z : 473 m		
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻⁶ (par extrapolation)	x : 394 m z : 470 m			x : 395 m z : 468 m			x : 406 m z : 465 m		
Distances des 3 points d'analyse choisis (x : en mètres)	<i>Pt1</i>	<i>Pt2</i>	<i>Pt3</i>	<i>Pt1</i>	<i>Pt2</i>	<i>Pt3</i>	<i>Pt1</i>	<i>Pt2</i>	<i>Pt3</i>
	210	250	320	300	340	350	320	340	360
Nombre de blocs passés au niveau du point d'analyse (sur 10 000 blocs)	1021	250	2	6984	1440	737	9033	2207	44
Energie moyenne des blocs passés au niveau du point d'analyse (en kJ)	285	150	85	1011	564	528	40000	25000	12761

Figure 18 : Tableau des principaux résultats de la modélisation (utiles à la réalisation de la cartographie de l'aléa)

Il est ici constaté que :

- pour les probabilités d'atteinte faible (10^{-6}), le volume du bloc joue peu, la distance d'arrêt évolue de 394 m pour un bloc de 1 m³ à 406 m pour un bloc de 33 m³,
- l'énergie des volumes important, 8 et 30 m³ reste très importante même dans les zones d'arrêt (supérieure à 300 kJ),

5. Cartographie de l'aléa

5.1 Matrice suisse : rappel et application à ce projet

L'intensité des chutes de blocs en un endroit donné peut être définie par l'énergie des blocs en ce point. Par analogie avec les directives fédérales helvétiques (OFEFP, 1997), trois classes d'intensité sont distinguées :

- forte (> 300 kJ): destruction partielle ou totale des bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées;
- moyenne (30-300 kJ): dégâts aux bâtiments atteints, les personnes atteintes peuvent être tuées. Une énergie de 300 kJ correspond à la résistance standard d'un mur en béton armé;
- faible (< 30 kJ): les bâtiments atteints sont faiblement endommagés, les personnes atteintes peuvent être tuées ou blessées. Une énergie de 30 kJ correspond à la résistance standard d'une barrière en bois de chêne d'environ 30 cm d'épaisseur.

La Combinaison Intensité - probabilité de propagation permet une estimation du niveau d'aléa qui se fait selon le diagramme ci-dessous :

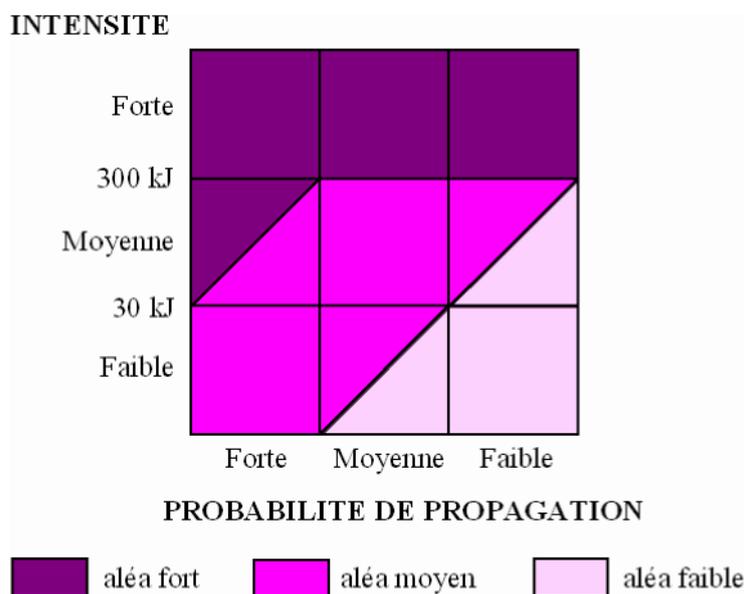


Figure 19 : Recommandation de l'Ofefp 1997- matrice suisse de l'aléa chutes de blocs utilisée pour la réalisation des cartographie

Une autre matrice issue de la recommandation ci-dessus est utilisée (voir Figure 22).

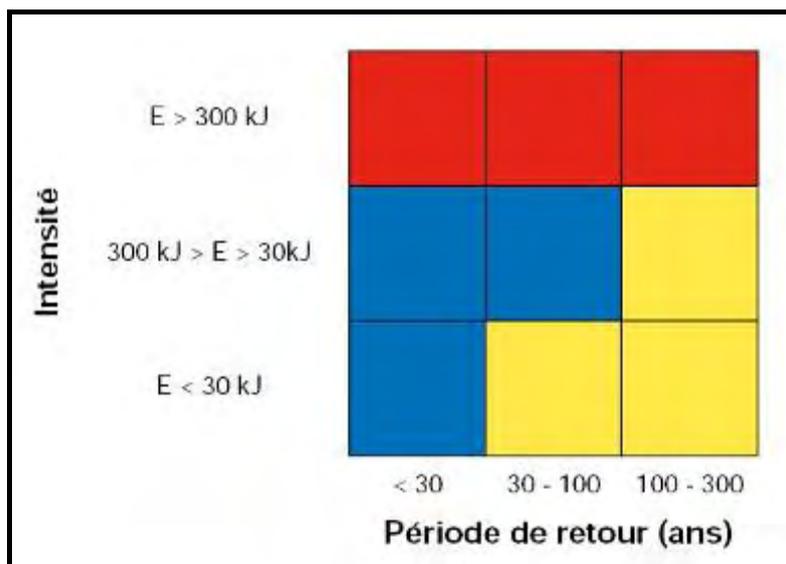


Figure 20 : Tableau de la matrice suisse de l'aléa chutes de blocs utilisée pour la réalisation des cartographies)

Dans le cadre de ce projet, il est choisi de réaliser une approche similaire en conservant l'approche traditionnellement mise en œuvre en France avec 3 niveaux d'intensité en fonction de la probabilité d'atteinte :

- Proba 10^{-2}
- Proba 10^{-4}
- Proba 10^{-6}

Ainsi la matrice retenue pour ce projet est la suivante :

E > 300 kJ	Fort	Fort	Fort
300 kJ > E > 30 kJ	Fort	Moyen	Moyen
E < 30 kJ	Fort	Moyen	Faible
Energie/Probabilité d'atteinte	$P > 10^{-2}$	$10^{-2} > P > 10^{-4}$	$10^{-4} > P > 10^{-6}$

5.3 Cartographie des événements de 1 m^3 / 8 m^3 / 33 m^3

Nous rappelons brièvement ce que représentent les zonages de ce projet :

- le zonage d'un événement de type chute de bloc isolé ou de faible volume (est exclu l'écroulement en masse de décembre 2008),
- la caractérisation de la zone de propagation est faite sur la base des observations post événement de décembre 2008,

- deux types de zonage sont proposés, en fonction de la probabilité d'atteinte par un bloc et en fonction de la combinaison probabilité d'atteinte / énergie du bloc

Les résultats obtenus par calcul sur le profil P2 sont extrapolés en périphérie d'après la morphologie du terrain. P2 est le profil de plus forte pente le plus négatif.

La légende de la Figure 23 est la suivante :

Zonage en termes de probabilité d'atteinte par un bloc :

- Ligne rouge = limite 10-2
- Ligne orange = limite 10-4
- Ligne verte = limite 10-6

Zonage par la combinaison probabilité d'atteinte et énergie d'un bloc :

- Aléa fort = zone rouge
- Aléa moyen = zone bleue
- Aléa faible = zone jaune

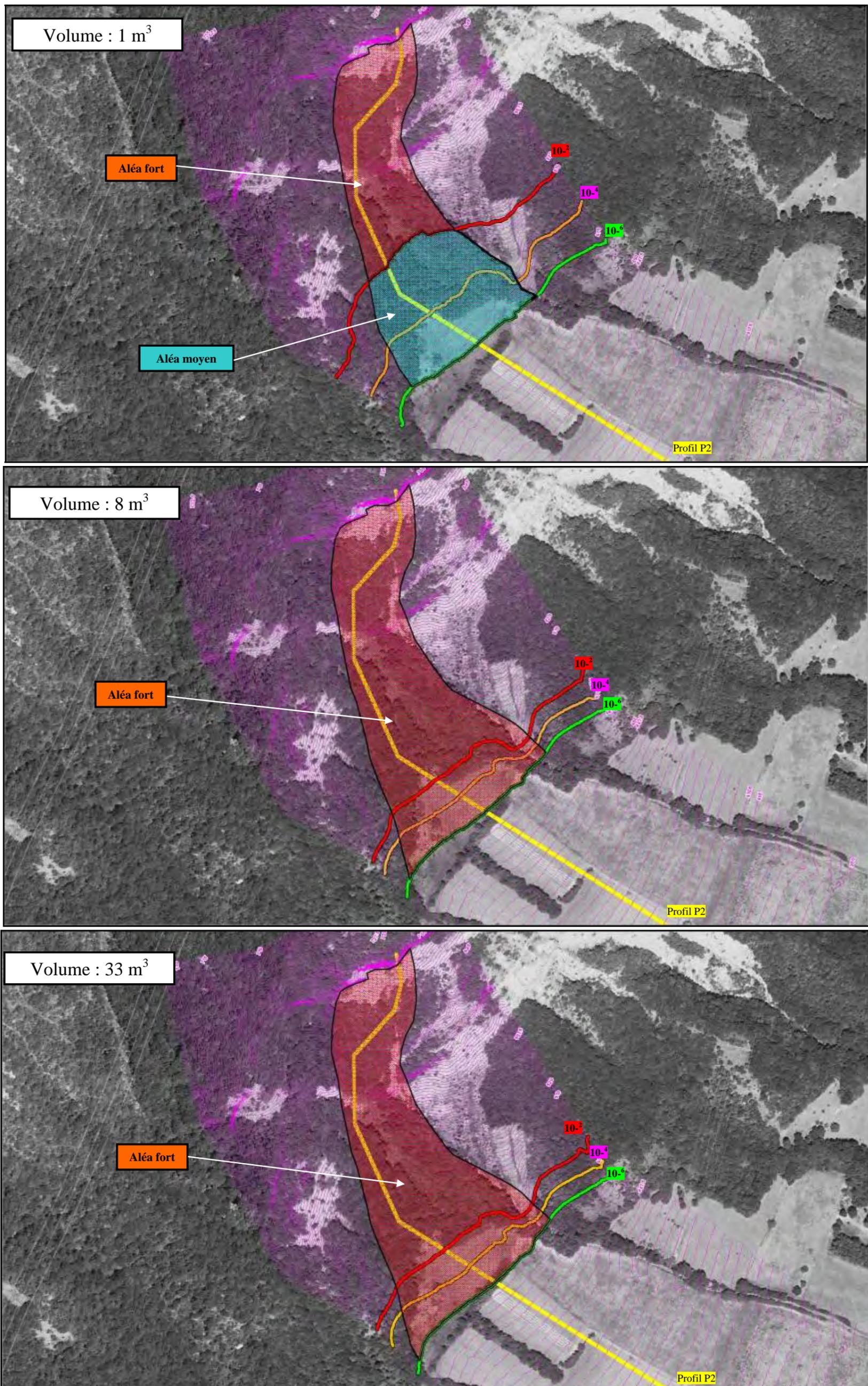


Figure 21 : Cartographie de l'aléa chutes de blocs pour les 3 différents volumes ($1\text{m}^3 / 8 \text{ m}^3 / 33\text{m}^3$)

5. Conclusions

Les conclusions et la synthèse de ce rapport sont provisoires dans l'attente de réunions de bilan programmées par le Cemagref.

Les conclusions de ce rapport sont basées sur les résultats de calcul d'un logiciel : CRSP. Ils ne sont pas généralisables aux autres logiciels. Nous rappelons tout de même que ce logiciel a fait l'objet de plusieurs calages par son concepteur et que le RTM a réalisé de même diverses opérations de vérification de celui-ci. Comme tout logiciel il est sensible à l'utilisateur et aux choix des variables par celui-ci. Le temps consacré à l'étude est de 4.5 jours d'ingénieur, ce temps imparti limite les possibilités d'exploration par l'utilisateur de tout le potentiel d'un logiciel.

A ce stade apparaît nettement que le choix des hypothèses de cartographie des zones d'aléa a une influence forte dès que les événements de référence sont d'un volume important. Une cartographie en termes de probabilité d'atteinte par un bloc aurait conduit à la définition d'une zone d'aléa fort et une zone d'aléa moyen. Une cartographie par la combinaison de la probabilité d'atteinte et de l'énergie aurait conduit en la définition d'une unique zone d'aléa fort qui inclut la zone d'aléa moyen du zonage en probabilité d'atteinte.

Dans le cadre d'un calcul avec CRSP, les résultats et l'extrapolation pour les probabilités d'atteinte extrêmes (10^{-6}) conduisent à des résultats similaires quelque soit le volume (moins de 10 mètres de différence). Cela se traduit en termes de mesure d'angle à un arrêt pour un angle de 31° . Les résultats bruts du calcul de CRSP sur 10 000 blocs donnent une distance d'arrêt maximale de :

- 330 m pour un bloc de 1 m^3 ,
- 371 m pour un bloc de 8 m^3 ,
- 379 m pour un bloc de 33 m^3 ,

Celle-ci correspond à la probabilité d'atteinte de 10^{-4} , l'extrapolation linéaire selon une approche type ADRGT lisse encore plus les résultats :

- 394 m pour un bloc de 1 m^3 ,
- 395 m pour un bloc de 8 m^3 ,
- 406 m pour un bloc de 33 m^3

Compte tenu des incertitudes liées à la nature même du phénomène, aux hypothèses de calcul, un écart de 10 mètres entre un volume de 1 m^3 et un volume de 33 m^3 ne paraît pas significatif. Il semble donc en première approche que pour un zonage basé sur une probabilité d'atteinte de 10^{-6} , le volume du bloc importe peu. L'application de la méthode des cônes pour une valeur d'angle à définir est pertinente et simplifie la démarche de zonage puisqu'il ne nécessite pas la définition d'un volume de départ et donc la prospection dans la zone source.

ANNEXES du rapport du RTM :

Annexe 1 : Présentation du logiciel de trajectographie CRSP
Et note méthodologique d'intégration de l'outil de calcul trajectographique CRSP dans les études RTM

Annexe 2 : Fiche événement du RTM Isère du 31-12-2008

Annexe 1

Le logiciel utilisé pour ces calculs est CRSP, acronyme de Colorado Rockfall Simulation Program (logiciel de simulation des chutes de blocs du Colorado), réalisé par le Département des Routes du Colorado et l'Ecole des Mines du Colorado.

Ce logiciel simule la chute de blocs le long d'un profil divisé en segments. Chaque segment se voit attribuer, en plus de ses caractéristiques géométriques, un coefficient de restitution normal (perpendiculaire à la pente), un coefficient de restitution tangentiel (parallèle à la pente) et un coefficient de rugosité.

Les coefficients de restitution sont fonction de la nature du sol à l'endroit de l'impact et servent au logiciel à calculer l'énergie résiduelle du bloc après chaque rebond.

Le coefficient de rugosité traduit l'irrégularité de la surface topographique à l'échelle du rayon du bloc. Plus la surface est irrégulière, plus ce coefficient est important.

Les blocs sont caractérisés par leur masse volumique, leurs dimensions et leur forme. Le logiciel CRSP permet de simuler la chute de sphères, de cylindres ou de discoïdes.

Trois points d'analyse (AP1, AP2, AP3) peuvent être positionnés le long du profil. Le logiciel fournit en ces points des données statistiques supplémentaires sur les vitesses, les hauteurs de rebond et les énergies cinétiques des blocs, ainsi que les probabilités de propagation.

Le choix du positionnement de ces points permet d'optimiser l'emplacement d'un ouvrage de protection futur, ou de tester l'efficacité d'un ouvrage de protection existant.

Il peut aussi, et c'est l'utilité des points d'analyse dans le cadre de cette étude, permettre d'affiner les probabilités de propagation données par tranches de 10 mètres : en positionnant ces points en fin de parcours des blocs, on peut espérer affiner la résolution de ces tranches pour obtenir finalement une meilleure extrapolation des probabilités de propagation (cf. annexe 2).

On fixe enfin le nombre de trajectoires simulées. CRSP permet de simuler jusqu'à 32768. Le nombre de trajectoires simulées dans le cadre de cette étude est de 30000.

Le premier résultat donné par CRSP est un graphique sur lequel figurent le profil du terrain et les traces des trajectoires simulées. Ce graphique est reproduit dans cette étude.

On accède ensuite aux données statistiques calculées au niveau des points d'analyse. Une partie de ces données sont utilisées dans le cadre de cette étude.

On passe ensuite en revue plusieurs graphiques et tableaux montrant notamment les vitesses et hauteurs de rebond maximum le long du profil. Il n'y a pas d'utilité à intégrer ces graphiques dans le cadre de cette étude.

CRSP fournit un tableau donnant, par intervalles de 10 mètres, le nombre de blocs arrêtés (cf. annexe 3). Pour rester en cohérence avec les données fournies au niveau des points d'analyse, ces données sont transformées en probabilités de propagation. C'est sous cette forme que sont présentés les résultats dans le cadre de cette étude.

TRAJECTOGRAPHIE METHODOLOGIE RTM

Intégration des résultats de calculs trajectographiques par le Colorado Rockfall Program System dans les expertises RTM

1. PREANMBULE

Dans le cadre de ses expertises de phénomènes de chute de bloc, l'ONF service RTM appuie son analyse sur un outil de calcul trajectographique, le Colorado Rockfall simulation Program version 4.0 (CRSP). Cet outil est utilisé pour :

- des approches trajectographiques simples en première analyse de risque,
- des approches dimensionnantes (propositions de parade),
- des approches de zonage (affinage des limites PPR).

Il s'agit d'un outil d'appui à l'approche experte couramment développée par le RTM. Le RTM ne cherche donc pas à intervenir dans l'algorithme de calcul et à en modifier les paramètres, il a choisi de développer une méthodologie d'utilisation de CRSP afin d'éclaircir son expertise qui s'appuie essentiellement sur une connaissance forte du terrain, des archives riches, des praticiens très expérimentés et un réseau important.

Le but de cette note est de définir les limites du modèle en comparaison des modèles courants. Celle-ci est co-signée par le Cemagref qui dans le cadre d'un travail de recherche UEE 2007 - Module 4 a réalisé des analyses comparatives de calcul

trajectographique sur différents modèles dont CRSP. Référence article « F. Berger, L. Dorren »

2. PRESENTATION DU LOGICIEL

Ce logiciel simule la chute de blocs le long d'un profil divisé en segments. Chaque segment se voit attribuer, en plus de ses caractéristiques géométriques, un coefficient de restitution normal (perpendiculaire à la pente), un coefficient de restitution tangentiel (parallèle à la pente) et un coefficient de rugosité.

Les coefficients de restitution sont fonction de la nature du sol à l'endroit de l'impact et servent au logiciel à calculer l'énergie résiduelle du bloc après chaque rebond.

Le coefficient de rugosité traduit l'irrégularité de la surface topographique à l'échelle du rayon du bloc. Plus la surface est irrégulière, plus ce coefficient est important.

Les blocs sont caractérisés par leur masse volumique, leurs dimensions et leur forme. Le logiciel CRSP permet de simuler la chute de sphères, de cylindres ou de discoïdes.

Trois points d'analyse (AP1, AP2, AP3) peuvent être positionnés le long du profil. Le logiciel fournit en ces points des données statistiques supplémentaires sur les vitesses, les hauteurs de rebond et les énergies cinétiques des blocs, ainsi que les probabilités de propagation.

Le choix du positionnement de ces points permet d'optimiser l'emplacement d'un ouvrage de protection futur, ou de tester l'efficacité d'un ouvrage de protection existant.

Il peut aussi, et c'est l'utilité des points d'analyse dans le cadre de cette étude, permettre d'affiner les probabilités de propagation données par tranches de 10 mètres : en positionnant ces points en fin de parcours des blocs, on peut espérer affiner la résolution de ces tranches pour obtenir finalement une meilleure extrapolation des probabilités de propagation.

Les résultats obtenus découlent d'approches statistiques et fournissent des informations sur :

- les vitesses,
- les hauteurs de rebond,
- les énergies cinétiques des blocs,
- les distances de propagation.

3. PHASE DE TEST DU MODELE

2.1. Reproduction de calcul

Le RTM ayant participé à de nombreuses études, dispose dans ces archives d'études trajectographiques réalisées par les principaux bureaux d'étude reconnus.

Pour mémoire, CRSP a été utilisé sur la base d'étude de SAGE et d'IMS à Val d'Isère sur le site du Rocher du Planet, sur les profils du program Interreg IIC « Prévention des instabilités de falaise » et les résultats des bureaux d'étude SAGE, CETE de Lyon LMR-EPF de Lausanne (profils sur les sites de Barjac, Comboire, Champrond, St Marcel, Bieudron, Crétaux), sur les profils de l'étude du CETE pour le projet de la gare TGV à Montmelian, sur les profils d'une étude SAGE aux ORRES.

Les écarts entre les différents modèles étaient constatés dans le cadre du programme Interreg IIC, CRSP n'échappe pas à la règle. Il a cependant à chaque fois été possible de construire un modèle numérique cohérent avec les résultats de principaux autres modèles. Après construction du modèle et par comparaison des résultats, nous avons constaté que CRSP était:

- bon pour les distances de propagation;
- moyen pour les énergies;
- parfois limites pour les hauteurs de rebond (souvent sur estimées);

La méthodologie pour les calculs trajectographiques proposés par le service RTM tient compte des qualités et des défauts du modèle.

Quelques soit les modèles le paramètres primordial des calculs est le profil topographique. Des hypothèses initiales de profil ou bien des données initiales de topographie va découler un plus ou moins grand ajustement des autres paramètres du modèle afin de restituer des résultats cohérents de propagation.

Durant cette étape, il a été constaté que le modèle CRSP est certes assez simple :

- peu de paramètres d'entrée,
- 3 formes de blocs,
- pas de fractionnement en court de chute.

Cependant c'est un modèle dont les résultats convergent assez rapidement les temps de calcul sont courts, ce qui permet un paramétrage plus simple car il est facile de multiplier les calculs trajectographiques.

Il est important de signaler que pour ces premiers tests l'approche a été purement calculatoire, nous n'avons pas fait de complément de terrain, nous n'avons pas pris de profils différents. Et donc en conclusion, il a été à chaque fois possible de reproduire

d'une manière satisfaisante les résultats des autres calculs. Pour cela il a été nécessaire dans certains cas de forcer certains paramètres d'entrée du modèle, le coefficient R_n et la rugosité S . Ces éléments montrent la forte sensibilité des modèles à l'utilisateur. Ce sont les ajustements faits par celui-ci sur la base des observations de terrains, des événements historiques et d'hypothèses propres qui font le modèle.

2.2. Test de CRSP sur des problématiques RTM

L'objectif de ces tests était de :

- vérifier les valeurs des coefficients de restitution de la notice CRSP,
- utiliser le modèle sans étude comparative sur des études en interne par comparaison de l'approche experte dite traditionnelle, et des résultats de calcul trajectographique.

Sur plusieurs cas d'étude en interne, la sensibilité des agents de terrain avec les résultats de CRSP a pu être testée, notamment sur des profils à Pralognan, Chignin et Pontamafray. Dans les Pyrénées, CRSP a été utilisé à Campan pour affiner le zonage et à Asté pour conforter le zonage.

Dans tous les cas, l'étape délicate a été le choix des coefficients physiques qui doivent être introduits avec une influence par ordre croissant de R_t , R_n et S . Il s'agit d'une étape délicate où la connaissance du terrain, en particulier des irrégularités topographiques et de la répartition des différents sols est fondamentale. Les paramètres R_n et R_t peuvent être trouvés dans la littérature, mais la meilleure solution a été de les déterminer par analyses en retour des blocs déjà tombés. L'établissement des coefficients géomécaniques du sol se fait alors par essais successifs, en cherchant à retrouver les trajectoires et les points d'arrivée pour les événements passés. A noter que le Département des Routes du Colorado et l'Ecole des Mines du Colorado qui ont développé le logiciel ont déjà réalisé des tests de calage. Le contexte géologique est cependant sensiblement différent : falaise de grés surmontant des pentes d'éboulis.

Globalement les constats déjà signalés dans la notice sont vérifiés :

- ajustement du coefficient R_n en fonction de la longueur de pente. Sur des profils assez longs (supérieur à 300 m), il est nécessaire de majorer les valeurs de R_n pour obtenir des distances de propagation proches des observations, inversement sur des propagations courtes, R_n doit être légèrement minoré

- la vitesse maximale est généralement sur estimée alors que la vitesse moyenne est légèrement sous estimée. Ce constat découle des ajustements statistiques choisis
- R_t est un coefficient dont l'influence est réduite, c'est un paramètre permettant de simuler l'impact du couvert forestier (diminution des valeurs avec l'augmentation de la végétation)

Les tests sur des sols mous de type surface d'altération, terre végétal, montre qu'il est nécessaire de réduire la valeur de R_n par rapport aux préconisations de la notice, il peut être nécessaire d'entrer une valeur de 0.05 (la notice donne une valeur de 0.1 à 0.2 pour des sols mous).

Les tests montrent que dans le cadre d'une analyse en énergie et vitesse, il est plus approprié de rechercher un calage sur des distances de propagation, puis d'ajuster les paramètres R_n et R_t et d'apprécier sur le point d'analyse leur impact sur les vitesses et énergie, ce qui permet de créer un échantillonnage plus important pour les approches statistiques. De cette manière

Les vitesses de départ verticales et horizontales : ce paramètre est important.. Si on connaît exactement les coordonnées de départ des blocs, les vitesses par défaut proposées par le logiciel sont $V_v = 0.3 \text{ m/s} = V_h$. La morphologie et la pente de la zone de départ doivent aussi être prises en considération pour estimer les vitesses initiales. Dans une falaise presque verticale la vitesse verticale aura une importance plus forte que la vitesse horizontale. Si les zones de départ des blocs ne sont pas connues avec précision, où s'il s'agit d'une zone d'instabilité diffuse, la vitesse maximale verticale peut être déterminée de la façon suivante :

Par application du principe de conservation d'énergie on considère que la vitesse maximale au pied de la falaise est $V = \sqrt{2g h}$

En conclusion, CRSP a été utilisé pour des études de zonage des études de positionnement de parade, à des niveaux sommaires (en appui au dire d'expert) et à des niveaux développés (construction fine d'un modèle). La construction du modèle (couple profil topographique et paramètres d'entrée) découle bien d'une réflexion et d'une appréciation à la fois naturaliste et mathématicienne, il convient donc bien de garder à l'esprit que tous ces modèles sont sensibles à l'utilisateur.

Note : la prise en compte du couvert forestier est possible par l'ajustement du coefficient R_t . Nous tenons à signaler dès à présent que dans son approche terrain le RTM intègre des observations forestière. Les trajectoires de calage du modèle seront aussi étudiées car si la forêt a eu un rôle et si le modèle est calé sur celle-ci, cela signifie qu'il prend en compte l'effet de la forêt.

4. METHODOLOGIE RTM

4.1. Développement RTM

Le RTM a amélioré l'ergonomie du logiciel CRSP. Un « chapeau » sous Excell favorise la saisie des données et donc la multiplication des simulations. Celui-ci permet l'exploitation de la caractéristique de temps de calcul court, car il optimise la réalisation de nombreuses trajectographies et donc un paramétrage important (modification des paramètres pour apprécier la sensibilité du modèle).

La méthodologie RTM exploite donc au maximum l'outil excell pour pallier à l'absence de fragmentation, plusieurs simulations avec plusieurs tailles de bloc et avec plusieurs conditions d'énergie initiale permettent de générer un échantillonnage important de propagation possible.

4.2. Méthodologie générale

La méthodologie RTM sur la base de ce constat s'appuie sur une méthode de simulation sur plusieurs étapes. Etant bien entendu que le volume du bloc, la densité des blocs et les zones de départ sont des données d'entrée. Les étapes du calcul CRSP sont :

0- acquisition de terrain - Voir 4.2

1- choix des profils de référence. CRSP est un modèle 2D qui implique le choix de profil de calcul

2- un calage des paramètres R_n , R_t et S par retro analyse des distances de propagation observées sur site ou bien suspectées,

3- dans le cadre du dimensionnement d'ouvrage, le calage du paramètre énergie et rebond par "tunning" (c'est à dire en modifiant sensiblement les paramètres R_n , R_t et S ce qui permet de moyenner les résultats qui sont alors jugés bons.

4- une validation des paramètres par un deuxième regard. CRSP est sensible à l'utilisateur. Les paramètres d'entrée étant simple l'appréciation de l'utilisateur pour les hypothèses de départ est dominante. Ainsi est organisé en interne un second regard systématique.

Comme vu dans les phases de test l'étape du choix du profil de référence va commander tous les résultats. Un des intérêts du modèle CRSP est qu'il converge

rapidement et que les temps de calcul sont courts, on réalisera donc plusieurs profils afin de préciser les plus négatifs sur lequel le modèle sera affiné.

Cette méthodologie conduit à être transparent sur les paramètres d'entrée qui sont à chaque fois rendus avec l'étude. En annexe sont joints les fichiers Excel définissant la topographie et les coefficients descriptifs (r_n , r_t et S), la carte des observations terrain et les levés terrains si nécessaire.

4.3. Acquisition de terrain

Il est ici fait la distinction entre 3 situations :

- Utilisation de CRSP en interne pour appuyer l'avis d'expert. Dans sa démarche d'expert le RTM peut choisir d'appuyer ses réflexions sur des calculs trajectographiques avec des données d'entrée qu'il choisira par défaut sans forcément d'analyse terrain. Il peut être intéressant de confronter les appréciations d'expert aux résultats de calcul physique. Dans ce cas et uniquement dans ce cas, le RTM ne présentera pas de compte rendu de lever de terrain, les résultats de la trajectographie pourront être donnés pour information.
- Utilisation de CRSP en première approche de risque.
- Utilisation de CRSP dans le cadre d'une commande spécifique de résultats de calcul trajectographique.

Dans les 2 dernières situations l'approche de terrain est primordiale. Elle conduit en fonction du niveau d'expertise attendu à un compte rendu plus ou moins détaillé, qui est inclus dans le rapport RTM. Dans le cadre d'étude avec une demande spécifique de calcul trajectographique, il est annexé une carte (1/25 000 agrandi) de localisation des points d'observation pour le calage du modèle, à chaque point correspond un descriptif et les implications en terme de calcul trajectographique (nature des sols, couvert forestier, singularité topographique). L'objectif de cette fiche est de permettre une analyse critique post étude.

Annexe 2



Fiche de renseignement d'un événement concernant une commune Service Départemental de l'Isère

(2/11/2010)

1

Code risque : P	Date de l'événement : 28 déc 2008
Commune (s) : SAINT-PAUL-DE-VARCES	Site(s) : Rochers de la Bourgeoise
Autres communes :	
Evt valide : <input type="checkbox"/> Evt diffusable : <input type="checkbox"/>	CatNat : expertise RTM : <input type="checkbox"/> Reconnaissance CatNat : <input type="checkbox"/>
N° de classement : 3843600034	

Caractéristiques du phénomène

Durée du phénomène	Brutale (écroulement en masse d'un dièdre rocheux)
Commentaires sur la durée	
Nature du phénomène	Eboulement (volume total > 500 m ³) issu d'un affleurement de calcaires du Fontanil (pendage amont). Parcours avec un stockage au 1er impact, parcours dans une combe, un virage et éparpillement sur les pentes douces aval avec 4 blocs de 50 m ³ environ et 1 de 80 m ³ .
Causes du phénomène	Inconnue (pas de conditions météo défavorables/favorables au déclenchement d'un tel phénomène)

Zone de départ

Localisation	650 m (forêt domaniale du Gerbier) - Plantin
Description	Affleurement de calcaires du Fontanil

Zone d'arrivée

Localisation	Environ 390 m
Description	4 x 50 m ³ + 1 x 80 m ³ éparpillés (éventail de trajectoire) avec impacts dans sol

Impacts du phénomène

Commune (lieu-dit)	Victimes	Dégâts	Perturb	Commentaires
SAINTE-PAUL-DE-VARCES (Chabertière et Gauthier (?))	N	O	N	--DEGATS-- Dégâts sur boisements et impacts sur vignes. 1 petit cabanon détruit.

Commentaires

Boisements de robiniers peu âgés (20-30 ans). A priori, les arbres n'ont eu aucun rôle significatif dans l'arrêt des gros blocs.
Aucun suivi particulier.
Petites répliques d'éboulements possibles mais avec des volumes faibles.
Photos à prendre depuis le relais du Rocher de la Bourgeoise.

Documentation

Références	K:\Communtend\rtm\38\photos 2008\Yannick Robert\chutes de blocs St Paul-de-Varces 12-2008	
Source	Date	Document
RTM38	31/12/2008	Fiche-événement

V Présentation de l'étude trajectographique réalisée par le bureau d'étude SAGE

1 - INTRODUCTION

Cette étude trajectographique a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche 2009 financé par le Pôle Grenoblois Risques Naturels. Le projet est piloté par l'Unité de Recherche Dynamique des Ecosystèmes Montagnards du Cemagref de Grenoble, en collaboration avec les services du RTM de l'Isère et de la Savoie.

Ce projet de recherche a pour objectifs de comparer des résultats de zonage obtenus avec différents outils de simulations trajectographiques et différentes matrices d'aléa en utilisant l'événement du 28 décembre 2008 survenu à St Paul de Varcès au droit des Rochers de la Bourgeoise, lieu-dit Plantin. Lors de cet événement qui a mis en jeu plusieurs centaines de mètres cubes de matériaux rocheux, 5 blocs calcaires de forme cubiques de 1.5 à 37 m³ ont atteint les prés cultivés entre les altitudes 410 et 430 mètres, sans provoquer de dégâts importants. Cet événement a fait l'objet de plusieurs interventions de la part du RTM38.

Dans le cadre de cette étude de zonage, les calculs trajectographiques ont été réalisés à l'aide du code de calcul ADRGT élaboré en 1976, version 2004.

Cinq profils trajectographiques différents ont été utilisés pour les calculs :

- un relevé terrestre établi le 28/10/2010 par l'ADRGT à l'aide d'une chaîne d'arpenteur et d'un clisimètre (profil localisé sur la figure n°1). De manière à se placer dans des conditions initiales avant éboulement, le profil a été relevé en relevant uniquement des points sur l'ancien terrain naturel désormais recouvert par les matériaux issus de l'éboulement. La hauteur totale de falaise sommitale a été estimée à 45 mètres.
- un profil trajectographique a été dressé par l'ADRGT sur la base de la carte au 1/25000ème de l'IGN. La hauteur de falaise considérée pour ce profil est de 45 mètres.
- trois profils trajectographiques n°1 à 3 type ont été fournis par le Cemagref. Compte tenu du nombre très important de points par profils (700 à 800 points), ces profils ont été simplifiés pour une meilleure optimisation des temps de calculs (45 à 50 points par profil de calcul). La hauteur de chute au départ varie entre 39 et 42 mètres.

Documents consultés :

- Fiche événements du 31/12/2008 et avis RTM du 9/03/2009,
- Missions photographiques IRMA Janvier 2009 et RTM prises en décembre 2008, février et mars 2009,

2 - GENERALITE SUR LA METHODE DE CALCULS ADRGT

Le code de calculs ADRGT est fondé sur une approche de type probabiliste et se caractérise actuellement par un calcul en deux dimensions. Ce logiciel tient compte du fait que dans la nature, il n'est pas réaliste d'avoir une approche déterministe, vue les innombrables possibilités de trajectoires et de variations des caractéristiques du terrain.

Pour une zone de départ fixée et un volume au départ compris dans une fourchette de valeurs d'après les observations de terrain, le calcul consiste en une série de simulations de chutes de blocs laquelle est exploitée par une méthode probabiliste. Le logiciel prend en compte le mécanisme de fractionnement des blocs en cours de propagation.

L'originalité de la méthode repose sur l'introduction d'un certain nombre de coefficients aléatoires sur la pente locale du versant au niveau point d'impact, les coefficients caractérisant les sols et la végétation, et les réductions des vitesses normales et tangentielles lors des rebonds. Ce jeu de coefficients aléatoires permet une infinité de trajectoires ce qui correspond bien à une approche pseudo-tridimensionnelle.

Pour s'approcher le plus possible de la réalité et définir objectivement des zones exposées :

- zones très exposées ($p > 10^{-2}$)
- zones exposées $10^{-4} < p < 10^{-2}$
- zones moyennement à faiblement exposées $10^{-6} < p < 10^{-4}$
- zones très peu exposées $p < 10^{-6}$

Les calculs sont réalisés en simulant un grand nombre de trajectoires (au moins 1 million de blocs au départ pour approcher la limite 10^{-6}).

Ces calculs ne prennent pas en compte les événements de types exceptionnels (sol gelé, séisme de grande ampleur, éboulement en masse, modification des conditions initiales due au déboisement...), les calculs sont effectués pour des chutes de blocs isolés.

Les hypothèses de départ sont tirées d'après les observations de terrain. Dans le cadre de cette étude, seuls des calculs de propagation ont été réalisés. Sur chaque profil de calcul, on donne :

- une figure avec la topographie du profil et quelques trajectoires calculées.
- un tableau «Données du profil» rappelant les hypothèses de départ et les

- principales caractéristiques du profil avec les coordonnées des points du profil, la
- nature des sols et de la végétation.
- Les éléments nécessaires pour l'établissement d'un zonage du risque :
 - pour chaque profil, on fixe une valeur limite d'abscisse (X_{lim}) au niveau de laquelle on fixe un nombre N (maximum 7000) de blocs qui devront l'atteindre ou la dépasser. Le nombre N_0 de blocs au départ peut atteindre 2×10^9 .
 - on étudie ensuite la répartition statistique des points d'arrêt des N blocs qu'ont atteint ou dépassé X_{lim} . On en tire des valeurs de probabilités d'atteinte associées à des abscisses X lesquelles sont représentées dans un graphe probabilité d'atteinte / $X_{arrêt}$. On établit 4 classes de zones exposées aux chutes de blocs selon les probabilités d'atteintes $p > 10^{-2}$, $10^{-4} < p < 10^{-2}$, $10^{-6} < p < 10^{-4}$ et $p < 10^{-6}$. Ces probabilités p sont issues des histogrammes des valeurs X_{arr} pour les N blocs dépassant X_{lim} , en tenant compte du nombre N_0 de blocs au départ. Le choix de X_{lim} est fortement lié aux particularités topographiques du versant et il est également conditionné par la répartition des points d'arrêt des blocs. En général X_{lim} est choisi pour correspondre au début d'une section suffisamment régulière pour permettre les extrapolations de probabilité, et suffisamment grand pour atteindre $p \sim 10^{-6}$ (plusieurs calculs sont souvent nécessaires).
- une statistique sur les poids des blocs à l'arrivée (pour $X \geq X_{lim}$).
- un tableau des valeurs moyenne et maximale des hauteurs de passage, vitesses, énergies des blocs et le nombre de blocs en chaque point du profil (résultats au passage des points par profil). De plus, au point $X = X_{lim}$, on dispose d'une statistique complète sur les valeurs précédentes.

3 - MODELISATIONS TRAJECTOGRAPHIQUES

3.1 Hypothèses de calcul

Les calculs ont été menés en considérant les hypothèses suivantes :

- blocs cubiques de 1 à 30 m³,
- départ en sommet de falaise,

Les calculs prennent en compte des terrains de type roche tendre (marno-calcaires) pour les sections de falaise, éboulis meuble pour l'ensemble du versant et sol herbeux pour les prés en pied de pente.

Les calculs ont été menés avec et sans végétation. La forêt en présence constitue une protection naturelle qui peut être considérée dans les calculs.

Le diamètre et l'espacement des arbres placent cette forêt dans les calculs sous le type de «buisson moyen», le RTM parle d'un boisement de robiniers peu âgés (20-30 ans).

3.2 Résultats des calculs

Après échange avec le Cemagref, il s'avère que les données LIDAR présentent un décalage constant de 60m d'altitude par rapport aux altitudes données par de IGN (LIDAR = IGN + 60 m). Compte-tenu de cet écart lié à des problèmes de conversion de coordonnées géographiques, les résultats des calculs seront analysés uniquement suivant les abscisses d'arrêt des blocs.

Les résultats synthétiques de l'ensemble des 10 calculs sont donnés en ANNEXE 1, les résultats détaillés sont donnés en ANNEXE 2.

En annexe1, pour chaque calcul, un graphique des résultats a été élaboré sur lequel on visualise directement les principaux résultats en termes de probabilité d'atteinte et d'énergie moyenne des blocs sur le profil de calcul. Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau de synthèse donné ci-dessous.

		profil SAGE relevé sur le terrain	profil SAGE relevé sur le terrain	profil SAGE relevé sur l'IGN	profil SAGE relevé sur l'IGN	profil LIDAR 1	profil LIDAR 1	profil LIDAR 2	profil LIDAR 2	profil LIDAR 3	profil LIDAR 3
Nbre de simulations		1 460 876	1 177 428	1 415 253	1 398 427	1 527 190	3 230 337	972 689	1 729 959	1 658 458	2 961 235
prise en compte de la végétation		NON	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	OUI
abscisse probabilité d'atteinte	$\times 10^{-2}$	335	291	335	294	348	295	342	270	330	290
	$\times 10^{-4}$	412	367	417	364	426	387	416	366	395	359
	$\times 10^{-6}$	435	392	449	388	440	406	438	395	413	374
abscisse énergie moyenne en kJ	$\times E = 300 \text{ kJ}$	300	272	300	282	308	255	305	248	294	254
	$\times E = 30 \text{ kJ}$	415	356	416	372	418	380	416	370	390	360

3.3 Synthèse des calculs trajectographiques

Les calculs ont été réalisés en considérant la végétation actuelle qui tapisse le pied de versant comme pérenne. Or, ce couvert végétal désormais bien fragilisé peut être amené à disparaître totalement (nouvel éboulement, sécheresse, incendie...), les conditions de propagation des blocs dans le versant peuvent donc évoluer dans le temps. Par comparaison des calculs réalisés « avec » et « sans végétation », on constate qu'en cas de disparition de la forêt en pied de versant, la limite de la zone très exposée devrait progresser de 50 mètres en moyenne vers l'aval (l'effet protecteur de la forêt disparaît).

Si on analyse les résultats de calculs menés sans prise en compte de la végétation (hypothèse sécuritaire justifiée dans le cadre d'un zonage vis-à-vis de phénomène d'éboulement), on peut faire les principales observations suivantes :

1. les limites de zonage 10^{-2} , 10^{-4} et 10^{-6} obtenues sur les 3 profils proches « terrain », « IGN » et « P2 » s'avèrent très cohérentes entre elles. En effet, on note des résultats qui convergent fortement vers les abscisses suivantes :

		abscisse moyenne en mètres	écart type
abscisse probabilité d'atteinte	$\times 10^{-2}$	337,3	4,0
	$\times 10^{-4}$	415,0	2,6
	$\times 10^{-6}$	440,7	7,4
abscisse énergie moyenne en kJ	$\times E = 300 \text{ kJ}$	301,7	2,9
	$\times E = 30 \text{ kJ}$	415,7	0,6

Sur ces 3 profils, on peut d'ailleurs considérer que les abscisses 10^{-2} , 10^{-4} , Emoy 30 kJ et Emoy 300 kJ sont identiques.

2. De manière plus générale, on remarque que si on regarde les résultats sur l'ensemble des 5 profils de calcul réalisés sans prise en compte de la végétation, on obtient les valeurs suivantes :

		abscisse moyenne en mètres	écart type
abscisse probabilité d'atteinte	$\times 10^{-2}$	338,0	7,0
	$\times 10^{-4}$	413,2	11,4
	$\times 10^{-6}$	435,0	13,4

3. La limite 10^{-2} varie très peu d'un profil à l'autre, par contre, on constate des écarts plus importants vers le bas des profils. Ce léger effet de dispersion semble directement lié à la divergence des trajectoires qui s'observe dans les prés en pied de versant.

3.3 Proposition de zonage

Avant de proposer un zonage, il semble judicieux d'écarter les résultats du profil P3 pour la définition précise des limites 10^{-4} et 10^{-6} . En effet, ce profil présente une nette zone de replat entre les abscisses 360 et 410 mètres, zone de replat invisible sur le terrain (erreur sur le MNT ?) ce qui favorise l'arrêt naturel des blocs en fin de trajectoire, en faisant remonter les limites d'arrêt 10^{-4} et 10^{-6} d'une vingtaine de mètres plus en amont.

Après correction, nous proposons de retenir ces abscisses pour établir les limites d'un zonage ne prenant pas en compte la végétation :

		abscisse moyenne en mètres	écart type
abscisse probabilité d'atteinte	$\times 10^{-2}$	338	7,0
	$\times 10^{-4}$	418	5,9
	$\times 10^{-6}$	440,5	6,0
abscisse énergie moyenne en kJ	$\times E = 300 \text{ kJ}$	242,5	5,4
	$\times E = 30 \text{ kJ}$	411	1,3

Si on cherche à appliquer la grille de zonage CEMAGREF, on obtient le zonage suivant:

- X limite zone à risque élevé < 411
- 411< X Limite zone à risque modéré < 418
- Limite zone à risque faible > 418

3.4 Comparaison des données calculées avec les ponts d'arrêt extrêmes observés

On donne ci-après la position des abscisses des blocs qui se sont propagés le plus en aval dans les prés lors de l'événement du 28 décembre 2008. La numérotation des blocs correspond au marquage des blocs par le RTM :

	volume en m ³	abscisse d'arrêt en m le long du profil terrain	altitude d'arrêt en m
B1	5,5		411
B2	37		414
B3	3,8	383	421
B4	37	416	413
B5	1,7	350	429
B6	7,8		442
B7	6,6		453
B8	1,35		443

On rappelle ci-dessous les résultats des zonages obtenus avec et sans prise en compte de la végétation :

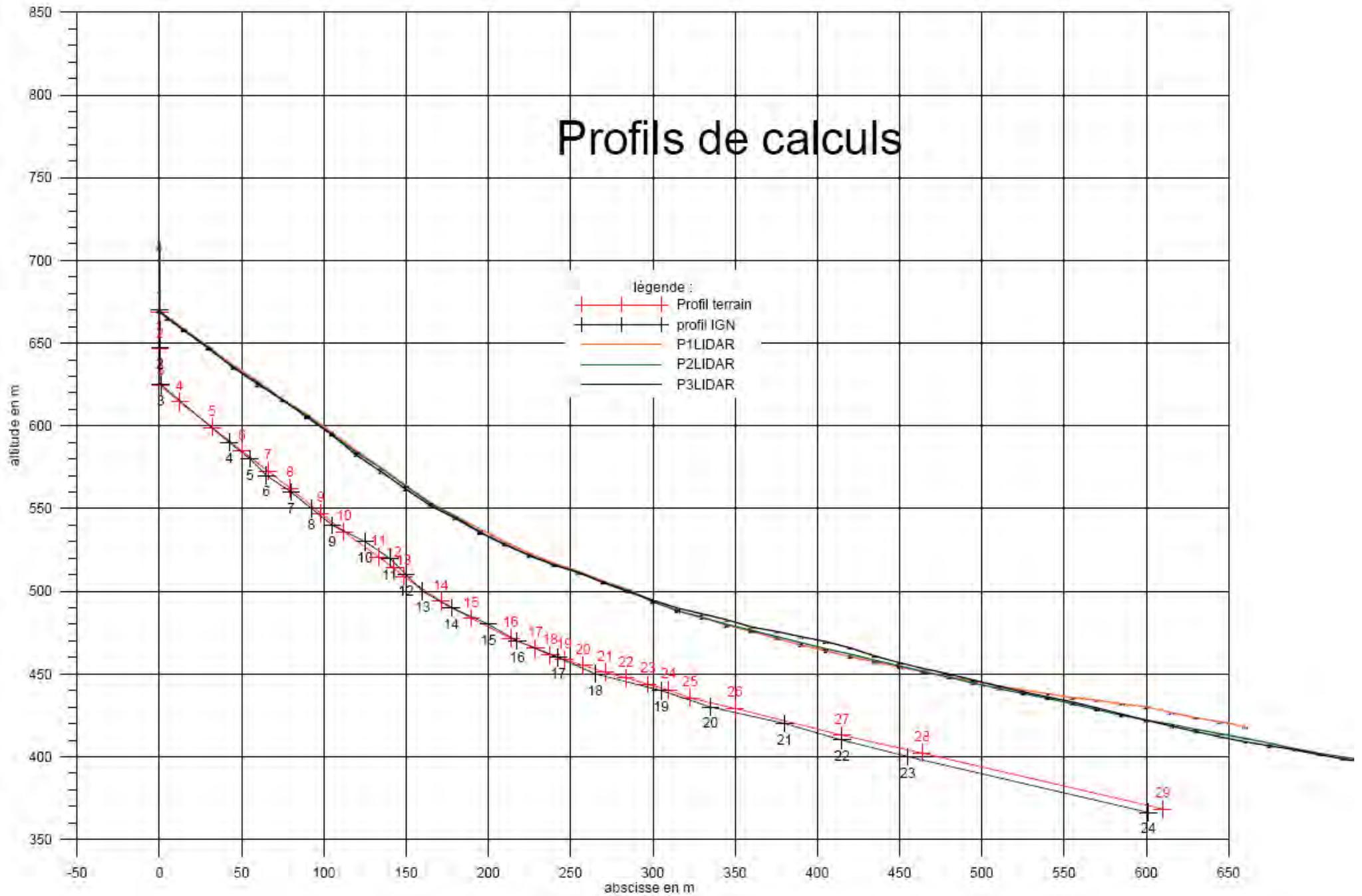
		abscisse moyenne en mètres avant éboulement	abscisse moyenne en mètres après éboulement
prise en compte de la végétation		OUI	NON
abscisse probabilité d'atteinte	x 10 ⁻²	288,0	338,0
	x 10 ⁻⁴	371,0	417,8
	x 10 ⁻⁶	395,3	440,5
abscisse energie moyenne en kJ	x E = 300 kJ	211,4	242,6
	x E = 30 kJ	367,6	411,0

D'après l'observation des trajectoires suivies par les blocs (photos IRMA), on peut penser que les blocs B1, B3, B4 et B5 se sont propagés le long de la même trajectoire en fin d'éboulement à la faveur d'une trouée ouverte dans la végétation.

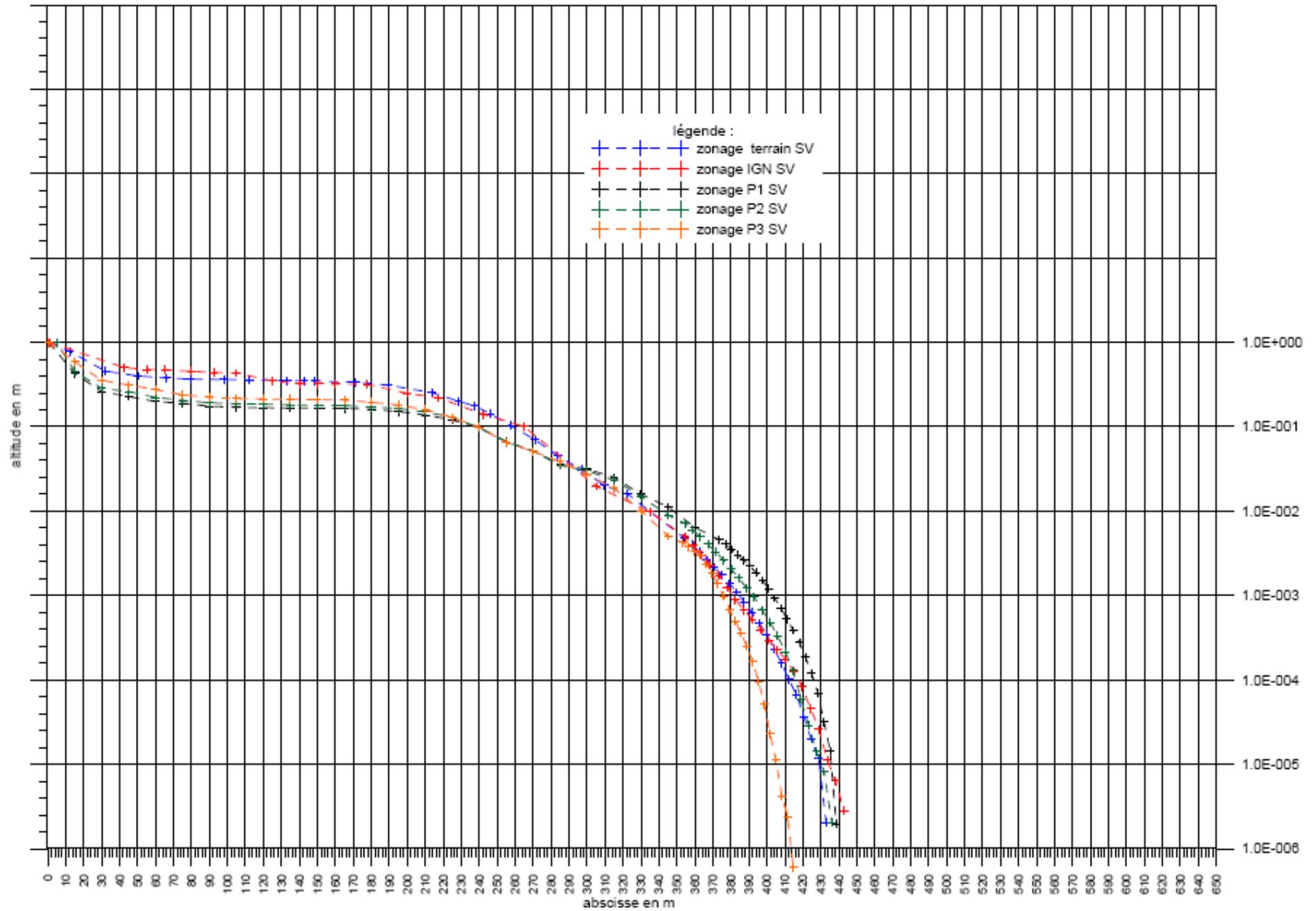
Sans prise en compte de la végétation détruite lors de l'éboulement, les abscisses d'arrêt des derniers blocs sont situées dans la zone moyennement exposée caractérisée par $10^{-4} < p < 10^{-2}$. La limite 10^{-6} calculée sur cette trajectoire se situe encore 24 mètres de distance plus en aval du bloc B1.

L'A.D.R.G.T. se tient à votre disposition pour tout renseignement complémentaire ou assistance technique relative à cette étude.

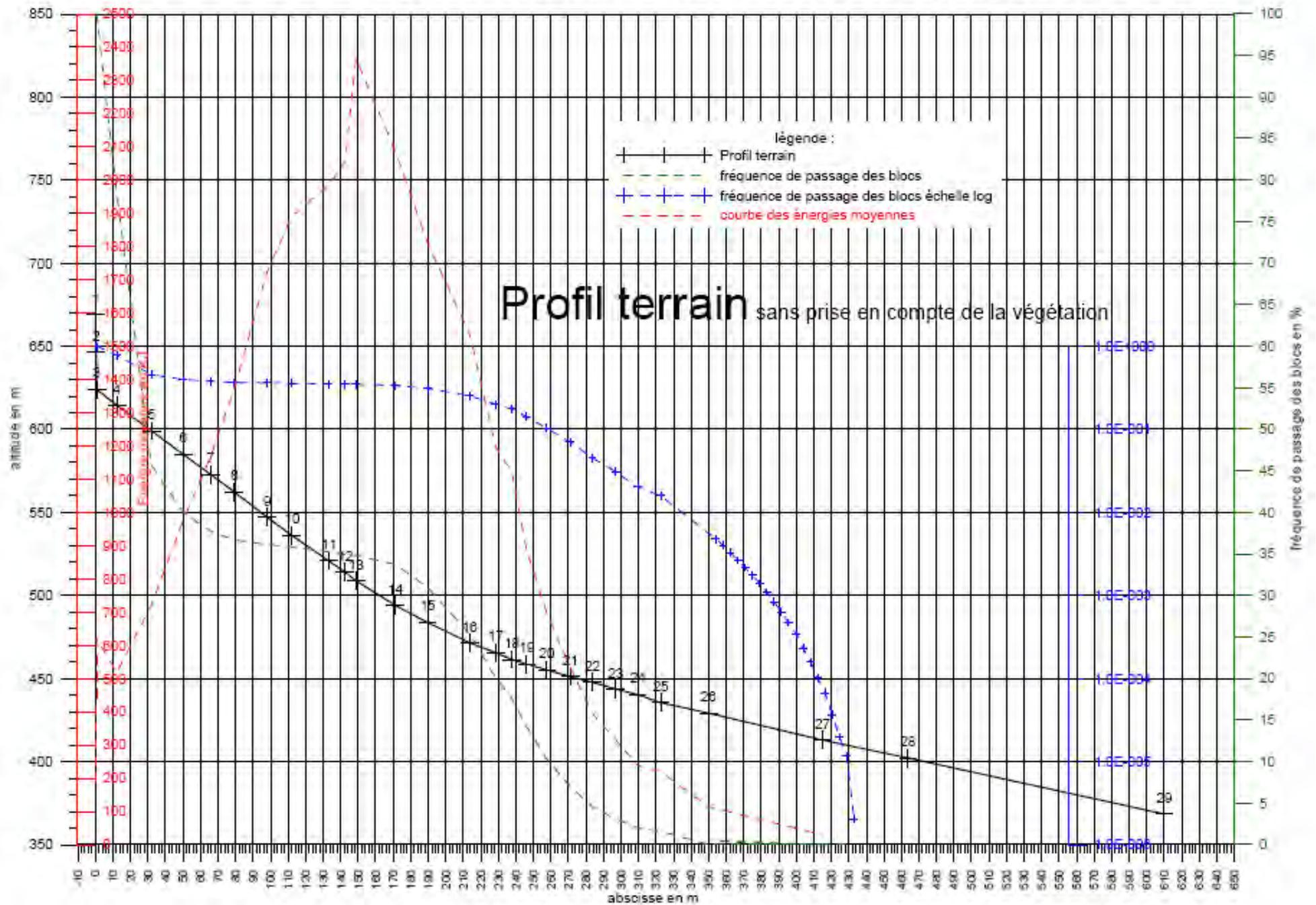
Profils de calculs



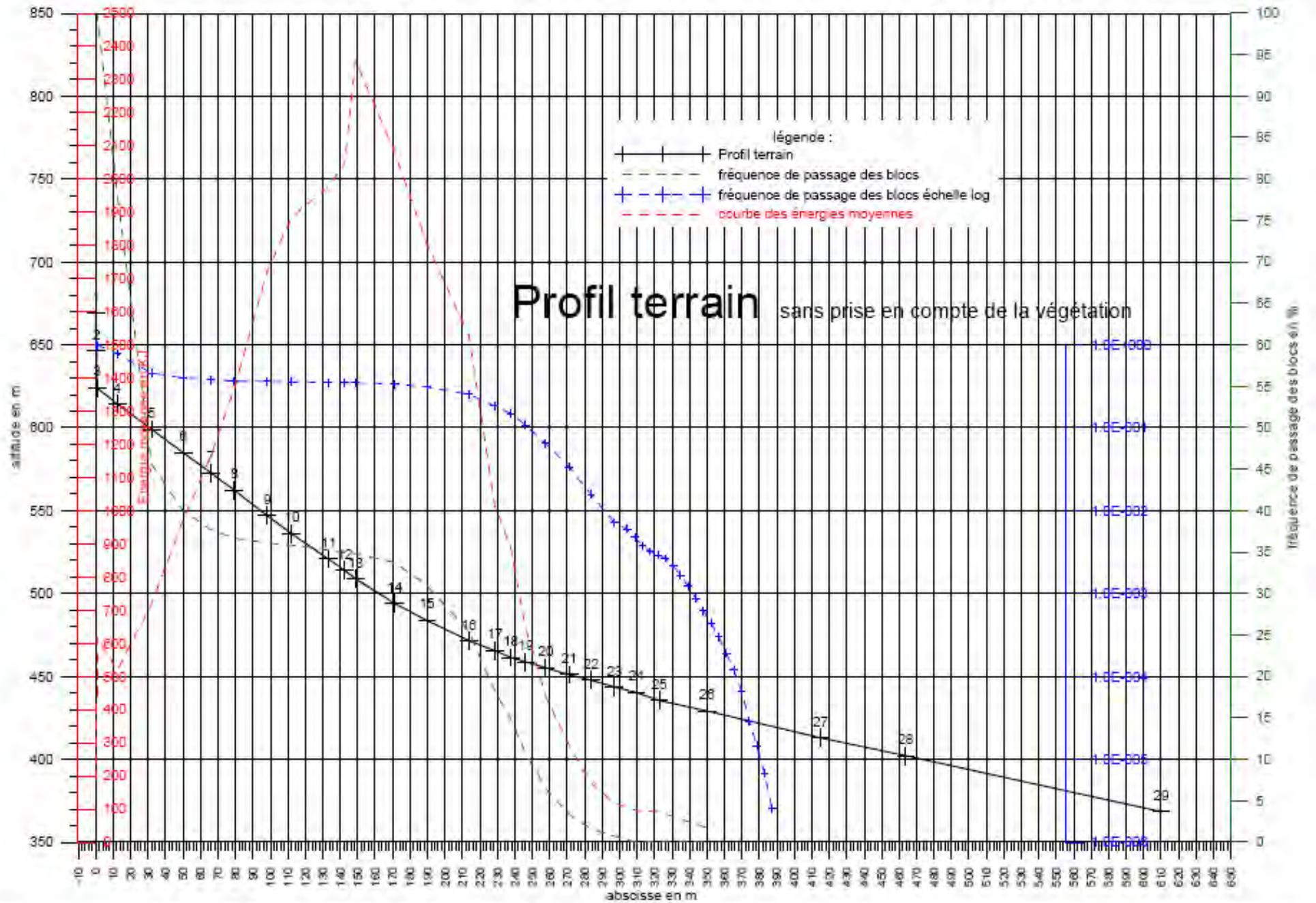
Synthèse des calculs trajectographiques

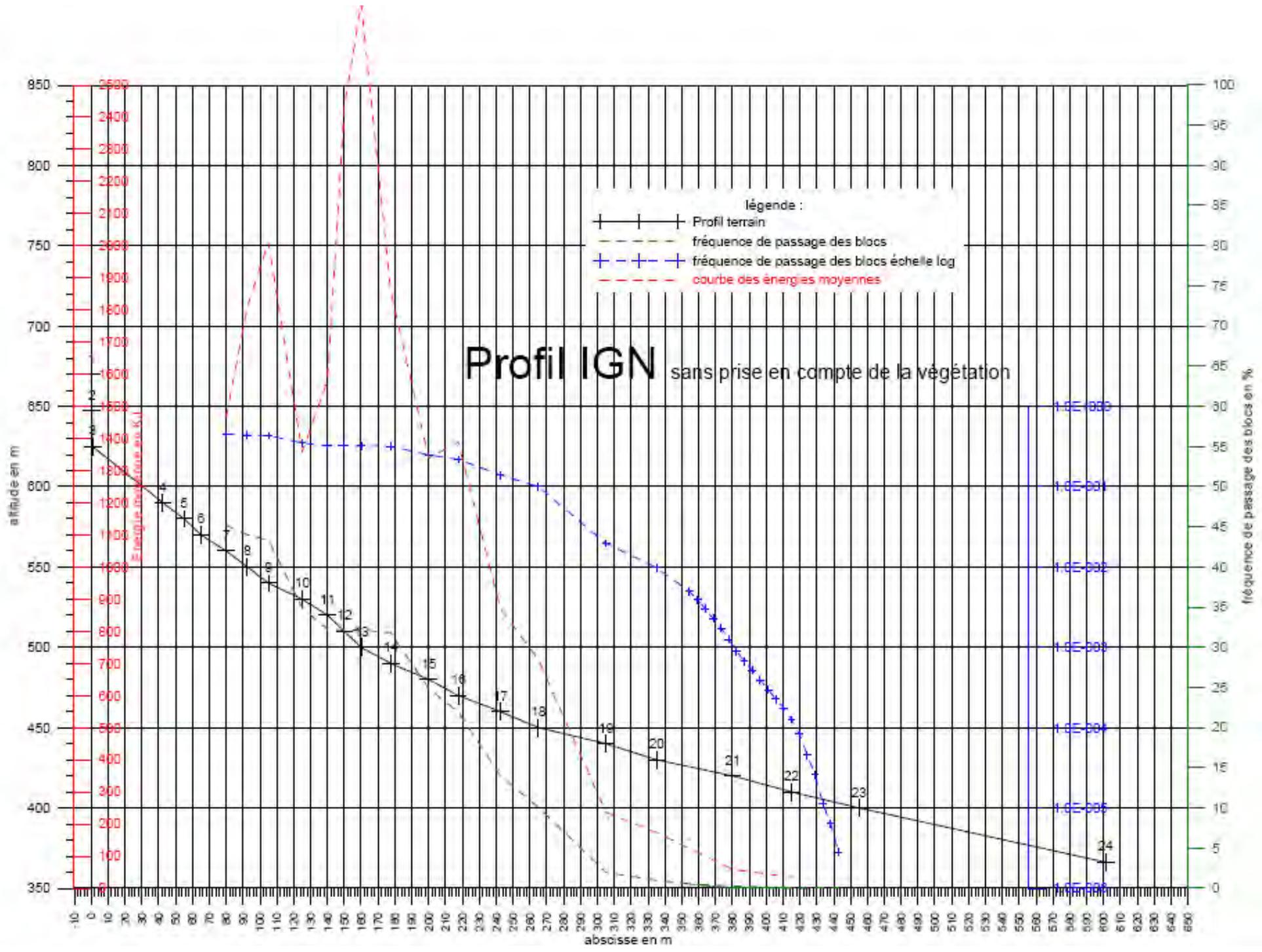


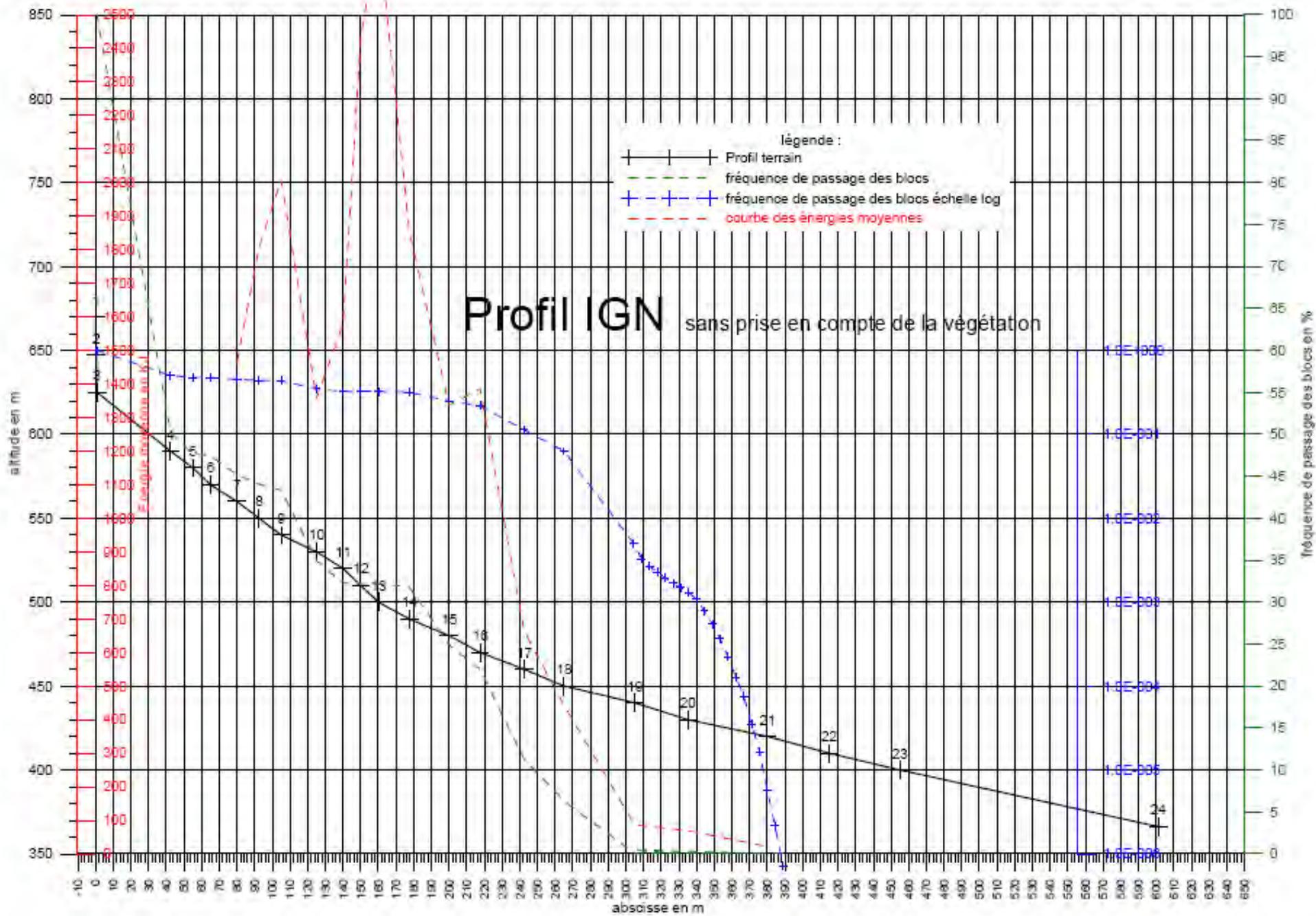
Représentation graphique des résultats des calculs trajectographiques



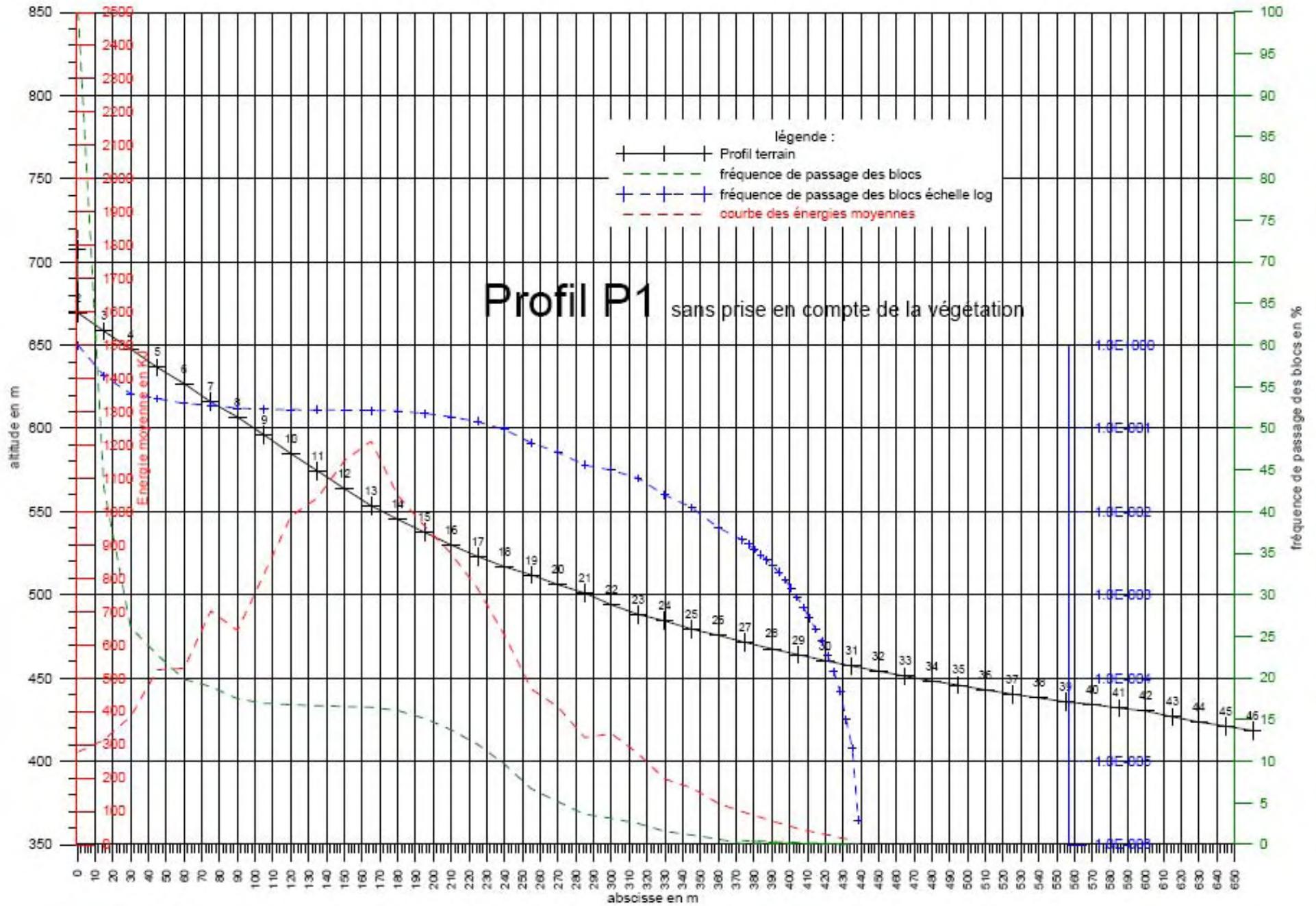
Représentation graphique des résultats des calculs trajectograpiques



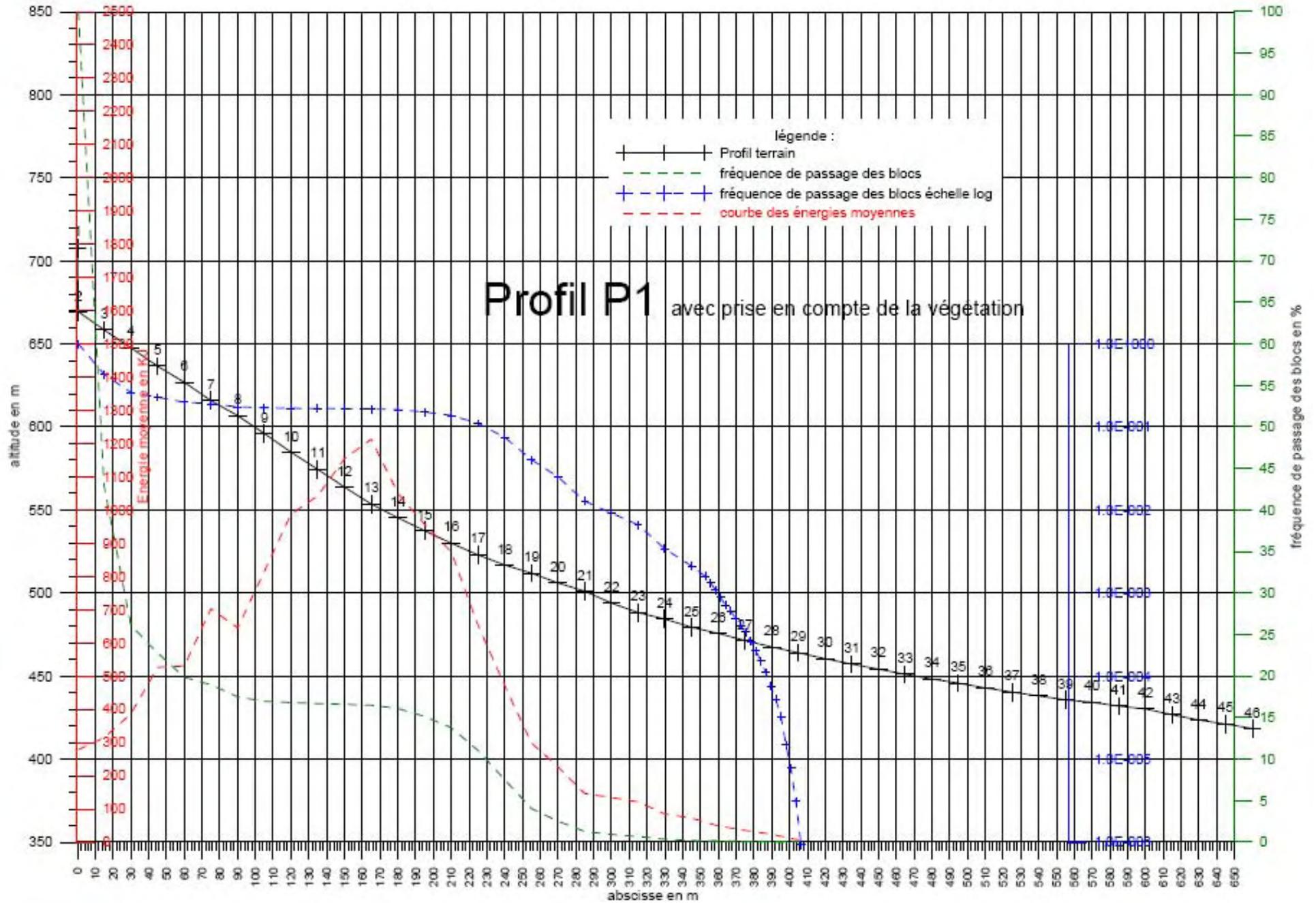


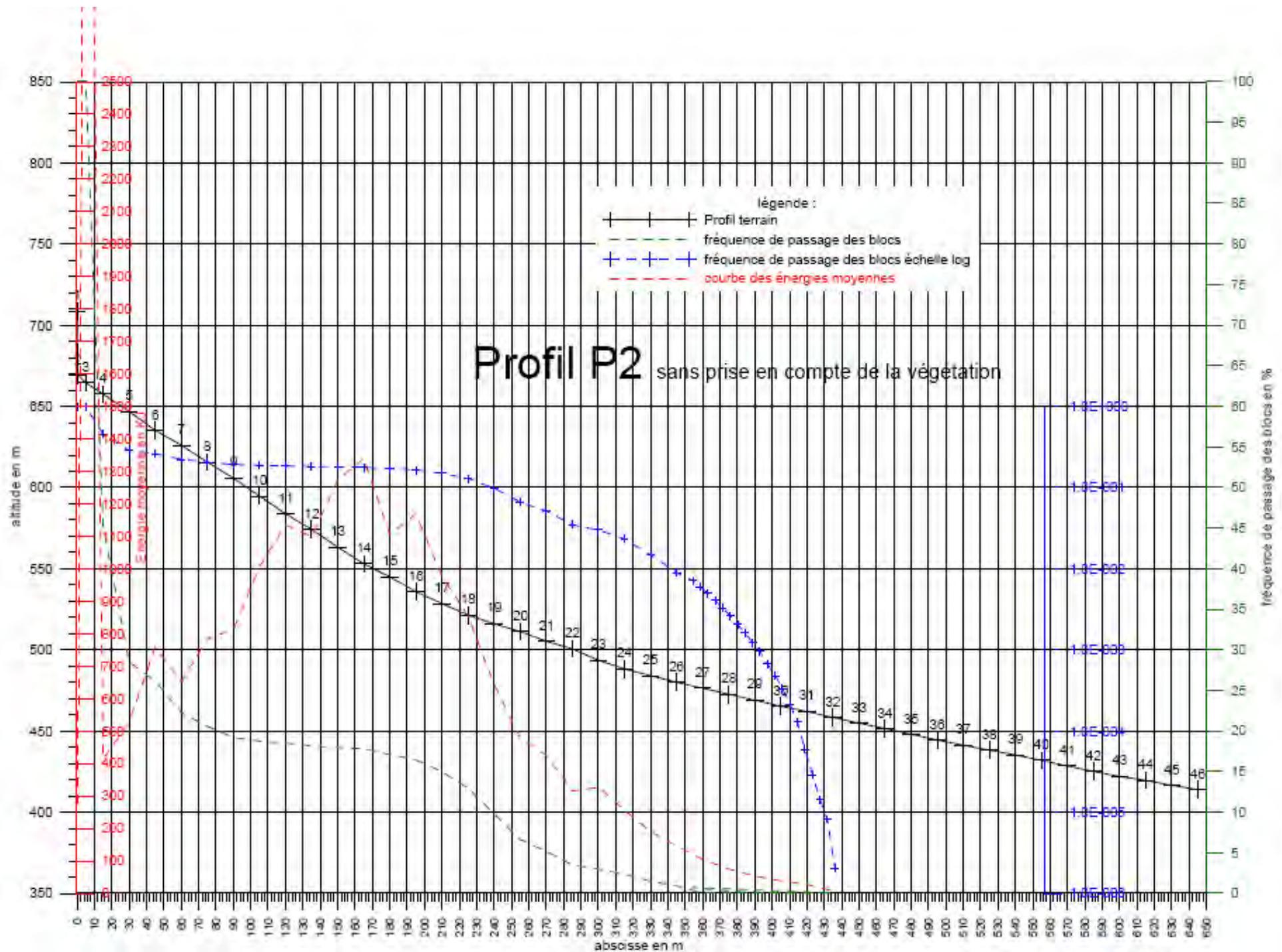


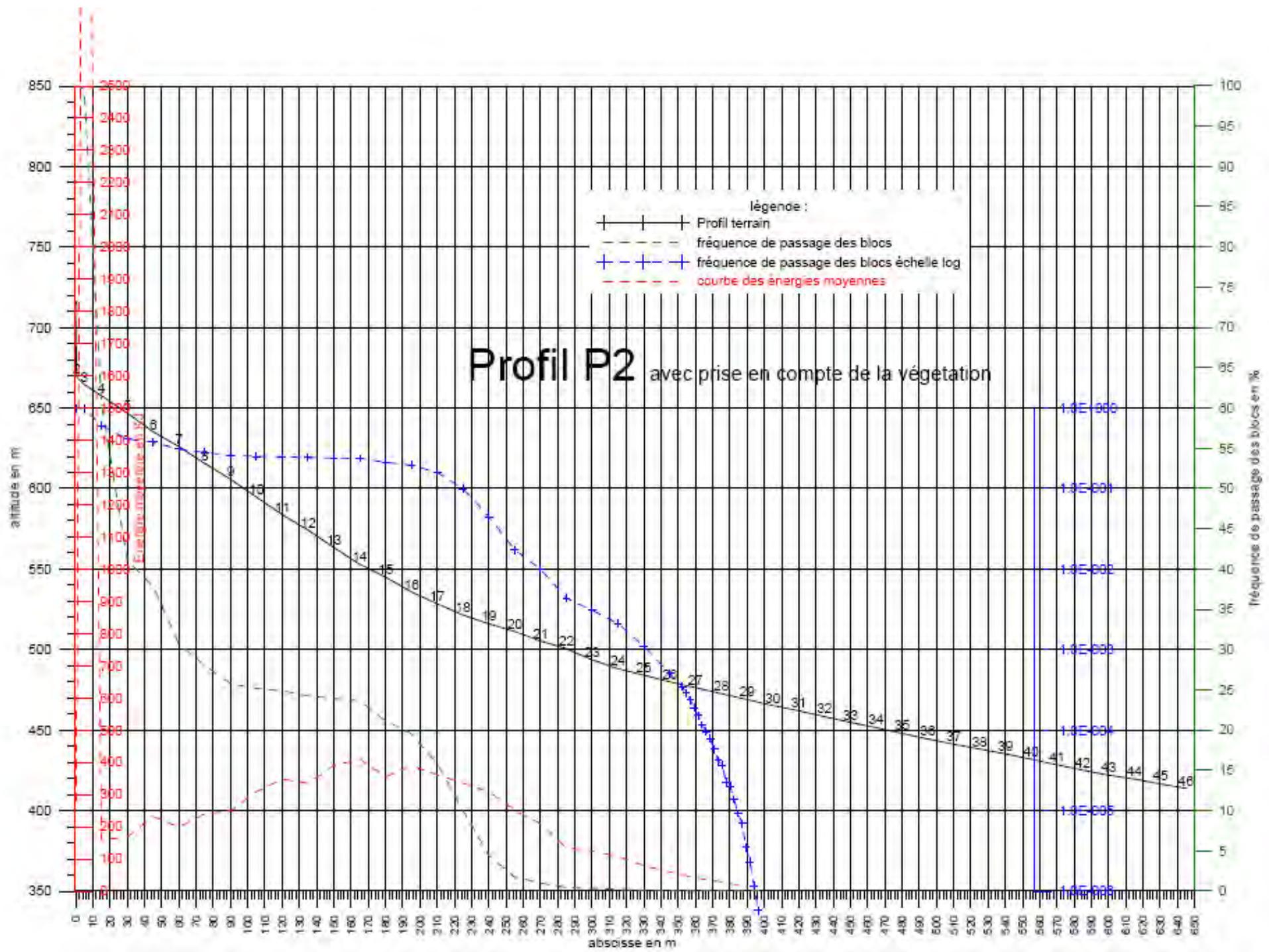
Représentation graphique des résultats des calculs trajectographiques



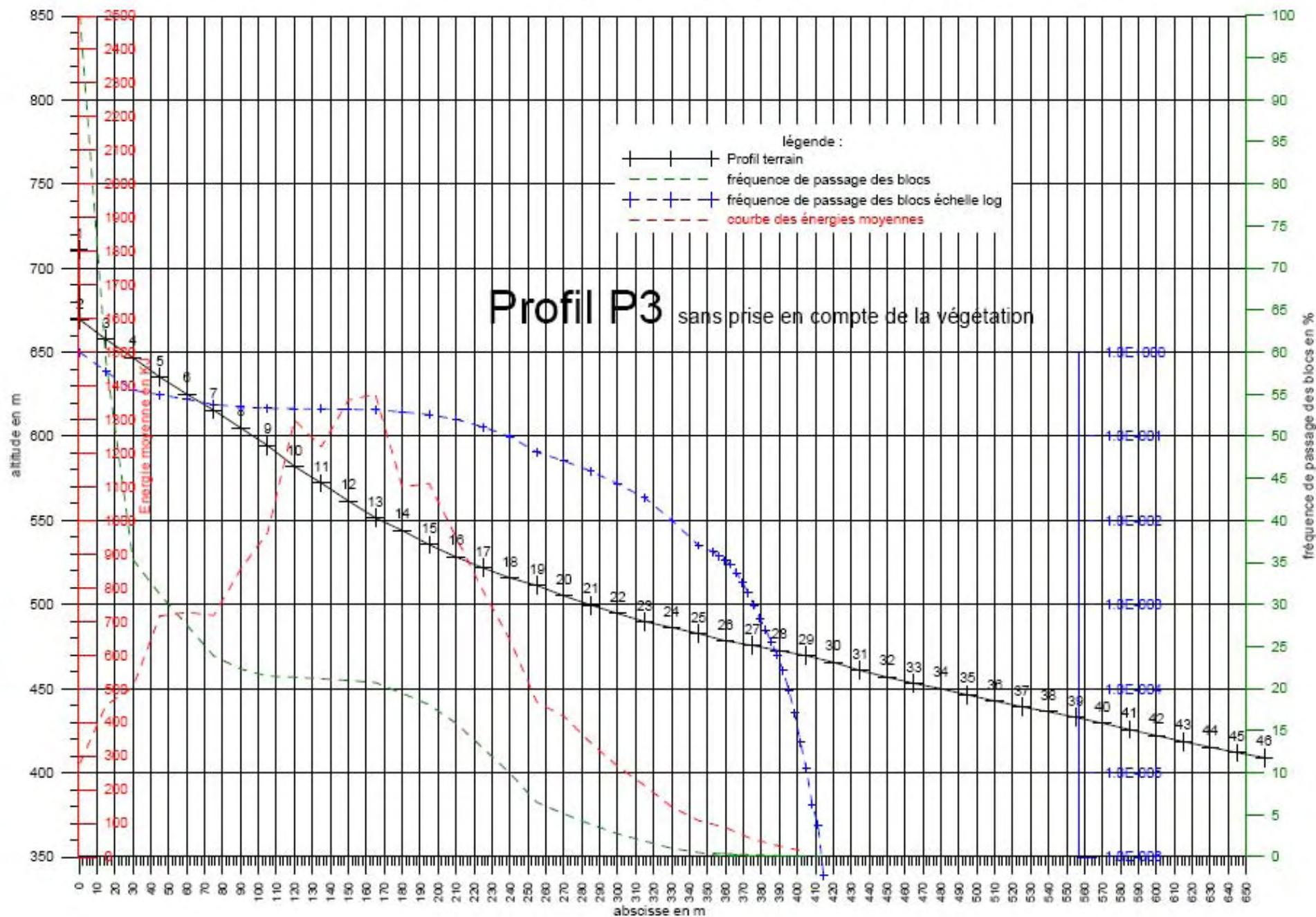
Représentation graphique des résultats des calculs trajectograpiques



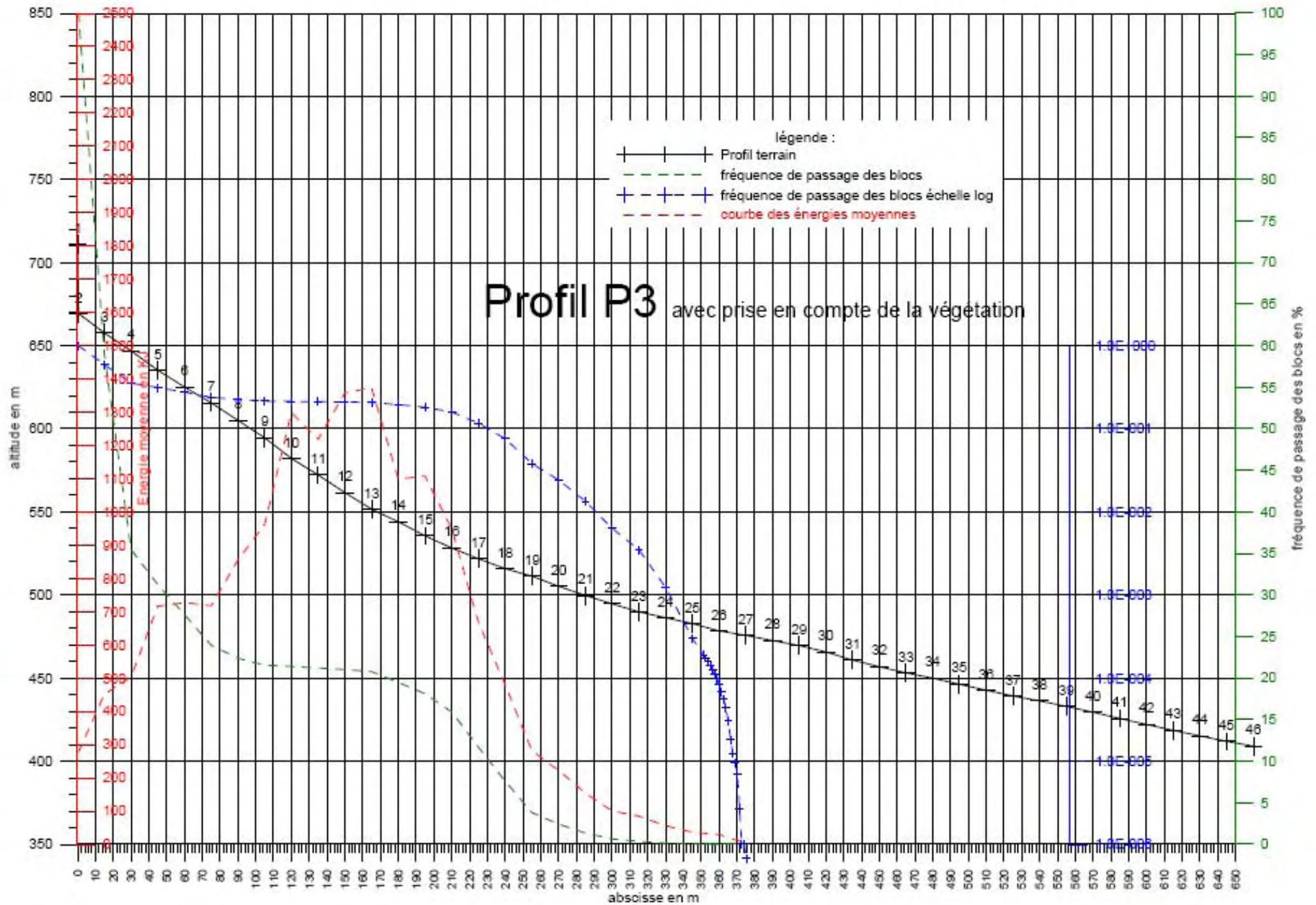




Représentation graphique des résultats des calculs trajectographiques



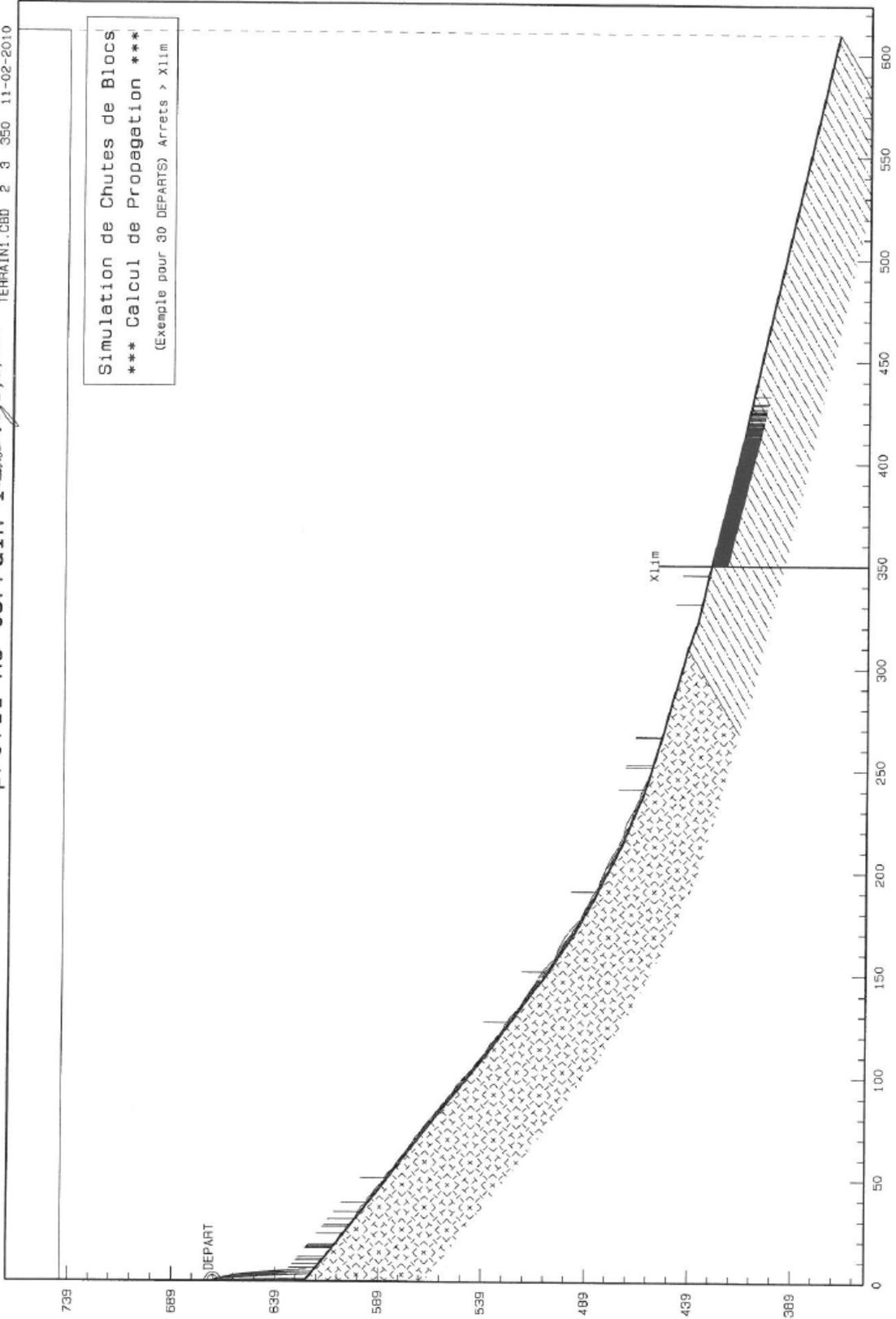
Représentation graphique des résultats des calculs trajectographiques



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

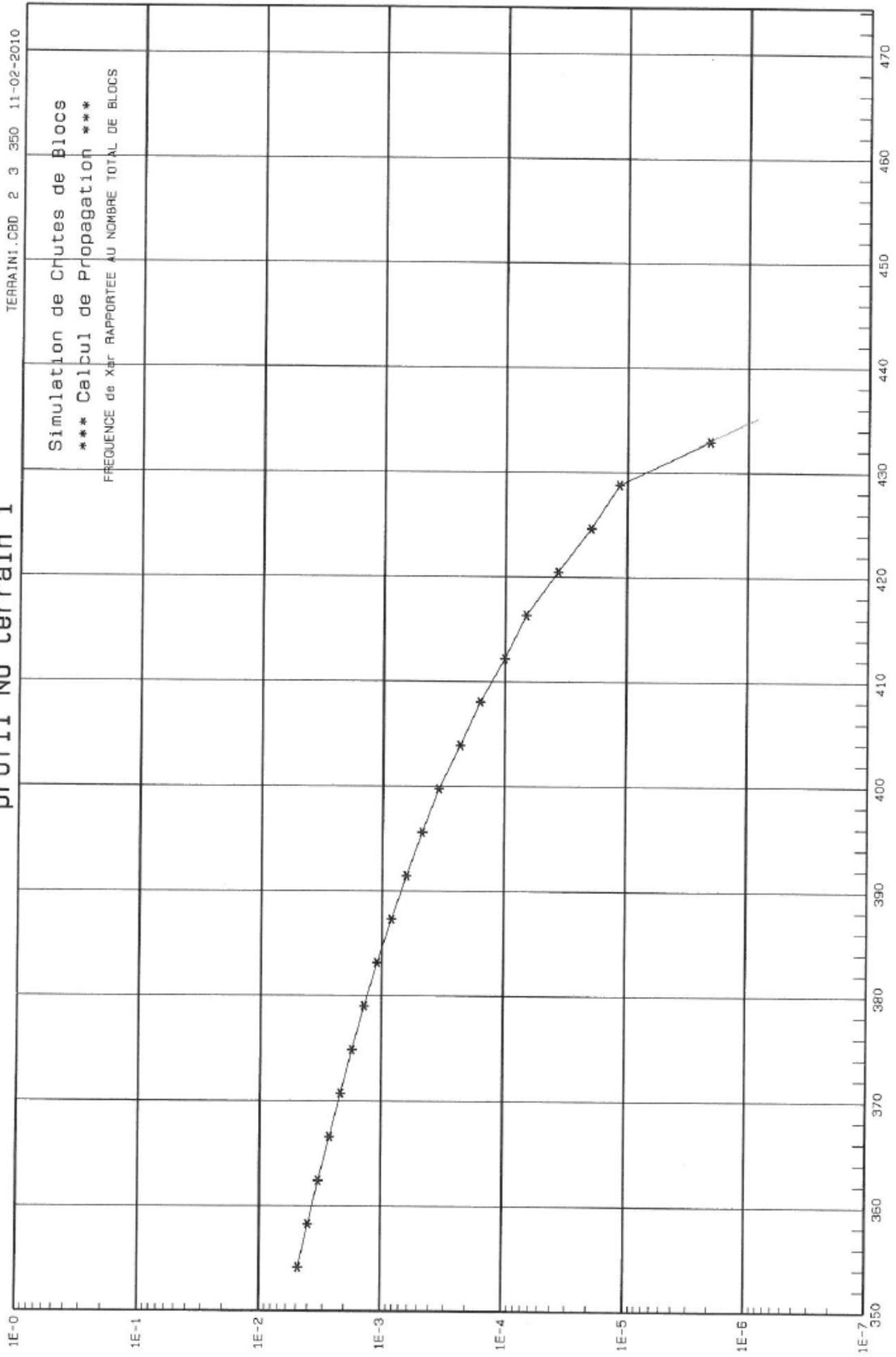
profil No terrain 1 *Sous végétation*

TERRAIN1.CBD 2 3 350 11-02-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No terrain 1



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 1

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 669.1
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1460876

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	669.1	89.0	RT	SV
2	0.4	22.5	646.6	89.0	RT	SV
3	0.8	45.0	624.1	40.0	EB	SV
4	12.3	54.6	614.5	38.0	EB	SV
5	32.0	70.0	599.1	38.0	EB	SV
6	50.1	84.2	584.9	37.5	EB	SV
7	66.0	96.4	572.7	38.0	EB	SV
8	79.4	106.8	562.3	39.0	EB	SV
9	98.0	121.9	547.2	38.0	EB	SV
10	112.2	133.0	536.1	36.0	EB	SV
11	133.2	148.3	520.8	36.0	EB	SV
12	142.5	155.1	514.0	40.0	EB	SV
13	148.7	160.2	508.9	33.5	EB	SV
14	171.2	175.1	494.0	29.0	EB	SV
15	189.5	185.3	483.8	27.0	EB	SV
16	213.6	197.5	471.6	22.0	EB	SV
17	228.4	203.5	465.6	24.0	EB	SV
18	237.6	207.6	461.5	18.0	EB	SV
19	246.1	210.4	458.7	17.0	EB	SV
20	257.6	213.9	455.2	17.0	EB	SV
21	271.0	218.0	451.1	15.0	EB	SV
22	283.6	221.3	447.8	17.0	EB	SV
23	296.9	225.4	443.7	15.0	EB	SV
24	309.5	228.8	440.3	20.0	SP	SV
25	322.7	233.6	435.5	13.0	SP	SV
26	349.9	239.9	429.2	14.0	SP	SV
27	414.9	256.1	413.0	12.5	SP	SV
28	463.8	266.9	402.2	13.0	SP	SV
29	609.9	300.7	368.4	13.0	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 1

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 1460876 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.4	1460876	24.2	23.7	593	189	75.0	38.7	4.0	3.1
3	0.8	1460876	46.2	44.6	2261	619	75.0	38.7	7.8	5.6
4	12.3	1143132	2.8	1.6	3759	518	75.0	34.1	11.8	5.6
5	32.0	666964	3.1	1.6	4878	721	75.0	27.8	14.7	7.3
6	50.1	584457	3.4	1.7	6085	975	75.0	26.6	17.3	8.7
7	66.0	550907	3.6	1.8	7920	1170	75.0	26.1	18.9	9.6
8	79.4	535746	4.1	1.8	8205	1375	75.0	25.9	20.6	10.4
9	98.0	527617	4.9	2.0	9898	1724	75.0	25.8	23.0	11.6
10	112.2	523374	5.3	2.0	10712	1891	75.0	25.7	23.8	12.2
11	133.2	514622	5.4	2.0	11329	1985	75.0	25.7	23.8	12.4
12	142.5	509843	5.4	2.0	12042	2054	75.0	25.7	24.9	12.6
13	148.7	508335	6.0	2.3	13072	2367	75.0	25.7	25.2	13.5
14	171.2	492741	5.5	2.0	12067	2088	75.0	25.7	24.6	12.7
15	189.5	451978	4.6	1.8	9531	1811	75.0	25.7	23.5	11.9
16	213.6	369982	4.1	1.7	7693	1537	75.0	24.8	23.4	11.4
17	228.4	292893	3.4	1.5	5496	1197	75.0	22.9	21.7	10.7
18	237.6	256622	3.4	1.5	5573	1124	75.0	21.5	22.0	10.7
19	246.1	207302	2.9	1.4	3729	886	74.6	19.2	21.1	10.1
20	257.6	150071	2.3	1.3	2829	698	63.9	16.0	19.8	9.8
21	271.0	102416	2.1	1.2	2086	533	53.9	13.0	19.4	9.4
22	283.6	66093	1.9	1.1	1432	395	39.3	10.3	17.7	9.0
23	296.9	45196	1.8	1.0	1131	316	31.2	8.6	17.7	8.8
24	309.5	29442	1.5	1.0	804	238	24.4	7.1	16.6	8.3
25	322.7	23150	1.8	1.0	855	220	18.9	6.5	16.9	8.4
26	349.9	7081	1.2	0.8	350	114	11.4	4.5	13.6	7.0
27	414.9	76	0.8	0.7	85	30	3.8	2.8	7.9	4.4

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 1

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1460876
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 4.5
 Valeur max:..... 10.5
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... 1.6

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 4.5 à 4.5
 Par[1/100] = 8.1 Par[1/1000] = 9.3 Par[1/10000] = 10.3

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE .8 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
3.3	1983	28.3
4.1	1496	21.4
4.9	1138	16.3
5.7	860	12.3
6.5	622	8.9
7.3	445	6.4
8.1	238	3.4
8.9	145	2.1
9.7	55	0.8
10.5	18	0.3

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1460876
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... .8
 Valeur max:..... 1.2
 Valeur min:..... .6
 Ecart type:..... .1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .8 à .8
 Hpas[1/100] = 1 Hpas[1/1000] = 1.1 Hpas[1/10000] = 1.1

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE .1 mètre > à .6 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.7	590	8.4
0.7	1342	19.2
0.8	1670	23.9
0.9	1564	22.3
0.9	1147	16.4
1.0	530	7.6
1.0	134	1.9
1.1	21	0.3
1.2	1	0.0
1.2	1	0.0

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 1

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1460876
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.8
 Valeur max:..... 12.9
 Valeur min:..... .6
 Ecart type:..... 2.3

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.8 à 6.9
 Vxpas[1/100] = 12.3 Vxpas[1/1000] = 14 Vxpas[1/10000] = 15.5

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.2 mètre/sec > à .6 ***

Lim sup	Nombre	freq.%
1.8	91	1.3
3.1	311	4.4
4.3	655	9.4
5.5	1004	14.3
6.7	1268	18.1
8.0	1247	17.8
9.2	1222	17.5
10.4	805	11.5
11.6	333	4.8
12.9	64	0.9

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1460876
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.6
 Valeur max:..... 5.7
 Valeur min:..... -.4
 Ecart type:..... .9

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.6 à 1.7
 Vzpas[1/100] = 3.8 Vzpas[1/1000] = 4.6 Vzpas[1/10000] = 5.1

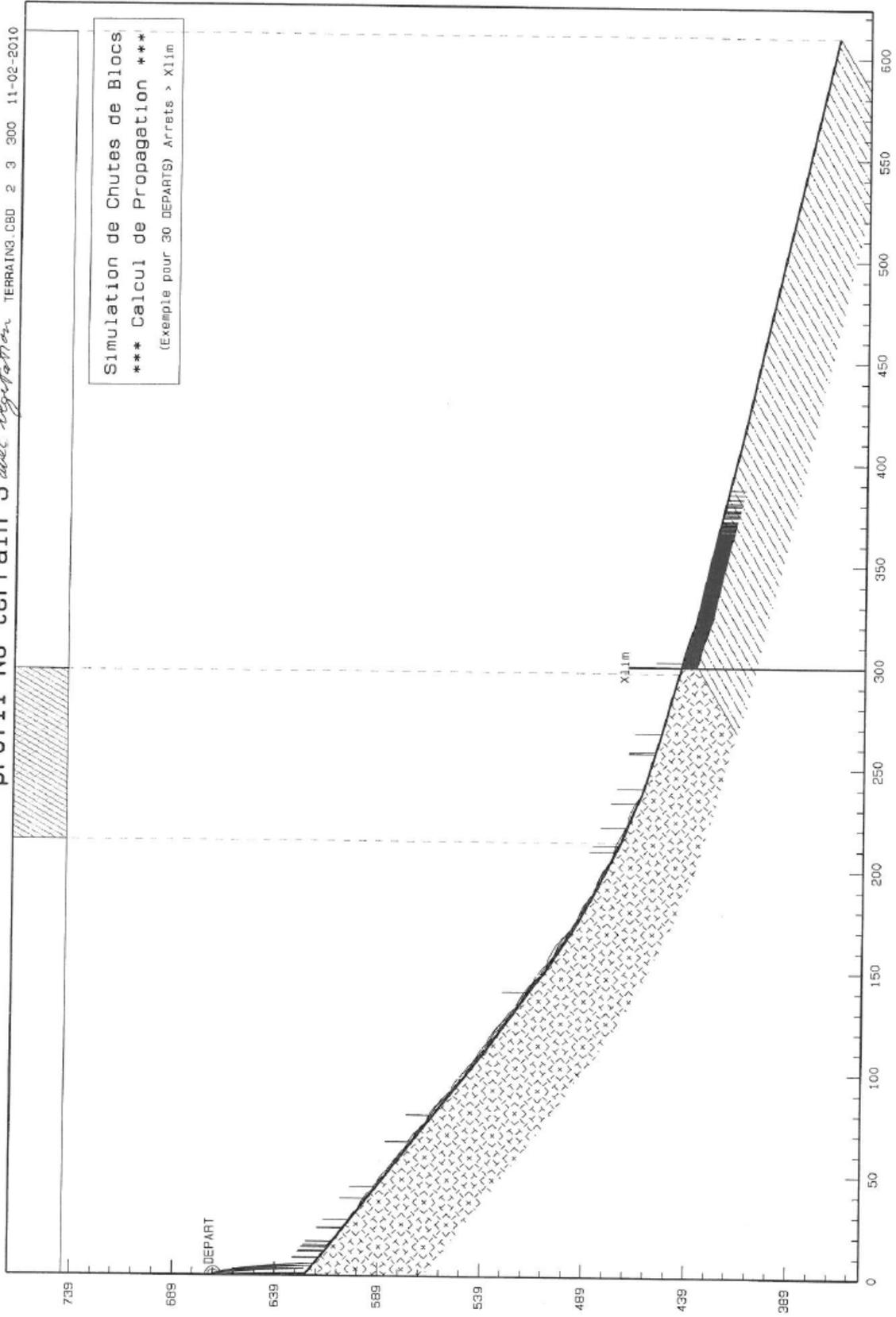
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à -.4 ***

Lim sup	Nombre	freq.%
0.2	73	1.0
0.8	1355	19.4
1.4	1824	26.1
2.0	1569	22.4
2.6	1065	15.2
3.2	629	9.0
3.8	328	4.7
4.5	119	1.7
5.1	36	0.5
5.7	2	0.0

FLANIN ST-PAUL-DE-VAHUES

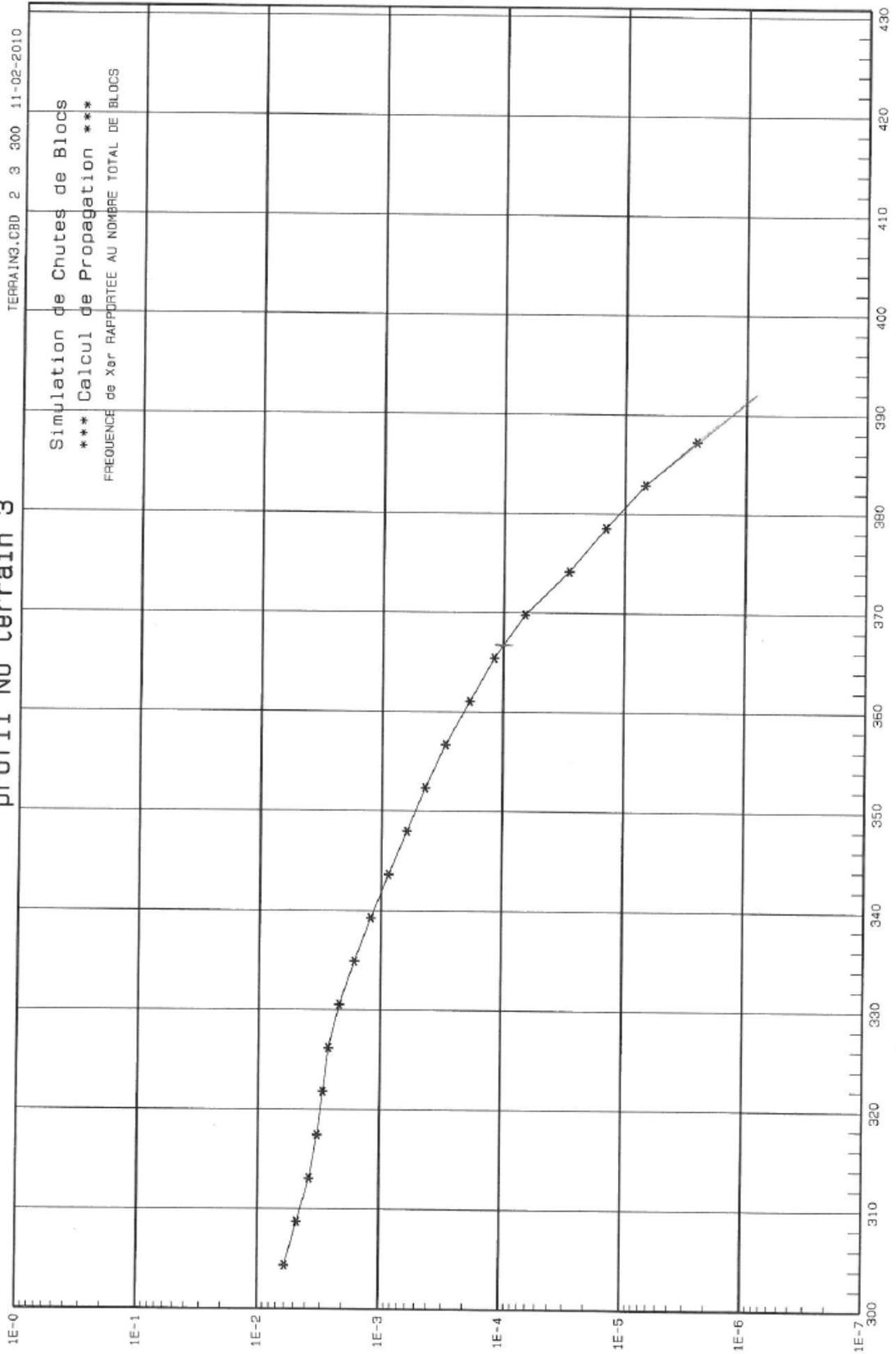
profil No terrain 3 avec végétation

TERRAIN3.CBD 2 3 300 11-02-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No terrain 3



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 3

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 669.1
 Xlim..... 300
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1177428

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	669.1	89.0	RT	SV
2	0.4	22.5	646.6	89.0	RT	SV
3	0.8	45.0	624.1	40.0	EB	SV
4	12.3	54.6	614.5	38.0	EB	SV
5	32.0	70.0	599.1	38.0	EB	SV
6	50.1	84.2	584.9	37.5	EB	SV
7	66.0	96.4	572.7	38.0	EB	SV
8	79.4	106.8	562.3	39.0	EB	SV
9	98.0	121.9	547.2	38.0	EB	SV
10	112.2	133.0	536.1	36.0	EB	SV
11	133.2	148.3	520.8	36.0	EB	SV
12	142.5	155.1	514.0	40.0	EB	SV
13	148.7	160.2	508.9	33.5	EB	SV
14	171.2	175.1	494.0	29.0	EB	SV
15	189.5	185.3	483.8	27.0	EB	SV
16	213.6	197.5	471.6	22.0	EB	BM
17	228.4	203.5	465.6	24.0	EB	BM
18	237.6	207.6	461.5	18.0	EB	BM
19	246.1	210.4	458.7	17.0	EB	BM
20	257.6	213.9	455.2	17.0	EB	BM
21	271.0	218.0	451.1	15.0	EB	BM
22	283.6	221.3	447.8	17.0	EB	BM
23	296.9	225.4	443.7	15.0	EB	SV
24	309.5	228.8	440.3	20.0	SP	SV
25	322.7	233.6	435.5	13.0	SP	SV
26	349.9	239.9	429.2	14.0	SP	SV
27	414.9	256.1	413.0	12.5	SP	SV
28	463.8	266.9	402.2	13.0	SP	SV
29	609.9	300.7	368.4	13.0	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 3

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 300 m Ntotal = 1177428 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.4	1177428	24.2	23.7	594	189	75.0	38.7	4.0	3.1
3	0.8	1177428	46.2	44.7	2261	619	75.0	38.7	7.8	5.6
4	12.3	920925	2.8	1.6	3861	518	75.0	34.1	11.7	5.6
5	32.0	536639	3.1	1.6	4901	720	75.0	27.8	14.7	7.3
6	50.1	470594	3.4	1.7	6436	972	75.0	26.5	17.1	8.7
7	66.0	443801	3.8	1.8	7285	1166	75.0	26.0	18.8	9.6
8	79.4	431763	4.0	1.8	8477	1370	75.0	25.8	20.6	10.4
9	98.0	425110	4.9	2.0	10140	1719	75.0	25.6	22.7	11.7
10	112.2	421781	5.3	2.0	11401	1886	75.0	25.6	23.3	12.2
11	133.2	414792	5.1	2.0	11194	1977	75.0	25.5	24.1	12.4
12	142.5	410950	5.5	2.0	11864	2048	75.0	25.5	24.4	12.6
13	148.7	409664	6.1	2.3	12923	2359	75.0	25.5	25.3	13.5
14	171.2	397130	5.4	2.0	11805	2081	75.0	25.6	24.6	12.7
15	189.5	364658	4.6	1.8	9550	1806	75.0	25.6	24.4	11.9
16	213.6	299011	4.1	1.7	7299	1530	75.0	24.7	23.2	11.4
17	228.4	214766	3.2	1.5	4786	1016	75.0	22.0	21.6	10.1
18	237.6	174530	3.2	1.4	4246	890	75.0	19.8	20.9	9.9
19	246.1	126299	2.5	1.3	2836	645	69.7	16.6	19.3	9.2
20	257.6	76149	2.0	1.2	1881	442	58.1	12.7	18.5	8.7
21	271.0	39773	1.7	1.0	1150	292	34.3	9.3	17.4	8.1
22	283.6	18502	1.4	0.9	729	179	25.4	6.8	15.1	7.3
23	296.9	8330	1.3	0.9	446	118	16.3	5.2	13.5	6.7
24	309.5	4233	1.2	0.8	337	96	11.9	4.4	12.2	6.5
25	322.7	3066	1.2	0.8	306	92	10.2	4.0	12.7	6.6
26	349.9	421	0.8	0.7	188	43	5.2	3.1	10.3	5.1

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°terrain 3

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 300 m ***

Nombre de Simulations:... 1177428
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.5
 Valeur max:..... 12.3
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.3

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.4 à 6.5
 Vxpas[1/100] = 11.7 Vxpas[1/1000] = 13.5 Vxpas[1/10000] = 14.9

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.2 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.2	43	0.6
2.5	239	3.4
3.7	607	8.7
4.9	978	14.0
6.2	1301	18.6
7.4	1306	18.7
8.6	1216	17.4
9.9	845	12.1
11.1	407	5.8
12.3	58	0.8

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 300 m ***

Nombre de Simulations:... 1177428
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.8
 Valeur max:..... 5.8
 Valeur min:..... -0.4
 Ecart type:..... 1

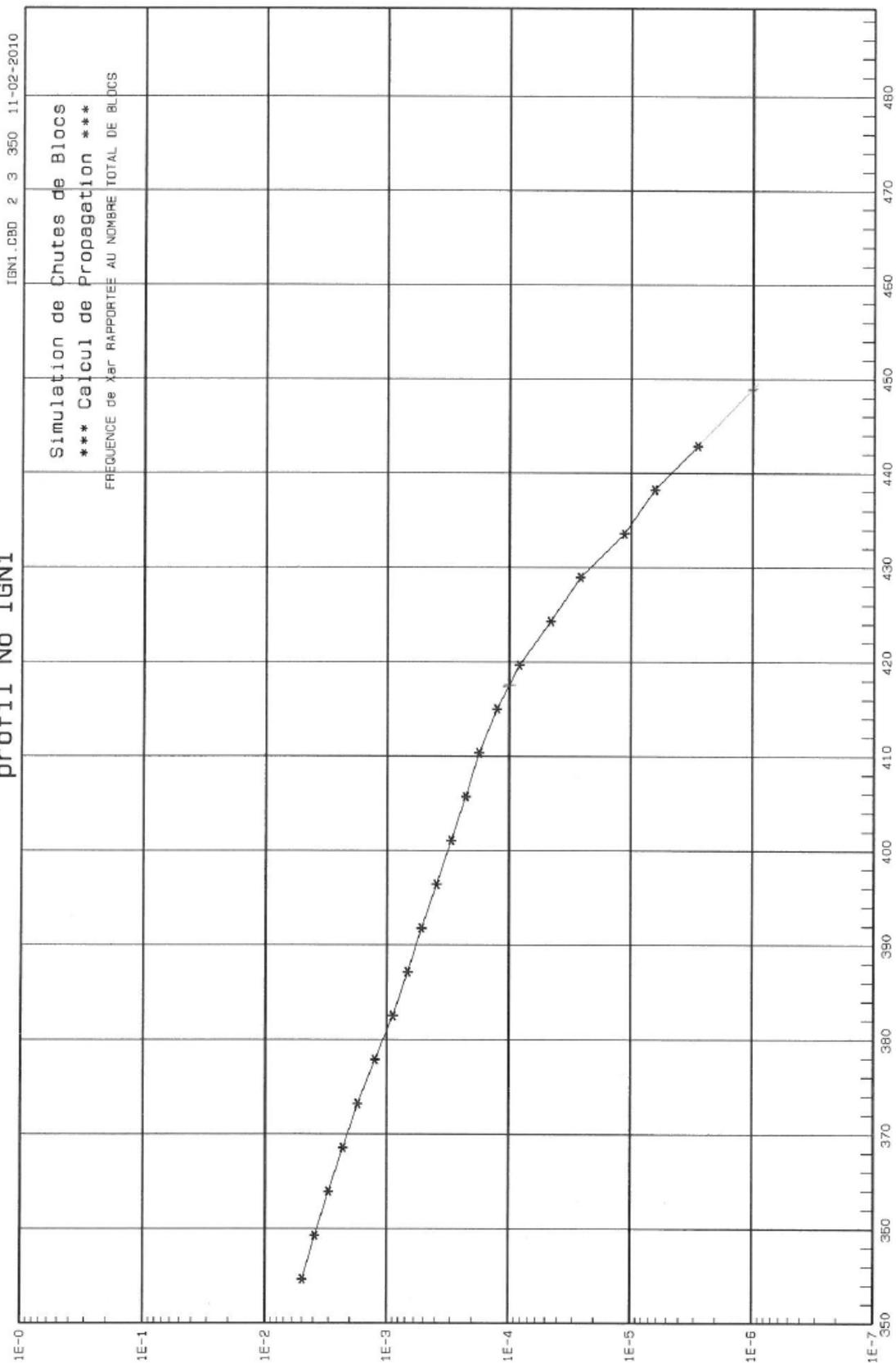
Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.7 à 1.8
 Vzpas[1/100] = 4.1 Vzpas[1/1000] = 4.9 Vzpas[1/10000] = 5.5

*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à -0.4 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.3	183	2.6
0.9	1300	18.6
1.5	1757	25.1
2.1	1409	20.1
2.7	1085	15.5
3.4	756	10.8
4.0	363	5.2
4.6	90	1.3
5.2	41	0.6
5.8	16	0.2

PLANTIN St-PAUL-DE-VARGES

profil No IGN1



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN1

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 670
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1415253

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	670.0	89.0	RT	SV
2	0.4	22.5	647.5	89.0	RT	SV
3	0.8	45.0	625.0	40.0	EB	SV
4	42.5	80.0	590.0	38.7	EB	SV
5	55.0	90.0	580.0	45.0	EB	SV
6	65.0	100.0	570.0	33.7	EB	SV
7	80.0	110.0	560.0	38.7	EB	SV
8	92.5	120.0	550.0	38.7	EB	SV
9	105.0	130.0	540.0	26.6	EB	SV
10	125.0	140.0	530.0	33.7	EB	SV
11	140.0	150.0	520.0	45.0	EB	SV
12	150.0	160.0	510.0	45.0	EB	SV
13	160.0	170.0	500.0	29.7	EB	SV
14	177.5	180.0	490.0	24.0	EB	SV
15	200.0	190.0	480.0	29.7	EB	SV
16	217.5	200.0	470.0	21.8	EB	SV
17	242.5	210.0	460.0	24.0	EB	SV
18	265.0	220.0	450.0	14.0	EB	SV
19	305.0	230.0	440.0	18.4	SP	SV
20	335.0	240.0	430.0	12.5	SP	SV
21	380.0	250.0	420.0	15.9	SP	SV
22	415.0	260.0	410.0	14.0	SP	SV
23	455.0	270.0	400.0	13.0	SP	SV
24	601.2	303.7	366.3	13.0	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN1

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 1415253 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.4	1415253	24.2	23.7	614	194	75.0	38.7	4.0	3.1
3	0.8	1415253	46.1	44.5	2345	641	75.0	38.7	7.9	5.7
4	42.5	710656	3.7	1.8	7215	1100	75.0	29.0	17.1	8.8
5	55.0	674130	3.8	1.8	8140	1270	75.0	28.5	18.8	9.5
6	65.0	670583	5.9	2.2	11549	1849	75.0	28.5	21.2	11.4
7	80.0	639291	4.2	1.8	8538	1466	75.0	28.3	19.3	10.2
8	92.5	622828	5.0	2.0	11097	1809	75.0	28.2	21.9	11.3
9	105.0	612759	5.0	2.1	11467	2012	75.0	28.1	23.3	11.9
10	125.0	494068	3.5	1.7	7202	1358	75.0	27.3	19.9	10.1
11	140.0	456202	4.8	1.8	9257	1580	75.0	26.8	22.7	11.0
12	150.0	455272	7.8	2.5	13682	2432	75.0	26.7	26.1	13.6
13	160.0	454662	9.3	2.7	15633	2756	75.0	26.7	28.9	14.5
14	177.5	449975	5.5	1.9	10032	1859	75.0	26.6	24.4	11.9
15	200.0	351733	3.7	1.6	6860	1339	75.0	25.3	21.9	10.5
16	217.5	310341	4.4	1.7	7225	1388	75.0	24.1	24.0	11.1
17	242.5	198177	2.9	1.4	3952	871	75.0	19.3	21.1	9.9
18	265.0	142329	2.9	1.4	3357	710	61.9	15.9	21.2	9.9
19	305.0	27865	1.5	0.9	1000	238	25.5	7.2	16.6	8.2
20	335.0	13868	1.5	0.9	693	174	17.4	5.6	16.2	7.9
21	380.0	1095	1.0	0.7	207	59	7.3	3.3	11.1	5.7
22	415.0	119	0.8	0.7	100	34	4.2	2.9	8.5	4.6

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN1

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1415253
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 4.6
 Valeur max:..... 11.4
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... 1.7

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 4.6 à 4.6
 Par[1/100] = 8.5 Par[1/1000] = 9.8 Par[1/10000] = 10.8

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE .9 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
3.4	2078	29.7
4.3	1572	22.5
5.2	1182	16.9
6.0	834	11.9
6.9	606	8.7
7.8	347	5.0
8.7	199	2.8
9.6	124	1.8
10.5	46	0.7
11.4	12	0.2

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1415253
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... .8
 Valeur max:..... 1.2
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .8 à .8
 Hpas[1/100] = 1 Hpas[1/1000] = 1.1 Hpas[1/10000] = 1.2

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE .1 mètre > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.1	2	0.0
0.2	0	0.0
0.4	0	0.0
0.5	0	0.0
0.6	0	0.0
0.7	1235	17.6
0.8	3058	43.7
0.9	2152	30.7
1.1	521	7.4
1.2	32	0.5

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN1

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1415253
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.9
 Valeur max:..... 13
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.4

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.9 à 6.9
 Vxpas[1/100] = 12.5 Vxpas[1/1000] = 14.3 Vxpas[1/10000] = 15.8

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.3 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.3	46	0.7
2.6	224	3.2
3.9	563	8.0
5.2	909	13.0
6.5	1291	18.4
7.8	1301	18.6
9.1	1322	18.9
10.4	900	12.9
11.7	363	5.2
13.0	81	1.2

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1415253
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.6
 Valeur max:..... 5.3
 Valeur min:..... -0.3
 Ecart type:..... 1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.6 à 1.6
 Vzpas[1/100] = 3.9 Vzpas[1/1000] = 4.7 Vzpas[1/10000] = 5.3

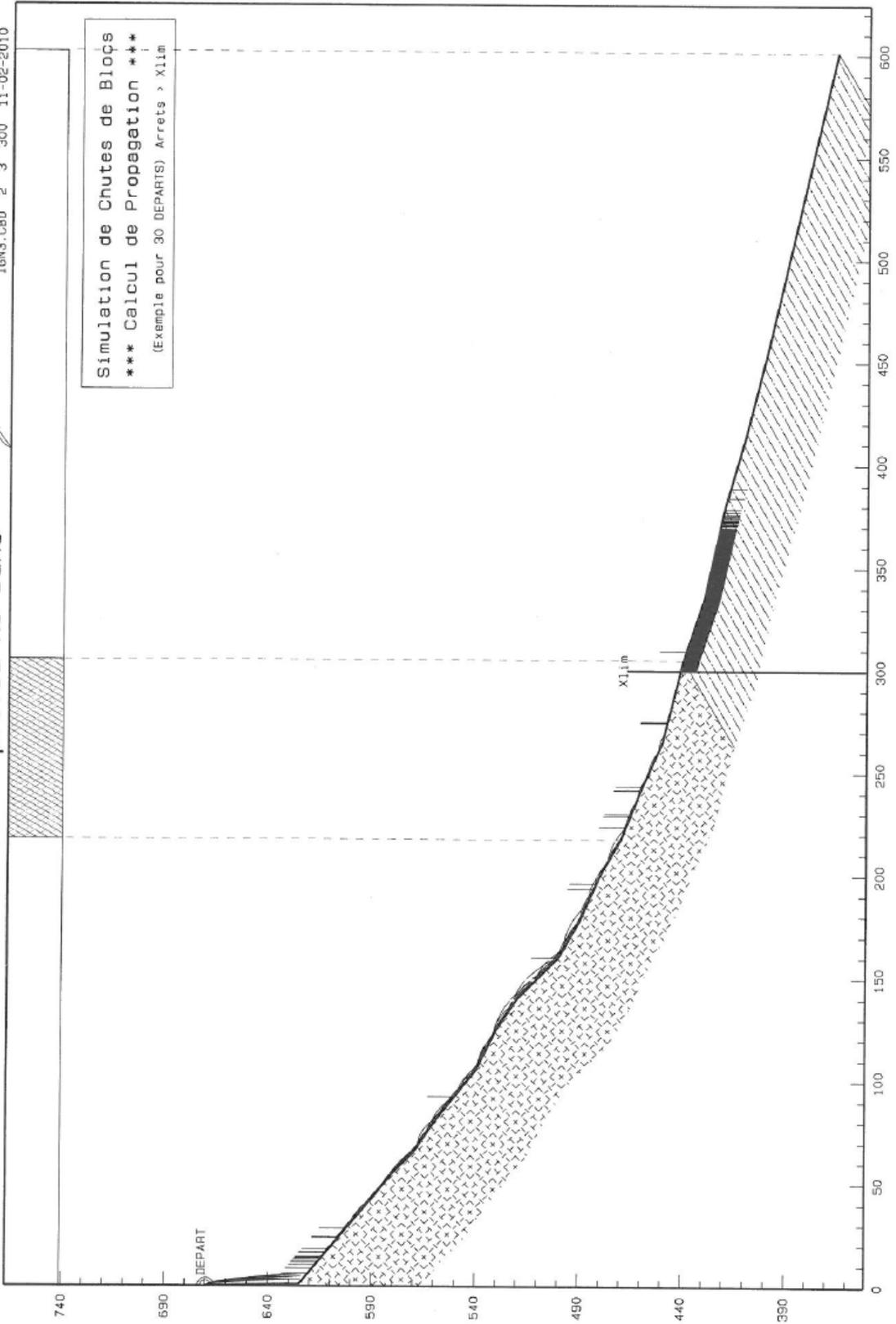
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à -0.3 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.3	321	4.6
0.8	1529	21.8
1.4	1619	23.1
2.0	1318	18.8
2.5	958	13.7
3.1	625	8.9
3.6	363	5.2
4.2	163	2.3
4.8	67	1.0
5.3	37	0.5

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

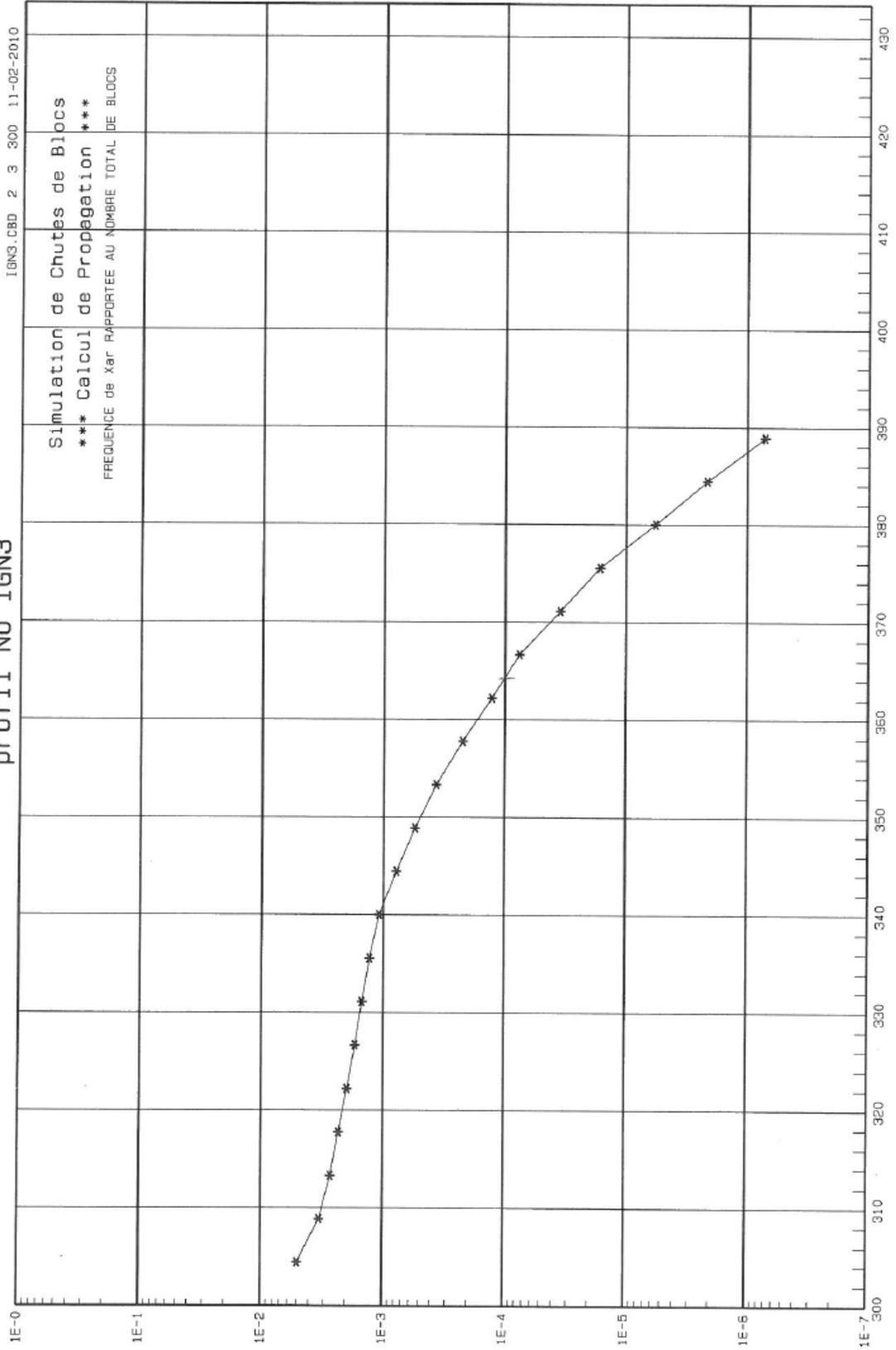
profil No IGN3 avec végétation

IGN3.CBD 2 3 300 11-02-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No IGN3



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN3

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 670
 Klim..... 300
 Nombre de blocs dépassant Klim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1398427

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	670.0	89.0	RT	SV
2	0.4	22.5	647.5	89.0	RT	SV
3	0.8	45.0	625.0	40.0	EB	SV
4	42.5	80.0	590.0	38.7	EB	SV
5	55.0	90.0	580.0	45.0	EB	SV
6	65.0	100.0	570.0	33.7	EB	SV
7	80.0	110.0	560.0	38.7	EB	SV
8	92.5	120.0	550.0	38.7	EB	SV
9	105.0	130.0	540.0	26.6	EB	SV
10	125.0	140.0	530.0	33.7	EB	SV
11	140.0	150.0	520.0	45.0	EB	SV
12	150.0	160.0	510.0	45.0	EB	SV
13	160.0	170.0	500.0	29.7	EB	SV
14	177.5	180.0	490.0	24.0	EB	SV
15	200.0	190.0	480.0	29.7	EB	SV
16	217.5	200.0	470.0	21.8	EB	BM
17	242.5	210.0	460.0	24.0	EB	BM
18	265.0	220.0	450.0	14.0	EB	BM
19	305.0	230.0	440.0	18.4	SP	SV
20	335.0	240.0	430.0	12.5	SP	SV
21	380.0	250.0	420.0	15.9	SP	SV
22	415.0	260.0	410.0	14.0	SP	SV
23	455.0	270.0	400.0	13.0	SP	SV
24	601.2	303.7	366.3	13.0	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN3

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 300 m Ntotal = 1398427 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.4	1398427	24.2	23.7	614	194	75.0	38.7	4.0	3.1
3	0.8	1398427	46.1	44.5	2345	641	75.0	38.7	7.9	5.7
4	42.5	701901	3.6	1.8	7102	1099	75.0	28.9	17.1	8.8
5	55.0	666434	3.8	1.8	7650	1269	75.0	28.5	18.6	9.5
6	65.0	662840	6.0	2.2	11400	1846	75.0	28.5	21.4	11.4
7	80.0	632024	4.2	1.8	8685	1465	75.0	28.2	19.3	10.2
8	92.5	615951	4.9	2.0	10948	1807	75.0	28.1	22.3	11.3
9	105.0	605958	5.0	2.1	11743	2009	75.0	28.0	23.4	11.9
10	125.0	488348	3.6	1.7	7203	1357	75.0	27.3	20.0	10.1
11	140.0	451460	4.8	1.8	8550	1578	75.0	26.7	22.6	11.0
12	150.0	450578	7.9	2.5	13445	2430	75.0	26.7	26.0	13.6
13	160.0	450002	9.7	2.7	15904	2753	75.0	26.7	28.7	14.5
14	177.5	445319	5.3	1.9	10302	1855	75.0	26.6	23.1	11.9
15	200.0	348120	3.7	1.6	7178	1337	75.0	25.2	22.1	10.5
16	217.5	307408	4.5	1.7	7088	1386	75.0	24.0	24.2	11.1
17	242.5	157674	2.6	1.3	3485	663	73.6	17.3	20.2	9.1
18	265.0	88276	2.4	1.2	2323	443	51.9	12.7	18.9	8.6
19	305.0	4356	1.1	0.8	313	86	14.6	4.4	12.5	6.1
20	335.0	1587	1.1	0.8	230	69	8.6	3.6	11.7	6.0
21	380.0	3	0.7	0.7	35	22	2.6	2.6	5.3	4.1

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°IGN3

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 300 m ***

Nombre de Simulations:... 1398427
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.2
 Valeur max:..... 12.4
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.3

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.2 à 6.2
 Vxpas[1/100] = 11.5 Vxpas[1/1000] = 13.2 Vxpas[1/10000] = 14.7

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.2 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.2	51	0.7
2.5	343	4.9
3.7	706	10.1
5.0	1064	15.2
6.2	1329	19.0
7.4	1316	18.8
8.7	1123	16.0
9.9	736	10.5
11.2	283	4.0
12.4	49	0.7

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 300 m ***

Nombre de Simulations:... 1398427
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.6
 Valeur max:..... 5.4
 Valeur min:..... -1
 Ecart type:..... 1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.6 à 1.6
 Vzpas[1/100] = 3.8 Vzpas[1/1000] = 4.6 Vzpas[1/10000] = 5.2

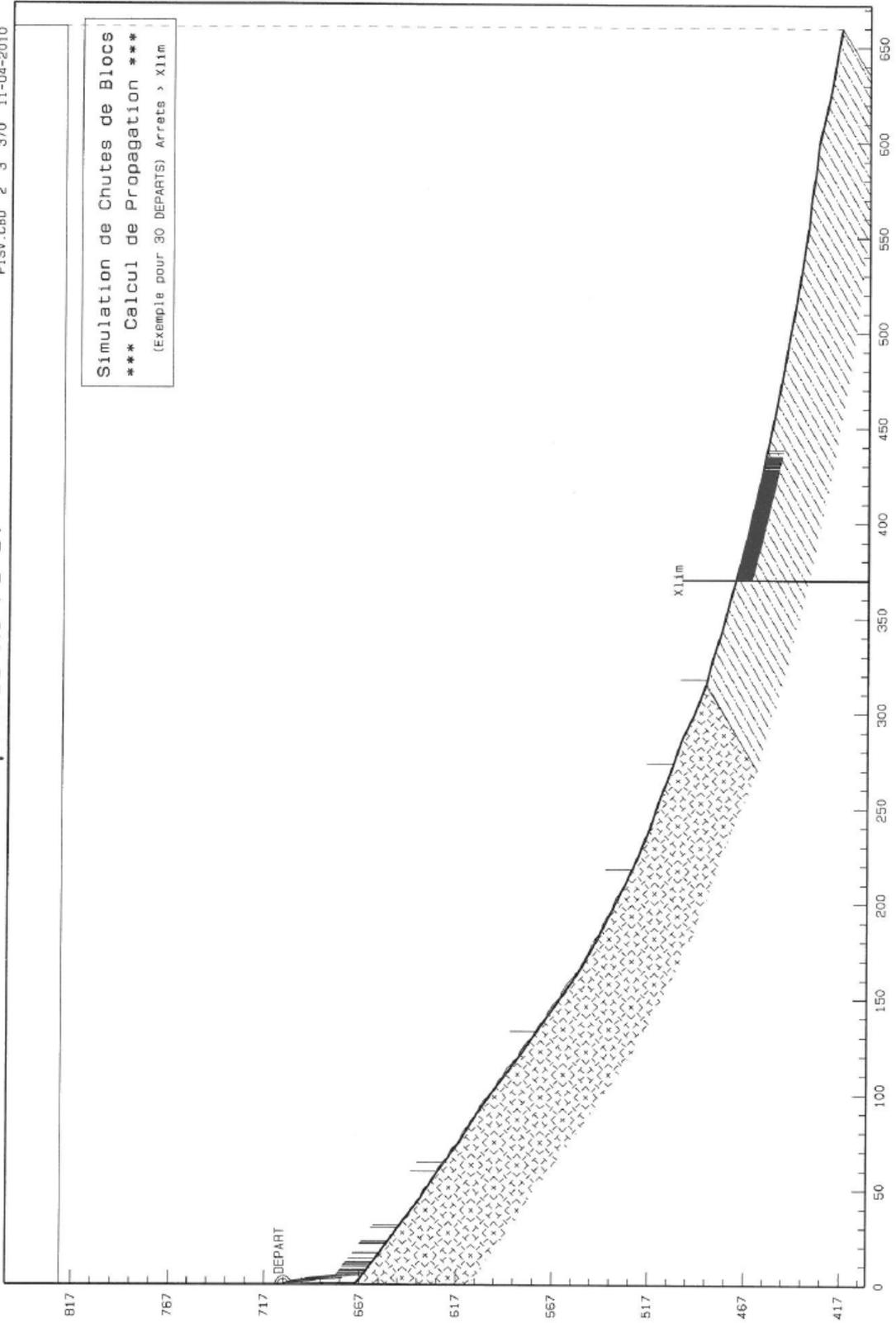
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .5 mètre/sec > à -.1 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.5	579	8.3
1.0	1580	22.6
1.5	1580	22.6
2.1	1293	18.5
2.6	872	12.5
3.2	566	8.1
3.7	330	4.7
4.3	142	2.0
4.8	41	0.6
5.4	17	0.2

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

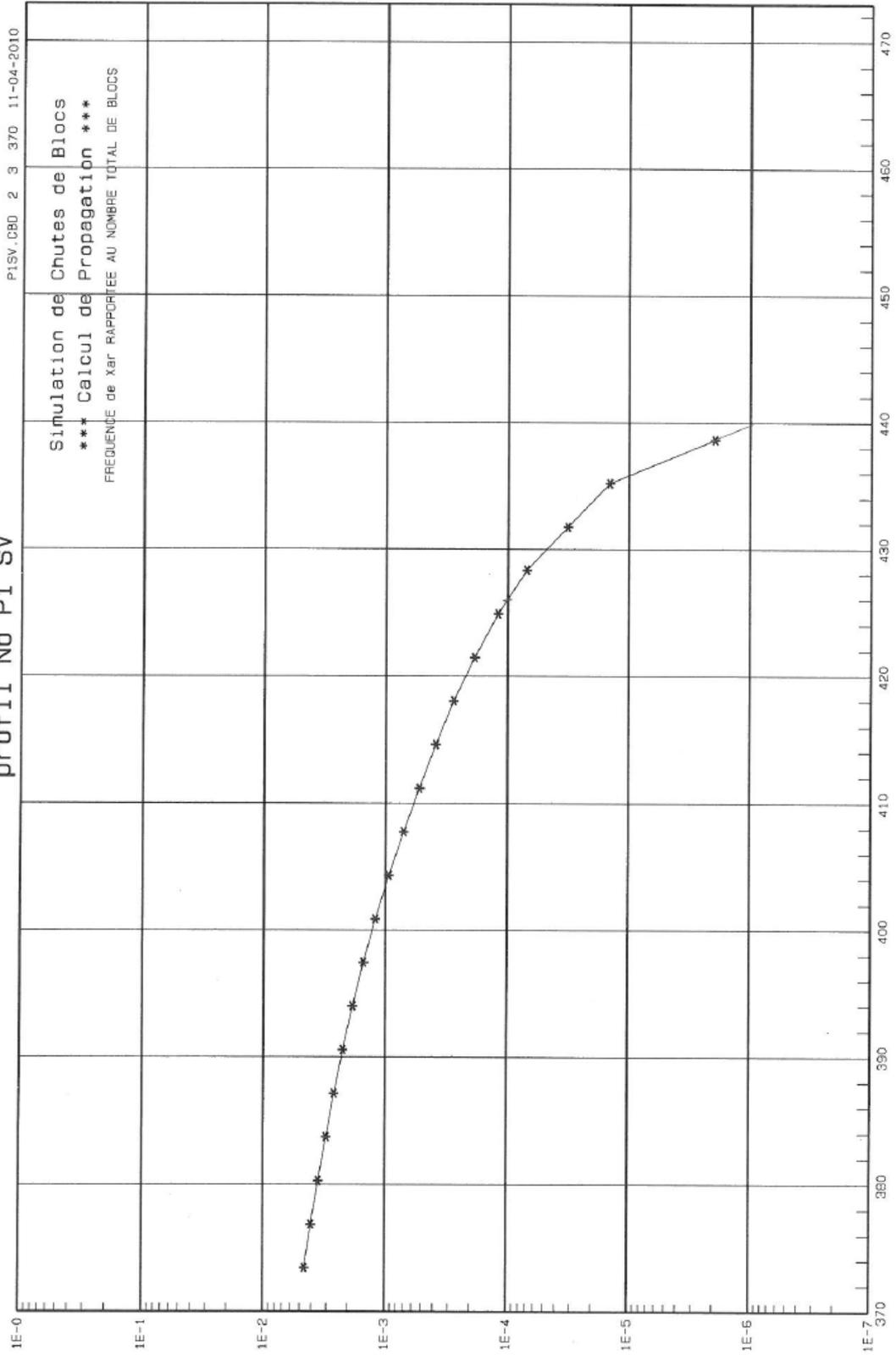
profil No P1 SV

PJSV.CBD 2 3 370 11-04-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No P1 SV



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 SV

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 707.7
 Xlim..... 370
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1527190

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	707.7	89.3	RT	SV
2	0.5	38.3	669.4	37.0	EB	SV
3	15.0	49.2	658.5	35.7	EB	SV
4	30.0	60.0	647.7	36.5	EB	SV
5	45.0	71.1	636.6	32.9	EB	SV
6	60.0	80.8	626.9	36.3	EB	SV
7	75.0	91.8	615.9	31.2	EB	SV
8	90.0	100.9	606.8	35.7	EB	SV
9	105.0	111.7	596.0	36.9	EB	SV
10	120.0	122.9	584.8	34.7	EB	SV
11	135.0	133.3	574.4	35.2	EB	SV
12	150.0	143.9	563.8	34.3	EB	SV
13	165.0	154.1	553.6	28.8	EB	SV
14	180.0	162.4	545.3	27.5	EB	SV
15	194.9	170.1	537.6	26.7	EB	SV
16	210.0	177.7	530.0	25.1	EB	SV
17	224.9	184.7	523.0	22.1	EB	SV
18	240.0	190.8	516.9	18.1	EB	SV
19	255.0	195.7	512.0	21.4	EB	SV
20	269.9	201.6	506.1	18.6	EB	SV
21	285.0	206.6	501.1	25.3	EB	SV
22	300.0	213.7	494.0	20.9	EB	SV
23	315.0	219.5	488.2	14.6	SP	SV
24	329.9	223.4	484.4	18.1	SP	SV
25	345.0	228.3	479.4	14.1	SP	SV
26	360.0	232.0	475.7	15.7	SP	SV
27	375.0	236.3	471.4	14.6	SP	SV
28	390.0	240.2	467.5	13.2	SP	SV
29	405.0	243.7	464.0	13.2	SP	SV
30	420.0	247.2	460.5	12.3	SP	SV

PROPAGATION P1SV.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	435.0	250.5	457.2	11.6	SP	SV
32	449.9	253.5	454.2	11.5	SP	SV
33	465.0	256.6	451.1	10.8	SP	SV
34	480.0	259.4	448.3	9.4	SP	SV
35	494.9	261.9	445.8	11.0	SP	SV
36	510.0	264.8	442.9	9.4	SP	SV
37	525.0	267.3	440.4	9.0	SP	SV
38	540.0	269.7	438.0	8.8	SP	SV
39	555.0	272.0	435.7	5.6	SP	SV
40	570.0	273.5	434.2	8.6	SP	SV
41	585.0	275.8	431.9	6.5	SP	SV
42	600.0	277.5	430.2	13.1	SP	SV
43	615.0	281.0	426.7	12.0	SP	SV
44	629.9	284.2	423.5	9.2	SP	SV
45	645.0	286.6	421.1	10.2	SP	SV

PROPAGATION P1SV.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	660.0	289.3	418.4	10.2	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 SV

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 370 m Ntotal = 1527190 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	1527190	39.9	39.6	938	278	75.0	38.7	5.0	3.8
3	15.0	654617	2.4	1.4	2438	314	75.0	26.7	10.6	5.0
4	30.0	398227	2.5	1.4	2612	385	75.0	20.6	12.9	6.4
5	45.0	347633	2.7	1.4	3336	525	75.0	18.9	15.2	7.7
6	60.0	303106	2.7	1.4	2963	529	74.9	17.7	15.7	8.0
7	75.0	289653	3.3	1.5	3791	701	74.9	17.2	17.9	9.3
8	90.0	267014	3.0	1.4	3350	643	74.9	16.7	17.5	9.0
9	105.0	258942	3.6	1.6	4198	813	74.8	16.4	19.8	10.2
10	120.0	256543	4.2	1.7	5053	986	74.8	16.4	21.3	11.2
11	135.0	254607	4.3	1.7	5315	1041	74.8	16.3	21.8	11.5
12	150.0	253135	4.4	1.8	5927	1153	74.8	16.3	22.6	12.1
13	165.0	251723	4.7	1.8	6038	1211	74.7	16.3	23.0	12.4
14	180.0	245779	4.0	1.6	4746	1049	74.7	16.2	21.5	11.5
15	194.9	231254	3.6	1.5	4316	957	71.7	16.1	21.6	11.1
16	210.0	210281	3.3	1.5	3809	873	66.6	15.7	21.5	10.8
17	224.9	183488	3.2	1.4	3213	768	60.4	15.0	20.9	10.4
18	240.0	147054	2.8	1.3	2442	628	52.6	13.7	19.9	9.9
19	255.0	102063	2.3	1.2	1756	467	41.9	11.5	18.6	9.3
20	269.9	78474	2.2	1.2	1591	413	36.9	10.1	19.3	9.3
21	285.0	55249	1.9	1.1	1123	321	28.3	8.6	17.3	8.9
22	300.0	47972	2.4	1.2	1190	333	25.3	8.0	19.3	9.3
23	315.0	38330	2.2	1.1	916	273	22.3	7.3	17.3	8.8
24	329.9	24213	1.6	0.9	603	197	17.0	6.1	15.2	8.1
25	345.0	17099	1.7	0.9	524	170	13.9	5.4	14.9	8.0
26	360.0	9774	1.3	0.8	370	123	10.8	4.6	13.5	7.3
27	375.0	5847	1.2	0.8	276	96	9.2	4.0	13.1	6.8
28	390.0	2948	1.1	0.7	195	71	7.0	3.5	11.4	6.2
29	405.0	1021	0.9	0.7	151	47	5.5	3.1	9.8	5.3
30	420.0	228	0.8	0.7	86	31	4.1	2.8	7.8	4.4
31	435.0	7	0.7	0.6	24	12	2.8	2.6	4.2	2.9

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 SV

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 370 m ***

Nombre de Simulations:... 1527190
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.7
 Valeur max:..... 12.2
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.2

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.6 à 6.7
 Vxpas[1/100] = 11.9 Vxpas[1/1000] = 13.5 Vxpas[1/10000] = 14.9

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.2 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.2	32	0.5
2.4	196	2.8
3.7	513	7.3
4.9	831	11.9
6.1	1176	16.8
7.3	1372	19.6
8.6	1339	19.1
9.8	993	14.2
11.0	496	7.1
12.2	52	0.7

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 370 m ***

Nombre de Simulations:... 1527190
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.9
 Valeur max:..... 5.9
 Valeur min:..... -0.2
 Ecart type:..... 1.1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.9 à 1.9
 Vzpas[1/100] = 4.5 Vzpas[1/1000] = 5.3 Vzpas[1/10000] = 6

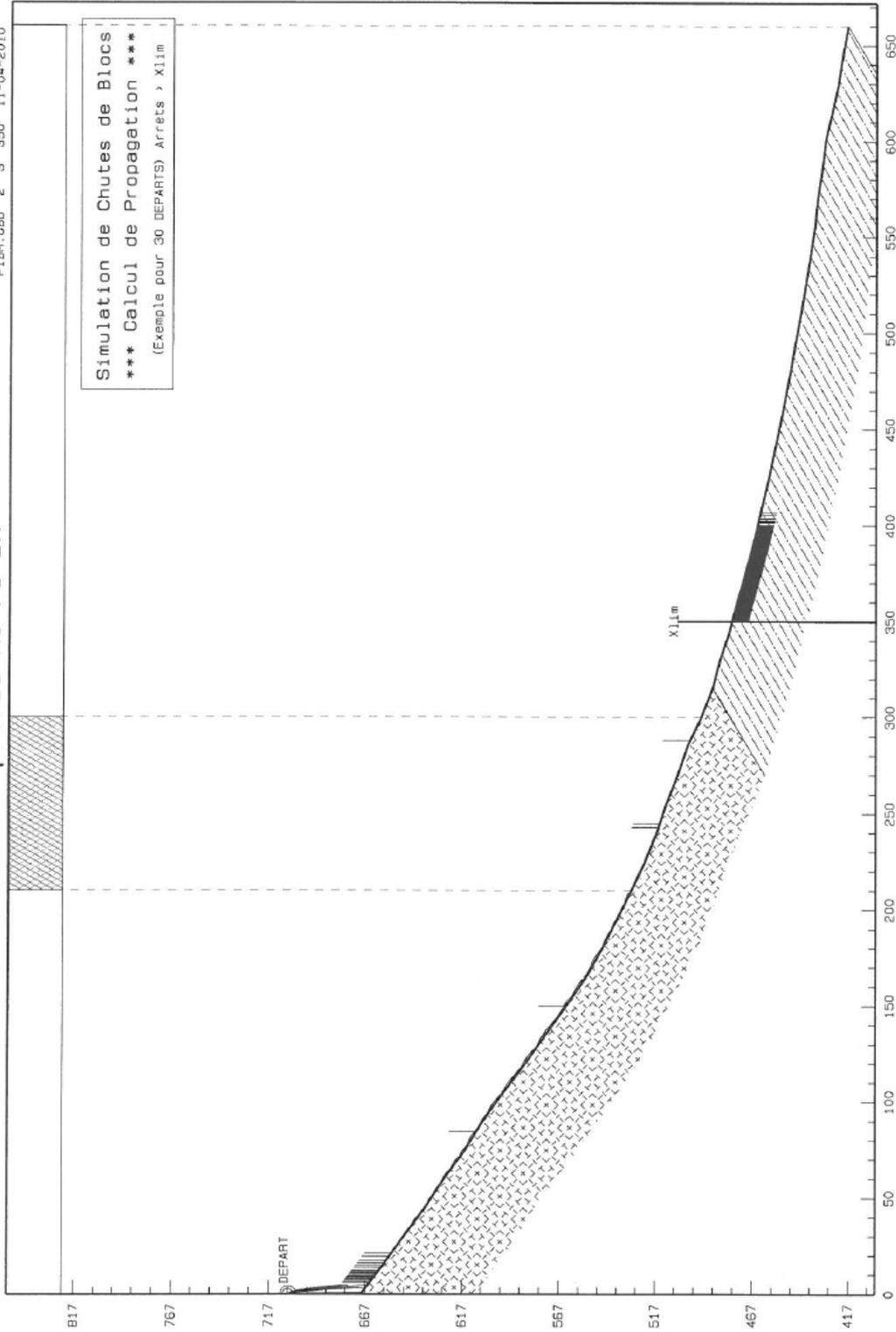
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à -0.2 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.4	337	4.8
1.0	1312	18.7
1.6	1564	22.3
2.2	1359	19.4
2.9	995	14.2
3.5	739	10.6
4.1	414	5.9
4.7	201	2.9
5.3	61	0.9
5.9	18	0.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

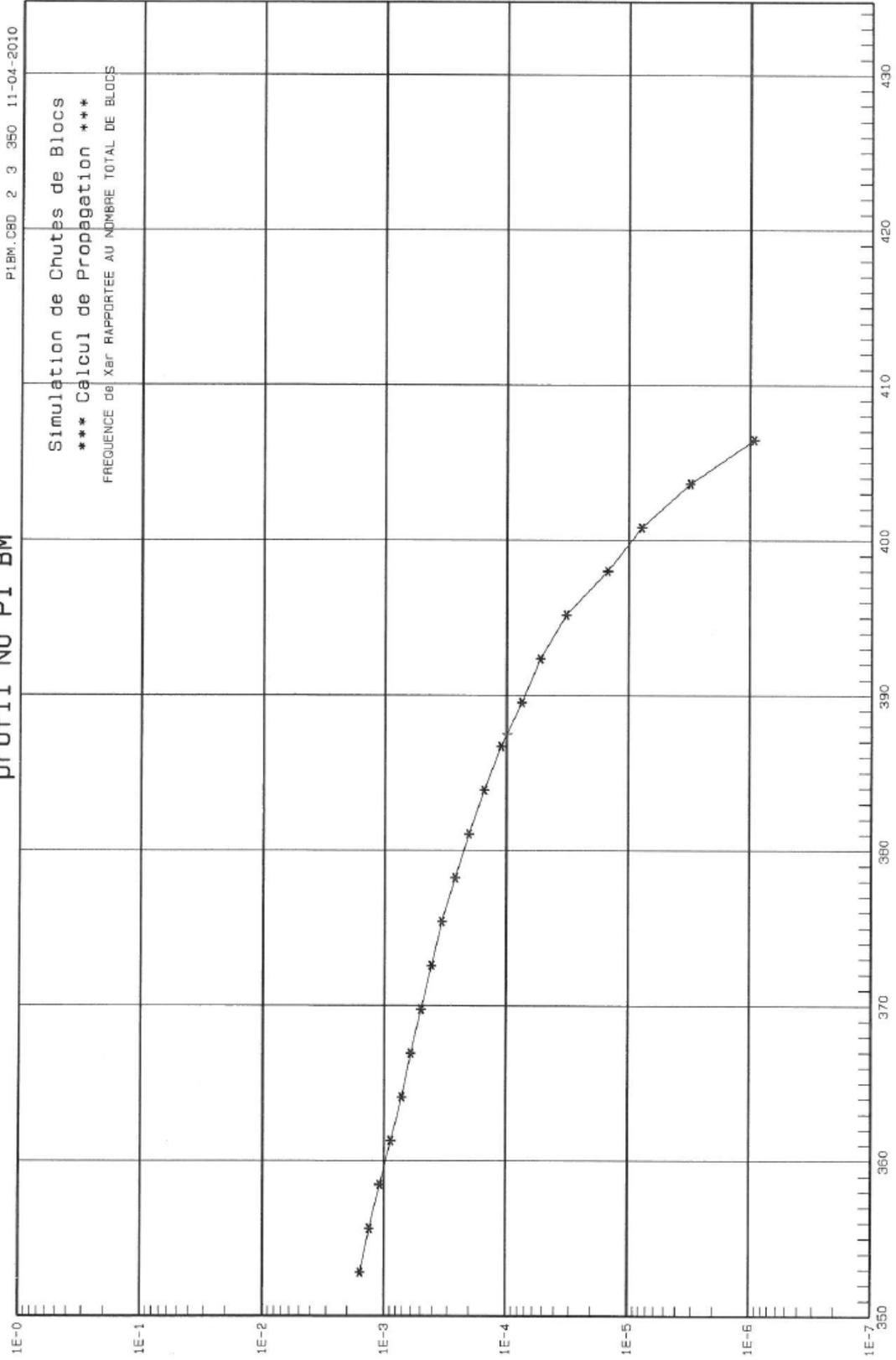
prof11 No P1 BM

PIBM.C80 2 3 350 11-04-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No P1 BM



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 BM

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 707.7
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 5099
 Nombre total de simulations:... 3230337

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	707.7	89.3	RT	SV
2	0.5	38.3	669.4	37.0	EB	SV
3	15.0	49.2	658.5	35.7	EB	SV
4	30.0	60.0	647.7	36.5	EB	SV
5	45.0	71.1	636.6	32.9	EB	SV
6	60.0	80.8	626.9	36.3	EB	SV
7	75.0	91.8	615.9	31.2	EB	SV
8	90.0	100.9	606.8	35.7	EB	SV
9	105.0	111.7	596.0	36.9	EB	SV
10	120.0	122.9	584.8	34.7	EB	SV
11	135.0	133.3	574.4	35.2	EB	SV
12	150.0	143.9	563.8	34.3	EB	SV
13	165.0	154.1	553.6	28.8	EB	SV
14	180.0	162.4	545.3	27.5	EB	SV
15	194.9	170.1	537.6	26.7	EB	SV
16	210.0	177.7	530.0	25.1	EB	BM
17	224.9	184.7	523.0	22.1	EB	BM
18	240.0	190.8	516.9	18.1	EB	BM
19	255.0	195.7	512.0	21.4	EB	BM
20	269.9	201.6	506.1	18.6	EB	BM
21	285.0	206.6	501.1	25.3	EB	BM
22	300.0	213.7	494.0	20.9	EB	SV
23	315.0	219.5	488.2	14.6	SP	SV
24	329.9	223.4	484.4	18.1	SP	SV
25	345.0	228.3	479.4	14.1	SP	SV
26	360.0	232.0	475.7	15.7	SP	SV
27	375.0	236.3	471.4	14.6	SP	SV
28	390.0	240.2	467.5	13.2	SP	SV
29	405.0	243.7	464.0	13.2	SP	SV
30	420.0	247.2	460.5	12.3	SP	SV

PROPAGATION P1BM.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	435.0	250.5	457.2	11.6	SP	SV
32	449.9	253.5	454.2	11.5	SP	SV
33	465.0	256.6	451.1	10.8	SP	SV
34	480.0	259.4	448.3	9.4	SP	SV
35	494.9	261.9	445.8	11.0	SP	SV
36	510.0	264.8	442.9	9.4	SP	SV
37	525.0	267.3	440.4	9.0	SP	SV
38	540.0	269.7	438.0	8.8	SP	SV
39	555.0	272.0	435.7	5.6	SP	SV
40	570.0	273.5	434.2	8.6	SP	SV
41	585.0	275.8	431.9	6.5	SP	SV
42	600.0	277.5	430.2	13.1	SP	SV
43	615.0	281.0	426.7	12.0	SP	SV
44	629.9	284.2	423.5	9.2	SP	SV
45	645.0	286.6	421.1	10.2	SP	SV

PROPAGATION P1BM.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	660.0	289.3	418.4	10.2	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 BM

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 3230337 Nb >= Xlim = 5099

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	3230337	39.9	39.8	939	278	75.0	38.7	5.0	3.7
3	15.0	1385042	2.5	1.4	2495	315	75.0	26.8	10.6	5.0
4	30.0	842878	2.5	1.4	2770	386	75.0	20.7	12.9	6.4
5	45.0	735924	2.7	1.4	3262	526	75.0	19.1	15.4	7.7
6	60.0	641119	2.7	1.4	3163	530	75.0	17.8	15.6	8.0
7	75.0	612302	3.3	1.5	3948	703	75.0	17.3	17.9	9.3
8	90.0	564683	3.0	1.4	3403	645	74.9	16.7	17.5	9.0
9	105.0	547819	3.6	1.6	4414	815	74.8	16.5	19.9	10.2
10	120.0	542702	4.1	1.7	5039	988	74.8	16.4	21.5	11.2
11	135.0	538739	4.4	1.7	5470	1042	74.8	16.4	22.0	11.5
12	150.0	535675	4.5	1.8	5878	1154	74.8	16.3	22.8	12.1
13	165.0	532705	4.7	1.8	6038	1213	74.7	16.3	23.3	12.3
14	180.0	519878	4.1	1.6	4977	1050	73.9	16.3	21.4	11.5
15	194.9	488922	3.5	1.5	4537	958	73.1	16.2	21.8	11.1
16	210.0	444549	3.4	1.5	4087	874	67.3	15.8	21.9	10.8
17	224.9	357267	2.9	1.4	2891	655	60.3	14.7	21.6	9.8
18	240.0	242387	2.5	1.2	2007	472	47.8	12.4	18.8	9.1
19	255.0	130786	1.8	1.1	1180	299	34.6	9.3	16.8	8.2
20	269.9	81178	1.9	1.0	914	227	28.0	7.6	16.5	7.9
21	285.0	41171	1.5	0.9	563	146	17.5	5.8	14.9	7.1
22	300.0	29738	1.9	0.9	566	134	16.4	5.2	14.8	7.2
23	315.0	21342	1.7	0.9	385	121	12.9	4.7	13.8	7.1
24	329.9	11021	1.2	0.8	252	85	9.8	4.0	12.7	6.4
25	345.0	6824	1.2	0.8	222	72	7.9	3.7	12.4	6.1
26	360.0	2554	0.9	0.7	139	49	5.7	3.2	10.4	5.3
27	375.0	899	0.8	0.7	113	36	4.7	2.9	9.1	4.7
28	390.0	161	0.8	0.7	73	24	3.4	2.7	7.3	4.0
29	405.0	2	0.6	0.6	9	7	2.7	2.6	2.7	2.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 BM

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 3230337
 Nombre d'essais analysés: 5099
 Valeur moyenne:..... 3.5
 Valeur max:..... 7.3
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... .8

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 3.5 à 3.5
 Par[1/100] = 5.4 Par[1/1000] = 6 Par[1/10000] = 6.5

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE .5 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
3.0	1715	33.6
3.5	1217	23.9
3.9	831	16.3
4.4	588	11.5
4.9	386	7.6
5.4	206	4.0
5.9	100	2.0
6.3	43	0.8
6.8	8	0.2
7.3	5	0.1

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 3230337
 Nombre d'essais analysés: 5099
 Valeur moyenne:..... .7
 Valeur max:..... 1.1
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .7 à .7
 Hpas[1/100] = .9 Hpas[1/1000] = .9 Hpas[1/10000] = 1

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE .1 mètre > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.1	2	0.0
0.2	0	0.0
0.3	0	0.0
0.4	0	0.0
0.5	0	0.0
0.6	173	3.4
0.8	2846	55.8
0.9	1848	36.2
1.0	213	4.2
1.1	17	0.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P1 BM

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 3230337
 Nombre d'essais analysés: 5099
 Valeur moyenne:..... 5.6
 Valeur max:..... 10.6
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 1.8

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 5.6 à 5.6
 Vxpas[1/100] = 9.9 Vxpas[1/1000] = 11.3 Vxpas[1/10000] = 12.4

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.1 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.1	27	0.5
2.1	121	2.4
3.2	430	8.4
4.2	682	13.4
5.3	961	18.8
6.4	1038	20.4
7.4	953	18.7
8.5	642	12.6
9.5	228	4.5
10.6	17	0.3

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 3230337
 Nombre d'essais analysés: 5099
 Valeur moyenne:..... 1.4
 Valeur max:..... 4.9
 Valeur min:..... -0.3
 Ecart type:..... .9

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.4 à 1.5
 Vzpas[1/100] = 3.5 Vzpas[1/1000] = 4.2 Vzpas[1/10000] = 4.7

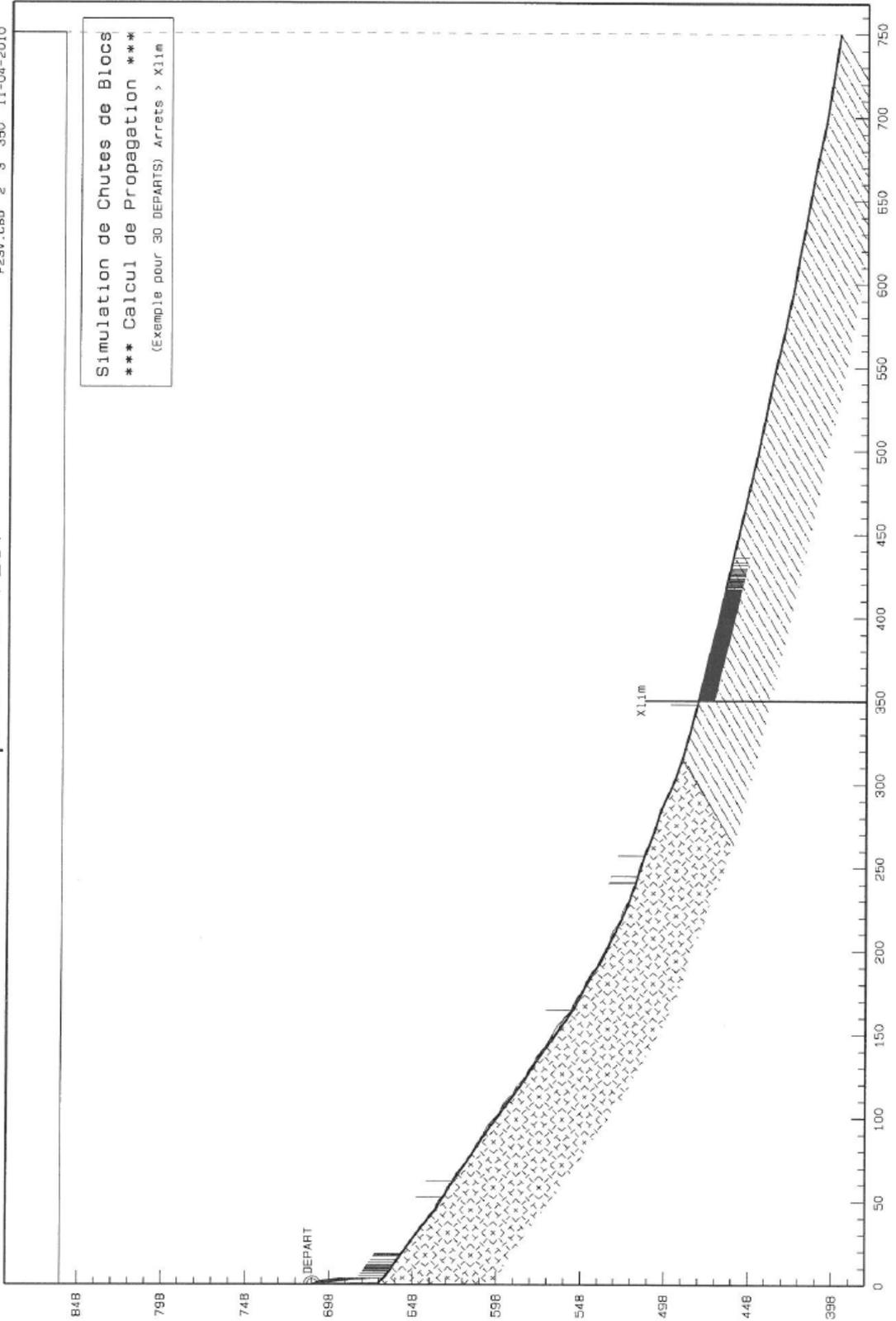
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .5 mètre/sec > à -0.3 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.2	153	3.0
0.7	1005	19.7
1.3	1276	25.0
1.8	1045	20.5
2.3	788	15.5
2.8	426	8.4
3.3	219	4.3
3.8	88	1.7
4.3	77	1.5
4.9	22	0.4

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

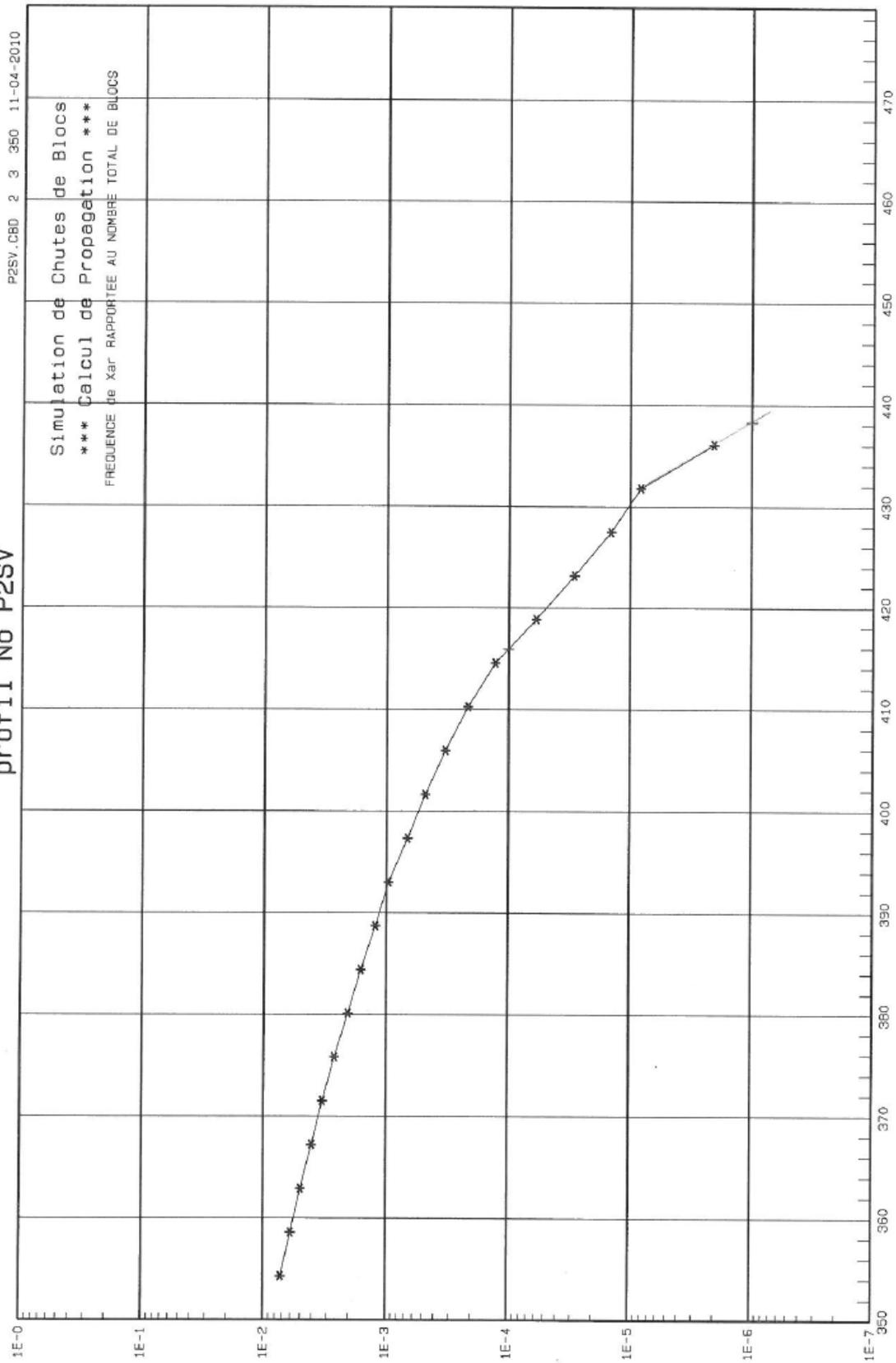
profil No P2SV

P2SV.C8D 2 3 350 11-04-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No P2SV



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2SV

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 708.7
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 972689

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	708.7	89.3	RT	SV
2	0.5	39.3	669.4	46.6	EB	SV
3	5.0	44.1	664.6	34.9	EB	SV
4	15.0	51.1	657.6	35.5	EB	SV
5	30.0	61.8	646.9	38.0	EB	SV
6	45.0	73.5	635.2	31.4	EB	SV
7	60.0	82.7	626.0	34.9	EB	SV
8	75.0	93.1	615.6	33.3	EB	SV
9	90.0	102.9	605.8	36.5	EB	SV
10	105.0	114.0	594.7	36.0	EB	SV
11	120.0	124.9	583.8	32.7	EB	SV
12	135.0	134.6	574.1	35.7	EB	SV
13	150.0	145.4	563.3	34.7	EB	SV
14	165.0	155.7	553.0	27.9	EB	SV
15	180.0	163.7	545.0	31.5	EB	SV
16	195.0	172.9	535.8	26.2	EB	SV
17	210.0	180.3	528.4	24.9	EB	SV
18	225.0	187.2	521.5	19.9	EB	SV
19	240.0	192.7	516.0	17.5	EB	SV
20	255.0	197.4	511.3	21.8	EB	SV
21	270.0	203.4	505.3	17.4	EB	SV
22	285.0	208.1	500.6	25.0	EB	SV
23	300.0	215.1	493.6	19.8	EB	SV
24	315.0	220.5	488.2	15.3	SP	SV
25	330.0	224.6	484.1	15.2	SP	SV
26	345.0	228.7	480.0	13.5	SP	SV
27	360.0	232.3	476.4	13.9	SP	SV
28	375.0	236.0	472.7	13.9	SP	SV
29	390.0	239.7	469.0	13.9	SP	SV
30	405.0	243.4	465.3	12.1	SP	SV

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	420.0	246.7	462.0	13.8	SP	SV
32	435.0	250.3	458.4	13.3	SP	SV
33	450.0	253.9	454.8	12.8	SP	SV
34	465.0	257.3	451.4	12.9	SP	SV
35	480.0	260.7	448.0	13.1	SP	SV
36	495.0	264.2	444.5	12.3	SP	SV
37	510.0	267.5	441.2	11.3	SP	SV
38	525.0	270.5	438.2	11.2	SP	SV
39	540.0	273.4	435.3	12.6	SP	SV
40	555.0	276.8	431.9	13.2	SP	SV
41	570.0	280.3	428.4	12.4	SP	SV
42	585.0	283.6	425.1	11.8	SP	SV
43	600.0	286.7	422.0	9.0	SP	SV
44	615.0	289.1	419.6	11.4	SP	SV
45	630.0	292.1	416.6	10.2	SP	SV

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	645.0	294.9	413.8	10.4	SP	SV
47	660.0	297.6	411.1	11.1	SP	SV
48	675.0	300.6	408.1	12.2	SP	SV
49	690.0	303.8	404.9	10.9	SP	SV
50	705.0	306.7	402.0	8.6	SP	SV
51	720.0	309.0	399.7	9.0	SP	SV
52	735.0	311.3	397.4	8.3	SP	SV
53	750.0	313.5	395.2	8.3	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2SV

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 972689 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	972689	40.9	40.1	938	278	75.0	38.7	5.0	3.8
3	5.0	972689	15.3	4.1	32510	4888	75.0	38.7	29.5	11.6
4	15.0	440003	2.8	1.4	3597	413	75.0	27.9	12.1	5.4
5	30.0	277270	2.8	1.4	4381	528	75.0	23.4	13.8	6.7
6	45.0	254246	3.3	1.6	5725	759	75.0	22.5	16.5	8.3
7	60.0	216784	2.9	1.5	4591	651	75.0	21.1	16.5	8.0
8	75.0	199979	3.2	1.6	5446	785	75.0	20.2	18.2	9.1
9	90.0	186783	3.2	1.5	5237	811	75.0	19.5	18.4	9.4
10	105.0	182286	3.9	1.7	6399	1007	75.0	19.2	20.6	10.5
11	120.0	180059	4.2	1.8	7004	1135	75.0	19.0	21.3	11.2
12	135.0	176581	4.2	1.7	6377	1099	75.0	18.8	21.1	11.1
13	150.0	174681	4.5	1.8	7848	1273	75.0	18.6	22.9	11.9
14	165.0	173108	4.9	1.8	7442	1339	75.0	18.5	23.2	12.3
15	180.0	166210	4.1	1.6	5681	1106	75.0	18.3	22.2	11.2
16	195.0	160055	4.4	1.7	6024	1168	74.9	18.0	23.4	11.7
17	210.0	145619	3.8	1.5	4848	977	74.4	17.4	21.2	10.9
18	225.0	125983	3.3	1.4	4242	855	73.3	16.4	21.2	10.6
19	240.0	95077	2.7	1.3	2760	643	59.1	14.4	19.4	9.8
20	255.0	64456	2.1	1.2	1925	478	48.1	11.8	18.7	9.3
21	270.0	50033	2.2	1.2	1649	426	40.4	10.4	18.7	9.4
22	285.0	33764	1.9	1.1	1220	315	28.9	8.6	17.3	8.8
23	300.0	29169	2.2	1.1	1250	327	28.4	8.0	19.4	9.3
24	315.0	22608	2.0	1.0	917	256	22.8	7.2	17.5	8.6
25	330.0	14455	1.5	0.9	636	191	18.4	6.0	15.3	8.0
26	345.0	8732	1.4	0.9	457	146	14.0	5.1	14.4	7.6
27	360.0	4549	1.2	0.8	334	104	9.7	4.3	12.9	6.9
28	375.0	2125	1.0	0.8	225	75	8.0	3.7	11.8	6.2
29	390.0	861	1.0	0.7	168	53	6.1	3.3	10.7	5.5
30	405.0	240	0.8	0.7	115	39	4.5	3.0	8.6	4.9
31	420.0	22	0.7	0.7	60	27	3.2	2.7	6.7	4.2
32	435.0	1	0.6	0.6	7	7	2.6	2.6	2.3	2.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2SV

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X >= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 972689
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 4.8
 Valeur max:..... 12.8
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... 1.8

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 4.8 à 4.8
 Par[1/100] = 8.9 Par[1/1000] = 10.3 Par[1/10000] = 11.4

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE 1 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
3.5	2136	30.5
4.6	1588	22.7
5.6	1244	17.8
6.6	886	12.7
7.6	556	7.9
8.7	338	4.8
9.7	179	2.6
10.7	59	0.8
11.8	10	0.1
12.8	4	0.1

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 972689
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... .8
 Valeur max:..... 1.2
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .8 à .8
 Hpas[1/100] = 1.1 Hpas[1/1000] = 1.2 Hpas[1/10000] = 1.2

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE .1 mètre > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.1	5	0.1
0.2	0	0.0
0.4	0	0.0
0.5	0	0.0
0.6	0	0.0
0.7	1044	14.9
0.8	2761	39.4
1.0	2423	34.6
1.1	696	9.9
1.2	71	1.0

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2SV

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 972689
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 7.1
 Valeur max:..... 13.1
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.4

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 7.1 à 7.1
 Vxpas[1/100] = 12.6 Vxpas[1/1000] = 14.4 Vxpas[1/10000] = 15.9

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.3 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.3	41	0.6
2.6	216	3.1
3.9	476	6.8
5.2	854	12.2
6.5	1136	16.2
7.8	1439	20.6
9.1	1356	19.4
10.5	987	14.1
11.8	430	6.1
13.1	65	0.9

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 972689
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.8
 Valeur max:..... 5.6
 Valeur min:..... -.4
 Ecart type:..... 1.1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.7 à 1.8
 Vzpas[1/100] = 4.2 Vzpas[1/1000] = 5 Vzpas[1/10000] = 5.7

*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à-.4 ***

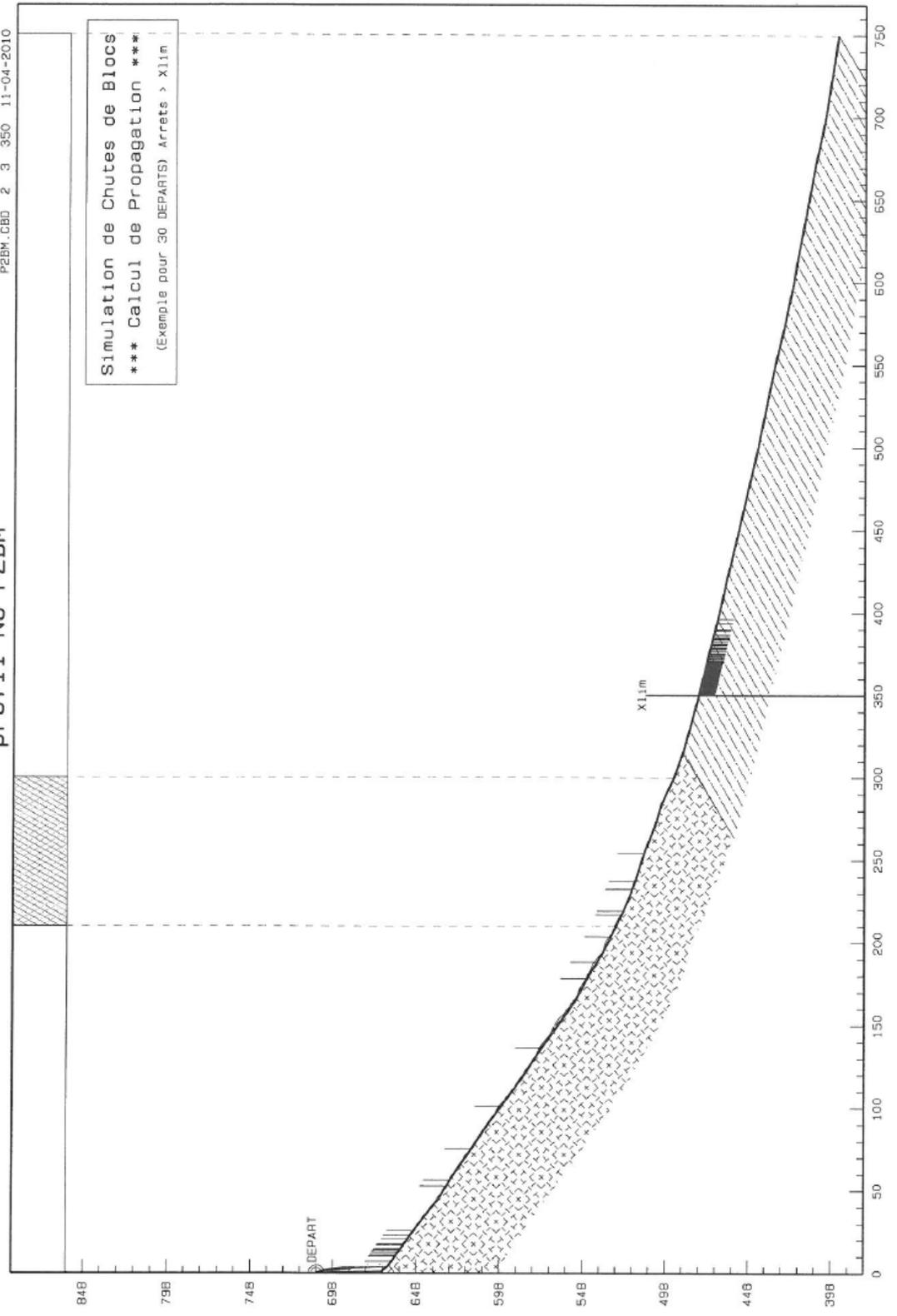
Lim sup	Nombre	freq. %
0.2	156	2.2
0.8	1296	18.5
1.4	1690	24.1
2.0	1375	19.6
2.6	1039	14.8
3.2	713	10.2
3.8	426	6.1
4.4	216	3.1
5.0	73	1.0
5.6	16	0.2

PLANTIN St-PAUL-DE-VARGES

profil No P2BM

P2BM.CBD 2 3 350 11-04-2010

Simulation de Chutes de Blocs
*** Calcul de Propagation ***
(Exemple pour 30 DEPARTS) Arrête > X11m



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2BM

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 708.7
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 602
 Nombre total de simulations:... 1729959

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	708.7	89.3	RT	SV
2	0.5	39.3	669.4	46.6	RT	SV
3	5.0	44.1	664.6	34.9	EB	SV
4	15.0	51.1	657.6	35.5	EB	SV
5	30.0	61.8	646.9	38.0	EB	SV
6	45.0	73.5	635.2	31.4	EB	SV
7	60.0	82.7	626.0	34.9	EB	SV
8	75.0	93.1	615.6	33.3	EB	SV
9	90.0	102.9	605.8	36.5	EB	SV
10	105.0	114.0	594.7	36.0	EB	SV
11	120.0	124.9	583.8	32.7	EB	SV
12	135.0	134.6	574.1	35.7	EB	SV
13	150.0	145.4	563.3	34.7	EB	SV
14	165.0	155.7	553.0	27.9	EB	SV
15	180.0	163.7	545.0	31.5	EB	SV
16	195.0	172.9	535.8	26.2	EB	SV
17	210.0	180.3	528.4	24.9	EB	BM
18	225.0	187.2	521.5	19.9	EB	BM
19	240.0	192.7	516.0	17.5	EB	BM
20	255.0	197.4	511.3	21.8	EB	BM
21	270.0	203.4	505.3	17.4	EB	BM
22	285.0	208.1	500.6	25.0	EB	BM
23	300.0	215.1	493.6	19.8	EB	SV
24	315.0	220.5	488.2	15.3	SP	SV
25	330.0	224.6	484.1	15.2	SP	SV
26	345.0	228.7	480.0	13.5	SP	SV
27	360.0	232.3	476.4	13.9	SP	SV
28	375.0	236.0	472.7	13.9	SP	SV
29	390.0	239.7	469.0	13.9	SP	SV
30	405.0	243.4	465.3	12.1	SP	SV

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	420.0	246.7	462.0	13.8	SP	SV
32	435.0	250.3	458.4	13.3	SP	SV
33	450.0	253.9	454.8	12.8	SP	SV
34	465.0	257.3	451.4	12.9	SP	SV
35	480.0	260.7	448.0	13.1	SP	SV
36	495.0	264.2	444.5	12.3	SP	SV
37	510.0	267.5	441.2	11.3	SP	SV
38	525.0	270.5	438.2	11.2	SP	SV
39	540.0	273.4	435.3	12.6	SP	SV
40	555.0	276.8	431.9	13.2	SP	SV
41	570.0	280.3	428.4	12.4	SP	SV
42	585.0	283.6	425.1	11.8	SP	SV
43	600.0	286.7	422.0	9.0	SP	SV
44	615.0	289.1	419.6	11.4	SP	SV
45	630.0	292.1	416.6	10.2	SP	SV

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	645.0	294.9	413.8	10.4	SP	SV
47	660.0	297.6	411.1	11.1	SP	SV
48	675.0	300.6	408.1	12.2	SP	SV
49	690.0	303.8	404.9	10.9	SP	SV
50	705.0	306.7	402.0	8.6	SP	SV
51	720.0	309.0	399.7	9.0	SP	SV
52	735.0	311.3	397.4	8.3	SP	SV
53	750.0	313.5	395.2	8.3	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2BM

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 1729959 Nb >= Xlim = 602

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	1729959	40.9	40.0	939	279	75.0	38.8	5.0	3.8
3	5.0	1722772	15.3	3.6	32517	4801	75.0	19.3	29.5	12.6
4	15.0	1047377	2.7	1.0	4154	159	75.0	10.9	12.3	5.2
5	30.0	710488	2.9	0.9	4472	168	75.0	7.9	14.6	6.1
6	45.0	653651	3.3	1.0	6233	231	75.0	7.4	17.0	7.3
7	60.0	531592	2.9	0.9	4626	198	75.0	7.0	16.4	6.8
8	75.0	484880	3.3	1.0	5327	240	75.0	6.7	18.5	7.6
9	90.0	445539	3.4	1.0	5393	249	75.0	6.5	19.1	7.7
10	105.0	435213	3.8	1.1	5946	309	75.0	6.4	21.0	8.7
11	120.0	430345	4.4	1.1	6670	348	75.0	6.4	21.3	9.1
12	135.0	419596	4.1	1.0	6327	335	75.0	6.3	21.3	8.8
13	150.0	413757	4.6	1.1	7348	390	75.0	6.3	22.5	9.5
14	165.0	409005	4.9	1.1	7335	410	75.0	6.3	23.6	9.6
15	180.0	366056	4.4	1.0	5701	355	75.0	6.5	21.4	8.6
16	195.0	338045	4.3	1.0	6204	390	74.9	6.6	22.9	8.9
17	210.0	274143	3.9	1.0	4810	361	74.9	6.9	21.8	8.4
18	225.0	172721	3.0	0.9	3781	336	69.8	7.7	21.7	7.8
19	240.0	76876	2.3	0.9	2151	309	54.3	8.5	18.2	7.6
20	255.0	30032	1.8	1.0	1439	251	36.6	8.1	16.9	7.6
21	270.0	17240	1.8	1.0	896	209	30.1	7.1	17.1	7.6
22	285.0	7534	1.4	0.9	508	134	20.8	5.6	15.1	7.0
23	300.0	5330	1.8	0.9	516	124	14.3	5.0	14.2	7.0
24	315.0	3636	1.5	0.9	413	108	11.3	4.5	13.1	6.9
25	330.0	1907	1.1	0.8	269	79	9.9	3.9	12.0	6.3
26	345.0	871	1.0	0.7	190	59	6.7	3.4	11.4	5.7
27	360.0	243	0.9	0.7	118	41	4.9	3.0	9.2	5.0
28	375.0	49	0.8	0.7	69	29	3.7	2.9	7.3	4.2
29	390.0	3	0.6	0.6	22	13	2.8	2.6	4.1	2.9

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P2BM

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1729959
 Nombre d'essais analysés: 602
 Valeur moyenne:..... 5.2
 Valeur max:..... 9.6
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 1.8

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 5.1 à 5.3
 Vxpas[1/100] = 9.4 Vxpas[1/1000] = 10.8 Vxpas[1/10000] = 11.9

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.0	5	0.8
1.9	17	2.8
2.9	46	7.6
3.9	75	12.5
4.8	107	17.8
5.8	126	20.9
6.7	103	17.1
7.7	68	11.3
8.7	43	7.1
9.6	12	2.0

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1729959
 Nombre d'essais analysés: 602
 Valeur moyenne:..... 1.3
 Valeur max:..... 4.4
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .8

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.3 à 1.4
 Vzpas[1/100] = 3.2 Vzpas[1/1000] = 3.8 Vzpas[1/10000] = 4.3

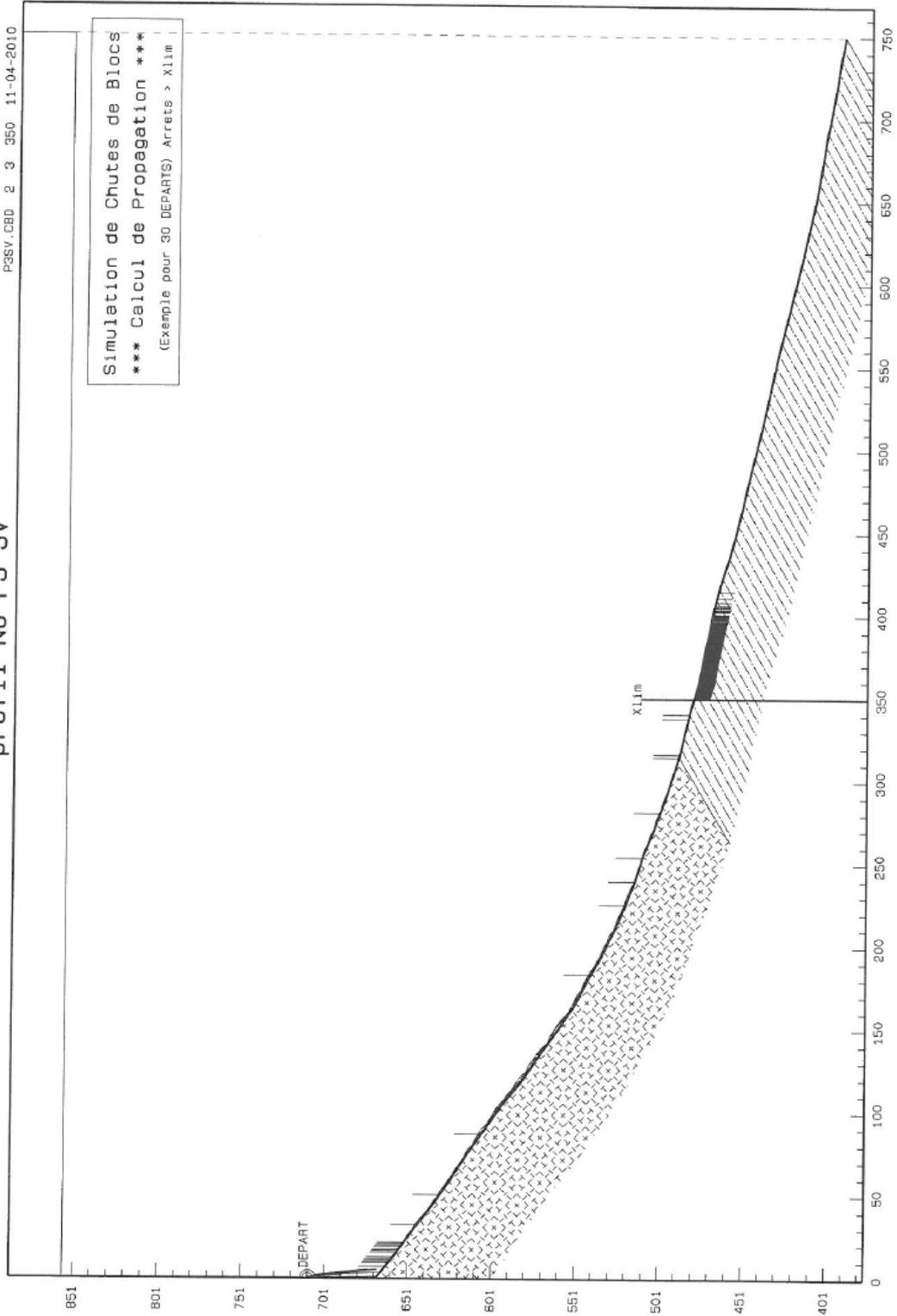
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .4 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.4	63	10.5
0.9	144	23.9
1.3	137	22.8
1.8	99	16.4
2.2	75	12.5
2.6	43	7.1
3.1	25	4.2
3.5	7	1.2
3.9	7	1.2
4.4	2	0.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

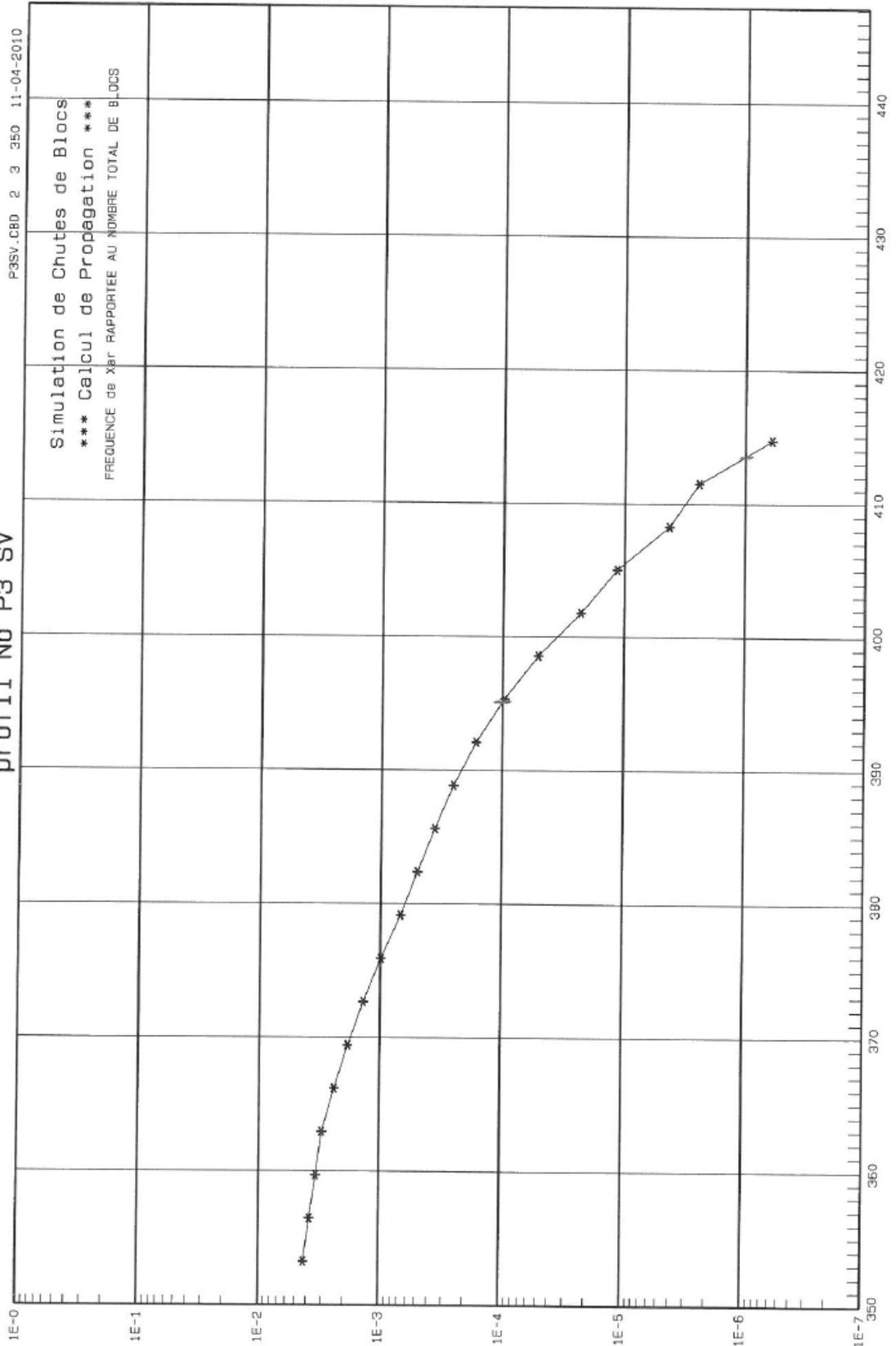
profil No P3 SV

P3SV.OBD 2 3 950 11-04-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No P3 SV



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3 SV

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 711
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 7000
 Nombre total de simulations:... 1658458

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pente section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	711.0	89.3	RT	SV
2	0.5	41.7	669.3	38.8	EB	SV
3	15.0	53.3	657.7	35.8	EB	SV
4	30.0	64.2	646.8	37.8	EB	SV
5	45.0	75.8	635.2	34.1	EB	SV
6	60.0	85.9	625.1	32.3	EB	SV
7	75.0	95.4	615.6	35.0	EB	SV
8	90.0	105.9	605.1	35.1	EB	SV
9	105.0	116.5	594.5	39.4	EB	SV
10	120.0	128.8	582.2	33.5	EB	SV
11	135.0	138.7	572.3	35.3	EB	SV
12	150.0	149.4	561.6	33.7	EB	SV
13	165.0	159.4	551.6	26.7	EB	SV
14	179.9	166.9	544.1	29.6	EB	SV
15	195.0	175.5	535.5	26.0	EB	SV
16	210.0	182.8	528.2	23.3	EB	SV
17	225.0	189.2	521.8	21.6	EB	SV
18	239.9	195.1	515.9	16.7	EB	SV
19	255.0	199.7	511.3	22.1	EB	SV
20	270.0	205.8	505.2	20.2	EB	SV
21	285.0	211.3	499.7	18.6	EB	SV
22	300.0	216.3	494.7	17.8	EB	SV
23	315.0	221.2	489.8	13.2	SP	SV
24	330.0	224.7	486.3	13.4	SP	SV
25	345.0	228.2	482.8	16.2	SP	SV
26	360.0	232.6	478.4	10.1	SP	SV
27	375.0	235.3	475.7	11.9	SP	SV
28	390.0	238.4	472.6	11.1	SP	SV
29	405.0	241.4	469.6	14.6	SP	SV
30	419.9	245.3	465.8	17.9	SP	SV

PROPAGATION P3SV.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	435.0	250.1	460.9	15.1	SP	SV
32	450.0	254.2	456.8	13.6	SP	SV
33	465.0	257.8	453.2	12.2	SP	SV
34	479.9	261.0	450.0	13.6	SP	SV
35	494.9	264.7	446.3	13.4	SP	SV
36	510.0	268.3	442.7	13.0	SP	SV
37	525.0	271.7	439.3	11.5	SP	SV
38	539.9	274.8	436.2	12.1	SP	SV
39	555.0	278.0	433.0	13.1	SP	SV
40	570.0	281.5	429.5	14.3	SP	SV
41	585.0	285.3	425.7	13.4	SP	SV
42	600.0	288.9	422.1	13.6	SP	SV
43	615.0	292.5	418.5	12.3	SP	SV
44	630.0	295.8	415.2	12.4	SP	SV
45	644.9	299.0	412.0	11.0	SP	SV

PROPAGATION P3SV.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	660.0	302.0	409.0	9.4	SP	SV
47	675.0	304.5	406.5	8.6	SP	SV
48	690.0	306.8	404.3	11.3	SP	SV
49	705.0	309.8	401.2	10.2	SP	SV
50	719.9	312.5	398.5	8.2	SP	SV
51	735.0	314.6	396.4	11.4	SP	SV
52	749.9	317.6	393.4	11.4	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3 SV

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 1658458 Nb >= Xlim = 7000

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	1658458	43.3	42.8	939	278	75.0	38.7	5.0	3.8
3	15.0	978114	2.7	1.5	3416	450	75.0	30.5	11.6	5.5
4	30.0	586470	2.6	1.5	3566	504	75.0	24.8	13.3	6.6
5	45.0	517299	3.0	1.6	4747	716	75.0	23.4	16.0	8.1
6	60.0	457160	2.9	1.5	4564	726	75.0	22.1	16.7	8.4
7	75.0	396138	3.0	1.5	4052	718	75.0	20.8	17.1	8.6
8	90.0	370456	3.4	1.6	4825	855	75.0	20.1	19.1	9.5
9	105.0	356401	3.7	1.7	5276	963	75.0	19.7	19.8	10.2
10	120.0	354130	4.8	1.9	7857	1298	75.0	19.6	22.5	11.8
11	135.0	350915	4.6	1.8	6484	1219	75.0	19.5	22.0	11.4
12	150.0	347777	4.7	1.8	7087	1358	75.0	19.5	23.1	12.0
13	165.0	343755	4.7	1.8	6918	1375	75.0	19.4	23.6	12.1
14	179.9	322498	3.8	1.6	5429	1100	75.0	19.2	21.0	11.0
15	195.0	299636	4.0	1.6	5591	1110	74.9	18.8	22.6	11.2
16	210.0	263234	3.6	1.5	4285	950	74.6	17.9	21.6	10.7
17	225.0	213999	3.1	1.4	3463	790	69.7	16.4	20.4	10.2
18	239.9	164621	2.7	1.3	2684	646	55.3	14.4	20.0	9.9
19	255.0	107433	2.1	1.1	1672	459	43.3	11.5	18.2	9.3
20	270.0	84709	2.2	1.2	1628	418	36.3	10.2	19.2	9.4
21	285.0	63917	2.1	1.1	1279	339	29.3	8.9	18.0	9.0
22	300.0	45280	1.8	1.0	961	269	24.3	7.6	16.7	8.6
23	315.0	30862	1.6	1.0	688	212	19.1	6.5	16.6	8.2
24	330.0	16728	1.3	0.9	435	149	13.6	5.2	14.3	7.5
25	345.0	8366	1.1	0.8	298	108	10.8	4.3	13.0	7.0
26	360.0	4910	1.2	0.8	242	87	8.0	3.9	12.7	6.6
27	375.0	1242	0.9	0.7	152	52	5.5	3.2	9.8	5.5
28	390.0	233	0.8	0.7	86	32	4.2	2.9	8.0	4.5
29	405.0	7	0.7	0.6	36	16	2.8	2.6	5.2	3.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3 SV

*** STATISTIQUE SUR Xar (mètre) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1658458
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 366
 Valeur max:..... 414.7
 Valeur min:..... 350
 Ecart type:..... 10.7

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 365.9 à 366.2
 Xar[1/100] = 390.9 Xar[1/1000] = 398.9 Xar[1/10000] = 405.7

*** REPARTITION DE Xar PAR TRANCHES DE 3.2 mètre > à 350 ***

Lim sup	Nombre	freq. %	Narr/Ndép
353.2	738	10.5	4.22E-03
356.5	702	10.0	3.78E-03
359.7	583	8.3	3.35E-03
362.9	1039	14.8	3.00E-03
366.2	888	12.7	2.37E-03
369.4	770	11.0	1.84E-03
372.7	641	9.2	1.37E-03
375.9	503	7.2	9.88E-04
379.1	309	4.4	6.85E-04
382.4	231	3.3	4.99E-04
385.6	178	2.5	3.59E-04
388.8	145	2.1	2.52E-04
392.1	113	1.6	1.65E-04
395.3	75	1.1	9.65E-05
398.6	47	0.7	5.13E-05
401.8	19	0.3	2.29E-05
405.0	12	0.2	1.15E-05
408.3	3	0.0	4.22E-06
411.5	3	0.0	2.41E-06
414.7	1	0.0	6.03E-07

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3 SV

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1658458
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 4.2
 Valeur max:..... 10.2
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... 1.3

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 4.1 à 4.2
 Par[1/100] = 7.2 Par[1/1000] = 8.2 Par[1/10000] = 9

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE .8 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
3.3	2181	31.2
4.0	1678	24.0
4.8	1182	16.9
5.6	874	12.5
6.3	548	7.8
7.1	307	4.4
7.9	162	2.3
8.6	48	0.7
9.4	15	0.2
10.2	5	0.1

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1658458
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... .8
 Valeur max:..... 1.2
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .8 à .8
 Hpas[1/100] = 1 Hpas[1/1000] = 1.1 Hpas[1/10000] = 1.1

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE .1 mètre > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.1	1	0.0
0.2	0	0.0
0.4	0	0.0
0.5	0	0.0
0.6	0	0.0
0.7	1173	16.8
0.8	3232	46.2
0.9	2152	30.7
1.1	423	6.0
1.2	19	0.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3 SV

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1658458
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 6.6
 Valeur max:..... 12.1
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... 2.2

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 6.5 à 6.6
 Vxpas[1/100] = 11.8 Vxpas[1/1000] = 13.5 Vxpas[1/10000] = 14.9

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE 1.2 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.2	26	0.4
2.4	222	3.2
3.6	499	7.1
4.8	844	12.1
6.0	1210	17.3
7.2	1311	18.7
8.4	1330	19.0
9.6	1007	14.4
10.9	444	6.3
12.1	107	1.5

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 1658458
 Nombre d'essais analysés: 7000
 Valeur moyenne:..... 1.9
 Valeur max:..... 6.2
 Valeur min:..... -1
 Ecart type:..... 1.1

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.9 à 1.9
 Vzpas[1/100] = 4.4 Vzpas[1/1000] = 5.3 Vzpas[1/10000] = 5.9

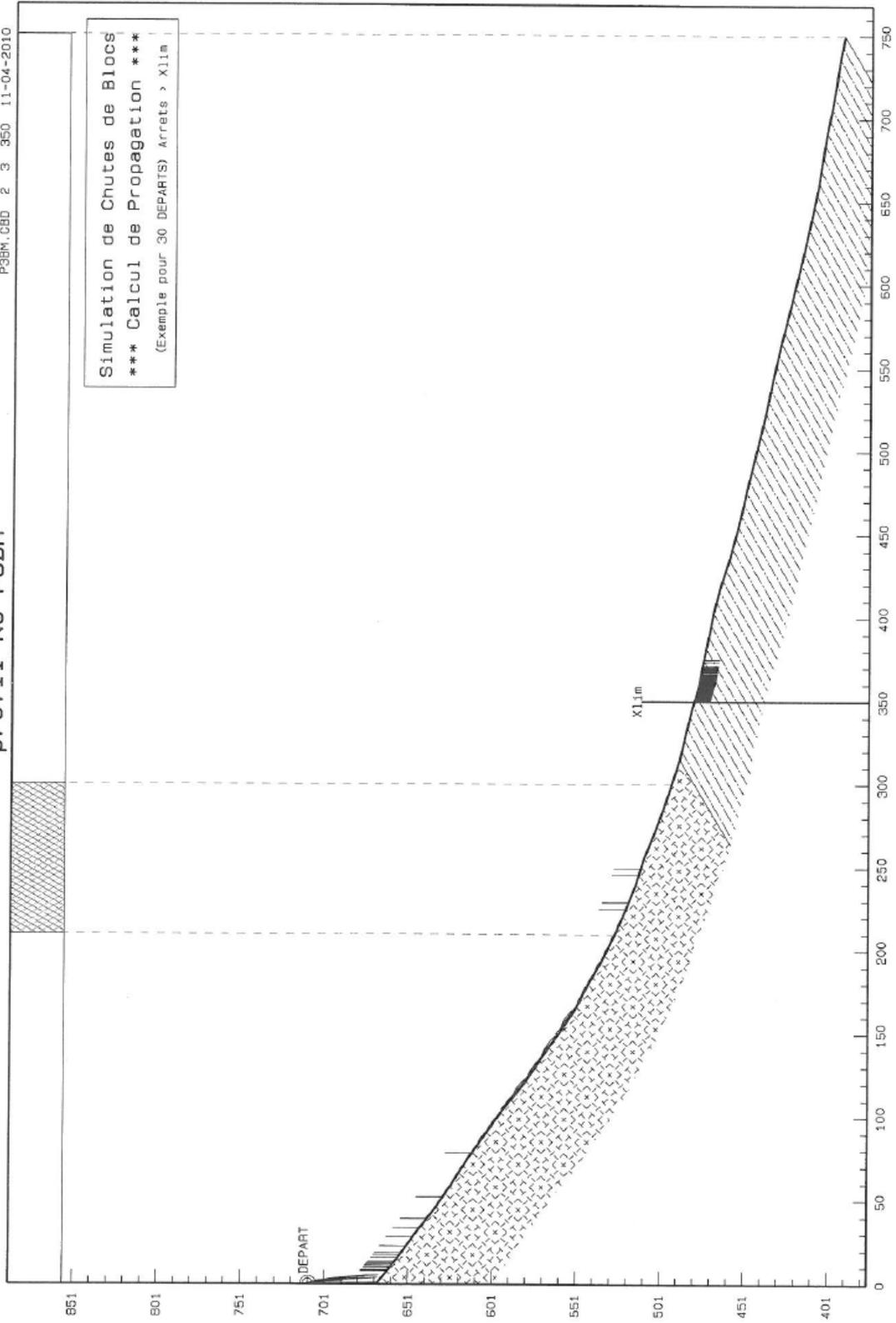
*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .6 mètre/sec > à -1 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.5	455	6.5
1.1	1413	20.2
1.8	1679	24.0
2.4	1318	18.8
3.0	960	13.7
3.7	665	9.5
4.3	338	4.8
4.9	96	1.4
5.5	56	0.8
6.2	20	0.3

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

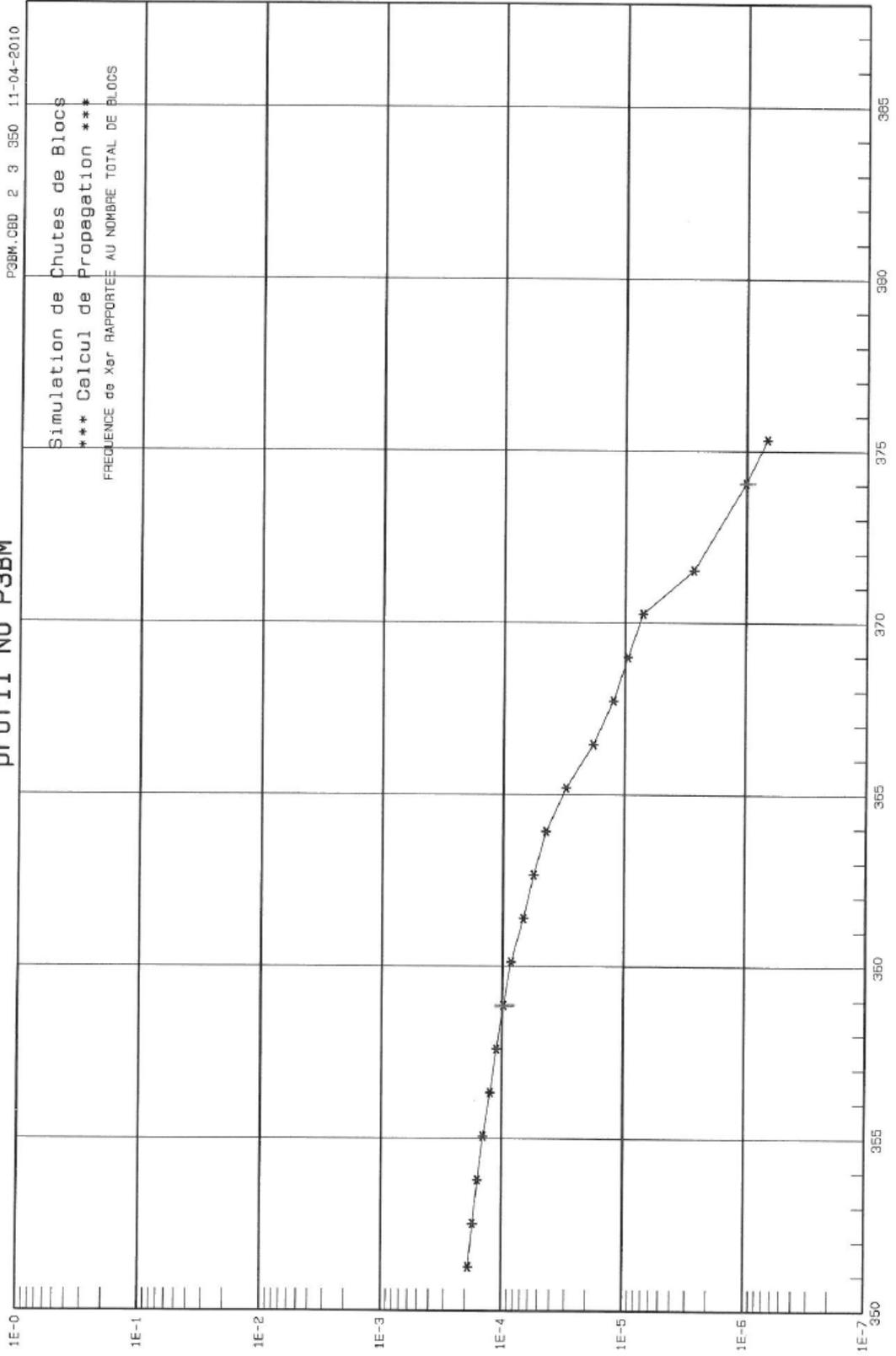
profil No P3BM

P3BM.CBD 2 3 350 11-04-2010



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES

profil No P3BM



PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3BM

*** Données du profil ***

Fragilité des blocs:..... 5
 coefficient de forme:..... 2
 coefficient de dispersion..... 3
 Poids Volumique:.....(t/m3) 2.5
 Volume minimal:.....(m3) 1
 Volume maximal:.....(m3) 30
 Point de départ:..... 1
 Altitude de départ:..... 711
 Xlim..... 350
 Nombre de blocs dépassant Xlim: 558
 Nombre total de simulations:... 2961235

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
1	0.0	0.0	711.0	89.3	RT	SV
2	0.5	41.7	669.3	38.8	EB	SV
3	15.0	53.3	657.7	35.8	EB	SV
4	30.0	64.2	646.8	37.8	EB	SV
5	45.0	75.8	635.2	34.1	EB	SV
6	60.0	85.9	625.1	32.3	EB	SV
7	75.0	95.4	615.6	35.0	EB	SV
8	90.0	105.9	605.1	35.1	EB	SV
9	105.0	116.5	594.5	39.4	EB	SV
10	120.0	128.8	582.2	33.5	EB	SV
11	135.0	138.7	572.3	35.3	EB	SV
12	150.0	149.4	561.6	33.7	EB	SV
13	165.0	159.4	551.6	26.7	EB	SV
14	179.9	166.9	544.1	29.6	EB	SV
15	195.0	175.5	535.5	26.0	EB	SV
16	210.0	182.8	528.2	23.3	EB	BM
17	225.0	189.2	521.8	21.6	EB	BM
18	239.9	195.1	515.9	16.7	EB	BM
19	255.0	199.7	511.3	22.1	EB	BM
20	270.0	205.8	505.2	20.2	EB	BM
21	285.0	211.3	499.7	18.6	EB	BM
22	300.0	216.3	494.7	17.8	EB	SV
23	315.0	221.2	489.8	13.2	SP	SV
24	330.0	224.7	486.3	13.4	SP	SV
25	345.0	228.2	482.8	16.2	SP	SV
26	360.0	232.6	478.4	10.1	SP	SV
27	375.0	235.3	475.7	11.9	SP	SV
28	390.0	238.4	472.6	11.1	SP	SV
29	405.0	241.4	469.6	14.6	SP	SV
30	419.9	245.3	465.8	17.9	SP	SV

PROPAGATION P3BM.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
31	435.0	250.1	460.9	15.1	SP	SV
32	450.0	254.2	456.8	13.6	SP	SV
33	465.0	257.8	453.2	12.2	SP	SV
34	479.9	261.0	450.0	13.6	SP	SV
35	494.9	264.7	446.3	13.4	SP	SV
36	510.0	268.3	442.7	13.0	SP	SV
37	525.0	271.7	439.3	11.5	SP	SV
38	539.9	274.8	436.2	12.1	SP	SV
39	555.0	278.0	433.0	13.1	SP	SV
40	570.0	281.5	429.5	14.3	SP	SV
41	585.0	285.3	425.7	13.4	SP	SV
42	600.0	288.9	422.1	13.6	SP	SV
43	615.0	292.5	418.5	12.3	SP	SV
44	630.0	295.8	415.2	12.4	SP	SV
45	644.9	299.0	412.0	11.0	SP	SV

PROPAGATION P3BM.CBD 2 3 11-04-2010 (suite)

Section No	Xc début	Zc début	altitude début	pen- te section	Nat.sol section	Nat.Veg section
46	660.0	302.0	409.0	9.4	SP	SV
47	675.0	304.5	406.5	8.6	SP	SV
48	690.0	306.8	404.3	11.3	SP	SV
49	705.0	309.8	401.2	10.2	SP	SV
50	719.9	312.5	398.5	8.2	SP	SV
51	735.0	314.6	396.4	11.4	SP	SV
52	749.9	317.6	393.4	11.4	SP	SV

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3BM

*** Résultats au passage des points du profil ***

Xlim = 350 m Ntotal = 2961235 Nb >= Xlim = 558

Npt	Xpt	Nbloc	Hmax	Hmoy	Emax	Emoy	Pmax	Pmoy	Vmax	Vmoy
2	0.5	2961235	43.3	41.6	939	278	75.0	38.7	5.0	3.7
3	15.0	1747050	2.7	1.5	3414	451	75.0	30.5	11.6	5.5
4	30.0	1049703	2.7	1.5	3762	504	75.0	24.9	13.5	6.6
5	45.0	925137	3.0	1.6	4983	716	75.0	23.4	16.0	8.1
6	60.0	817872	2.9	1.5	4847	727	75.0	22.2	16.7	8.4
7	75.0	708407	2.9	1.5	4172	718	75.0	20.8	17.1	8.6
8	90.0	662687	3.4	1.6	4932	855	75.0	20.1	19.4	9.5
9	105.0	637869	3.9	1.7	5246	963	75.0	19.7	20.0	10.2
10	120.0	633774	4.8	1.9	7049	1299	75.0	19.7	22.6	11.8
11	135.0	627981	4.6	1.8	6528	1218	75.0	19.6	22.0	11.4
12	150.0	622268	4.6	1.8	7389	1358	75.0	19.5	23.0	12.0
13	165.0	615070	4.7	1.8	7185	1374	75.0	19.4	23.1	12.1
14	179.9	576959	3.9	1.6	5588	1099	74.9	19.2	21.0	10.9
15	195.0	535953	4.0	1.6	6112	1108	74.9	18.8	22.7	11.2
16	210.0	470829	3.6	1.5	4656	948	74.9	17.9	21.7	10.6
17	225.0	345451	2.9	1.3	3144	667	63.2	15.7	21.0	9.6
18	239.9	224567	2.3	1.2	2115	480	50.2	12.7	18.8	9.0
19	255.0	112946	1.7	1.0	1107	282	34.8	9.2	16.4	8.1
20	270.0	71388	1.9	1.0	891	222	26.0	7.5	16.2	7.9
21	285.0	39803	1.6	0.9	658	154	19.4	6.0	15.1	7.2
22	300.0	18753	1.4	0.8	367	100	12.2	4.7	13.1	6.4
23	315.0	10367	1.2	0.8	318	85	10.0	4.1	13.1	6.3
24	330.0	3665	1.0	0.7	177	56	7.5	3.5	11.2	5.5
25	345.0	890	0.8	0.7	120	36	5.0	3.0	9.5	4.7
26	360.0	215	0.8	0.7	93	29	4.5	2.8	8.2	4.3
27	375.0	1	0.6	0.6	3	3	2.7	2.7	1.6	1.6

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3BM

*** STATISTIQUE SUR Par (tonne) POUR X>= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 2961235
 Nombre d'essais analysés: 558
 Valeur moyenne:..... 3
 Valeur max:..... 4.7
 Valeur min:..... 2.5
 Ecart type:..... .4

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 2.9 à 3
 Par[1/100] = 3.9 Par[1/1000] = 4.2 Par[1/10000] = 4.4

*** REPARTITION DE Par PAR TRANCHES DE .2 tonne > à 2.5 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
2.7	182	32.6
2.9	140	25.1
3.1	104	18.6
3.4	57	10.2
3.6	30	5.4
3.8	23	4.1
4.0	7	1.3
4.2	6	1.1
4.4	6	1.1
4.7	3	0.5

*** STATISTIQUE SUR Hpas (mètre) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 2961235
 Nombre d'essais analysés: 558
 Valeur moyenne:..... .7
 Valeur max:..... .9
 Valeur min:..... .6
 Ecart type:..... 0

Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: .7 à .7
 Hpas[1/100] = .8 Hpas[1/1000] = .8 Hpas[1/10000] = .9

*** REPARTITION DE Hpas PAR TRANCHES DE 0 mètre > à .6 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.7	92	16.5
0.7	149	26.7
0.7	129	23.1
0.7	57	10.2
0.7	62	11.1
0.8	35	6.3
0.8	18	3.2
0.8	8	1.4
0.8	4	0.7
0.9	4	0.7

PLANTIN St-PAUL-DE-VARCES - Profil N°P3BM

*** STATISTIQUE SUR Vxpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 2961235
 Nombre d'essais analysés: 558
 Valeur moyenne:..... 4.5
 Valeur max:..... 8.5
 Valeur min:..... .9
 Ecart type:..... 1.4
 Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 4.4 à 4.5
 Vxpas[1/100] = 7.8 Vxpas[1/1000] = 8.9 Vxpas[1/10000] = 9.7

*** REPARTITION DE Vxpas PAR TRANCHES DE .8 mètre/sec > à .9 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
1.7	15	2.7
2.4	29	5.2
3.2	68	12.2
4.0	96	17.2
4.7	118	21.1
5.5	84	15.1
6.2	92	16.5
7.0	37	6.6
7.8	17	3.0
8.5	2	0.4

*** STATISTIQUE SUR Vzpas (mètre/sec) POUR X= 350 m ***

Nombre de Simulations:... 2961235
 Nombre d'essais analysés: 558
 Valeur moyenne:..... 1.3
 Valeur max:..... 3.8
 Valeur min:..... 0
 Ecart type:..... .7
 Intervalle de confiance à 99% sur la valeur moyenne: 1.2 à 1.3
 Vzpas[1/100] = 3 Vzpas[1/1000] = 3.5 Vzpas[1/10000] = 4

*** REPARTITION DE Vzpas PAR TRANCHES DE .4 mètre/sec > à 0 ***

Lim sup	Nombre	freq. %
0.4	51	9.1
0.8	105	18.8
1.1	99	17.7
1.5	107	19.2
1.9	88	15.8
2.3	44	7.9
2.6	38	6.8
3.0	20	3.6
3.4	3	0.5
3.8	3	0.5

VI Présentation de l'étude trajectographique réalisée par le Cemagref

Dans le cadre de cette étude, le Cemagref a utilisé deux outils de simulation pour estimer les enveloppes de propagation des blocs rocheux sur la zone d'étude. Le premier outil, Rockfor^{LIN}, est basé sur le concept de la ligne d'énergie et à ce titre ne nécessite pas de description des matériaux de couverture du site. Le deuxième quant à lui, Rockyfor3D, est un outil de simulation trajectographique en 3D basé sur la modélisation des processus régissant la propagation d'un bloc rocheux. Mais avant d'utiliser un outil de simulation de propagation il convient bien évidemment de déterminer les zones de départ desquelles le volume du projectile de référence pour les travaux de simulations sera « lâché ». Le Cemagref a développé un principe de prédétermination des zones de départ à partir de l'analyse de la carte des pentes générée avec un MNT. Avant de présenter dans le détail les outils de simulation, nous allons tout d'abord présenter ce principe de prédétermination des zones de départ. Il convient de préciser que ce principe n'a été utilisé que pour alimenter le modèle statistique Rockfor^{LIN}.

VI.1 Présentation du principe de prédétermination des zones de départ développé par le Cemagref.

Les zones de départ réelles de chutes de pierre sont des barres rocheuses et des falaises. La localisation de ces zones peut se faire soit par reconnaissance de terrain, soit par photo-interprétation soit en utilisant un MNT. Les deux premières méthodes nécessitent une vision exhaustive des sites. Lors des inventaires de terrain il n'est pas toujours possible de parcourir la totalité du territoire étudié. La photo-interprétation peut s'avérer impossible à réaliser, s'il existe des zones d'ombres portées sur les documents photographiques et/ou si le couvert forestier masque des barres rocheuses. De plus, la lecture d'une carte géologique n'est pas toujours chose facile. Par contre l'emploi d'un MNT, s'il est de qualité et si le traitement est robuste, offre la possibilité d'avoir une vision exhaustive des zones de départ probable présentes sur l'ensemble du site étudié.

Dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit, par visualisation en 3 dimensions du secteur d'étude, soit, à partir du plan dérivé du MNT qu'est la carte des pentes. En fonction de la résolution du MNT (aussi dénommé le pas du MNT), il faut définir la valeur de pente minimale permettant de détecter le plus grand nombre possible de falaise et barre rocheuse.

Ainsi par exemple, dans un MNT au pas de 50 m (tel que celui de l'IGN), une falaise d'une hauteur de 20 m, dont la pente est égale à 60° et situé à l'amont d'une pente

d'éboulis ayant une pente de 35° , l'angle α évalué par le MNT au pas de 50 m sera égal à 43° .

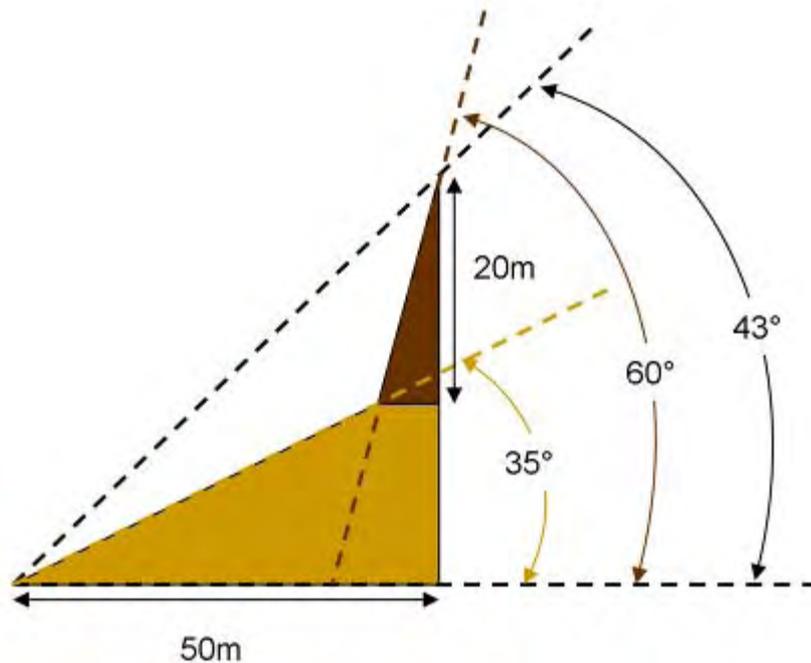


Fig. 1 : Exemple de valeur d'angle de pente sur un MNT au pas de 50m (celui de l'IGN) et dans la réalité

Par conséquent il est nécessaire pour un MNT donné, d'estimer l'angle α évalué par celui-ci dans la carte des pentes qui permet de caractériser les falaises le plus précisément possible.

Pour déterminer cette valeur seuil en fonction de la résolution des MNT, le Cemagref a, à partir des sites pour lesquels il dispose des valeurs de pente des zones de départ actives et connues, de MNT issus de données LIDAR ou de relevés topographiques, analysé la valeur de la pente minimale permettant d'identifier ces zones de départ.

Pour 2 de nos sites, en Maurienne, nous disposons du MNT au pas de 50m que nous avons ré-échantillonnés au pas de 25m afin de comparer les résultats obtenus avec les données de l'IGN à celles des données LIDAR. De plus nous avons dégradé, en fonction des sites, les données LIDAR ou de terrain initiales afin de construire des MNT de 2, 5, 10 et 25m

Au total nous avons travaillé avec les données de 9 sites : 5 en France, 2 en Autriche, 1 en Suisse et 1 au Liechtenstein. Pour ces sites nous disposons de MNT au pas de 1, 25 et 50m. Les MNT au pas de 1 m sont des MNT LiDAR. Nous avons dégradé, en fonction des sites, les données LIDAR ou de terrain initiales afin de construire des

MNT de 2, 5, 10 et 25m. Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus pour chacun de ces sites. Les sources de données initiales utilisées pour ré-échantillonner les MNT sont indiquées en gras dans ces tableaux.

Site du Montafon Autriche (Land duVoralberg)

Résolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
1(LIDAR)	28.7	78.7	60.3	6.5
2 (LIDAR)	35.0	77.2	60.3	5.7
5 (LIDAR)	47.9	72.0	59.8	4.4
10 (LIDAR)	45.3	65.8	58.1	4.5
25 (LIDAR)	39.3	57.7	51.4	4.2
50 (LIDAR)	39.4	51.1	43.8	5.2

Maurienne site 1, France

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
1 (LIDAR)	60	83.2	66.9	5.1
2 (LIDAR)	25.9	80.8	64.9	5.7
5 (LIDAR)	35.8	75.3	60.7	6.3
10 (LIDAR)	30.0	68.4	56.2	7.4
25 (LIDAR)	32.4	57.3	48.5	6.3
50 (LIDAR)	24.5	54.2	44.6	7,3
25 (IGN)	17.6	47.7	39.6	7.7
50 (IGN)	13.5	45.3	38.3	14.1

Maurienne site 2, France

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
1 (LIDAR)	45	83.0	55.2	8.2
2 (LIDAR)	30.2	80.8	54.4	8.4
5 (LIDAR)	26.7	75.3	52.0	8.5
10 (LIDAR)	24.5	68.4	49.6	8.1
25 (LIDAR)	17.4	57.3	42.7	8.8
50 (LIDAR)	14.8	55.1.	42.7	9,1
25 (IGN)	11.7	49.4	38.5	8.2
50 (IGN)	13.5	46.2	38.5	9.2

Vic-sur-Cère France

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
5 (levé terrain)	31.6	71.2	57.5	7.1
10	41.6	63.9	52.4	5.9
25	32.1	48.8	41.6	5.6

Vallée du Wipptal, Austria (Land du Tyrol)

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
5 (LIDAR)	0	89.6	48.5	14.7

Site de Steg, Liechtenstein

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
2 (LIDAR)	19.0	83.8	52.5	13.5
5 (LIDAR)	0	84.1	51.0	19.7

Site de Plaffeien, Switzerland

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
1 (LIDAR)	32.2	57.5	48.6	3.6
10 (LIDAR)	24.1	50.7	42.2	6.1

Site de Mont-Dore, France

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
2.5 (levé terrain)	22.9	72.9	46.2	14.0
10 (levé terrain)	23.9	56.9	40.2	8.8

Site de St. Martin le Vinoux, France

Resolution (m)	min (°)	max (°)	moy. (°)	std (°)
5 (levé terrain)	45.7	45.7	45.7	0

Avec l'ensemble de ces données on obtient le graphique présenté dans la figure 2.

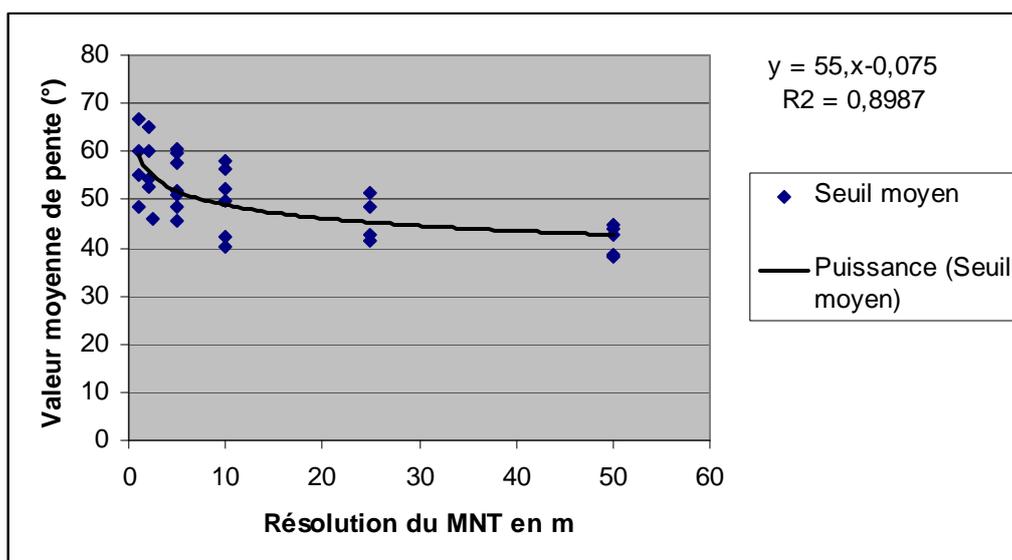


Fig. 2 : Valeur seuil moyenne de la pente indicatrice d'une zone de départ active en fonction de la résolution du MNT

A partir de ces données nous utilisons le tableau 1 pour déterminer la valeur seuil de l'angle α caractérisant les zones de départ en fonction de la résolution du MNT utilisé.

Résolution du MNT (en m)	Seuil d'angle de la pente à utiliser (en °)
1	55
2	52
5	49
10	46
25	43
50	41

Valeur seuil de l'angle α caractérisant les zones de départ en fonction de la résolution du MNT utilisé

Pour d'autres valeur de résolution que celles affichées dans ce tableau, nous utilisons la formule suivante :

$$\alpha = 55^{\circ} \cdot \text{RES}^{-0,075}$$

avec RES = la résolution du MNT

(par exemple si la, résolution est de 15x15 m alors RES = 15)

Cette formule a été construite en ajustant une courbe de régression sur les données de la fig. 2

Les résultats obtenus avec cette valeur d'angle doivent impérativement faire l'objet d'une validation par comparaisons avec la réalité du terrain et les données relatives aux phénomènes passés. Il est intéressant de noter qu'au pas de 50 m la valeur

moyenne seuil obtenue avec les MNT LIDAR est de $43,7^\circ$ alors qu'avec les MNT IGN elle est de $38,4^\circ$. La différence est significative et s'explique par les erreurs altimétriques des MNT réalisés par photogrammétrie et par la généralisation des pentes lors des interpolations aux pas de 25 et 50 m.

VI.2 Présentation du modèle statistique Rockfor^{LIN}

Il existe un type de modèle dit statistique qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie, principe similaire à celui utilisé pour l'élaboration du modèle statistique norvégien pour les avalanches.

Cette méthode développée par HEIM A. en 1932 repose sur un principe simple et trivial:

- un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide.

Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Cf. Figure. 3). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

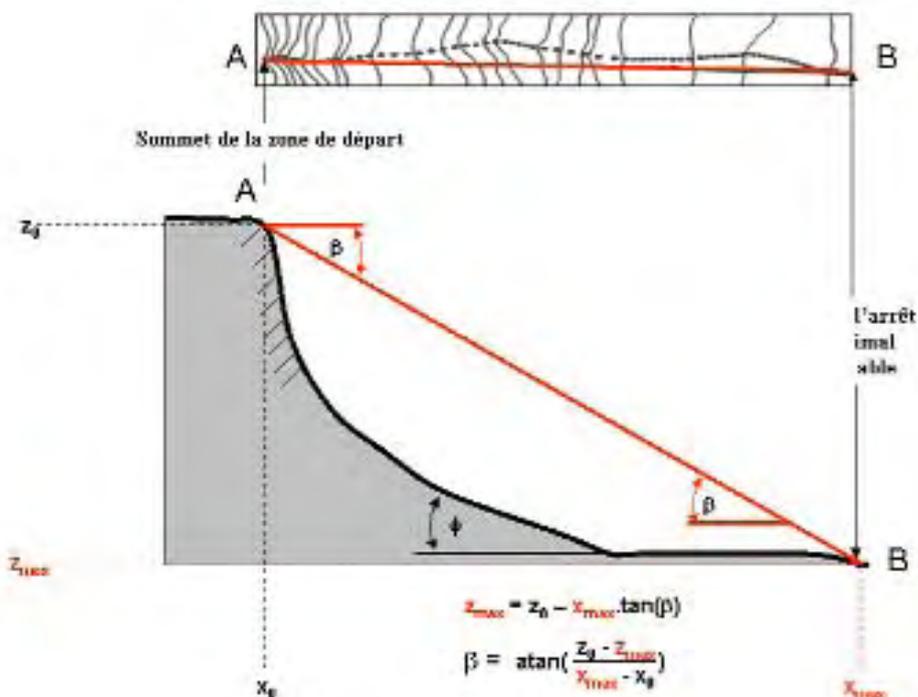


Fig. 3 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

A partir du profil en long de la pente à partir d'une zone de départ, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ A.

Depuis sa formalisation, ce principe a fait l'objet de nombreuses études. Différents auteurs se sont, entre autre, intéressés à l'adaptation de cette méthode en fonction de la localisation du point de départ A et du type de profil en long à utiliser pour les calculs. Ainsi des auteurs tels que Lied (1977), Wieczorek et al. (1990) et Evans and Hungr (1993) proposent d'utiliser non le point sommital des falaises mais les sommets des « talus » (intersection entre la pente et le pied de falaise). Ils ont ainsi élaboré le principe « d'angle d'ombrage » (Shadow angle) (cf. Fig.4). La valeur de l'angle de la ligne d'énergie étant pour chacun de ces auteurs de respectivement : 28° , 22° et $27,5^\circ$. L'utilisation du shadow angle nécessite de déterminer le sommet des « talus ». Une telle détermination n'est pas chose aisée à réaliser de façon automatique à partir de l'analyse d'un MNT. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas retenu ce principe de l'angle d'ombrage.

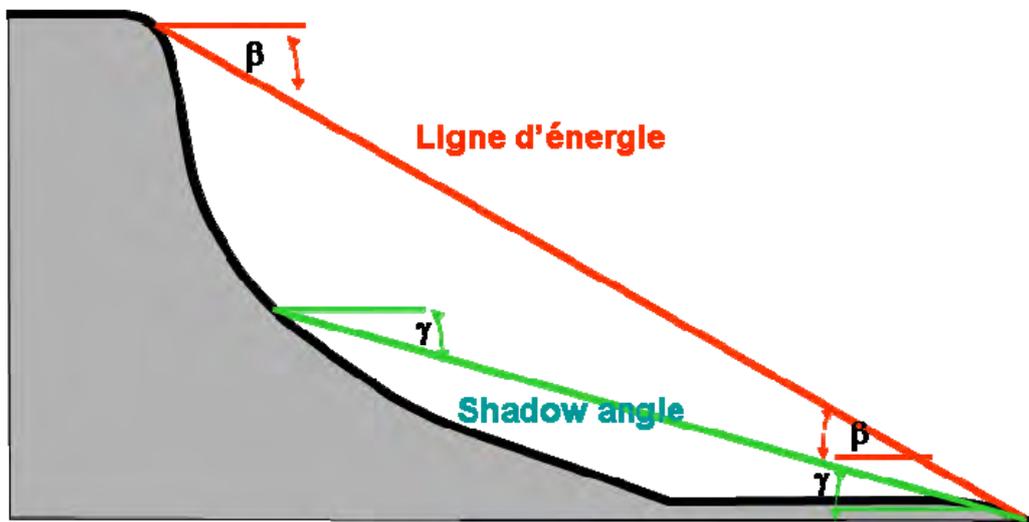


Fig. 4 : Principe de la ligne d'énergie selon Heim (1932) et principe du shadow angle selon Lied (1977)

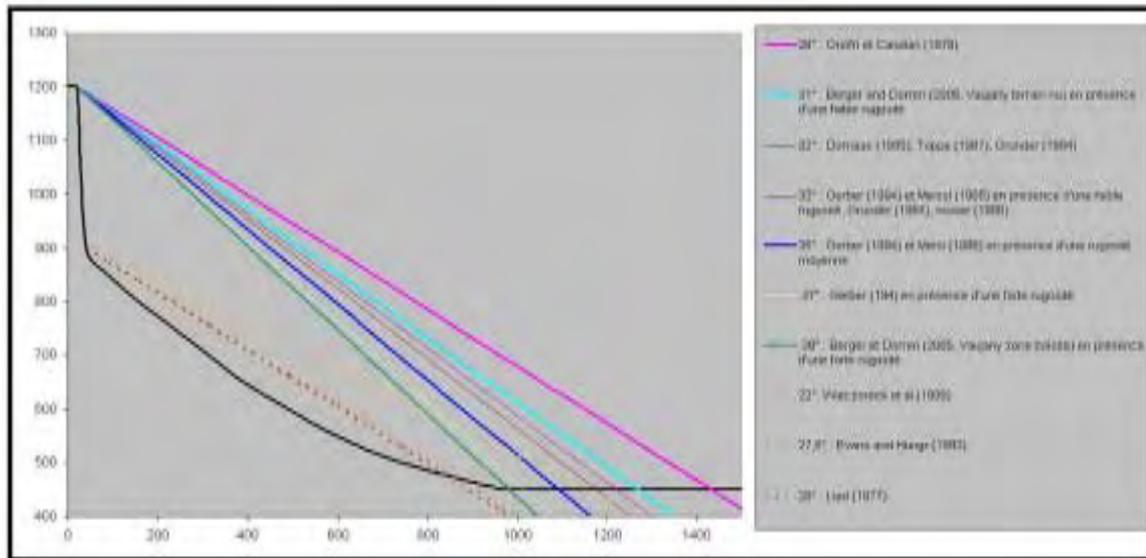


Fig.5 : Comparaison des résultats du calcul de la ligne d'énergie en fonction des valeurs d'angle de différents auteurs et suivant les principes de Heim et de Lied.

En ce qui concerne le choix d'implantation du profil en long, il existe deux grandes écoles de pensées. La première préconise d'utiliser la ligne de plus grande pente et est à l'origine du concept de l'angle géométrique (aussi dénommé « reach angle »). La deuxième quant à elle propose d'utiliser le profil en long correspondant au trajet le plus probable sur la pente et est ainsi à l'origine du concept de « l'angle de trajet » (travel angle). La figure 6 présente ces deux concepts.

Avec le principe de l'angle de trajet, l'angle de la ligne d'énergie est plus faible qu'avec le principe de l'angle géométrique. La différence entre les deux angles est de l'ordre du degré. Le principe de la ligne d'énergie avec l'angle de trajet est là encore plus difficile à traduire dans un utilitaire de calcul permettant de travailler sur de vastes surfaces géographiques. En effet, il faut développer ou utiliser un principe de calcul d'écoulement permettant de déterminer les lignes de plus grandes pentes, les thalwegs et micro-thalwegs présents.

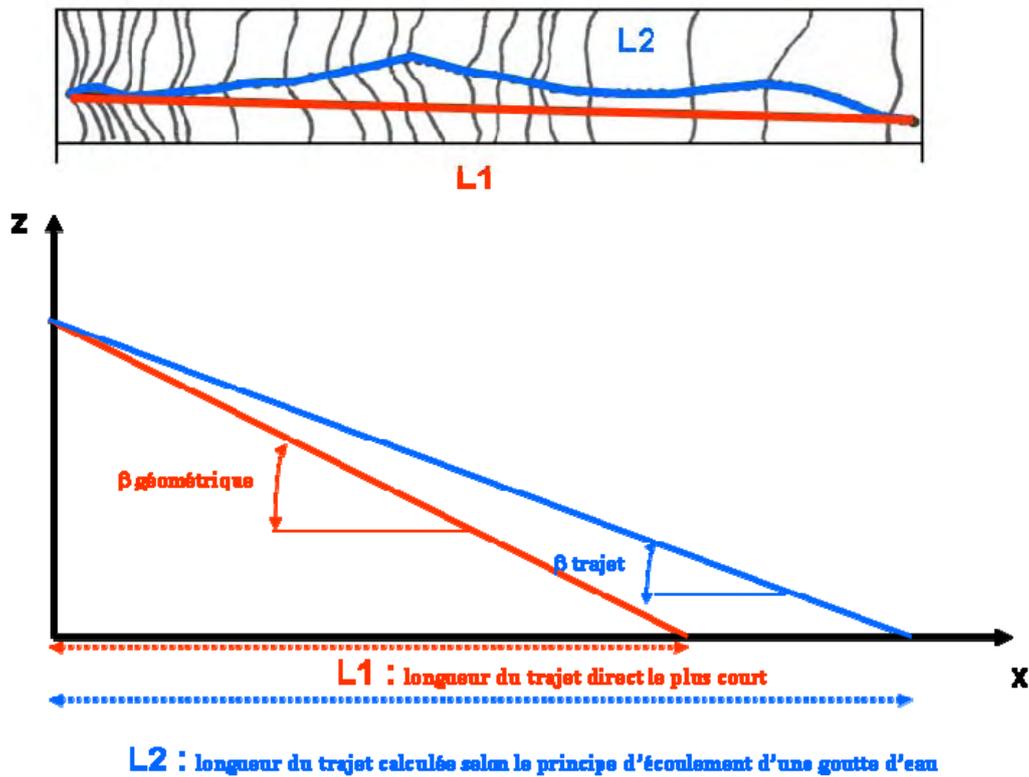


Fig. 6: Présentation des principes de calcul de la ligne d'énergie avec le principe de l'angle géométrique et de l'angle de trajet. Dans les deux cas le point d'arrêt géographique est le même mais par contre les distances des trajets d'atteintes sont différentes

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932) et celui de l'angle de trajet. Le tableau ci-dessous donne ces valeurs.

Auteur/Source	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie (entre parenthèse valeur de l'angle géométrique)	
	Minimum ou intervalle	Moyenne
Shreve (1968)	(26.57° - 38.66°)	---
Hsü (1975)	31° (32°)	---
Onofri & Candian (1979)	28.34° - 40.73° (28,84 ° - 41,73°)	---
Grunder (1984)	32.6° - 33.4° (33.1° - 34.4°)	---
Moser (1986)	33° - 42° (34° - 43°)	---
Domaas(1985 in Toppe 1987)	32° (33°)	---

Mac ewen (1989)	$(30.96^\circ) \approx (31^\circ)$	
Gerber (1994)	$33^\circ - 37^\circ$ $(33.5^\circ - 38^\circ)$	---
Meissl (1998)	$29^\circ - 47,5^\circ$ $(29.5^\circ - 48.5^\circ)$	$38^\circ (38^\circ)$
Heinimann et al. (1998)	$33^\circ - 37^\circ$ $(33.5^\circ - 38^\circ)$	---
Focardi & Iotti (2001)	$27^\circ - 29^\circ$ $(27.5^\circ - 30^\circ)$	---
Ayala-carcedo et al. (2001)	$(29.1^\circ - 38.9^\circ)$	$(31,9^\circ)$ pour la valeur minimale
Jaboyedoff & Labouise (2003)	$32^\circ (33^\circ)$	---
Corominas et al. (2003)	$26^\circ - 54^\circ$ $(27^\circ - 55^\circ)$	---
Dorren & Berger (2005,2006)	$31.3^\circ - 37^\circ$ $(31.9^\circ - 38^\circ)$	---
Copons et al.(2009) site a	$(36.87^\circ - 56,3^\circ)$	---
Copons et al.(2009) site b	$(28.81^\circ - 42.0^\circ)$	---
Hutter et al. (2005) modèle réduit	$(30^\circ - 37^\circ)$	---
Scheidegger (1973)	$(29.68^\circ - 39,69^\circ)$	---
Marquinez et al. (2002) cas 1	$(32.5^\circ - 40.9^\circ)$	$(31.5^\circ - 40.2^\circ)$
Marquinez et al. (2002) cas 2	$(29.4^\circ - 38.5^\circ)$	
Antoniou & Lekkas (2009)	(35°)	---
Deparis et al (2008)	$(31,61^\circ - 47,20^\circ)$	---
Hyndman & Hyndman (2009)	(33°)	---
Berger et al. (2009) sans forêt	$(27.67^\circ - 33.88^\circ)$	---
Berger et al. (2009) avec forêt	$(31.32^\circ - 37.86^\circ)$	---
Berger et al. (2009) modèle réduit	$(32.57^\circ - 48.99^\circ)$	---

Valeurs de l'angle B (trajet et géométrique) suivant différents auteurs.

Le tableau suivant présente les résultats de l'analyse statistique réalisée sur ces données.

Statistique	Angle géométrique minimal	Angle géométrique maximal
Moyenne	31.14°	39.30°
Min	26.57°	30°
1 ^{er} quartile	29.45°	36,97°
2 ^{ème} quartile	31.61°	38.58
3 ^{ème} quartile	33°	41.80°
Max	36.87°	48.99°

Analyse statistique des données publiées sur l'angle de la ligne d'énergie.

La bibliographie indique des valeurs de β variant de 26,57 à 48,99°. Cependant, les études de Gerber (1994) et de Meissl (1986) préconisent de déterminer la valeur de cet angle en tenant compte de la dimension des projectiles et de la rugosité du sol. (Cf. Tableau ci-dessous).

Type de projectile	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie et rugosité du sol		
	33 ° et faible rugosité	35° et rugosité moyenne	37° forte rugosité
Pierre (inférieure au dm ³)	Prairie	Broussaille	Arbres
	Pas d'irrégularités	Petites irrégularités	Grosses irrégularités
	Sol superficiel	Sol superficiele	Sol profond
1 dm ³ < Pierre- Bloc < 1m ³	Broussaille	Arbres	
	Petites irrégularités	Grosses irrégularités	
	Sol superficiele	Sol profond	
Bloc > 1m ³	Arbres		
	Grosses irrégularités		
	Sol profond		

Valeurs de l'angle géométrique β en fonction de la rugosité du sol et de la dimension des projectiles (d'après Meissl 1986 et Gerber 1994).

Au regard des expériences grandeur nature de chutes de blocs du Cemagref sur le site de Vaujany (Isère) (Dorren L.K.A et al., 2005), des valeurs de ces tableaux et des résultats que nous avons obtenus lors de nos travaux d'expertise et de contre-expertise de PPRN, nous avons obtenu les critères d'angle suivants pour le calcul de la ligne d'énergie selon les principes de l'angle géométrique et de Heim (1932) :

Qualification de la probabilité de propagation de l'aléa chutes de pierre	Angle de la ligne d'énergie sans prise en compte de la forêt	Angle de la ligne d'énergie avec prise en compte de la forêt	Différence d'angle : avec forêt – sans forêt
Forte	33,88°	37,86°	3.99°
Moyenne	30,22°	34,13°	3.91°
Faible	27,67°	31,32°	3.65°

Valeur des angles géométriques pour le calcul de la ligne d'énergie obtenus par la rétro analyse de phénomènes passés et de zonages PPRN

Il est intéressant de noter que la présence de la forêt se traduit par une augmentation systématique de la valeur d'angle de l'ordre de 3.8° ($\approx 4^\circ$) par rapport au terrain nu.

Le tableau ci-dessous présente la « matrice » que le Cemagref utilise pour l'utilisation de son utilitaire Rockfoir^{LIN} construit selon le principe de la ligne d'énergie. Il est important de préciser que comme tout outil de simulation, cet utilitaire n'est qu'un outil d'aide à l'expertise et qu'à ce titre les résultats obtenus avec celui-ci doivent faire l'objet d'une analyse critique de la part de l'expert.

Valeur seuil de l'angle géométrique	Qualification de la probabilité de propagation de l'aléa chutes de pierre
38°	Forte
35°	Moyenne
32°	faible
28°	très faible mais non nulle

Valeurs de seuillage des angles géométriques proposés et utilisés par le Cemagref pour l'aide à l'expertise.

Nous avons donc utilisé cet utilitaire avec cette « matrice de seuillage » dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés après le chapitre consacré à la description du modèle Rockyfor3D.

VI.3 Présentation du modèle de simulation trajectographique en 3 dimensions : Rockyfor3D

Rockyfor3D est un modèle de simulation trajectographique de projectiles rocheux en trois dimensions (3D). Il calcule pour chaque « run » de simulation une trajectoire. Ce modèle associe des algorithmes déterministes basés sur des données physiques avec des approches stochastiques. Ainsi, Rockyfor3D appartient à la famille des modèles probabilistes de trajectographie de type process based. Rockyfor3D peut être utilisé pour simuler des chutes de blocs à l'échelle d'un couloir, d'un versant, d'une commune et d'une région.

Rockyfor3D a été développé initialement par L. DORREN en 1998. À l'origine, il s'appuyait sur les publications de références relatives aux travaux de recherche sur les chutes de pierres (i.e Habib 1977 ; Azimi et al. 1982 ; Falcetta 1985 ; Wu 1985 ; Bozzolo et Pamini 1986 ; Spang 1988 ; Pfeiffer et Bowen 1989 ; Van Dijke et Van Westen 1990 ; Zinggeler 1990 ; Descoedres 1997 ; Meissl 1998 ; pour une vision exhaustive de l'état de l'art, voir Guzetti et al. 2002 ou Dorren 2003). Depuis sa création, Rockyfor3D a bénéficié de mises à jour régulières en fonction de l'état d'avancement des connaissances : observations personnelles de terrain de L. Dorren, des expériences réalisées avec l'équipe de Frédéric Berger (Cemagref Grenoble), tests permanent de nouveaux algorithmes et de ceux publiés par la communauté scientifique travaillant sur ce sujet, analyses critiques d'expertises et études trajectographiques. L'évolution de Rockyfor3D est retracée sous différents noms (Rocky3, RockyFor) dans une série d'articles scientifiques (Dorren et Maier 2001 ; Dorren et Seijmonsbergen 2003 ; Dorren et Heuvelink 2004 ; Dorren et al. 2004 ; Dorren et al. 2006 ; Stoffel et al. 2006). L'objet de cet document est de donner un aperçu transparent et cohérent des algorithmes employés par la version actuelle du programme (Rockyfor3D v3.0), qui est distribuée aux membres de l'association internationale ecorisQ (voir www.ecorisq.org). Rockyfor3D est utilisé en permanence dans des projets de recherche en vue de tester, et si possible d'améliorer, les modèles d'algorithmes (voir Bourrier et al. 2009). **Afin d'obtenir des résultats fiables, Rockyfor3D (comme tous les logiciels de simulation de la propagation d'aléa naturel) nécessite de la part de l'opérateur une expérience du travail de terrain (en matière de chutes de blocs) ainsi qu'une préparation soignée des données.**

Rockyfor3D simule la trajectoire d'un bloc en 3D, en calculant des séquences de chute libre dans l'air, de rebonds sur la surface de la pente, et d'impacts contre des arbres le cas échéant (fig. 7). Le roulement est représenté par une séquence de micro rebonds et le glissement des blocs n'est pas modélisé.

L'utilisation de Rockyfor3D nécessite comme données d'entrée un jeu de *raster* ASCII (au format ESRI, voir explication au chapitre 3.1). Ces données définissent la topographie et les caractéristiques mécaniques du terrain. Des paramètres complémentaires déterminent les conditions de simulation (nombre de run, dimension des projectiles, ...). Le chapitre suivant expose en détail les données d'entrée et de brèves instructions concernant le démarrage de Rockyfor3D. Les principaux composants du modèle Rockyfor3D sont détaillés au chapitre 3.2. Le chapitre 3.3 présente quant à lui les résultats (données de sortie) des simulations.

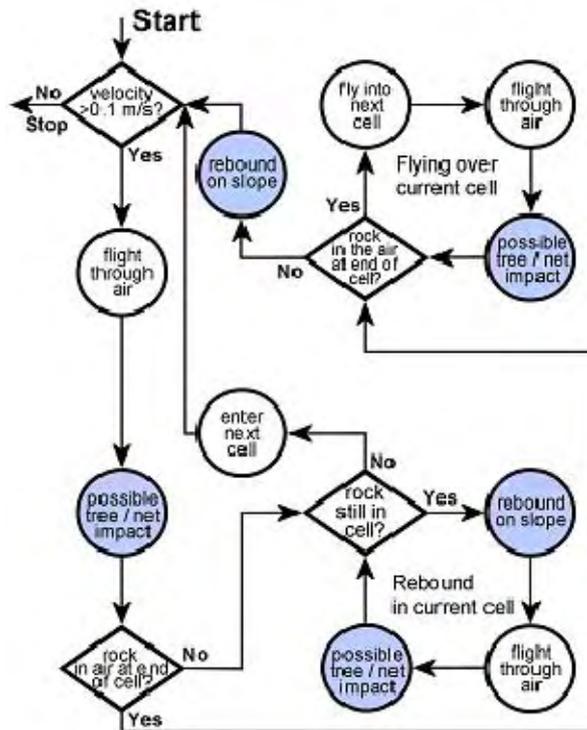


Fig. 7. Logigramme de Rockyfor3D. Les cercles en bleu indiquent les étapes du modèle où des changements de direction de la trajectoire du bloc simulé sont susceptibles de se produire.

VI.3.1. Données d'entrée du modèle et prise en main rapide du modèle

VI.3.1.1. Données d'entrée de base : les rasters

A minima, 10 cartes en format raster sont nécessaires pour utiliser Rockyfor3D. Toutes ces cartes doivent couvrir la même zone géographique, avoir le même nombre de lignes, le même nombre de colonnes, et avoir la même taille de maille élémentaire (résolution). Cependant, quand la résolution augmente, la précision spatiale des données d'entrée, et de fait, celle des résultats diminuent. La résolution optimale est comprise entre 2 m × 2 m et 10 m × 10 m (voir aussi Dorren et Heuvelink 2004). Avec ce modèle, l'utilisation d'une résolution de 1 m × 1 m n'améliore pas la robustesse des résultats tout en augmentant fortement les temps de calculs.

Les rasters doivent être au format ESRI ASCII Grid, qui est lisible par tous les éditeurs de texte. Nous présentons ci-dessous l'exemple d'un petit raster dans ce format. L'en-tête renseigne sur le nombre de lignes et de colonnes du raster (ncols et nrows), la résolution, en anglais cellsize, du raster (en m), les coordonnées en x et en y du centre (ou du coin inférieur gauche) de la cellule inférieure gauche (xllcenter/xllcorner et yllcenter/yllcorner) et la valeur représentant les données indéfinies (NODATA_value ; valeur par défaut = -9999). Les décimales doivent être précédées d'un point (.) et non d'une virgule (,). Ci-dessous un exemple type d'un raster:

```
ncols 5
nrows 3
xllcorner 123456.123
yllcorner 1234567.123
cellsize 2
NODATA_value -9999.00
1115.81 1114.28 1109.25 1107.74 1105.01
1110.31 1109.35 1107.33 1103.57 -9999.00
1006.55 1005.00 999.62 -9999.00 -9999.00
```

Les 10 couches d'informations rasters nécessaires pour utiliser Rockyfor3D sont :

- un Modèle Numérique de Terrain (MNT, en anglais Digital Elevation Model, DEM) rasterisé qui définit la topographie (dem.asc). Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 8 850,00 m ou indéfinies (NODATA_values)]. L'utilisation de Rockyfor3D est optimisée par l'utilisation de données LiDAR (laserscanning). À partir du MNT, Rockyfor3D calcule une carte des pentes et une carte des expositions suivant les algorithmes de Zevenbergen et Thorne (1987 ; voir également Burrough et McDonnell 1998, p. 191)
- une carte contenant la masse volumique des blocs pour chacune des cellules source ou cellules de départ (rockdensity.asc). Raster de type entier ; [valeurs de 0 à 3300 kg.m⁻³ ou indéfinies (NODATA_values)]. Ce raster définit les cellules qui correspondent aux points de départ identifiés sur le terrain. De plus, ce raster définit la masse volumique (en kg.m⁻³) du bloc qui sera simulé à partir de chacune des cellules de départ. Les cellules dont la valeur est 0 ne sont pas considérées comme étant des points de départ. Ainsi, si à une cellule la valeur de 2500 est associée alors le modèle va simuler depuis cette cellule le départ d'un projectile rocheux dont la masse volumique est égale à 2500 kg.m⁻³.
- trois cartes raster définissant la dimension des trois principaux axes du projectile représentatif de chacune des cellules de départ : hauteur, largeur et longueur (d1.asc, d2.asc, d3.asc). Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 100,00 m ou indéfinies (NODATA_values)]. Les cellules dont la valeur est 0 dans l'un de ces trois rasters ne sont pas considérées comme des cellules de départ. Les caractéristiques de la population de projectiles simulés par le modèle sont centrées sur ces 3 dimensions pour chacune des cellules sources.

Une variation aléatoire de $\pm 10\%$ est affectée à chacune de ces 3 dimensions et ce avant chaque simulation. Pour un projectile donné, la valeur du coefficient est la même pour ses trois dimensions. Si le tirage donne une valeur de -3.5% alors les trois dimensions du projectile sont réduites de 3.5% .

- une carte raster définissant la forme du projectile pour chacune des cellules de départ (blshape.asc). Raster de type entier ; [valeurs de 0 à 4 ou indéfinies (NODATA_values)]. Ce raster peut contenir les valeurs suivantes :

0	Pas de forme définie
1	Bloc rectangulaire (les trois longueurs peuvent être complètement différentes)
2	Bloc ellipsoïdal (les trois longueurs peuvent être complètement différentes)
3	Bloc sphérique (les trois longueurs sont identiques)
4	Bloc en forme de disque (la longueur la plus petite atteint au max. $1/3$ des deux autres longueurs du bloc qui sont assez proches)

Si aucune forme de bloc n'est définie dans une cellule source (valeur 0), Rockyfor3D simulera un bloc ellipsoïdal ou sphérique, en fonction des caractéristiques du bloc (attendu que d_1 , d_2 , d_3 , et la masse volumique soient supérieurs à 0).

- trois cartes raster définissant la rugosité de la surface (rg70.asc, rg20.asc, rg10.asc ; voir plus loin la définition de la rugosité). Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 100,00 m ou indéfinies (NODATA_values)]. La rugosité de la surface de la pente est à déterminer sur le terrain en identifiant des zones homogènes, représentées par des polygones sur une carte. Chaque polygone (voir tableau 1) définit la rugosité de la surface, exprimée par l'étendue du matériau recouvrant la surface de la pente, en regardant vers l'aval de la pente, par trois classes de probabilité de dimensions appelées Rg70, Rg20, et Rg10. Chacune de ces classes est représentée par une carte raster et correspond à la hauteur exprimée en m d'un obstacle représentatif (MOH) rencontré par un projectile et dans respectivement 70%, 20% et 10% des cas lors d'un rebond dans une zone homogène sur la pente étudiée (fig. 2). La gamme des valeurs de rugosité varie de 0 à 100 m. Si la surface de la pente est lisse, on utilisera une valeur de rugosité de 0 m. La valeur de 100 m peut être utilisée pour forcer l'arrêt des blocs simulés comme par exemple lors de la présence d'un lac ! Le choix des valeurs de MOH nécessite une grande attention de la part de l'opérateur lors des relevés de terrain car Rockyfor3D est sensible à ces paramètres.

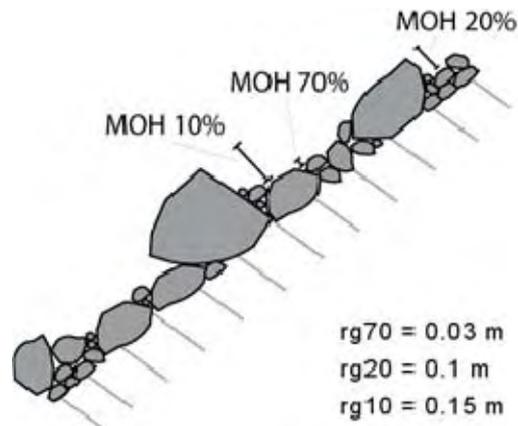
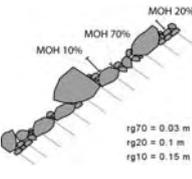


Fig. 8. Visualisation des hauteurs d'obstacle (MOH) représentant 70%, 20% et 10% de la surface au sein d'une zone homogène sur la pente. Le MOH est à mesurer en regardant vers l'aval de la pente.

Lors de chaque calcul de rebond, la taille du matériau impacté par le projectile simulé est choisie par tirage aléatoire en fonction des probabilités de rencontre (70,20 et 10%) des trois classes de rugosité. Chaque classe de rugosité est représentée par un raster. Par exemple, les valeurs des cellules dans la carte raster rg70.asc représentent les dimensions du matériau recouvrant 70% de la surface de ces cellules. D'autres détails sont également donnés dans le tableau suivant, qui présente la fiche de relevé de terrain à remplir pour chacune des zones homogènes. La figure 9 donne un utilitaire visuelle pour faciliter l'estimation des pourcentages 70,20 et 10%.

Fiche de relevé de terrain pour une simulation avec Rockyfor3D

Générale							
Date*		Nr. Polygone**		* optionnel ; non requis pour Rockyfor3D!			
Location*		Pente*	(° / %)	** zone homogène (en général 25–500 m ²)			
Nom*		Zone*	<input type="checkbox"/> départ / source <input type="checkbox"/> transit <input type="checkbox"/> dépôt / arrêt				
Caractéristiques du polygone							
1. Pierre / Bloc caractéristique							
Forme	<input type="checkbox"/> 1. rectangulaire <input type="checkbox"/> 2. ellipsoïdale <input type="checkbox"/> 3. sphère <input type="checkbox"/> 4. dalle						
Dimensions des axes (d1, d2, d3) : (m) x (m) x (m)						
2. Type du sous-sol							
Matériau	<input type="checkbox"/> rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc pénètre profondément <input type="checkbox"/> sol lâche (profondeur > 100 cm) <input type="checkbox"/> sol lâche (profondeur < 100 cm) <input type="checkbox"/> piste forestière, éboulis fin, sol moyennement compacté <input type="checkbox"/> éboulis grossier, sol compacté avec pierres <input type="checkbox"/> route goudronnée, roche mère avec couvert fin de matériau altéré <input type="checkbox"/> roche mère						
(soiltype) <i>valeurs à utiliser pour Rockyfor3D</i>	0	1	2	3	4	5	6
3. Rugosité du versant							
MOH : hauteur en m d'un obstacle représentatif (MOH) rencontré par un projectile dans respectivement 70%, 20% et 10% des cas lors d'un rebond dans une zone homogène. A mesurer en regardant vers l'aval de la pente			MOH pour 70% de la zone homogène (rg70)	0 - 100 (m)			
			MOH pour 20% de la zone homogène (rg20)	0 - 100 (m)			
			MOH pour 10% de la zone homogène (rg10)	0 - 100 (m)			
Arbres à terre*	Hauteur moyenne = m		Zone couverte = %				
4. Forêt*							
Taille de la placette représentative : m × m							
DHP# (cm)	<small># DHP: diamètre à l'hauteur de la poitrine (cm)</small> <small>Notez tous les DHP ≥ 10 cm mesurés dans la placette: p.e. 31, 17, 13, ...</small>						
Tiges / ha							
DHP moyen (cm)		Conifères (%)					
DBH écart type (cm)							
Espèces*							
5. Indicateurs d'activité de chute de pierres / témoins silencieux*							
N° d'impacts sur les arbres*		Hauteur(s) des impacts sur les arbres (m)*					
Profondeur des cratères (m)*		Présence de blocs frais*		Oui / Non			
6. Remarques*							

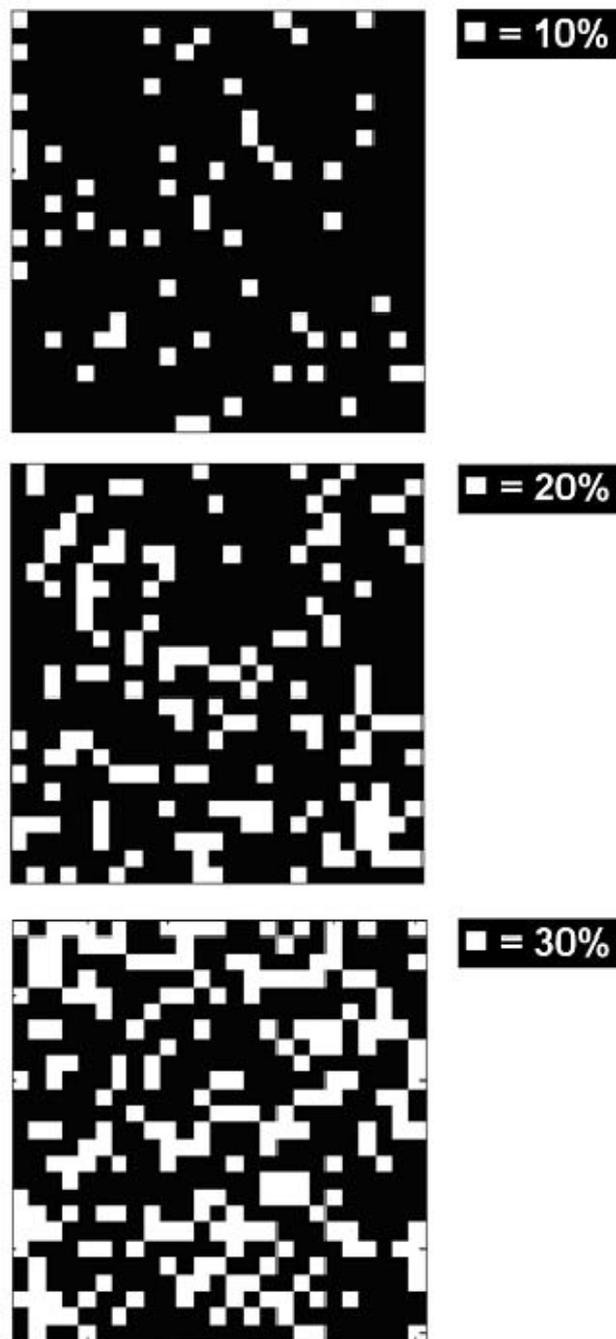


Fig. 9. Guide visuel pour l'aide à l'estimation des pourcentages de couverture de surface sur le terrain

- une carte raster décrivant le type de sol (soiltype.asc). Raster de type entier ; [valeurs de 0 à 6 ou indéfinies (NODATA_values)]. Ce raster, qui représente l'élasticité du terrain, doit également, à l'issue de la phase de terrain, être cartographié sous la forme de polygones, donnée vecteur qui sera transformée en donnée raster. (appelée soiltype.asc). Rockyfor3D prend en compte 6 types de sols (types de couverture de surface/sous-sols) décrits dans le tableau ci-dessous. A ces types de sols sont associés des gammes de valeurs R_n (= coefficient de restitution normal).

Type de sol	description	Valeur moyenne du R_n	Intervalle de valeur du R_n
0	rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc pénètre profondément	0	0
1	sol lâche (profondeur > 100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	sol lâche (profondeur < 100 cm)	0.28	0.25 - 0.31
3	piste forestière, éboulis fin, sol moyennement compacté	0.33	0.30 - 0.36
4	éboulis grossier, sol compacté avec pierres	0.38	0.34 - 0.42
5	route goudronnée, roche mère avec couvert fin de matériau altéré	0.43	0.39 - 0.47
6	roche mère	0.53	0.48 - 0.58

Les types de sols utilisés par Rockyfor3D et les valeurs R_n correspondantes

VI.3.1.2. Simulation avec forêt

En cas de réalisation d'une simulation avec prise en compte de la végétation forestière, Rockyfor3D offre deux possibilités pour intégrer les paramètres forestiers :

- La première option consiste à utiliser un fichier contenant les coordonnées en x et en y de chacun des arbres ainsi que les diamètres mesurés à hauteur de poitrine (en anglais Diameter at Breast Height, DBH, exprimé en cm). Ces données peuvent s'obtenir au moyen de l'analyse automatique d'un modèle de surface normalisé, dérivé de données LiDAR d'après les méthodes décrites par un grand nombre d'auteurs dont Dorren et al. (2007). Ce fichier d'arbres est à nommer `treefile.txt` et doit avoir le format suivant (avec ou sans en-tête, cela ne fait pas de différence) :

```

X           Y           DBH
136578.55  2236789.45  43
136554.89  2236793.22  27
136531.39  2236801.37  34
...

```

- La seconde option consiste, à partir de données globales (nombre d'arbre à l'hectare, diamètre moyen, surface terrière), à représenter la forêt à l'aide de quatre cartes matricielles, à savoir :
 - `nrtrees.asc` - les valeurs des cellules représentent le nombre d'arbres par hectare au sein de chaque cellule. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 à 100 ou indéfinies (NODATA_values)]
 - `dbhmean.asc` - les valeurs des cellules représentent le DBH moyen (en cm) au sein de chaque cellule. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 à 100 cm ou indéfinies (NODATA_values)]
 - `dbhstd.asc` - les valeurs des cellules représentent l'écart standard du DBH (en cm) au sein de chaque cellule. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 à 200 cm ou indéfinies (NODATA_values)]

- standnr.asc - les valeurs représentent le type de peuplement auquel appartient la cellule. Par exemple, s'il y a deux "types" de forêt dans la zone d'étude, cette carte contient des "0" là où il n'y a pas de forêt, des "1" dans toutes les cellules couvertes par un peuplement de type 1, et des "2" dans toutes les cellules représentative du peuplement de type 2. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 à xx, ou indéfinies (NODATA_values)]

Avec ces quatre rasters, le modèle génère aléatoirement un nombre donné d'arbres dans chaque pixel, avec un diamètre donné pour chacun des arbres ainsi créés. Puis, il génère à partir de ces données un fichier d'arbres contenant pour chacun des arbres ses coordonnées en x et en y et son DBH.

NB 1 : En cas de réalisation d'une simulation avec prise en compte de la forêt en utilisant le fichier « treefile.txt », le fichier doit être associé à votre répertoire de travail. Dans le cas contraire, il faut que les quatre cartes raster décrites ci-dessus soient présentes dans ce répertoire.

NB 2 : Pour les options 1 et 2, l'utilisateur doit dans tous les cas préciser le pourcentage de résineux présents pour chacun des types de peuplements. Ce pourcentage est à définir au sein de chaque cellule dans une carte matricielle appelée « conif_percent.asc » (Raster de type entier ; [valeurs entre 0% et 100 %]). Par conséquent, la couche d'information raster « conif_percent.asc » doit être présente dans le répertoire de travail. Si la zone est exclusivement composée de feuillus, cette carte raster ne contient que des zéros.

VI.3.1.3. Paramètres de simulation

Dans toute utilisation d'un modèle, l'opérateur doit saisir un certain nombre de paramètres qui vont régir les conditions de simulations. Les paramètres de simulation à saisir dans l'interface utilisateur graphique (graphical user interface, GUI) de Rockyfor3D sont les suivants :

- Le nombre de simulations (run) par cellule source, c'est-à-dire le nombre de départ de projectiles dont les trajectoires seront simulées à partir de chaque cellule source.
- La hauteur de chute initiale « supplémentaire », c'est-à-dire la hauteur (en m) au-dessus de la surface MNT à partir de laquelle le bloc sera initialement lâché. Cela permet à l'utilisateur d'accroître la vitesse verticale initiale du bloc simulé. Ceci est d'autant plus important dans le cas de l'utilisation d'un MNT dont la résolution ne permet pas de représenter les petits à-pics. La valeur minimale est de 0 m.

- Le fait que la forêt soit ou non prise en compte dans la simulation. Dans le cas d'une simulation avec forêt, il convient de définir quelles données seront utilisées (voir section précédente).

D'autres paramètres initiaux sont fixés par Rockyfor3D, ce sont les vitesses initiales suivant les 3 directions de l'espace : $V_{xy} = 0.5$ m/s et $V_z = -0.5$. Afin d'accroître la composante de vitesse V_z lors du premier impact sur la pente, il est possible d'augmenter la hauteur de chute « supplémentaire ».

VI.3.1.4. Comment « lancer » Rockyfor3D ?

Premièrement, vérifiez que le moteur MATLAB Compiler Runtime (MCR) fourni avec la clé d'installation du modèle est bien installé sur votre ordinateur. Si ce n'est pas le cas utiliser le fichier fourni « MCRInstaller.exe ».

Deuxièmement, afin d'exécuter Rockyfor3D, les trois fichiers **rockyfor3d.exe**, **rockyfor3d.ctf** et **rockyfor3d.fig** doivent être copiés dans le même répertoire de travail que celui comprenant les fichiers raster contenant les données d'entrées (dem.asc, d1.asc, etc.). Ensuite, double cliquez sur rockyfor3d.exe et l'interface utilisateur graphique (GUI) s'ouvrira en affichant l'ombrage du MNT du raster dem.asc se trouvant dans votre répertoire de travail (voir fig. 10). Cette interface permet de définir les paramètres des simulations, puis de réaliser les simulations en cliquant sur le bouton correspondant (Start simulation). Si des erreurs se produisent, l'utilisateur en est informé dans la fenêtre Messages. Une fois les simulations terminées, les données raster des résultats sont sauvegardées dans le même répertoire de travail. Ces fichiers peuvent être importés ou bien ouverts directement dans un logiciel SIG utilisant des données raster, comme les logiciels libres SAGA GIS (www.saga-gis.org) et QGIS (www.qgis.org), ou bien du commerce tel qu'ArcGIS. Lorsque vous cliquerez sur rockyfor3d.exe, un sous-répertoire appelé rockyfor3d_mcr sera créé dans votre répertoire de travail. Il contient des fichiers Matlab cryptés qui sont nécessaires à l'exécution du programme.

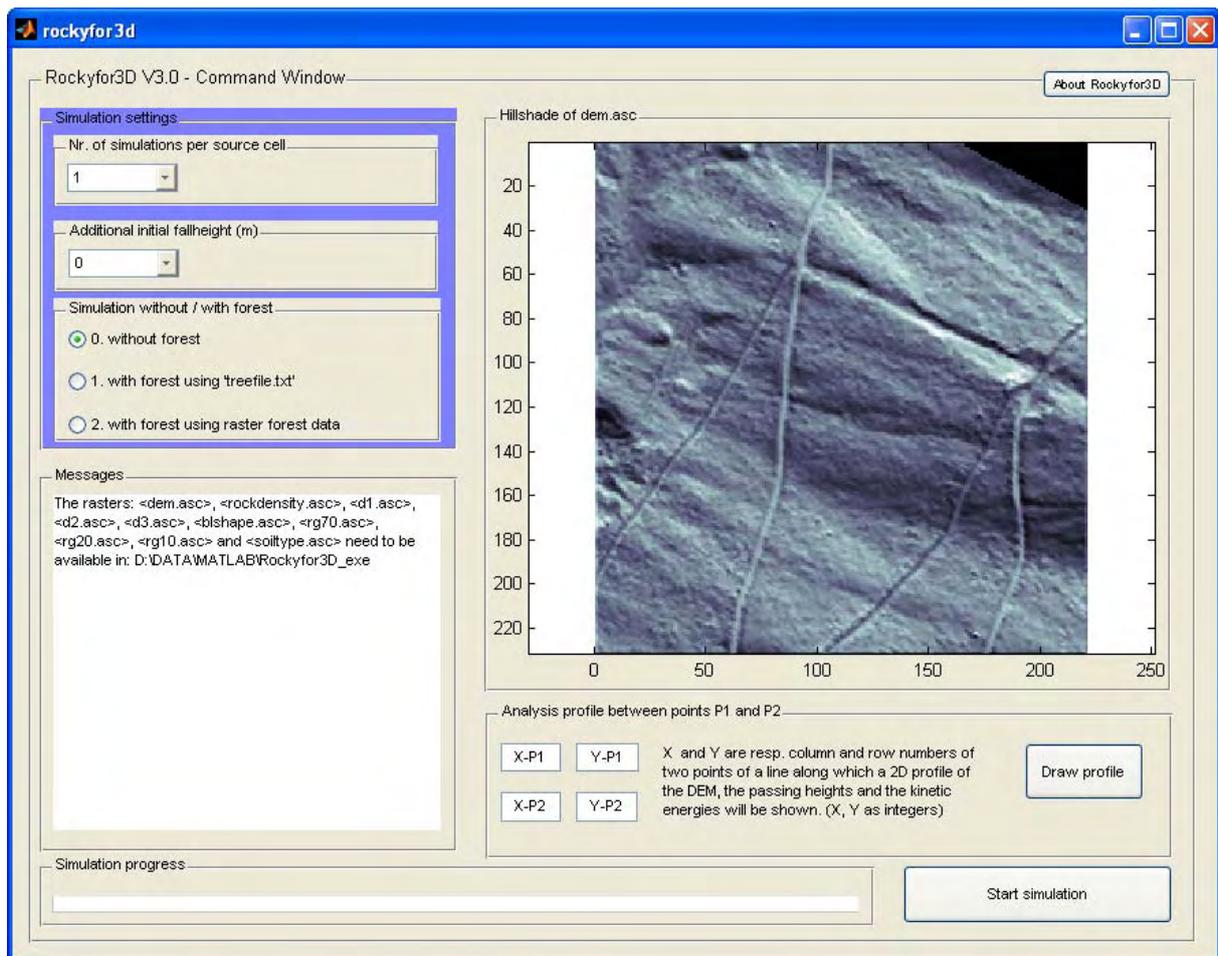


Fig. 10 L'interface utilisateur graphique (GUI) de Rockyfor3D.

Une fois les simulations terminées, il est possible d'effectuer une première analyse des données en utilisant le GUI. L'utilisateur peut visualiser les « enveloppes » des énergies, des hauteurs de passage et des zones de propagation simulées dans un profil en 2D. L'opérateur doit définir ce profil en saisissant les deux points les plus distants de celui-ci (coordonnées en X et en Y correspondant respectivement au numéro de ligne et de colonne du point initial et du point final du profil). Après avoir défini les coordonnées en X et en Y des deux points du profil, il faut cliquer sur le bouton « Draw profile ». Le programme affiche le profil de l'analyse en 2D dans une seconde fenêtre. Le fait de cliquer sur la fenêtre principale dans le GUI aide l'utilisateur à définir les coordonnées en X et en Y de P1 et P2. En parallèle, les données indiquées dans le profil d'analyse seront sauvegardées dans le répertoire de travail sous la forme d'un fichier texte ASCII appelé *Rockyfor3D_ProfileData_dd-mmm-20yy.txt*.

VI.3.2. Principaux composants du modèle

VI.3.2.1. Forme du bloc

Rockyfor3D offre la possibilité d'utiliser des formes de blocs de type rectangulaire, ellipsoïdal, sphérique et/ou en forme de disque. Cette forme de bloc définit la manière dont sont calculés à partir des 3 longueurs des blocs (d_1, d_2 et d_3) 1) le volume du bloc (et donc sa masse) et 2) le moment d'inertie. Pour calculer la position du bloc, les rebonds sur la pente et les impacts contre les arbres, Rockyfor3D utilise toujours une forme circulaire (voir également fig. 10) pouvant, en fonction du processus simulé, avoir 2 diamètres différents : le premier correspondant à la plus petite des longueurs d_1, d_2 et d_3 pour calculer la probabilité de rencontre avec un arbre, le deuxième égal à la moyenne des deux plus grandes longueurs du triplet d_1, d_2 et d_3 pour calculer la déperdition d'énergie lors des impacts sur le sol. Ce calcul est basé sur le rapport entre la rugosité de surface et le rayon du plus grand périmètre du bloc (voir l'équation 5).

Les autres formes de blocs plus complexes, ainsi que les effets explicites de la forme du bloc sur la direction de chute ne sont pas prises en compte dans Rockyfor3D. Une telle prise en compte nécessiterait de disposer d'un algorithme qui permette à la fois de calculer un nombre de trajectoires statistiquement robuste tout en tenant compte de tous les effets possibles de la forme du bloc sur la nature du rebond. Actuellement, un tel algorithme satisfaisant à ces deux conditions n'existe pas. Etant donné que les algorithmes employés pour calculer la direction de chute dans Rockyfor3D sont basés sur des observations de terrain (rétro analyses et expérimentations grandeur réelle), incluant des formes de blocs multiples, l'influence de la forme des projectiles est donc implicitement prise en compte dans les algorithmes probabilistes de calcul de la direction après un rebond au sol ou un impact sur un arbre.

VI.3.2.2. Chute libre parabolique

La chute libre parabolique est calculée au moyen d'un algorithme standard pour un mouvement parabolique uniformément accéléré dans l'air. Ce calcul permet de déterminer la position et la vitesse du projectile sur une topographie en 3D représentée par le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ainsi, Rockyfor3D simule une trajectoire en 3D en calculant l'évolution de la position d'un projectile le long des axes x, y et z . L'axe des x correspond à la direction est-ouest, l'axe des y à la direction nord-sud, et l'axe des z à la position verticale. Au moyen de ses coordonnées en x et en y , la trajectoire d'un projectile en 3D est identifiable dans les cartes raster initiales et finales.

En connaissant la position du rebond, les caractéristiques de la pente définies par les rasters au regard de ce point de contact, ainsi que la vitesse d'arrivée du projectile, il est alors possible de réaliser le calcul du rebond proprement dit.

VI.3.2.3. Rebond sur la pente

La vitesse après un rebond sur la la pente, aussi appelé bounce, est réalisé avec 8 algorithmes (voir fig. 11). La première étape importante est la conversion de la vitesse d'arrivée dans le plan horizontal xy (V_{hor}) et dans le plan vertical z (V_{vert}) en une vitesse d'arrivée normale V_n et tangentielle V_t (par rapport à la pente locale).

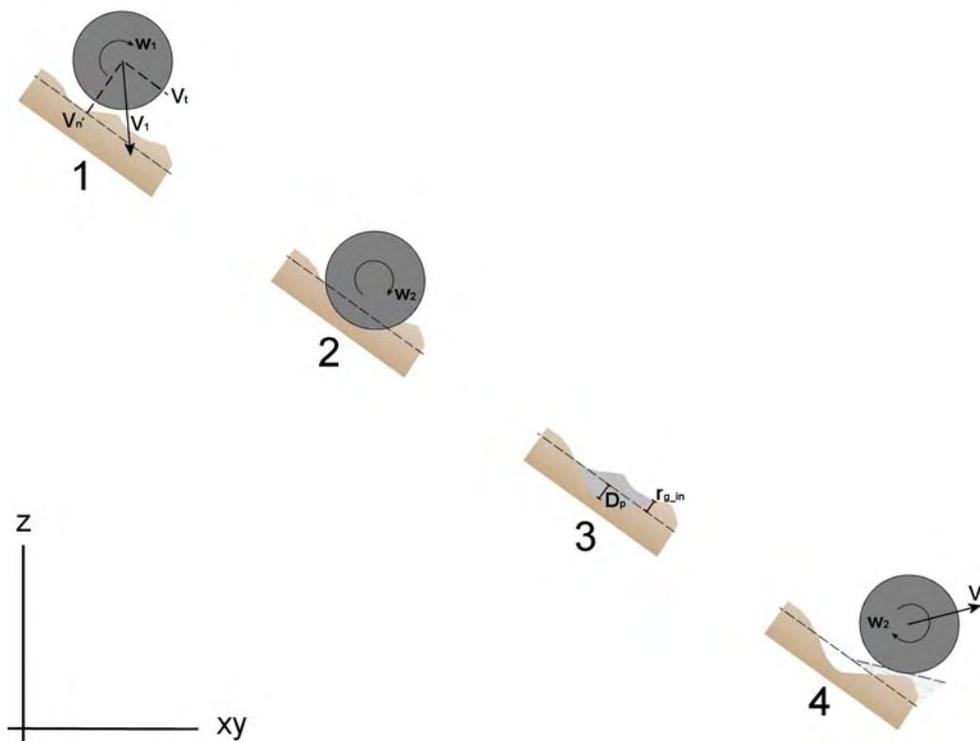


Fig. 11. Le rebond tel qu'il est représenté par les algorithmes employés dans Rockyfor3D.

La deuxième étape correspond au calcul de la profondeur de pénétration du bloc au point d'impact. Ce calcul est réalisé en utilisant les résultats des travaux de Pichler et al. 2005 :

Les paramètres d'entrée nécessaires à cet algorithme sont les suivants :

- ρ_{soil} = masse volumique du matériau impacté en kg/m^3 (définie avec une fonction logarithmique avec pour paramètres $1500 kg/m^3$ pour un sol à grain fin et $2500 kg/m^3$ pour un substratum rocheux)

- R_i = résistance à la pénétration du matériau impacté (définie par une fonction linéaire avec pour paramètre 1 et 5 Mpa pour un sol à grain fin et 200 à 250 Mpa pour un substratum rocheux)
- d = diamètre du bloc (en m)

Les constantes utilisées sont :

- $k = 1.207$ (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- $B = 1.2$ (paramètre de compressibilité du matériau impacté ; varie peu en fonction des différents matériaux)

Les principales équations utilisées pour le calcul de la profondeur de pénétration (D_p) sont les suivantes :

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left[\frac{1 + I_e / N}{1 + k\pi / 4N} \right] + k \quad \text{pour } \frac{D_p}{d} > k$$

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + k\pi / 4N}{1 + I_e / N} \frac{4k}{\pi} I_e} \quad \text{pour } \frac{D_p}{d} \leq k \quad (2)$$

où,

$$I_e = \frac{RockMass * V^2}{R_i * d^3} \quad (3)$$

(*RockMass* et V désignent respectivement la masse (kg) et la vitesse (m/s) du bloc)

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} * d^3 * B * 0.5} \quad (4)$$

Dans Rockyfor3D, la profondeur de pénétration D_p ne peut être supérieure au rayon du bloc et la valeur maximale absolue est fixée à 1 m. Une fois la profondeur de pénétration calculée, le calcul de la vitesse du bloc après le rebond est réalisé.

Dans ce calcul le coefficient de restitution tangentiel (R_t , voir Chau et al. 2002) constitue un paramètre important. Dorren et al. (2004) ont démontré que cette valeur R_t est déterminée par la composition et la dimension du matériau recouvrant la pente ainsi que par le rayon de l'impactant. Pour des blocs de grandes dimensions, la rugosité des matériaux de couverture de la pente a moins d'influence que pour des blocs de plus faibles dimensions (voir Kirkby et Statham 1975; Dorren 2003).

Le principe de calcul utilisé dans Rockyfor3D est analogue à celui du coefficient de variation de pente utilisé par exemple par Pfeiffer et Bowen (1989), Spang et Krauter (2001) et Dorren et al. (2004).

Dorren et al. (2006) ont ainsi proposé l'algorithme suivant pour calculer le R_t :

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p) / R)} \quad (5)$$

avec MOH la hauteur d'obstacle représentative à la surface de la pente (m), D_p est la profondeur de pénétration (m) et R est le rayon du bloc en chute (m).

Sur le terrain, il n'est pas possible de mesurer précisément le MOH en tout point d'une pente. Par contre, il est possible de réaliser une carte synthétique contenant, pour tous secteurs homogènes en termes de matériaux de couverture, les diamètres moyens de ces matériaux regroupés en différentes classes de diamètres. A partir d'une telle carte il est alors possible, de calculer une valeur de R_t représentative de chacune des zones ainsi identifiées. A partir de l'analyse de nos observations de terrain, il ressort que pour une zone donnée 3 modes de répartition spatiales du MOH permet de rendre compte de la valeur du R_t . Ces classes correspondent à la valeur du MOH que peut potentiellement impacter un projectile dans 70%, 20%, et 10% des rebonds dans une zone homogène donnée. L'algorithme de calcul du rebond de Rockyfor3D détermine le MOH sur la base de ces trois classes de probabilité de rencontre du MOH. En un point donné l'attribution du MOH se fait par tirage aléatoire en tenant compte des probabilités de rencontre de 70, 20 et 10%. Ainsi, les valeurs données par les trois classes de probabilité R_{g70} , R_{g20} et R_{g10} représentent les valeurs utilisées respectivement dans 70%, 20% et 10% des calculs de rebonds.

La valeur R_t ainsi obtenue est utilisée pour calculer la composante tangentielle de la vitesse du bloc après le rebond (V_{t2}) d'après Pfeiffer et Bowen (1989) :

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 * (I * V_{rot1}^2 + RockMass * V_{t1}^2) * R_t}{I + RockMass * R^2}} \quad (6)$$

avec V_{t1} la composante tangentielle de la vitesse du bloc avant le rebond, V_{rot1} est la vitesse rotationnelle avant le rebond et I est le moment d'inertie pour la forme du bloc définie.

Avant de réaliser le calcul de V_{t2} , le modèle opère une variation aléatoire de la valeur calculée de R_t de +/-10% afin de représenter la variabilité de la rugosité des matériaux de surface.

Il en va de même pour le coefficient normal de restitution (R_n), utilisé pour calculer la composante normale de la vitesse du bloc après le rebond V_{n2} en utilisant la formule de Pfeiffer et Bowen (1989) :

$$V_{n2} = \frac{-V_{n1} * R_n}{1 + (abs(V_{n1})/9)^2} \quad (7)$$

avec V_{n1} la composante normale de la vitesse du bloc avant le rebond. Le facteur $(abs(V_{n1})/9)^2$ permet un ajustement de la diminution du coefficient normal de restitution au fur et à mesure que la vitesse d'impact augmente. Ce facteur représente une transition, à partir d'un rebond plus élastique à de faibles vitesses normales vers un rebond plus plastique résultant de la fracturation croissante du bloc et de la formation de cratères à la surface de la pente, pour des vitesses normales plus élevées (Habib 1976). Ainsi, le modèle tient indirectement compte de l'effet de l'angle d'impact sur la nature du rebond (voir Wu 1984).

La vitesse rotationnelle après le rebond V_{rot2} est calculée avec l'équation :

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) * 2}{5 * R} \right] \quad (8)$$

Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente au regard du point d'impact est diminué en suivant une loi aléatoire uniforme et ce à chaque rebond. La réduction maximale de la valeur de la pente est fixée à 4°.

VI.3.2.4. Impact sur un arbre

Étant donné que le modèle utilise des solutions analytiques et non des itérations temporelles, la position exacte du projectile est connue à chaque instant. Ainsi, lors d'un impact avec un arbre, il est possible de calculer la position de celui-ci sur le tronc et par conséquent l'influence de l'arbre sur la dissipation d'énergie lors de cet impact. En plus de la position de l'impact sur le tronc de l'arbre, le modèle utilise pour le calcul de dissipation d'énergie : le diamètre de l'arbre impacté, son essence (conifère ou feuillu) et l'énergie du bloc avant impact. Les positions et les diamètres des arbres dans le voisinage immédiat de la trajectoire du bloc simulé sont disponibles en permanence dans un fichier résultant de l'analyse des rasters relatifs à la description des peuplements forestiers. En cas d'impact sur un arbre, le bloc perd une partie de son énergie cinétique, le calcul est réalisé en utilisant les quatre fonctions présentées dans la fig. 12. Ces fonctions seront expliquées dans les paragraphes suivants.

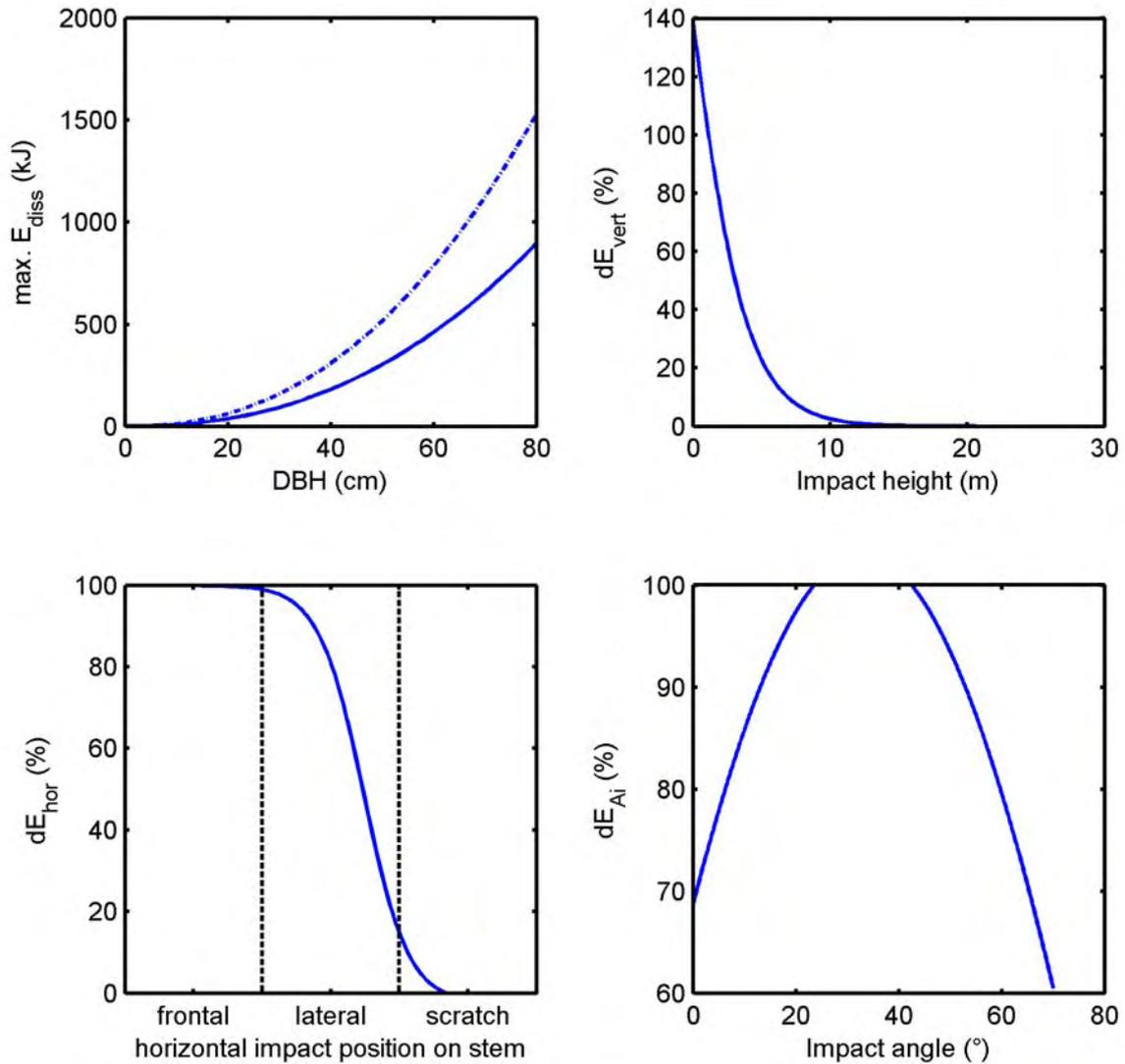


Fig. 12. Visualisation des quatre fonctions de calcul de dissipation d'énergie lors d'un impact sur un arbre. Le graphique en haut à droite est calculé avec une hauteur d'arbre de ~13 m (DBH = 20 cm).

D'après Dorren et Berger (2006), la quantité maximale d'énergie cinétique (E_{dissM}) susceptible d'être absorbée puis dissipée par un arbre dépend de son diamètre mesuré à 1,30m et de son essence. Elle est calculable avec l'équation suivante :

$$E_{dissM} = FERatio * 38.7 * DBH^{2.31} \quad (9)$$

avec, E_{dissM} quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être dissipée par l'arbre (en J), $FERatio$ taux d'énergie de rupture en fonction de l'essence de l'arbre impacté (d'après Dorren et Berger 2006), et son diamètre à hauteur de poitrine (DBH) exprimé en cm. Rockyfor3D utilise actuellement deux valeurs moyennes pour le $FERatio$: 0.93 pour les conifères et 1.59 pour les feuillus.

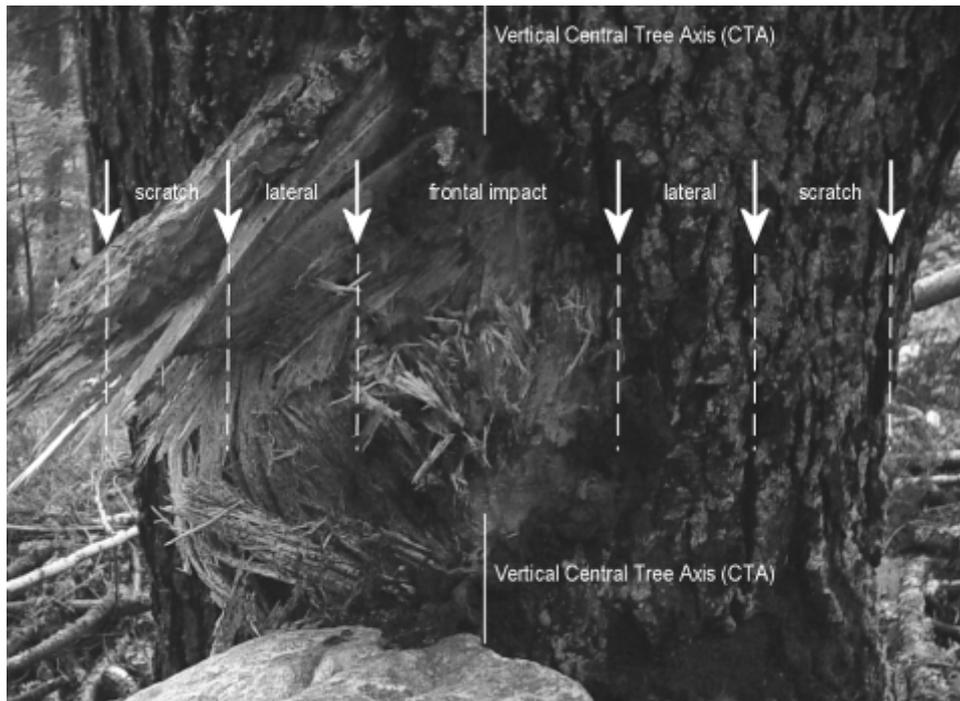


Fig. 13. Les trois principaux types d'impact déterminés d'après la distance horizontale entre le centre de l'impact et l'axe vertical central de l'arbre (Central Tree Axis, CTA).

La question de savoir, si cette quantité maximale d'énergie est réellement dissipée lors de l'impact, dépend de la position horizontale (voir fig. 13) et verticale de l'impact sur le tronc de l'arbre. L'effet de la position horizontale (dE_{hor} en %) est déterminé par la fonction suivante (d'après Dorren et Berger 2006) :

$$dE_{hor} = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{(0.58 - ((Pi - CTA) / 0.5 \times DBH)) \times (-8)}} \quad (10)$$

avec, dE_{hor} quantité maximale d'énergie pouvant être dissipée par l'arbre, en fonction de la position horizontale de l'impact (en %), $Pi - CTA$ distance horizontale entre l'impact et l'axe vertical central de l'arbre (en m), et le DBH (en m).

L'effet de la position verticale, ou hauteur d'impact, se calcule au moyen des trois équations suivantes. Premièrement, la hauteur théorique de l'arbre (H_{tree} en m) se calcule en fonction du DBH (en cm) :

$$H_{tree} = 1.22 * DBH^{0.8} \quad (11)$$

Deuxièmement, on calcule le pourcentage de quantité maximale d'énergie pouvant être dissipée par l'arbre en fonction de la hauteur d'impact (Z_i en m).

Pour cette étape le modèle utilise l'équation suivante :

$$dE_{vert} = \frac{3.36}{1 + e^{11.638*(Z_i / Htree) + 0.015*DBH - 0.301}} \quad (12)$$

L'équation 11 s'appuie sur l'analyse de milliers d'arbres mesurés dans toutes les Alpes. Il est possible, si un inventaire dendrométrique existe pour la zone d'étude de modifier cette équation. Les équations 12 et 13 reposent sur une récente analyse de données publiée par Dorren et Berger (2006), Jonsson (2007) et Lundström et al. (2009). Ces fonctions nouvellement développées ainsi que les analyses sous-jacentes seront bientôt publiées par Berger et Dorren.

Le pourcentage de quantité maximale d'énergie pouvant être dissipée par l'arbre, en relation avec l'angle d'impact (α_{imp} en degrés) du bloc par rapport à la position verticale de l'arbre ($dE_{\alpha_{imp}}$ en %) se calcule d'après Jonsson (2007) avec :

$$dE_{\alpha_{imp}} = \min(100, (1.03 * \sin(1.46 * \frac{\min(\alpha_{imp}, 70)}{180} * \pi + 0.73)) \quad (14)$$

Enfin, la quantité totale d'énergie dissipée par l'arbre (E_{dree} en kJ) se calcule selon le principe suivant:

$$E_{dree} = E_{dissM} * dE_{vert} * dE_{hor} * dE_{\alpha_{imp}} / 1000 \quad (15)$$

VI.3.2.5. Calcul de la direction de chute

Changement de direction du à un rebond sur la pente

Initialement, c'est l'orientation de la cellule source qui détermine la direction de chute du bloc simulé. Puis, la direction du projectile est conditionnée par les rebonds sur la pente ou les impacts avec les arbres. L'angle de déviation après un rebond sur la pente est déterminé par la topographie, par la direction de chute du bloc et sa vitesse avant l'impact (au sol ou sur un arbre).

A chaque rebond, le modèle permet au bloc de dévier de sa direction initiale (avant impact) dans la direction de l'exposition du pixel dans lequel il rebondit (fig. 14). L'exposition et donc l'orientation de la pente est calculée au moyen d'une fenêtre glissante de type 2x2 (2 pixels de part et d'autre de la cellule de calcul). Ainsi, l'orientation représente la direction de la ligne de plus grande pente dans chaque cellule et se calcule en utilisant les algorithmes de Zevenbergen et Thorne (1987).

Au final, la déviation du bloc par rapport à sa direction de chute initiale avant rebond est déterminée par un tirage d'un coefficient aléatoire et par la vitesse du bloc (voir tableau ci-dessous).

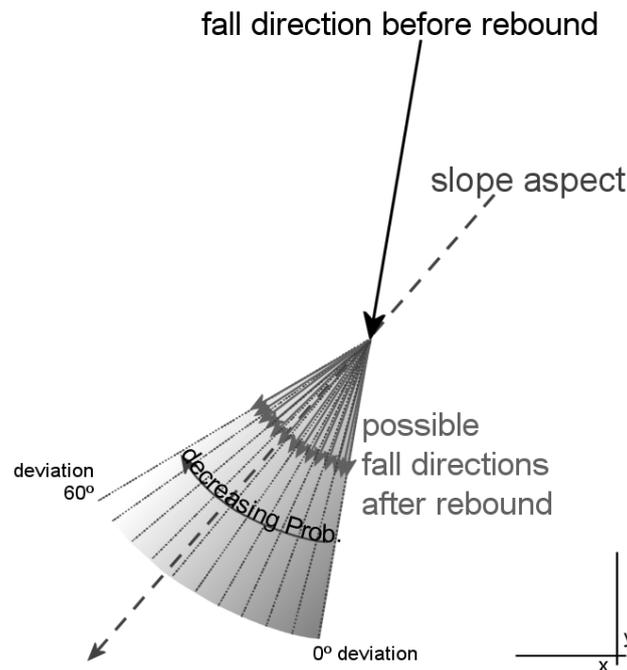


Fig. 14. Le principe de l'algorithme calculant la direction de chute après un rebond à la surface de la pente.

Le coefficient aléatoire permet de définir si la déviation du bloc par rapport à sa direction d'origine est comprise entre 0 et 5°, ou entre 5° et 10°, 10° et 15°, 15° et 20°, ... , 50° - 55°. A toutes ces classes sont associées des probabilités d'occurrence prédéfinies et déterminées par la vitesse du bloc avant le rebond (cf. tableau ci-dessous).

Probabilités (en %) d'intervalles d'angles de déviation après rebond utilisées par Rockyfor3D pour trois classes de vitesse.

Angles de déviation (°)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10$ m/s	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15$ m/s	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15$ m/s	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Les valeurs du tableau ci-dessus reposent sur des analyses statistiques de trajectoires de chutes de blocs et de vitesses observées lors d'expérimentations grandeurs naturelles et présentées dans Dorren et al. (2006). Si le bloc entre dans un « trou » (une petite dépression) dans le modèle numérique de terrain (MNT), la direction avant et après le rebond reste inchangée.

Changement de direction du à un impact contre un arbre

D'après les observations des expériences décrites par Dorren et al. (2005), la trajectoire d'un bloc, après impact sur un arbre, peut être déviée latéralement jusqu'à 76° par rapport à sa direction initiale de chute. Ces observations sont valides, pour la direction d'arrivée et de départ du projectile, dans un cercle d'un rayon de 5 m autour de l'arbre impacté. Localement, c'est-à-dire dans un rayon de moins d'1m autour du tronc, cette déviation peut atteindre 180°. La déviation du bloc après un impact sur un arbre dépend de la position au moment de l'impact du centre du bloc par rapport au tronc de l'arbre. Ainsi, trois principaux types d'impacts ont ainsi été (cf. fig. 13). À l'appui de ces trois types, les probabilités indiquées dans le tableau ci-dessous sont utilisées pour réaliser un tirage aléatoire en suivant une loi statistique uniformément afin de calculer l'angle de déviation.

Probabilités (exprimées en %) de déviation de la direction de chute suite à un impact sur un arbre.

Impact type	Probabilités		
	0 – 22.5° déviation	22.5° - 67.5° déviation	67.5° - 76° déviation
Frontal	44	50	6
Latéral	11	84	5
Frôlé	72	24	4

VI.3.3. Données de sortie du modèle

À chaque fois qu'un projectile survole ou rebondit sur une cellule, les valeurs des différentes variables calculées au regard de cette cellule sont enregistrées et sauvegardées (fig. 15) dans des couches de données rasters distinctes des couches de données d'entrées. Ainsi, tous les résultats de Rockyfor3D se présentent en format raster, avec la même couverture de zone, la même taille de pixel et le même format que les rasters d'entrée.

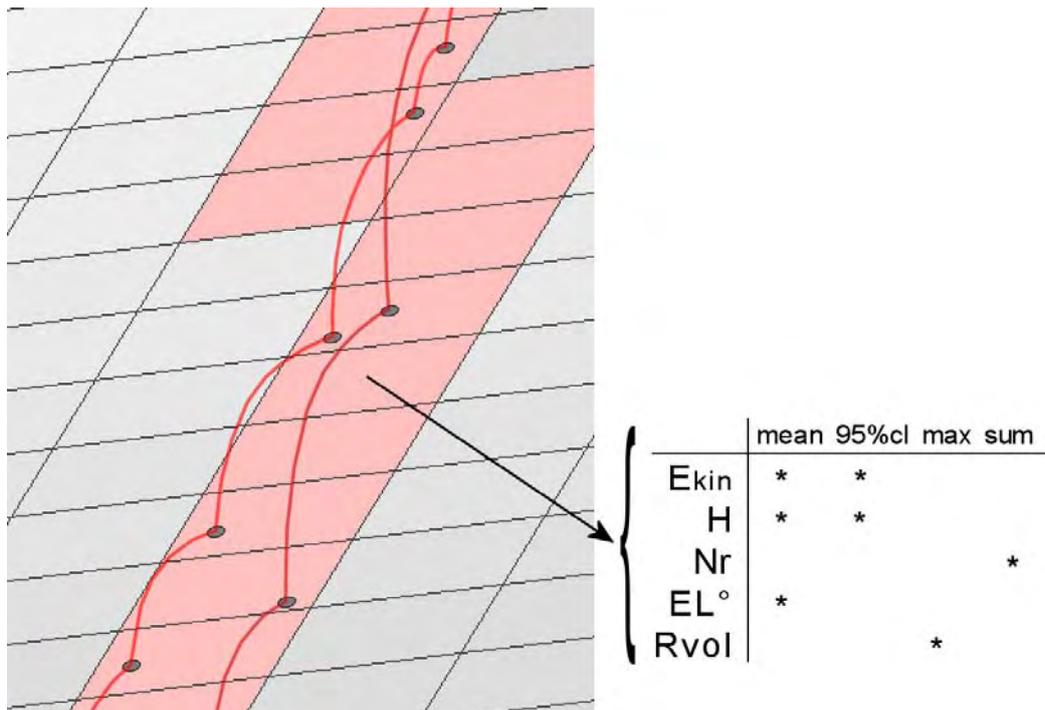


Fig. 15. D'une trajectoire en 3D aux données de sortie en format raster.

Les *rasters* de sortie créés par Rockyfor3D sont:

- E_mean.asc : l'énergie cinétique moyenne (translationnelle + rotationnelle, en kJ) par cellule
- E_95.asc : le niveau de confiance de 95% de toutes les valeurs d'énergie cinétique (en kJ) enregistrées dans chaque cellule
- Ph_mean.asc : la hauteur moyenne de passage (en m, mesurée dans la direction normale par rapport à la surface de la pente) par cellule
- Ph_95.asc : le niveau de confiance de 95% de toutes les valeurs de hauteur de passage (en m, mesurées dans la direction normale) enregistrées dans chaque cellule
- Nr_passage.asc : le nombre de blocs ayant traversé chaque cellule
- Nr_deposited.asc : le nombre de blocs stoppés dans chaque cellule
- Rvol_deposit.asc : le volume maximum de bloc (en m³) stoppé dans chaque cellule
- EL_angles.asc : un *raster* contenant les angles moyens de ligne d'énergie par cellule (en °). L'angle de ligne d'énergie, ou angle EL (*Energy Line angle*, tel qu'il est décrit par Heim 1932 ; Scheidegger 1973 ; Toppe 1987 ; Gerber 1998 ; Jaboyedoff et Labiouse 2003), est l'angle de pente d'une ligne directe virtuelle reliant le point d'arrêt au point de départ du projectile d'un. Cette carte *raster* peut être utile afin de comparer les angles EL calculés à partir des simulations de Rockyfor3D avec les valeurs d'angles EL communément utilisées (27° à 33° pour des pentes non boisées).

Après chaque simulation, Rockyfor3D crée un fichier journal, appelé *Rockyfor3D_logfile_dd-mm-20yy_hhhmm.txt*, qui contient les informations présentées ci-dessous.

Rockyfor3D v3.0 - Simulations completed on 11-3-2010, 16:19
(simulation started on 11-3-2010, 16:22)

Ini settings:

- nr. of simulations per source cell = 100
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 100
- additional initial fallheight = 0 m
- this simulation was: without forest

Simulated rock volumes:

- min = 0.4 m³
- mean = 0.5 m³
- max = 0.7 m³

Simulated Energy values:

- maximum of the mean energy values = 1569.3 kJ
- maximum energy value = 1655.1 kJ

Simulated Energy Line Angles:

- min = 32 °
- mean = 34 °
- max = 38 °

Output rasters:

- E_mean.asc: mean kinetic energy in kJ per cell
- E_95.asc: 95% confidence level of the kinetic energy values
- Ph_mean.asc: mean pass or jump height in m per cell
- Ph_95.asc: 95% confidence level of the pass heights
- Nr_passage.asc: number of rocks passed through each cell
- Nr_deposited.asc: number of rocks stopped in each cell
- Rvol_deposit.asc: maximum block volume stopped in each cell
- EL_angles.asc: mean Energy Line angles per cell

Remarks:

Il est recommandé d'ajouter dans la section « remarques » un descriptif textuel concernant la simulation qui a été réalisée et de sauvegarder ce fichier journal dans un répertoire séparé des *rasters* de sortie. Ainsi, il est toujours possible de reconstruire les scénarios qui ont été utilisés. Ce point est très important car il permet de participer à la traçabilité et à la transparence de l'expertise.

VI.3.4. Références citées dans la présentation du modèle rockyfor3D

- Azimi, C., Desvarreux, P., Giraud, A. et Martin-Cocher, J., 1982. Méthode de calcul de la dynamique des chutes des blocs - Application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors). Bull. Liais. Lab. Ponts Chauss. 122: 93-102.
- Burrough, P.A. et McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographic information systems. Oxford University Press, Oxford, Great Britain: 333 p.
- Bozzolo D. et Pamini R., 1986. Simulation of Block Falls down a valley side. Acta Mech. 63: 113-130.
- Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Nicot, F., Berger et F., Darve, 2009. Towards objective rockfall trajectory modelling using a stochastic rebound algorithm. Geomorphology 110: 68-79.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C. et Wu, J.J., 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39: 69-77.
- Descoeudres, F., 1997. Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. Soc. Suisse Mécan. Sols Roch. 135: 3-11.
- Dorren, L.K.A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Progr. Phys. Geog. 27(1): 69-87.
- Dorren, L.K.A. et Maier, B., 2001. GIS basierte Felssturz-Modellierung auf regionalem Maßstab im Montafon (Vorarlberg, Österreich). Forschen und Entdecken 9: 227-236.
- Dorren, L.K.A. et Seijmonsbergen, A.C., 2003. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. Geomorphology 56(1-2): 49-64.
- Dorren, L.K.A. et Heuvelink, G.B.M., 2004. Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model. Int. J. Geog. Inf. Sci. 18: 595-609.
- Dorren, L.K.A., Maier, B., Putters, U.S. et Seijmonsbergen, A.C., 2004. Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. Geomorphology 57(3): 151-167.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E. et Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. Forest Ecol. Manage. 215(1-3): 183-195.
- Dorren, L.K.A. et Berger, F., 2006. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Phys. 26: 63-71.
- Dorren, L.K.A., Berger, F. et Putters, U.S., 2006. Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Nat. Haz. Earth Syst. Sci. 6: 145-153.
- Dorren, L.K.A., Berger, F. et Maier, B., 2007. Cartographier la structure de la végétation forestière avec un système lidar aéroporté en terrain montagnard, Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 186: 54-59.
- Falcetta J.L., 1985. Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux. Rev. Franç. Géotech. 30: 1-80.
- Gerber, W. 1998: Waldwirkung und Steinschlag. In: Schwitter, R. (Ed.): Dokumentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN 1998, unpublished report, Grafenort / Engelberg: pp. 1-15.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. et Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls, Comp. & Geosc. 28: 1079-1093.
- Habib, P., 1977, Note sur le rebondissement des blocs rocheux. In: Proc. Meet. on Rockfall Dynamics and Protective Works. Bergamo, Italy. ISMES Publ. 90: pp. 123-125.
- Heim, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt Vierteljahrschrift Naturforsch. Gesell. Zürich, 77: 218.
- Jaboyedoff, M. et Labiouse, V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics. South African Inst. of Mining and Metallurgy: 575-578.
- Jonsson, M.J., 2007. Energy absorption of trees in a rockfall protection forest, PhD Thesis ETHZ No. 17214: 209 p.
- Kirkby, M.J. et Statham, I., 1975. Surface stone movement and scree formation, J. Geol. 83: 349-362.
- Lundström, T., Jonsson, M.J., Volkwein, A. et Stoffel, M., 2008. Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: a detailed assessment using a new experimental method. Tree Phys. 29: 345-359.
- Meissl, G., 1998, Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innbruck. Geog. Stud. 28: 249 p.
- Pichler, B., Hellmich, Ch. et Mang, H.A., 2005. Impact of rocks onto gravel - design and evaluation of experiments. Int. J. Impact Eng. 31: 559-578.
- Pfeiffer T.J. et Bowen T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. Bull. Ass. Eng. Geol. XXVI: 135-146.

- Scheidegger, A.E., 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mech.* 5: 231-236.
- Spang, R.M., 1988. Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. In: *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne: pp. 1237-1243.
- Spang, M.R. et Krauter, E., 2001. Rock fall simulation - A state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers. – *Int. Conf. Landslides; Causes, Impacts and Countermeasures*, 17-21 June 2001, Davos, Switzerland: pp. 607-615.
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., Perret, S. et Kienholz, H., 2006. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *For. Ecol. Manage.* 225: 113-222.
- Toppe, R. 1987: Terrain models - A tool for natural hazard mapping. In: Salm, B. and Gubler, H., (Eds.): *Avalanche formation, movement and effects*, IAHS Publ. 162: pp. 629-638.
- Van Dijke, J.J. et Van Westen C. 1990. Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS. *ITC J.* 1: 40–44.
- Wu, S.S., 1984, Rockfall evaluation by computer simulation. *Transportation Research Record*, Transp. Res. Board, Washington, DC, Nr. 1031: pp. 1-5.
- Zevenbergen L.W. et Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surf. Proc. Landforms* 12: 47-56.
- Zinggeler, A., 1990. Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Modellierung der relevanten Teilprozesse, MSc. Thesis Univ. Bern, Geog. Inst.: 116 p.

VI.4 Les relevés de terrain sur le site de Saint Paul de Varcès

Comme nous l'avons déjà précisé l'utilisation d'outils de simulations trajectographiques de projectiles rocheux nécessite de disposer d'un certain nombre de données relatives à la dimension des projectiles de référence, au comportement mécanique des sols et aux types de végétation présents sur le site d'étude.

Préalablement à la phase de terrain, une première cartographie sous SIG a été réalisée pour optimiser les relevés: un travail de photo interprétation a été mené à partir du MNT et du MNS LiDAR ainsi qu'avec les photographies aériennes pour délimiter les zones à priori homogènes d'un point de vue végétation et surface du sol.

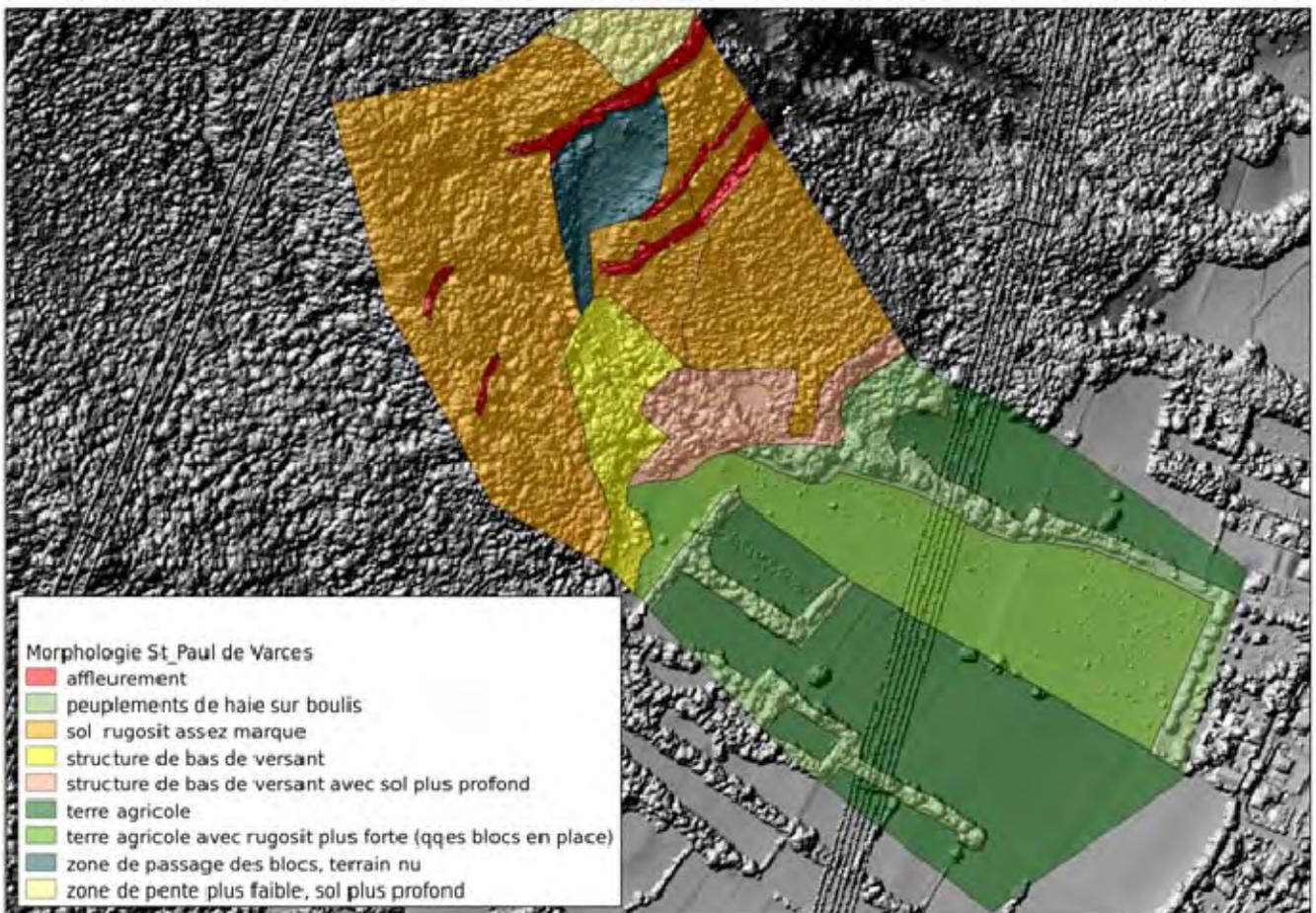


Fig 16 : Résultat de l'analyse morphologique de la zone d'étude à partir des photographies aériennes, du MNT et du MNS LiDAR.

Ensuite, une phase de terrain a été menée pour recueillir, dans chacun des polygones ainsi délimités, les informations nécessaires au modèle Rockyfor3D :

- caractéristiques du sol :
 - dureté (*notée soiltype*) à travers le type de sol (sol profond, éboulis, affleurement...) traduisant son élasticité,

- rugosité (notée Rg_{10} , Rg_{20} , et Rg_{70} en mètre), caractérisée par la hauteur moyenne des obstacles présents au sol sur 10, 20 et 70% de la surface de la placette considérée,
- la taille des blocs anciens présents (m).
- caractéristiques dendrométriques :
 - densité des arbres à l'hectare (N/Ha),
 - diamètre moyen (cm),
 - écart type sur le diamètre (cm),
 - pourcentage de résineux (%).

Pour optimiser la phase de relevés, nous utilisons la fiche de terrain type de Rockyfor3D (cf. chapitre 3.1.1) comprenant l'ensemble de ces paramètres. A partir des relevés terrain et de la carte géomorphologique, nous avons dressé les cartes de répartition de la végétation, du type de sol (soilytpe) et de la rugosité (Rg_{10} , 20, 70%).

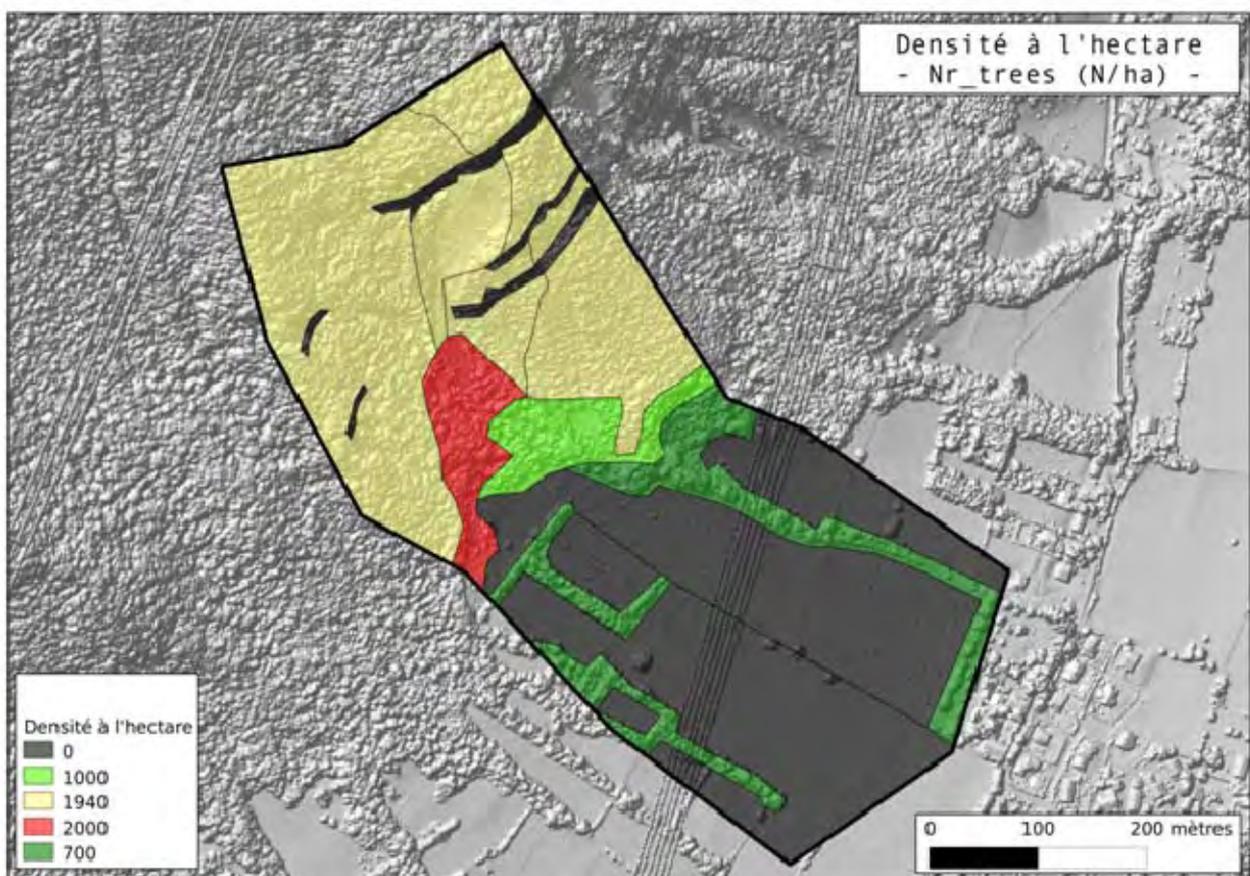


Fig 17 : Carte de la densité forestière

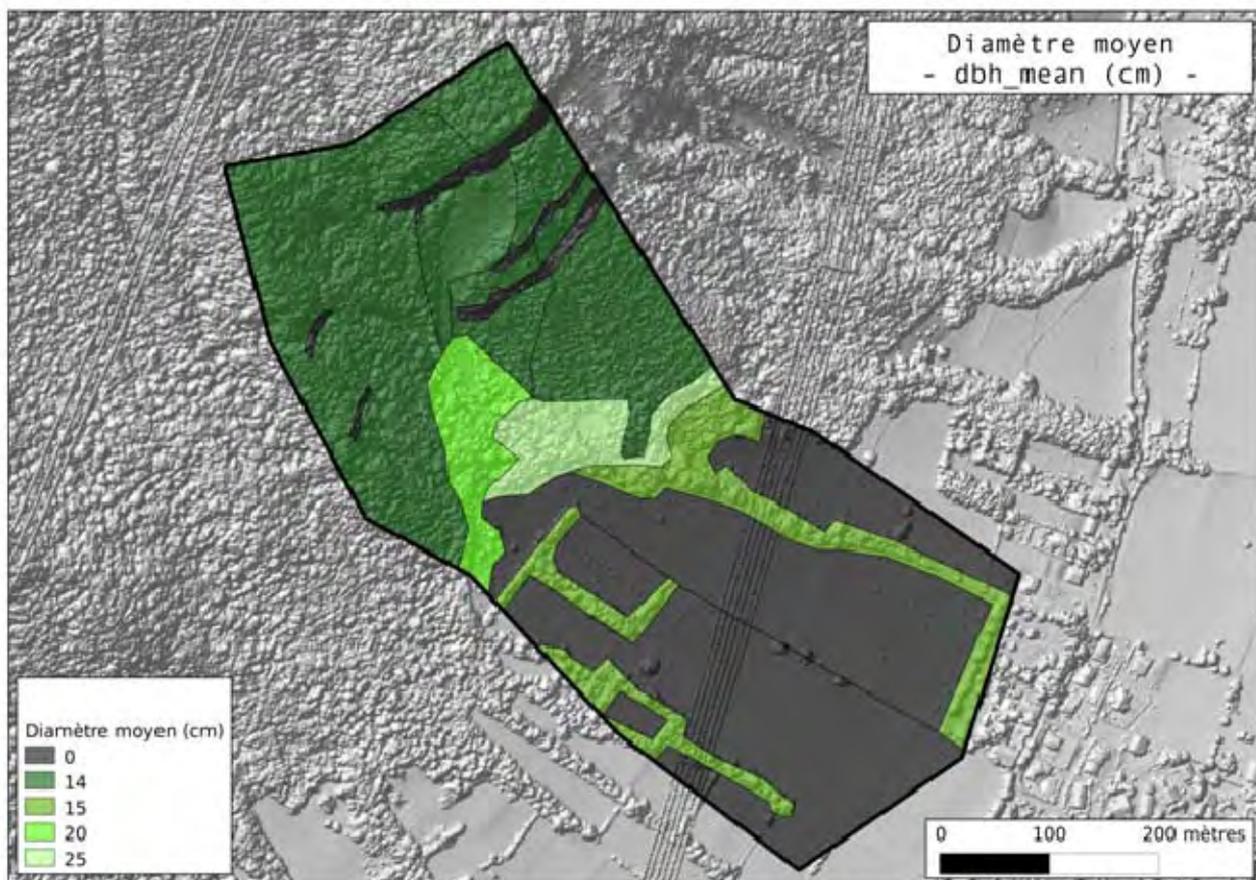


Fig 18 : Carte de la répartition spatiale des diamètres moyens des arbres

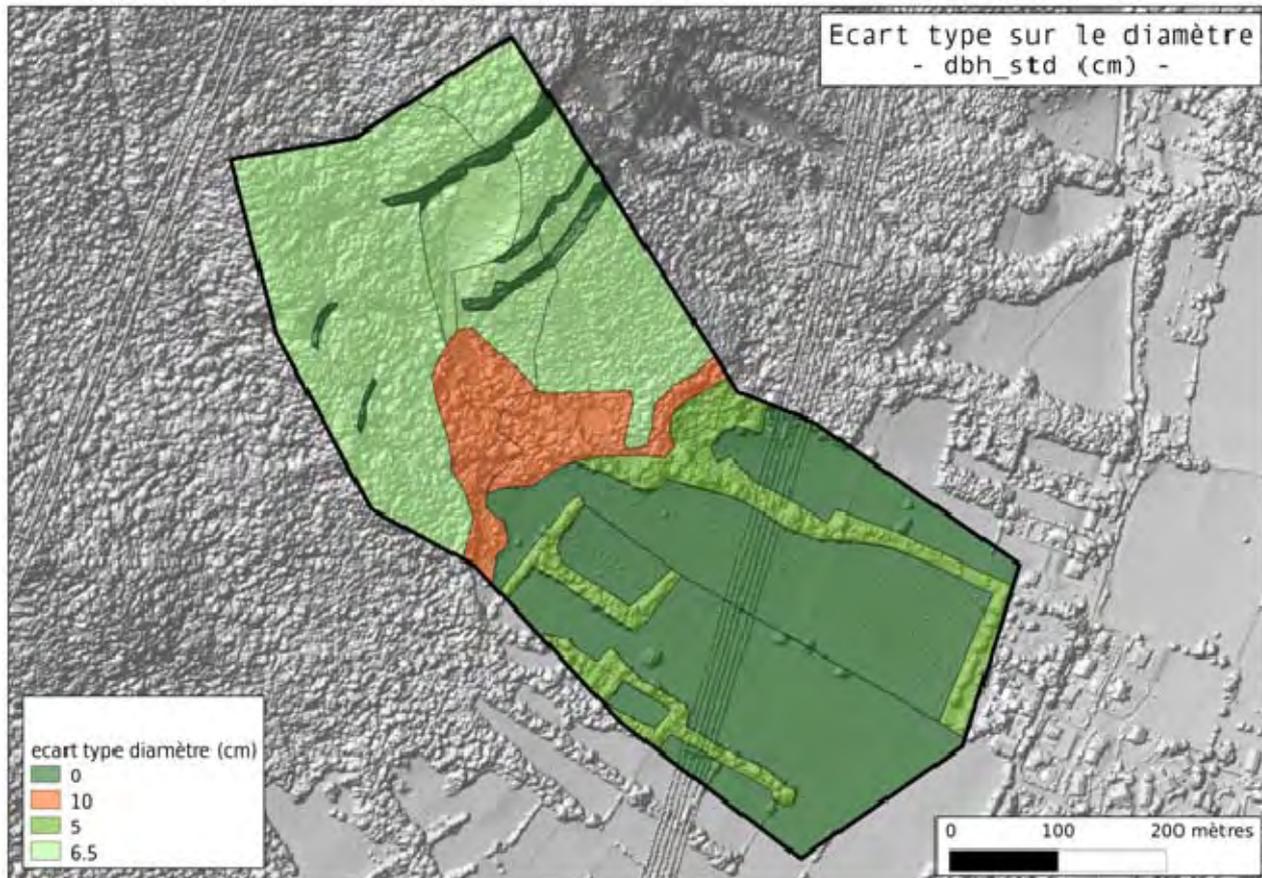


Fig . 19 : Carte de la répartition spatiale de l'écart type sur les diamètres

Concernant les caractéristiques du sol, nous avons décidé de modéliser la propagation des blocs rocheux avant et après le phénomène du 28 décembre 2008. Ainsi, les coefficients de rugosité du sol tels que relevés sur le terrain correspondent à la rugosité après l'éboulement. Nous avons diminué les valeurs des coefficients Rg10, Rg20 et Rg70 en fonction des obstacles rencontrés sur le terrain pour obtenir les valeurs de rugosité du sol avant phénomène.

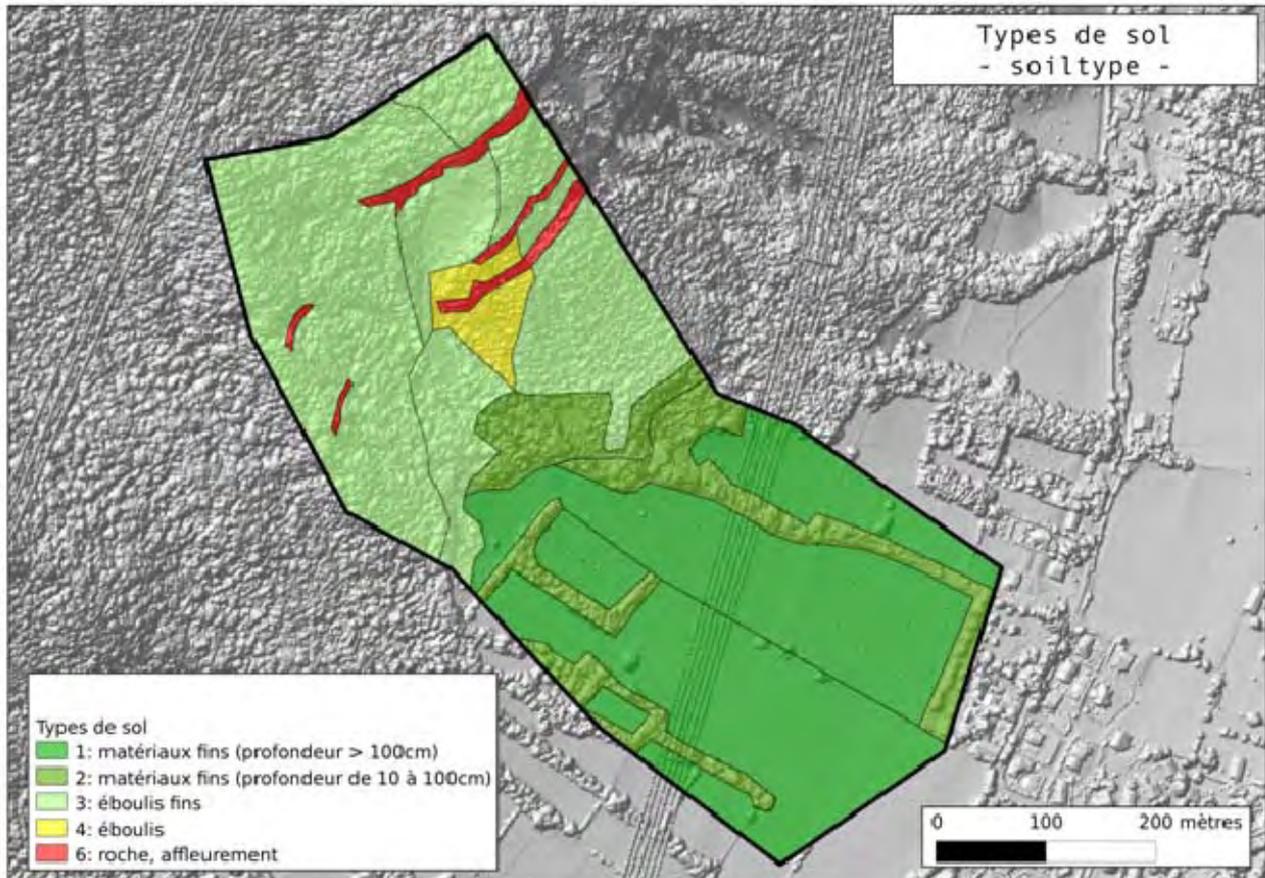


Fig .20 : Carte des types de sol

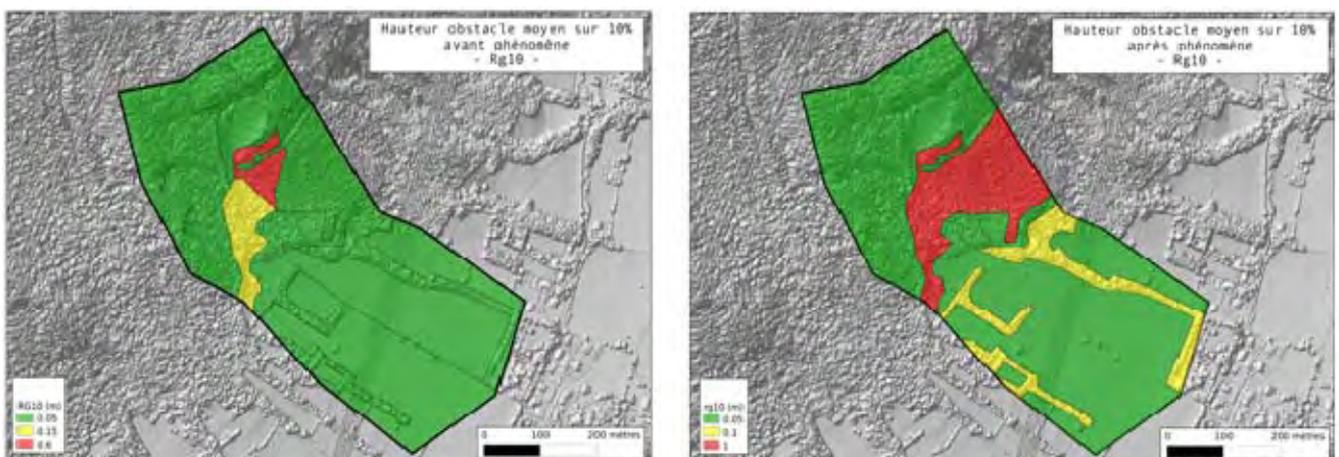


Fig .21 : Carte de la rugosité Rg10 avant (à gauche) et après l'évènement (à droite)

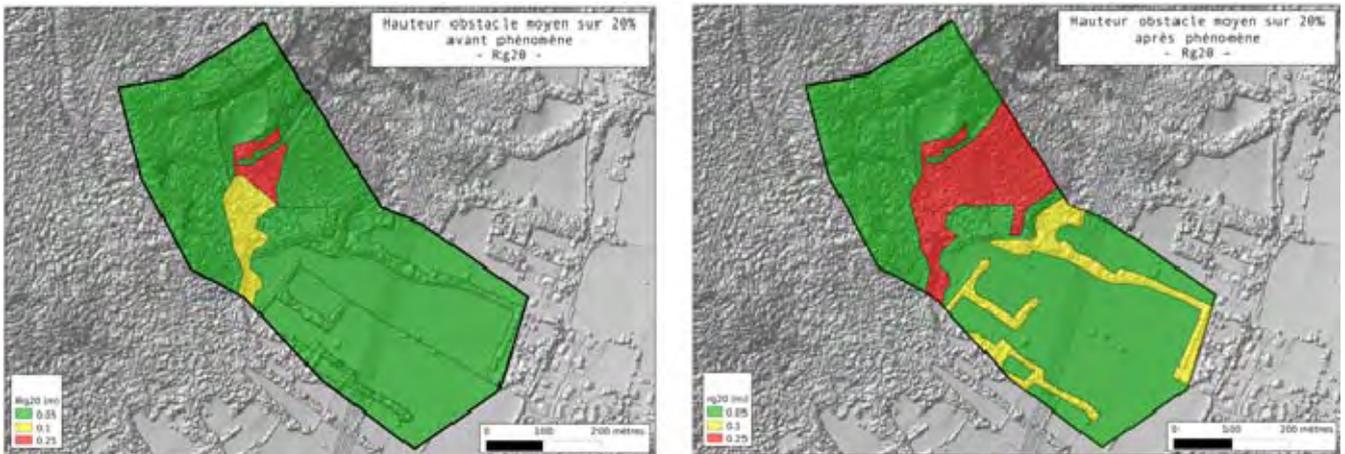


Fig.22 : Carte de la rugosité RG20 avant (à gauche) et après l'évènement (à droite)

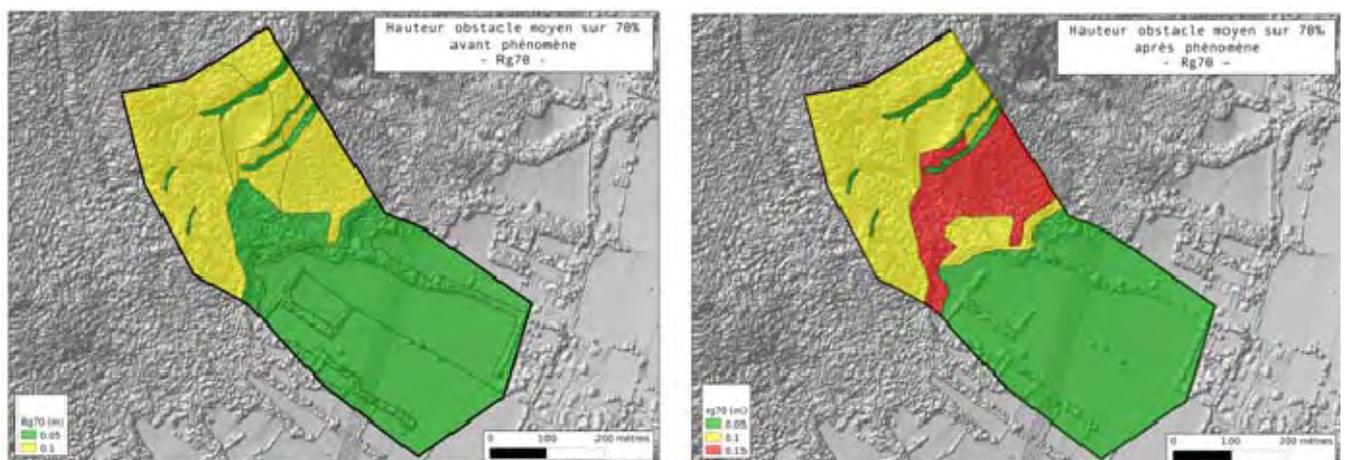


Fig.23 : Carte de la rugosité RG70 avant (à gauche) et après l'évènement (à droite)

VI.5 Choix des volumes de référence et des points de départ pour les simulations de propagation

Compte tenu des volumes des blocs présents sur le terrain suite au phénomène du 28 décembre 2008, et en accord avec le service RTM de l'ONF et du bureau d'étude SAGE, nous avons décidé de conserver 3 volumes de blocs pour les simulations :

- 1m^3 , pour les éléments courants pouvant se détacher de la falaise,
- 8m^3 pour les éléments moyens se trouvant en pied de versant,
- 33m^3 , correspondant au volume du plus gros bloc posé en bas de versant issu de l'évènement du 28/12/2008.

Dans le but de pouvoir comparer les différents modèles (Rockyfor3D pour le Cemagref, CRSP pour le RTM et le code de calcul de l'ADRGT), il était nécessaire de ne travailler qu'à partir d'un seul point de départ clairement identifié. Pour cela, nous avons préalablement localisé les zones de départ potentiel pour les travaux de simulations. Ensuite, nous avons validé un seul de ces points pour toutes les simulations.

Comme nous l'avons déjà précisé, dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit par visualisation 3D du secteur d'étude, soit à partir de la carte des pentes. En fonction de la résolution du MNT, il faut définir la valeur seuil de pente minimale à partir de laquelle le plus grand nombre de falaises et de barres rocheuses sont identifiées. Tous les pixels ayant une pente supérieure à la valeur seuil sont considérés comme points de départ potentiel. Ce seuil de pente α a été défini en utilisant l'équation : $\alpha = 55^\circ \times \text{RES}^{-0.075}$, où RES est la résolution du MNT. Dans notre cas où nous travaillons avec un MNT ayant une résolution métrique, le seuil de pente est de $55 \times 1^{-0.075}$, soit 55° .

De cette façon, 599 points de départ ont été identifiés. En accord avec l'ADRGT et le RTM, nous n'en avons retenu qu'un, situé à une hauteur de 707,5m par rapport à l'ellipsoïde, soit environ 655m d'altitude dans le référentiel de la carte IGN. C'est donc à partir de ce seul point de départ que chaque trajectoire a été simulée avec Rockyfor3D.

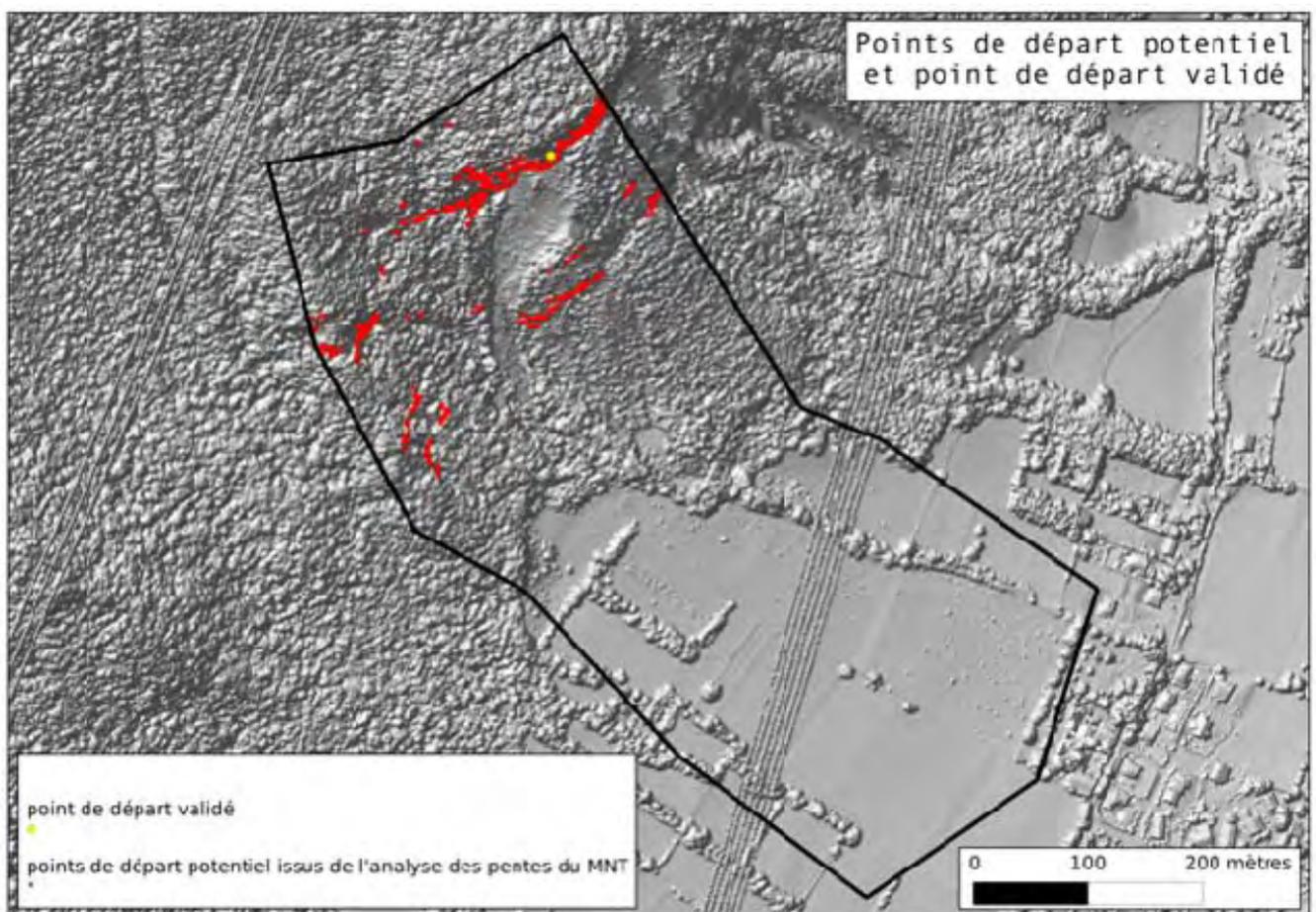


Fig.24 : Carte des points de départ potentiel et position du point retenu pour les travaux de simulation (en jaune)

VI.6 Résultats des simulations réalisées avec l'utilitaire Rockfor^{LIN}

Nous avons utilisé la carte des points de départ (cf. fig. 24) comme donnée d'entrée pour les simulations réalisées avec l'utilitaire Rockfor^{LIN}. Nous avons utilisé la matrice de seuillage permettant la mise en œuvre du principe de la ligne d'énergie. Les cartes suivantes présentent les résultats pour chacune des valeurs de pente utilisée ainsi que la synthèse. L'utilitaire Rockfor^{LIN} permet de calculer aussi une fréquence relative de passage en un point donné. Cette fréquence est calculée en identifiant, pour la zone d'étude, le pixel qui est atteint par le plus grand nombre possible de point de départ, puis en l'utilisant comme diviseur pour calculer pour chaque pixel le quotient de passage avec comme dividende le nombre de cellules de départ alimentant ce pixel. Cette fréquence relative permet de visualiser les zones de passage préférentiel pour le secteur d'étude concerné.

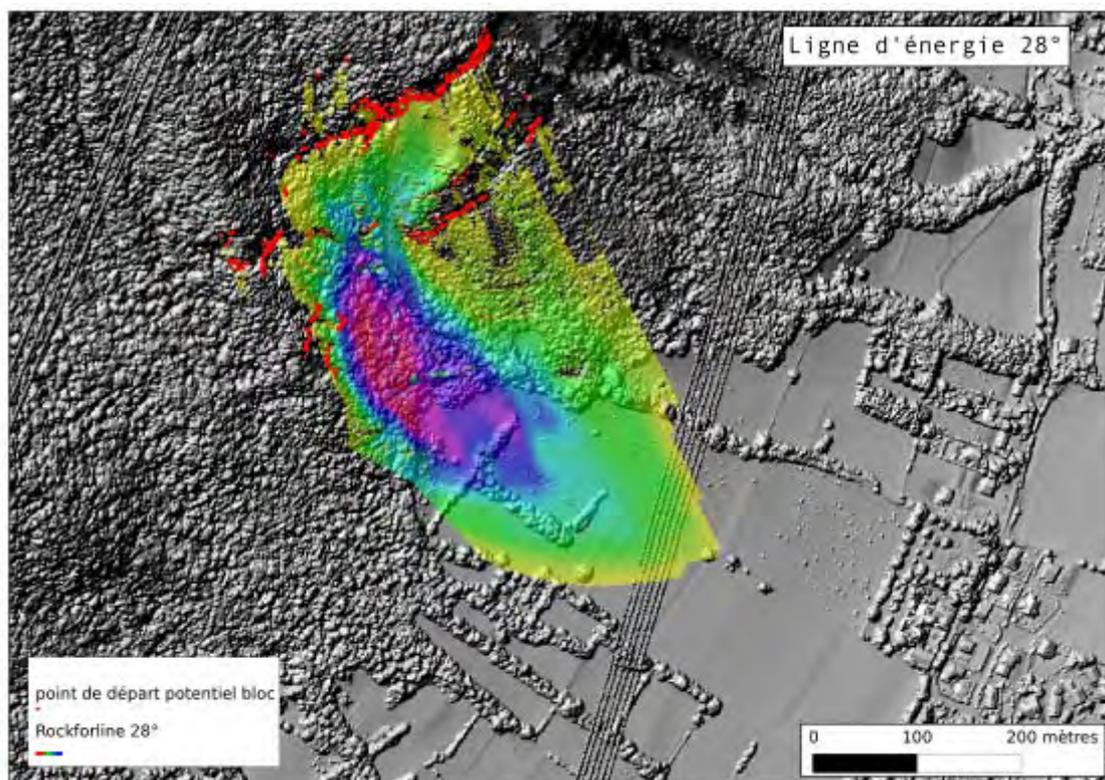


Fig.25 : Carte de l'enveloppe maximale de propagation avec une ligne d'énergie ayant un angle de 28°

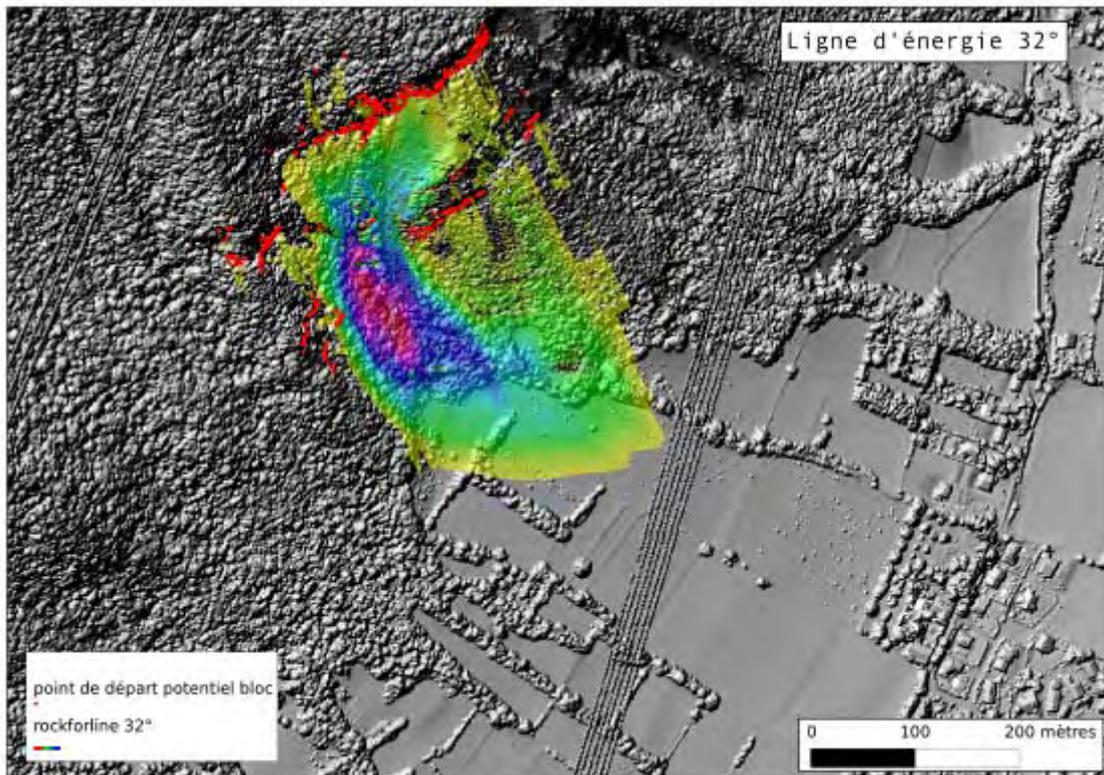


Fig.26 : Carte de l'enveloppe maximale de propagation avec une ligne d'énergie ayant un angle de 32°

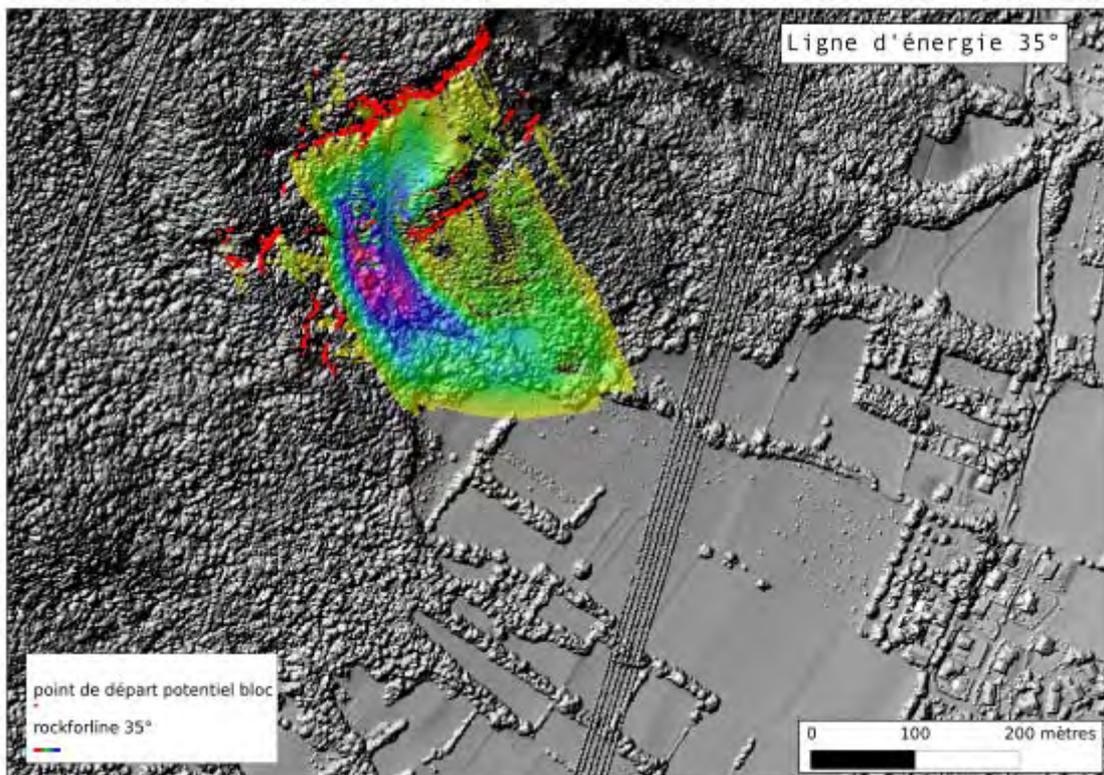


Fig.26 : Carte de l'enveloppe maximale de propagation avec une ligne d'énergie ayant un angle de 35°

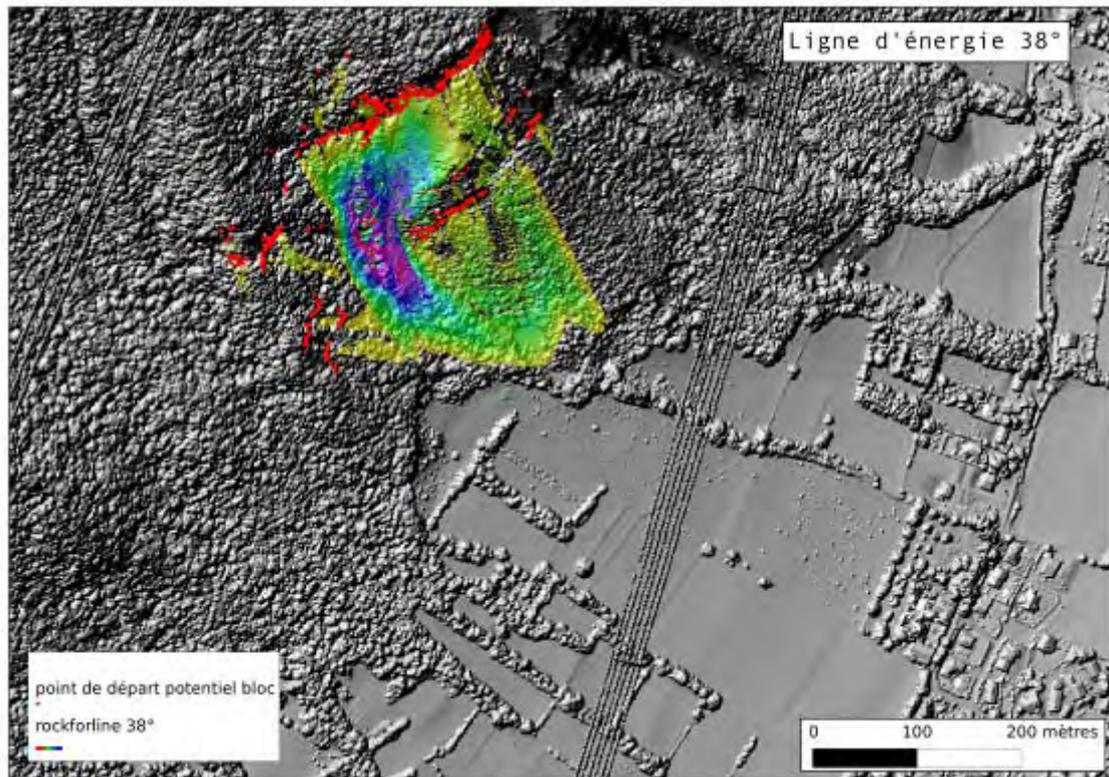


Fig.27 : Carte de l'enveloppe maximale de propagation avec une ligne d'énergie ayant un angle de 38°

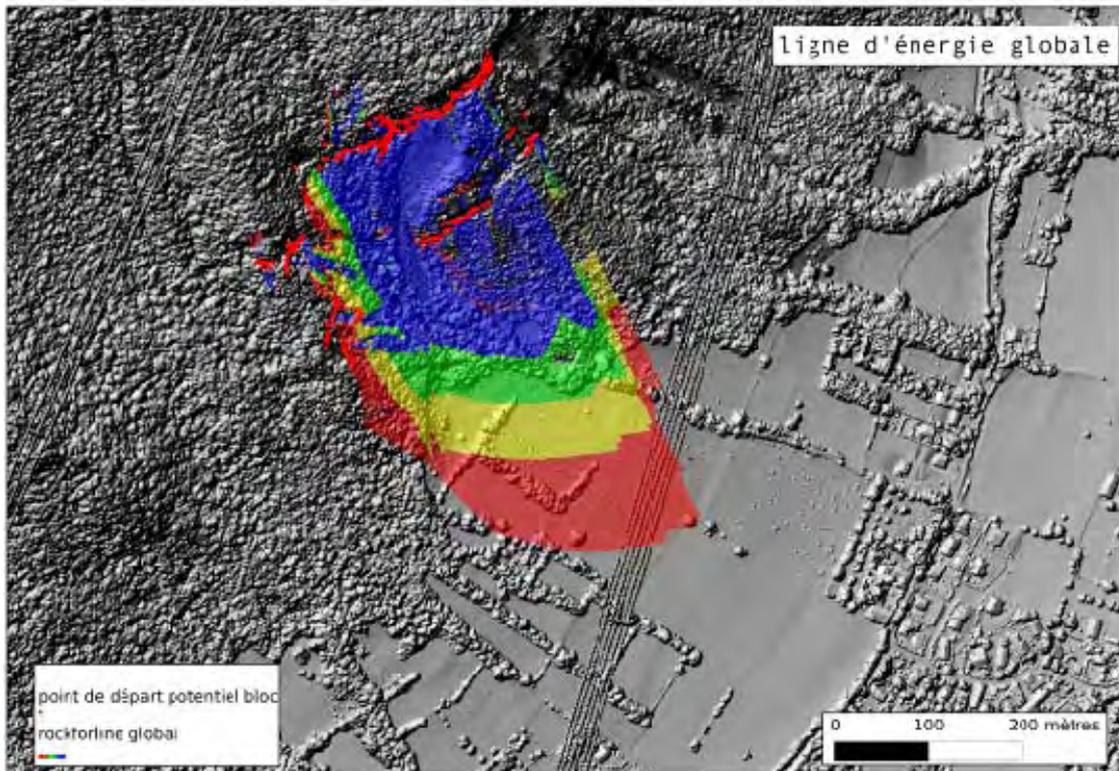


Fig.28 : Carte de synthèse de l'aléa chute de blocs obtenue avec le principe de la ligne d'énergie : Bleu = zone d'aléa fort, Vert = zone d'aléa moyen, Jaune = zone d'aléa faible et en Rouge = zone d'aléa très faible

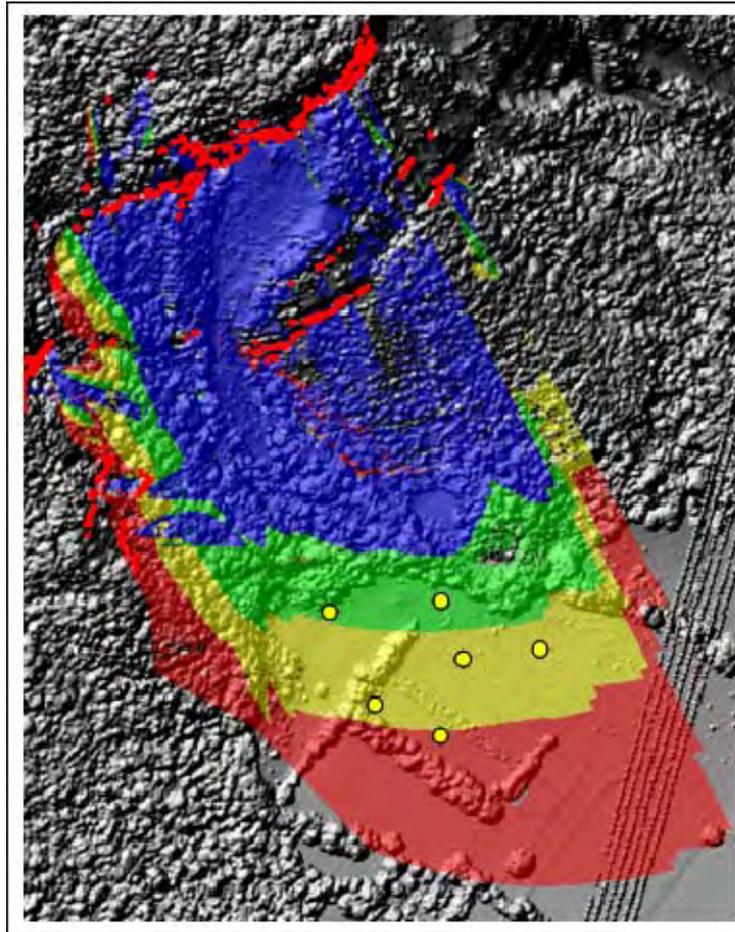


Fig.29 : Positions des points d'arrêt maximal du phénomène du 28/12/200 sur la carte de synthèse de l'aléa chute de blocs obtenue avec le principe de la ligne.

De l'analyse de la carte 29, il ressort que sur ce site d'étude le principe de la ligne d'énergie ainsi que la matrice de seuillage utilisée sont robustes car en mesure de reproduire les points d'arrêt observés. De plus, la proposition de la qualification de l'aléa semble cohérente avec la répartition spatiale de ces points d'arrêt.

VI.7 Résultats des simulations réalisées avec le modèle Rockyfor3D

Comme les autres membres du consortium et pour les simulations trajectographiques avec notre modèle en 3D, nous n'avons utilisé qu'un seul point de départ (cf. le point en jaune de la fig. 24), point de départ commun à tous les partenaires de cette étude.

Les travaux de simulations ont été réalisés en croisant les conditions suivantes :

- Avec prise en compte de la forêt (AF)
- Sans prise en compte de la forêt (TN pour terrain nu)
- Pour les conditions de terrain avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008 (Avant)
- Pour les conditions de terrain après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008 (Après)
- Pour chacun des volumes fixés (1,8 et 33 m³) réalisation d'1 million de « runs »

Les cartes 30 à 39 présentent les résultats obtenus (uniquement pour les fréquences de passage) pour chacune de ces combinaisons de paramètres pour les volumes de 8 et 33m³. Pour le volume unitaire d'1m³ nous ne présentons que les résultats avec et sans forêt et ce pour le scénario « avant réalisation de l'évènement du 28/12/2008 ». En effet, pour les conditions de terrain avant et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008, les blocs de ce volume ne sont pas en mesure de sortir de l'écran forestier.

Les cartes 40 à 49 présentent les résultats obtenus avec la matrice de seuillage dérivée de la matrice d'aléa suisse.

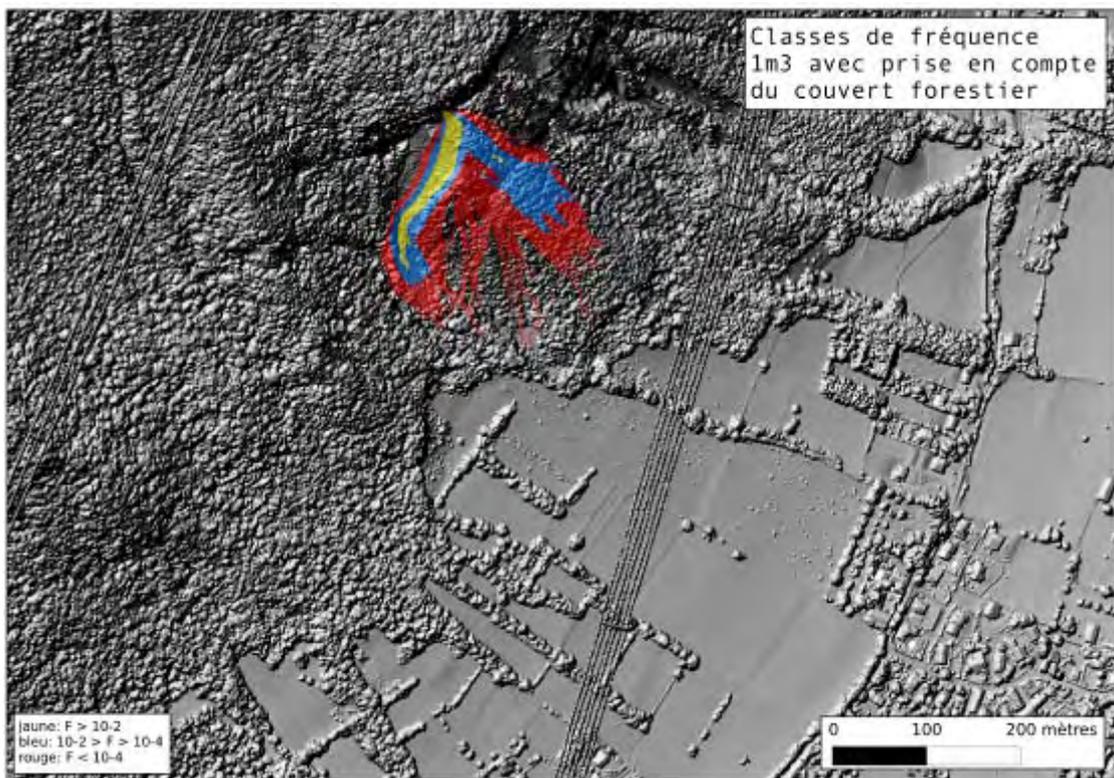


Fig.30 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 1m^3 , avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

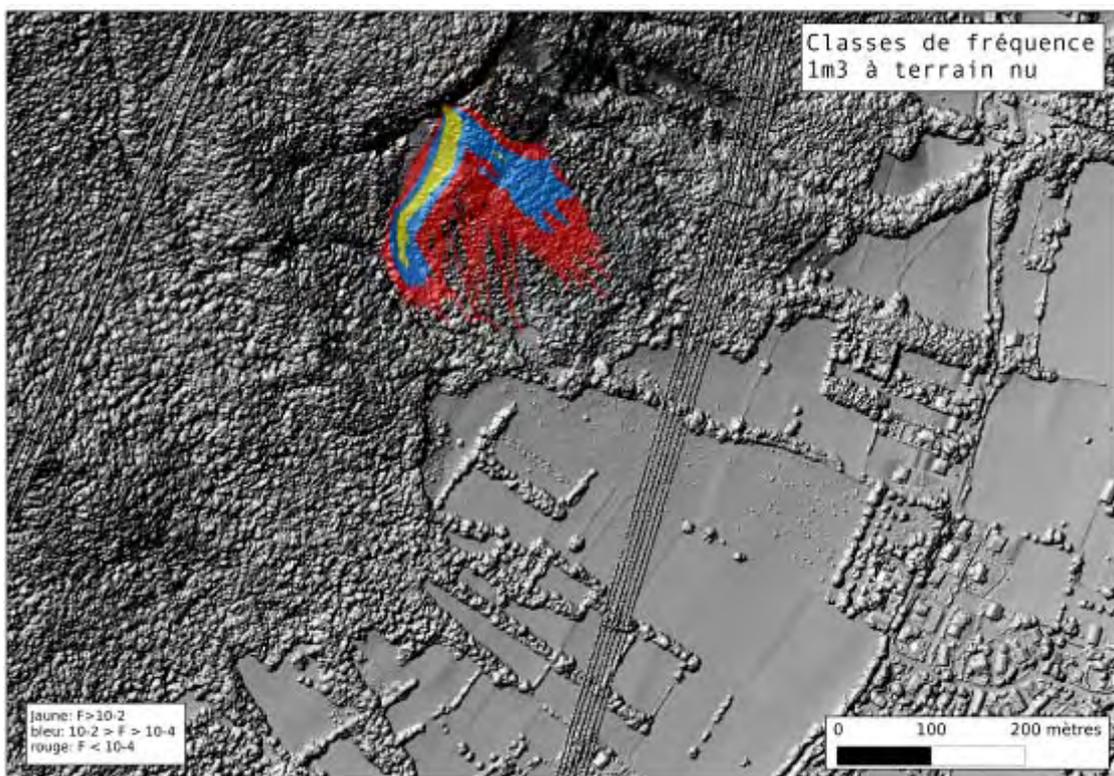


Fig.31 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 1m^3 sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

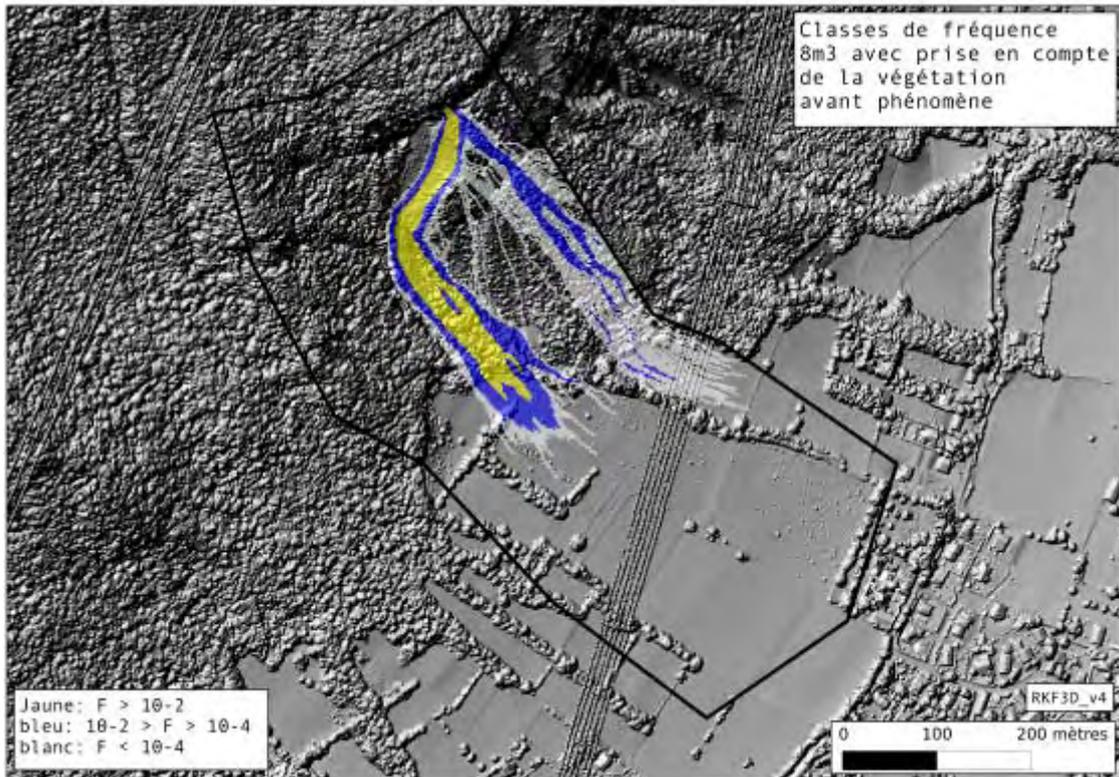


Fig.32 : Carte des fréquences de passage pour un volume de $8m^3$, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

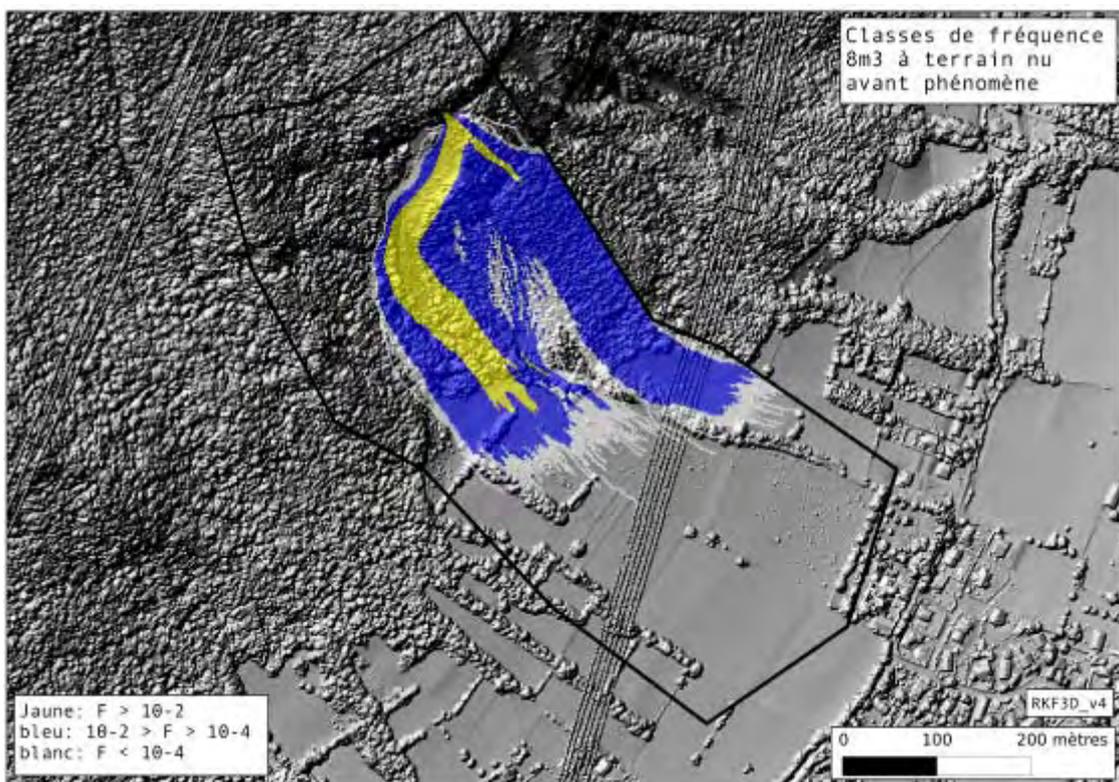


Fig.33 : Carte des fréquences de passage pour un volume de $8m^3$, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

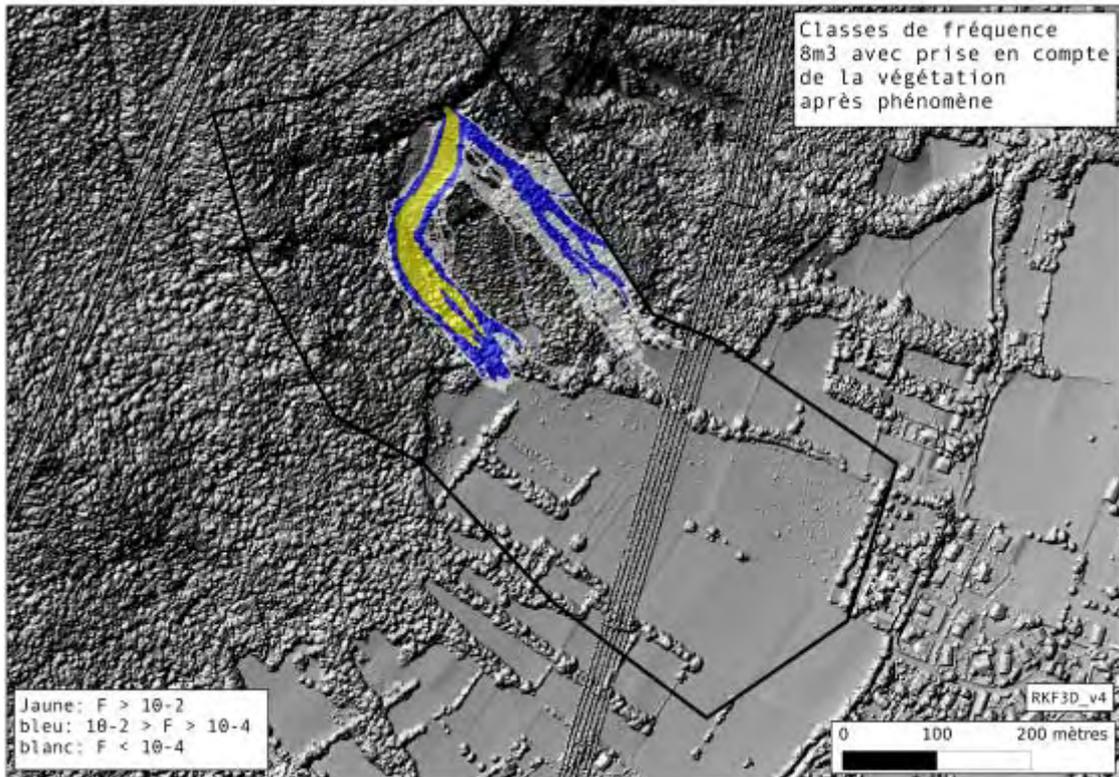


Fig.34 : Carte des fréquences de passage pour un volume de $8m^3$, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

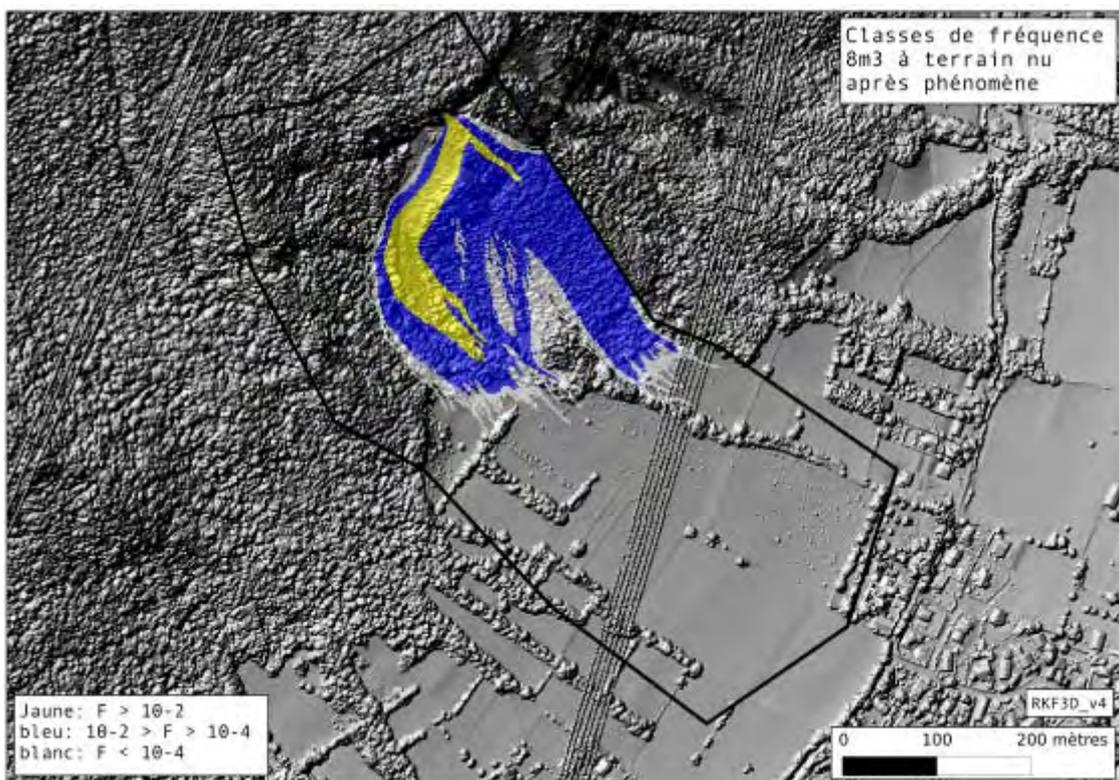


Fig.35 : Carte des fréquences de passage pour un volume de $8m^3$, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

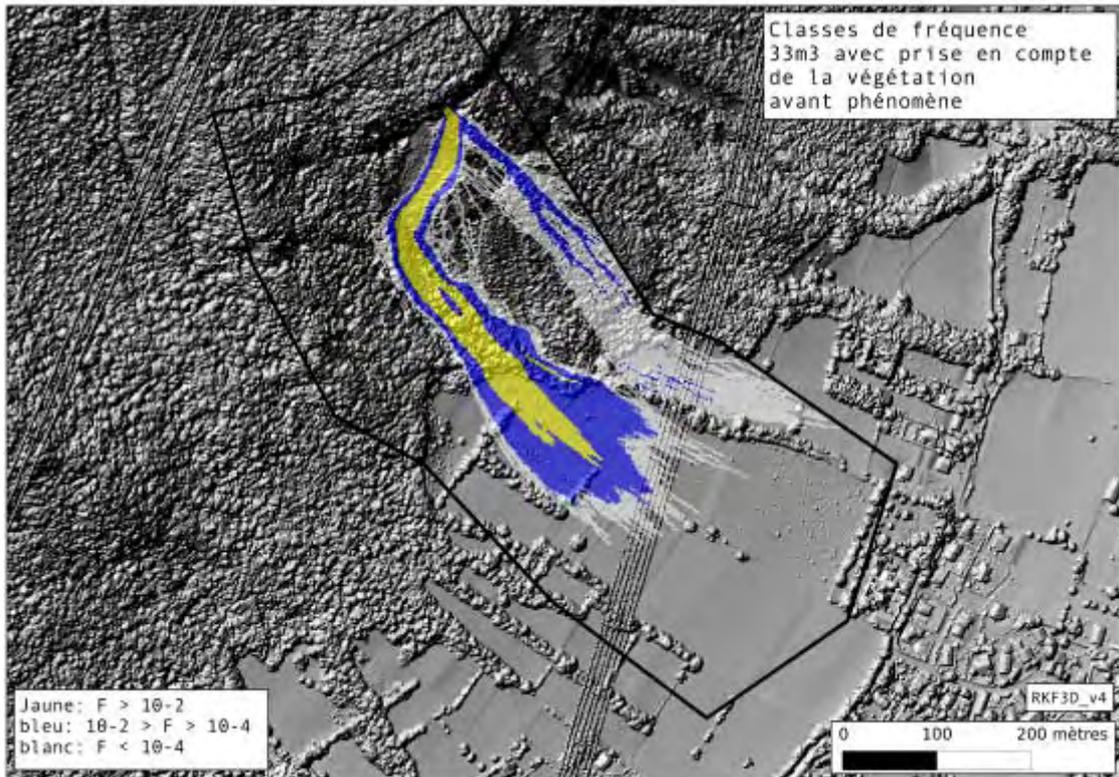


Fig.36 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 33m³, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

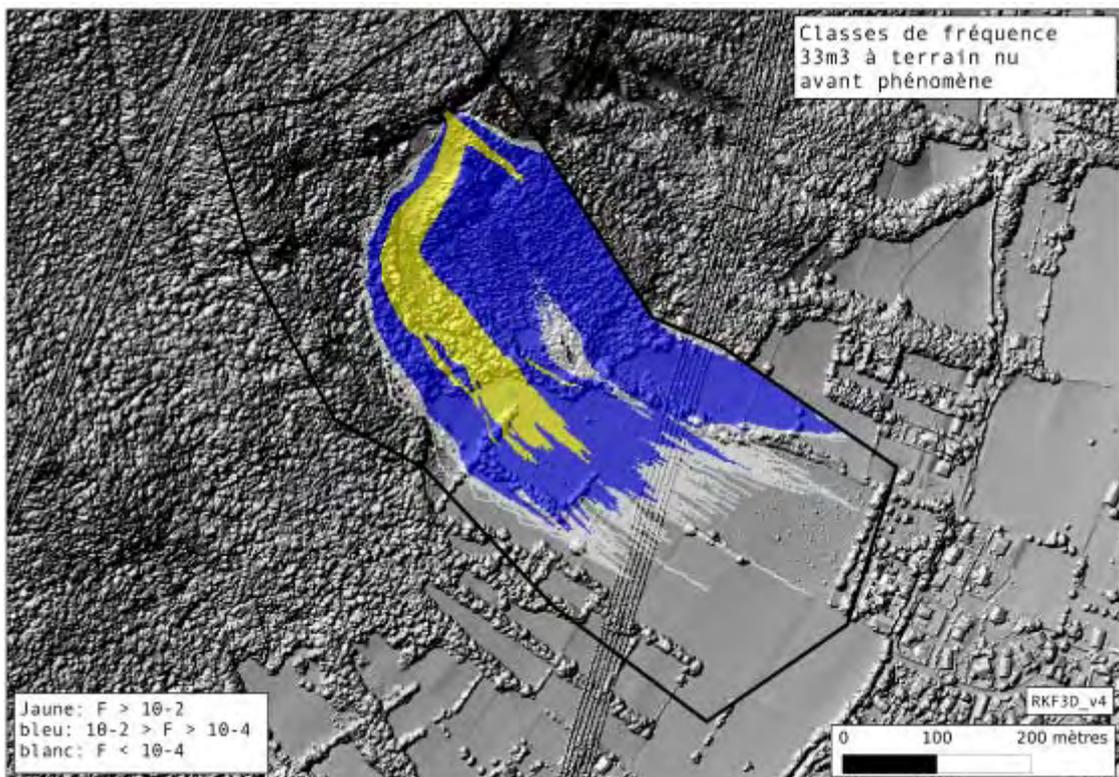


Fig.37 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 33m³, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

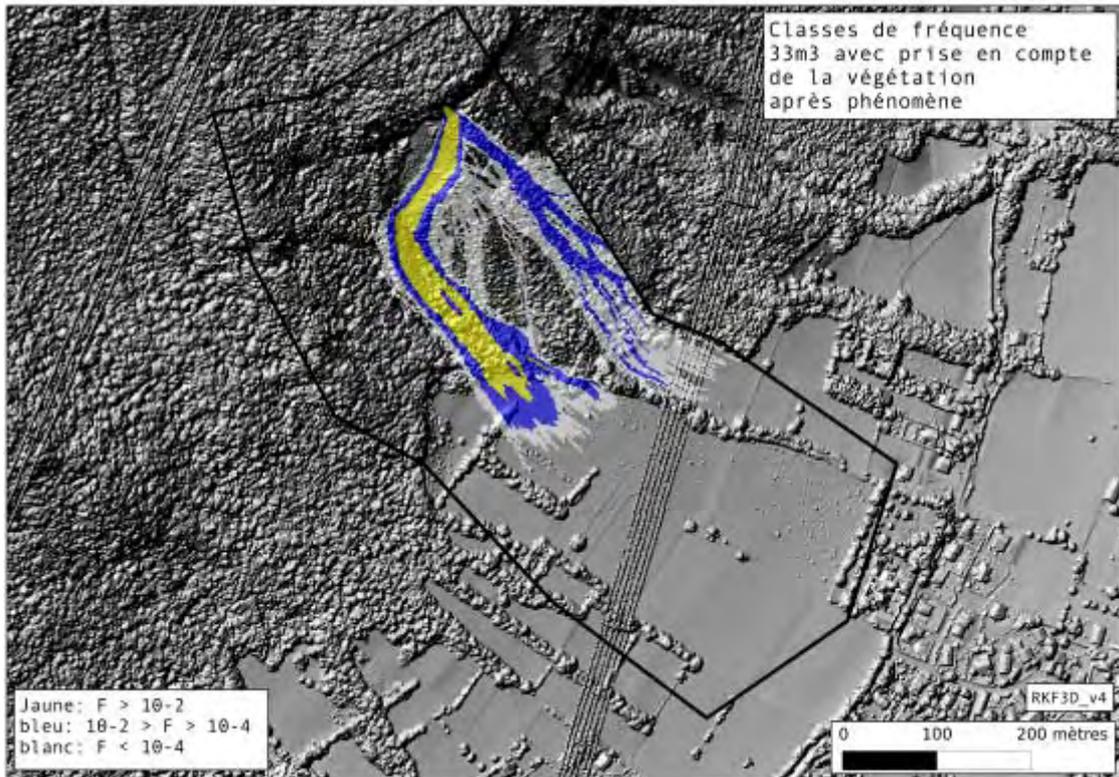


Fig.38 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 33m³, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

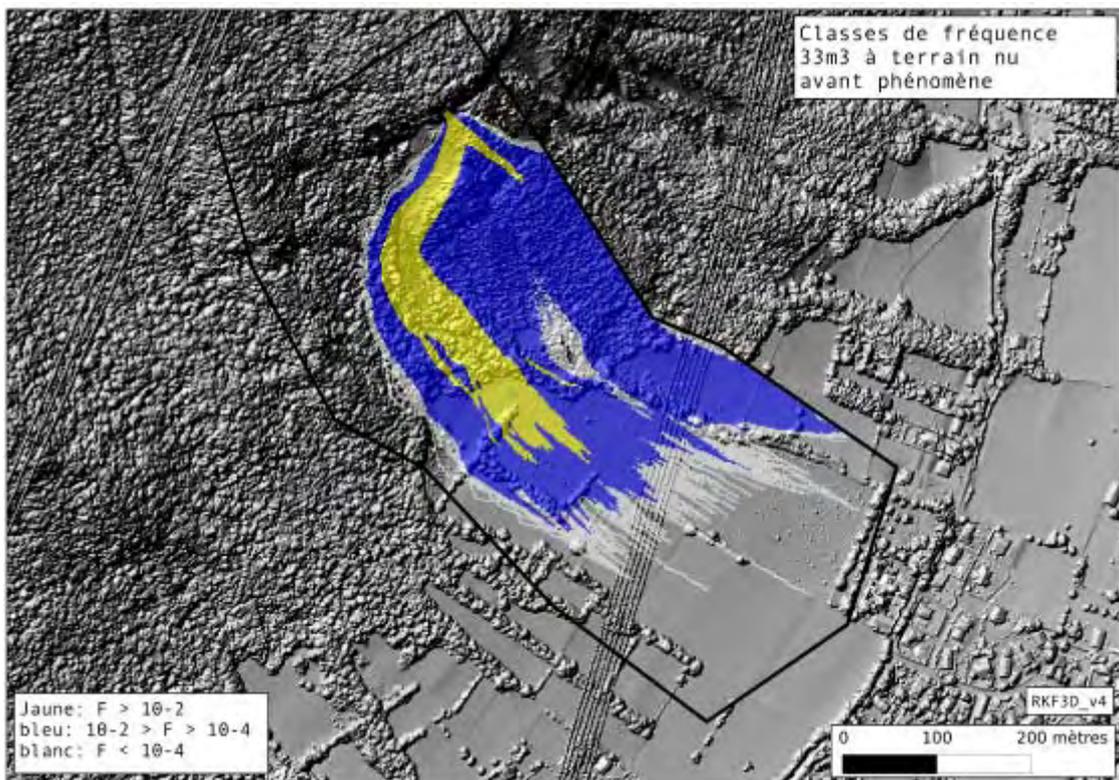


Fig.39 : Carte des fréquences de passage pour un volume de 33m³, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

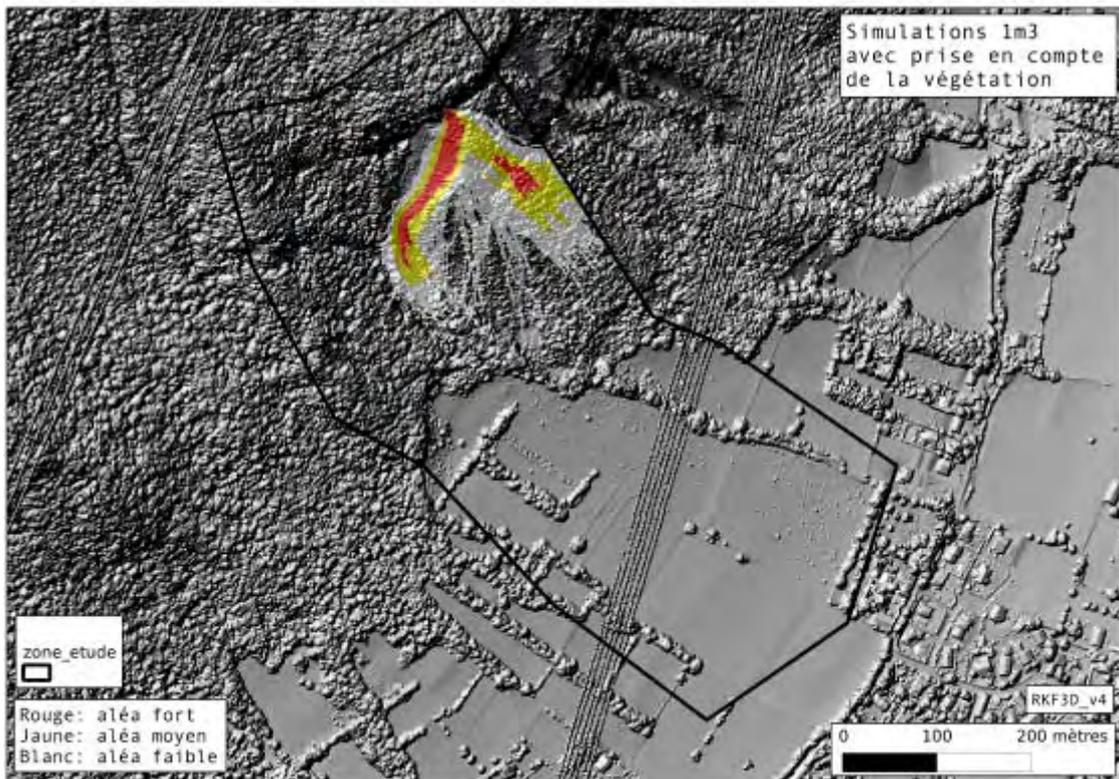


Fig.40 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $1m^3$, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

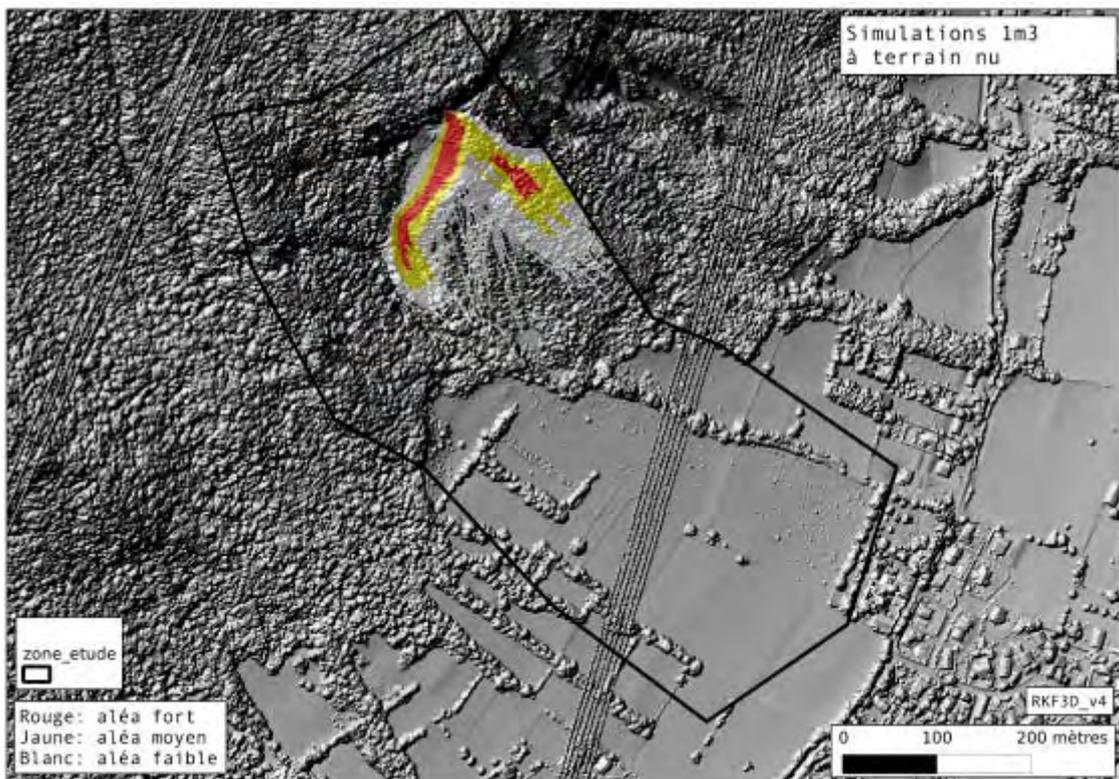


Fig.41 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $1m^3$ sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

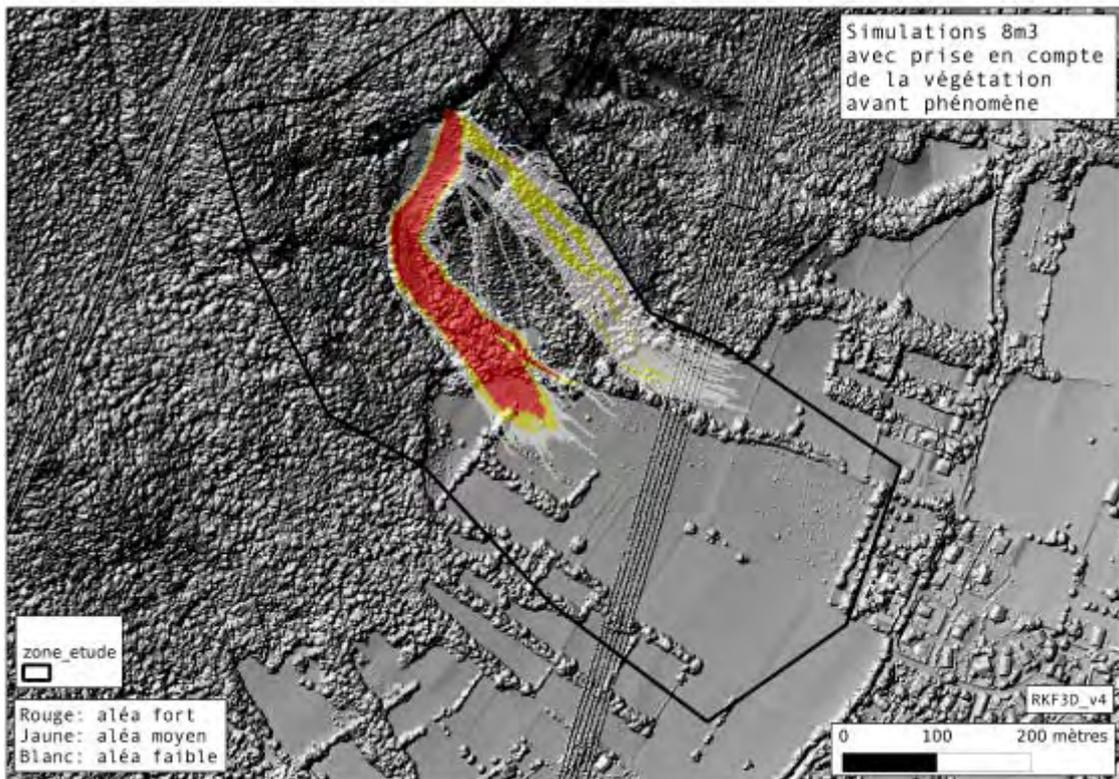


Fig.42 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $8m^3$, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

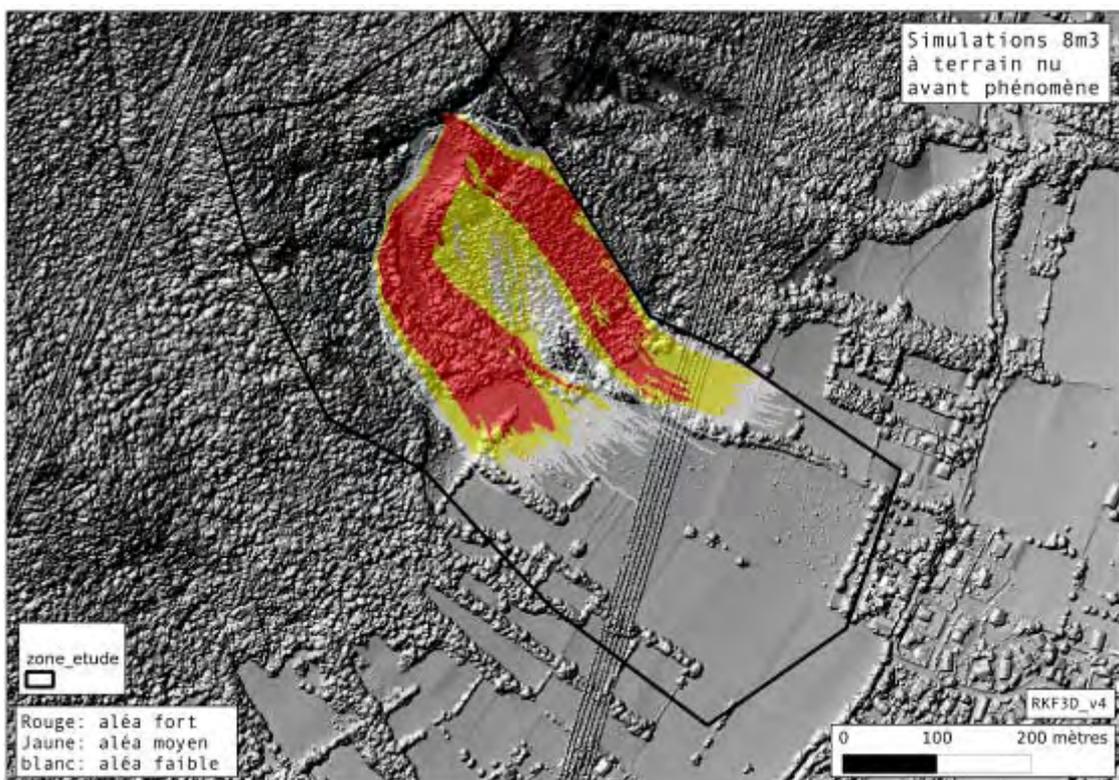


Fig.43 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $8m^3$, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

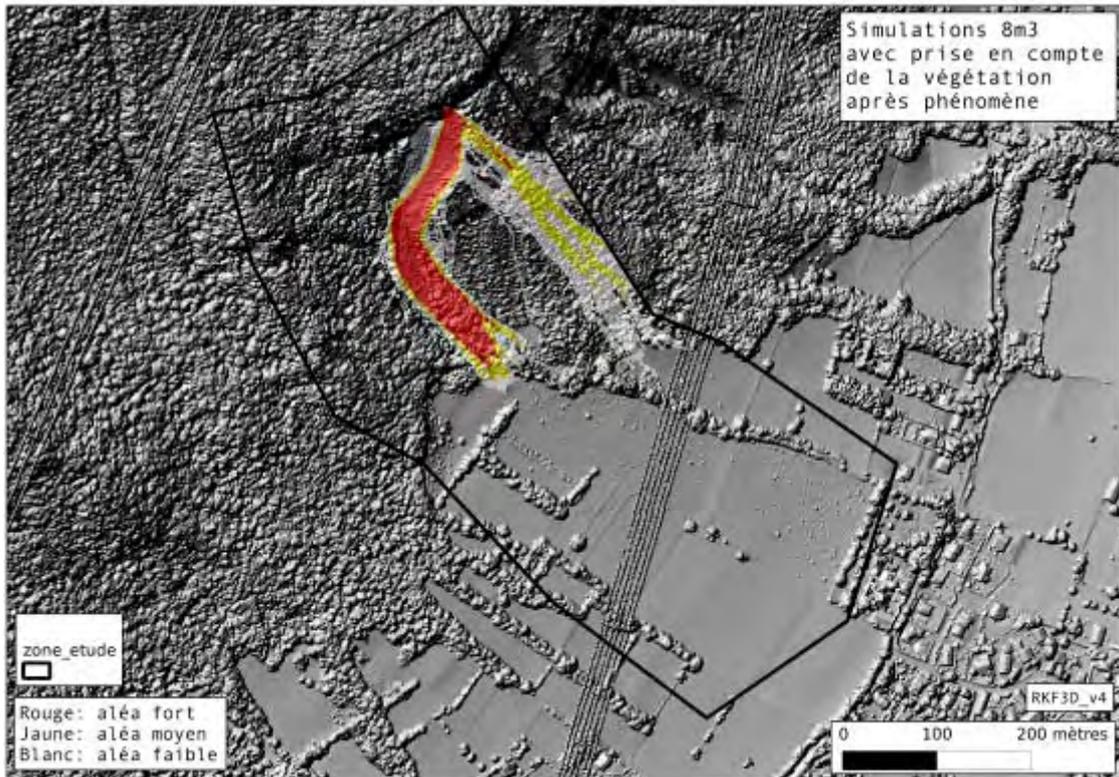


Fig.44 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $8m^3$, avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

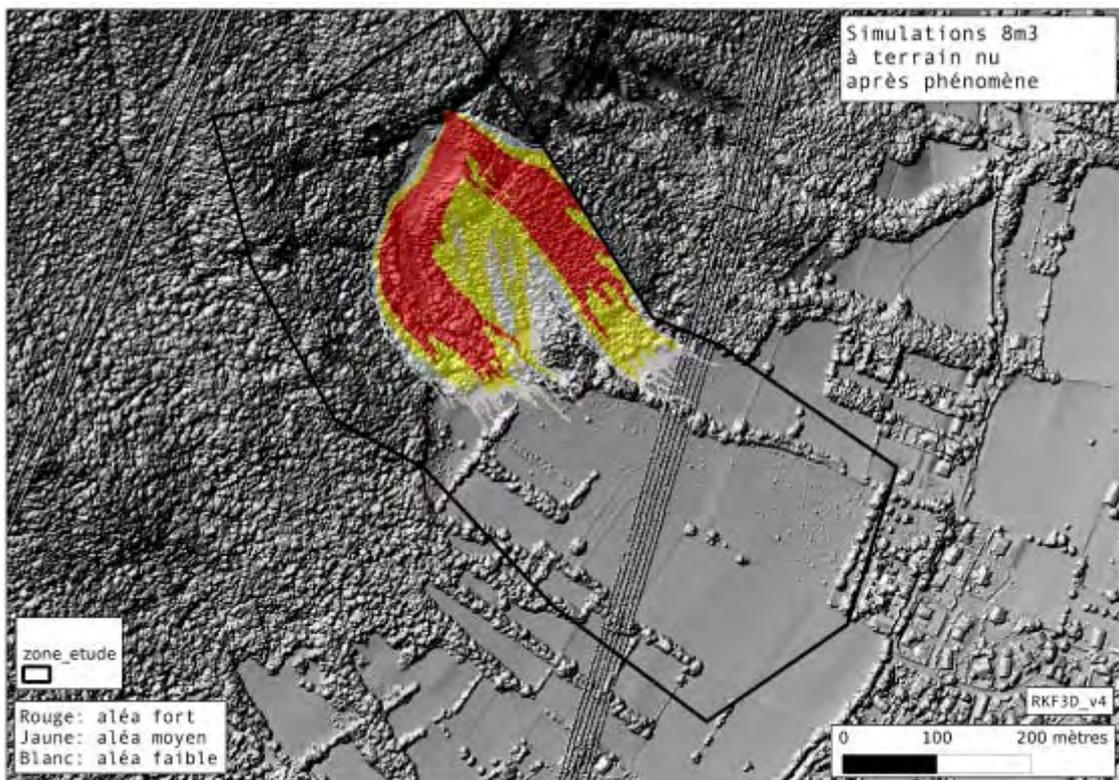


Fig.45 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de $8m^3$, sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

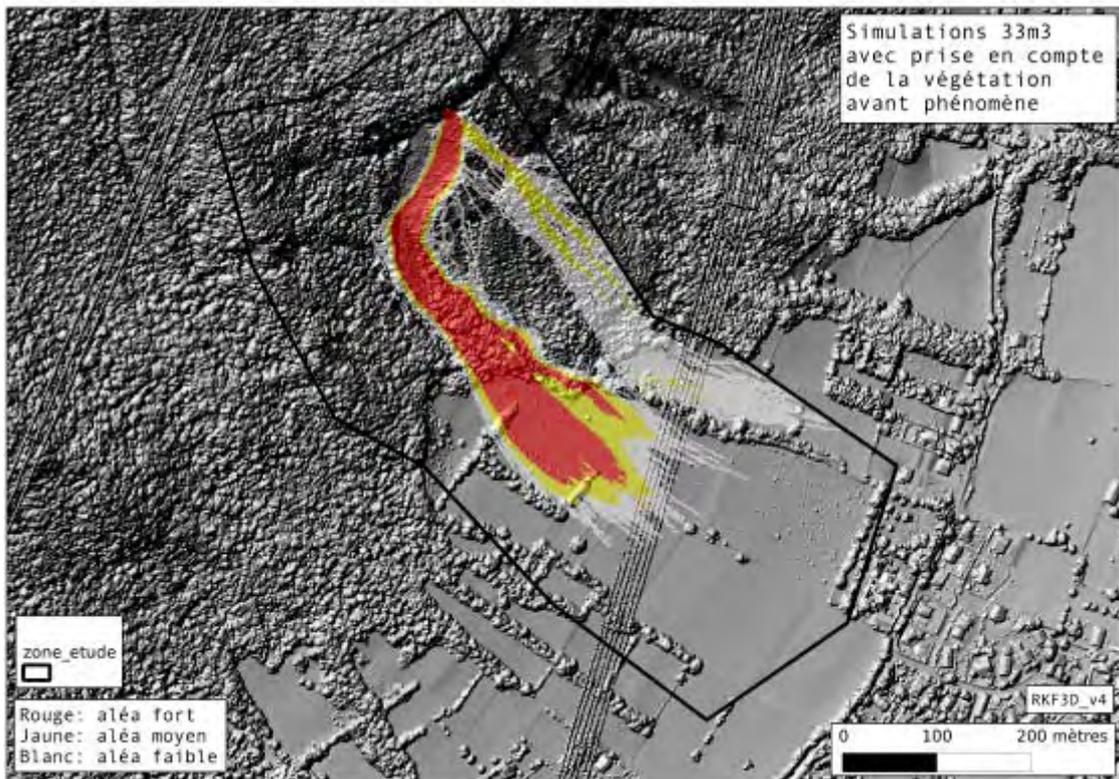


Fig.46 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de 33m^3 , avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

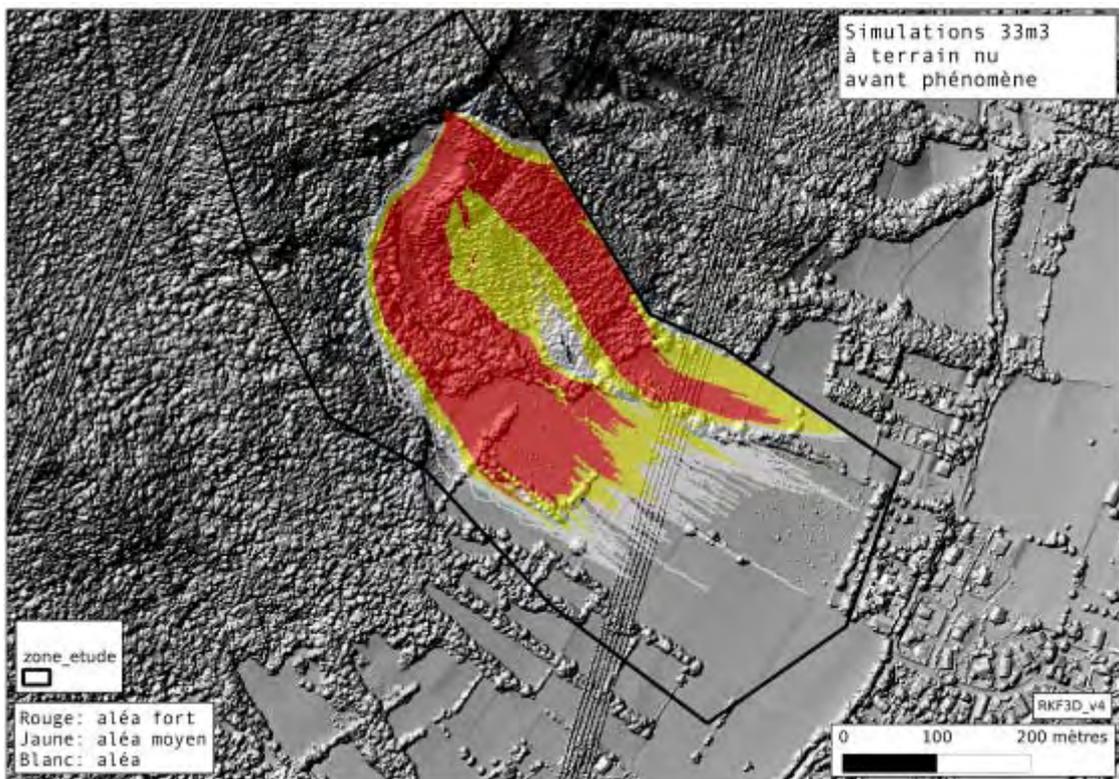


Fig.47 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de 33m^3 , sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

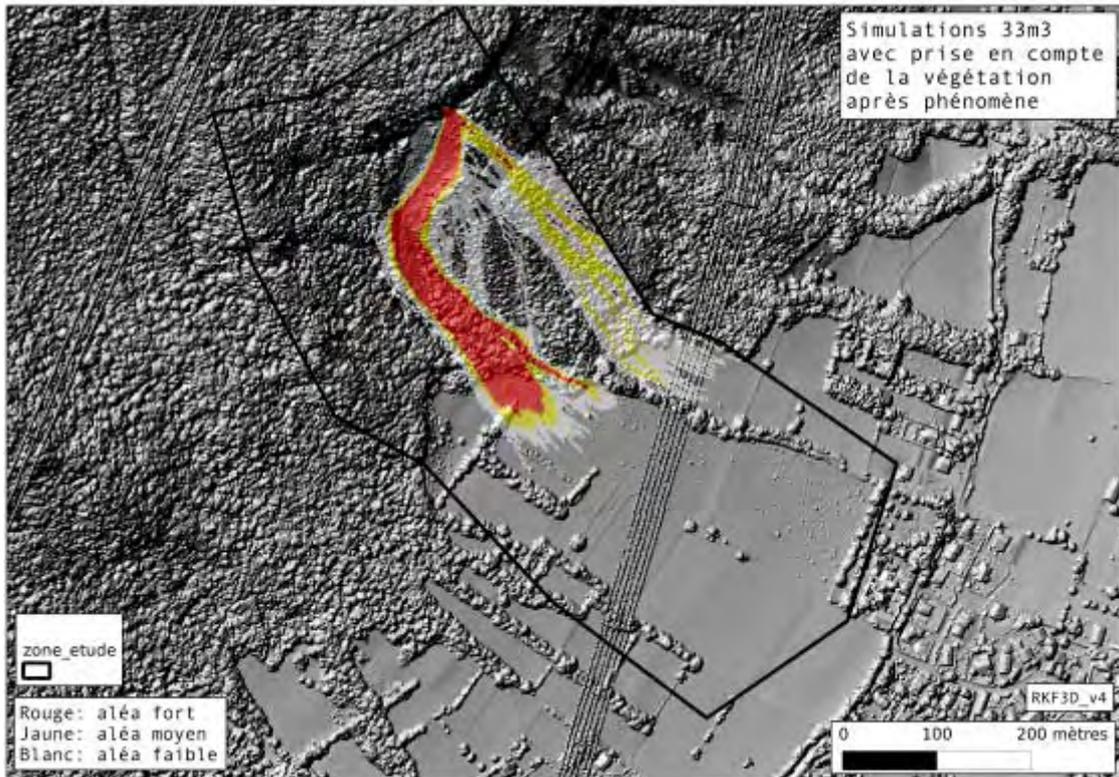


Fig.48 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de 33m^3 , avec prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

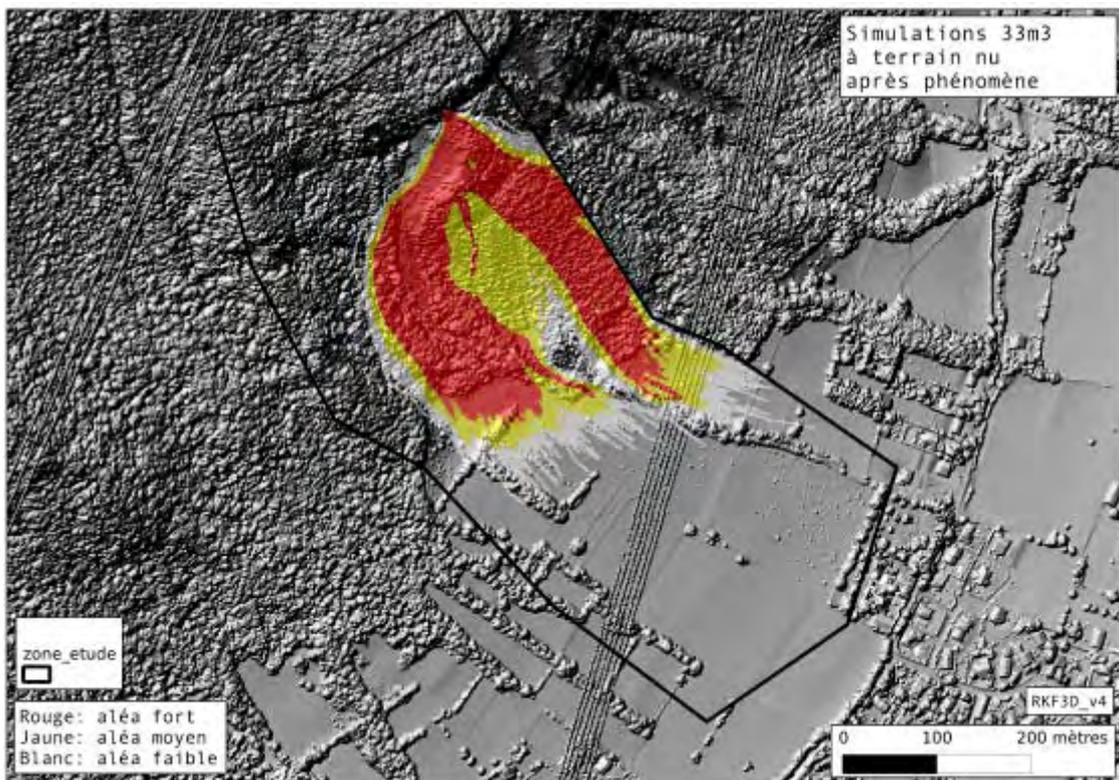


Fig.49 : Proposition de zonage de l'aléa pour un volume de 33m^3 , sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et après la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

Lors de ces travaux de simulation nous avons testé l'utilisation du MNT de l'IGN au pas de 25 m. La carte suivante présente, uniquement pour un volume de propagation de 33m^3 et pour le scénario a terrain et avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008, le résultat de la proposition de zonage.

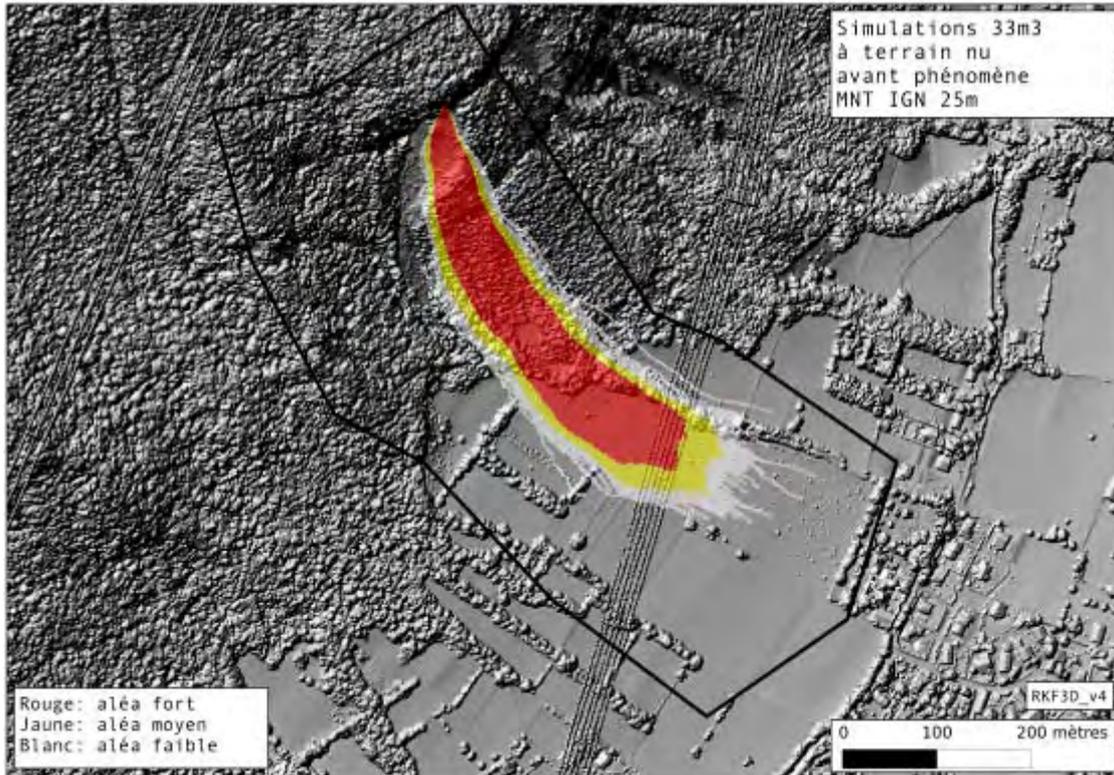


Fig.50 : Proposition de zonage de l'aléa obtenu avec le MNT de l'IGN au pas de 25m et pour un volume de 33m^3 , sans prise en compte de l'action de la végétation forestière et avants la réalisation de l'évènement du 28/12/2008

De la comparaison des cartes 47 et 50 il ressort que l'utilisation du MNT LIDAR fait apparaître une possibilité de déviation latérale en sommet de la zone de propagation, zone qui n'apparaît pas avec le MNT de l'IGN au pas de 25m. Ce constat peut s'expliquer par un lissage de la topographie plus important dans le MNT de l'IGN que dans le MNT LiDAR. Cet effet de lissage du MNT de l'IGN se traduit aussi par la limitation de l'étalement de la zone de propagation et par une zone de propagation plus longue. Le zonage obtenu avec le MNT de l'IGN s'il nous paraît trop pessimiste en termes de longueur maximal de l'axe de propagation principal, permet néanmoins dans ce secteur d'inclure les points d'arrêt observés. Par contre la limitation des déviations latérale occasionnée par le lissage de la topographie, ne permet pas de rendre compte des points d'arrêt situés situés les plus à gauche de cet axe (en regardant du pied vers le haut du versant).

Il est intéressant de noter que les simulations réalisées avec le MNT LiDAR avant la réalisation du phénomène du 28/12/2008, pour les volumes de 8 et 33m³ avec et sans prise en compte de la végétation forestière, permettent de rendre compte des points d'arrêts observés pour ces gammes de volumes. Pour les blocs de 8m³ les points d'arrêt observés sont situés soit dans la limite de la proposition de zone d'aléa moyen soit dans la zone d'aléa faible. En ce qui concerne le volume de 33m³ le résultat donne une localisation dans la zone d'aléa fort.

En comparant ces résultats obtenus avec la matrice de seuillage dérivée de la matrice suisse, à ceux obtenus avec la matrice « ligne d'énergie », on observe une convergence en ce qui concerne la limite maximale de la zone de propagation. En termes de qualification des différentes zones d'aléas, il y a une nette convergence avec les résultats des simulations pour un volume de 8m³. En ce qui concerne le volume de 33m³ si on observe une convergence en termes de limite maximale de propagation, celle-ci n'existe pas en termes classification de l'aléa. Ceci peut s'expliquer par le fait que par construction la ligne d'énergie ne tient pas compte de l'énergie développée par les projectiles. La matrice de seuillage basée sur la ligne d'énergie est en fait une matrice exprimant via une valeur d'angle une classe de probabilité d'atteinte d'un point donné : probabilité forte, moyenne, faible et très faible. Il est intéressant de préciser que l'utilisation de la ligne d'énergie permet à l'expert de se faire une première idée réaliste des potentialités d'atteintes d'un point donné. Il représente à notre avis, de par la nature de ses résultats, sa facilité et sa rapidité d'utilisation ; un outil incontournable pour l'aide à l'expertise.

VII Résultats et conclusions

La réalisation, par l'ADRGT-SAGE, d'un profil en long par relevé de terrain a permis de tester et valider la haute précision des données LiDAR. Hormis un problème de géo-référencement et après correction du biais de 60m les deux profils en long (LiDAR et terrain) coïncident. Par contre on observe sur le profil en long calculé avec les données de la BD Alti de l'IGN des différences locales (zones de replats et zones d'accentuation de pente) qui n'existent pas dans la réalité. De telles zones ont des conséquences très fortes sur les résultats des simulations. En effet une zone de replat va favoriser le freinage des blocs alors qu'une zone de plus forte pente va au contraire favoriser leur accélération. Par conséquent l'utilisation de la seule BD Alti est à proscrire pour une étude de simulation trajectographique pour l'aide à la réalisation d'un PPRn. Par contre, le profil en long calculé à partir des courbes de niveaux de la carte IGN au 1/25000 est de meilleure qualité mais il contient quand même des « aberrations » topographiques très localisées.

Il est important de préciser que c'est ce travail de comparaison des profils en long qui a permis de détecter les problèmes liés à la différence des référentiels géographiques entre les données LiDAR (Lambert 93) et les données de l'IGN (Lambert II E). Ce problème de géoréférencement est l'explication des conclusions du service RTM : « il existe un décalage très important. Les éléments qui ont une influence sur les calculs de CRSP sont, l'existence d'un replat sur le profil IGN qui aurait favorisé l'arrêt des blocs, une zone après le replat plus pentue qui aurait conduit à l'absence d'arrêt ». En effet, compte tenu du fait qu'il existe entre autre un décalage en xy entre la BD Alti et les données LiDAR, l'implantation du profil que le RTM a utilisé avec la BD Alti ne correspond pas à celle du profil en long calculé avec les données LiDAR.

De plus, en fonction du modèle de simulation utilisé, les données LiDAR au pas de 1m peuvent s'avérer « trop riches ». En d'autres termes le volume des données LiDAR peut être trop important pour les capacités de calcul de certains modèles de simulations et ainsi générer des temps de calcul très importants voire incompatibles avec un délai de réalisation raisonnable d'une expertise. Par ailleurs, pour les modèles de type 2D se sont les particularités topographiques présentes sur les profils qui sont importantes pour les calculs. Ceci explique que bien souvent que les points de relevés des profils, en long relevés sur le terrain, correspondent à des variations topographiques influençant la propagation des blocs, où tout du moins jugées comme telles par l'opérateur. Dans ce contexte, les données LiDAR peuvent revêtir un intérêt certain si elles sont ré-échantillonnées à un pas compatible avec l'utilisation de ces outils.

La figure suivante présente la localisation, sur le modèle Numérique de Surface LiDAR, des points d'arrêt maximal ainsi que les volumes des projectiles (visibles sur le MNS) correspondant à ces points d'arrêt. Il est important de rappeler que l'objectif de cette étude n'est pas de tester la robustesse des outils qui ont été utilisés mais d'analyser l'apport 1) d'une matrice de zonage standardisée, 2) d'un outil de simulation en 3D et 3) d'un outil de simulation en basé sur le principe de la ligne d'énergie.

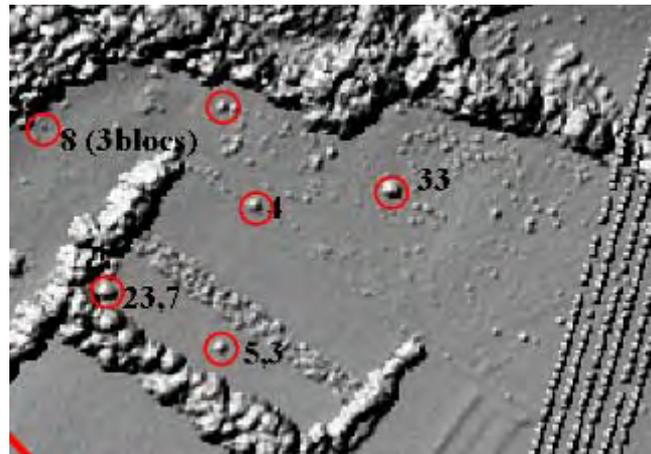


Fig.51 : Position des points d'arrêt maximal de l'évènement du 28/12/2008 (les chiffres correspondent au volume en m^3 des blocs)

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus avec la matrice de seuillage « énergie moyenne * probabilité d'atteinte » et celle des angles de ligne d'énergie. Ces résultats ne sont présentés que pour le plus fort volume observé à savoir $33m^3$.

De l'analyse des figures 52 et 53 il ressort, que les pour les résultats des travaux de simulations réalisés par le RTM, l'emploi de la matrice dérivée des directives suisses aboutit à la proposition d'une seule zone d'aléa classée en aléa fort. Dans le cas de l'utilisation de la matrice dite « zonage Isère », construite uniquement sur des classes de probabilité d'atteinte, la proposition de zonage conduit à la création de 3 zones d'aléas : fort, moyen et faible. La prise en compte de l'énergie dans le principe de qualification des zones d'aléas, permet de rendre compte du fait que même si, en un point donné, un projectile a une fréquence d'atteinte faible celui-ci est en mesure de générer un risque important si son énergie moyenne est importante. L'utilisation de cette matrice semble donc limiter les extensions des zones d'aléa moyen et d'aléa faible au profit de la zone d'aléa fort. De plus, dans le cas d'un bloc de $33m^3$, même si sa vitesse est faible son énergie est importante compte tenu de sa masse. Ainsi, dans ce cas de figure, le passage de la zone de propagation avec une forte énergie à la zone d'arrêt est très rapide. De part les hypothèses de calcul déterminées par le RTM (cf. chapitre IV), la zone d'arrêt du bloc de $33m^3$ est située en dehors de l'enveloppe de propagation simulée.

PROFIL P2	Bloc de 1 m ³	Bloc de 8 m ³	Bloc de 33 m ³						
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻²	x : 265 m z : 510 m	x : 347m z : 482 m	x : 353m z : 480 m						
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻⁴	x : 330 m z : 485 m	x : 371 m z : 475 m	x : 379 m z : 473 m						
Coordonnées (distance, altitude) de la probabilité d'atteinte : 10⁻⁶ (par extrapolation)	x : 394 m z : 470 m	x : 395 m z : 468 m	x : 406 m z : 465 m						
Distances des 3 points d'analyse choisis (x : en mètres)	Pt1	Pt2	Pt3	Pt1	Pt2	Pt3	Pt1	Pt2	Pt3
	210	250	320	300	340	350	320	340	360
Nombre de blocs passés au niveau du point d'analyse (sur 10 000 blocs)	1021	250	2	6984	1440	737	9033	2207	44
Energie moyenne des blocs passés au niveau du point d'analyse (en kJ)	285	150	85	1011	564	528	40000	25000	12761

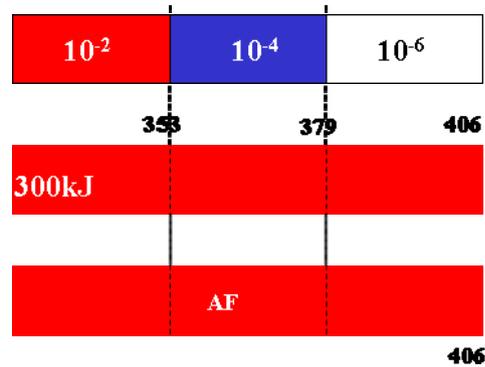


Fig.52 : Zonages de l'aléa obtenus avec les résultats du RTM et l'utilisation de la matrice de zonage « Isère » et celle dérivée des directives suisses.

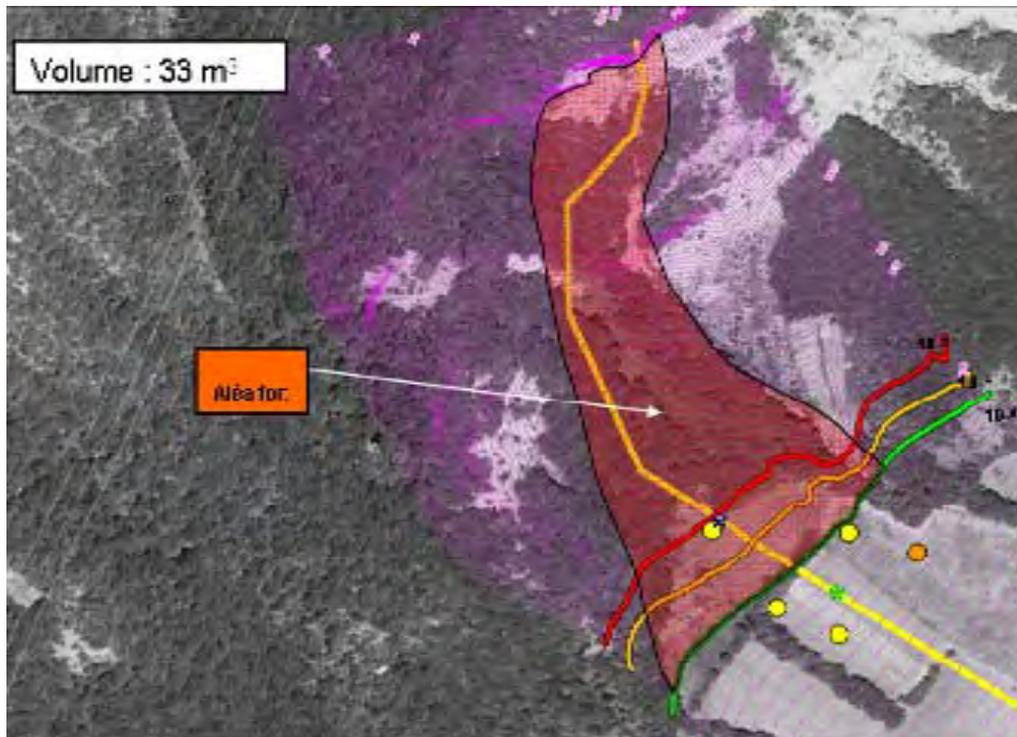


Fig.53 : Expression cartographique des zonages de l'aléa obtenus avec les résultats du RTM et l'utilisation de la matrice de zonage « Isère » (ligne rouge jaune et verte) et celle dérivée des directives suisses (zone en rouge). Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

Les figures 54,55 et 56 présentent les propositions de zonage obtenues avec les résultats de l'ADRGT. Il est intéressant de noter, qu'avec ces résultats de simulations, l'utilisation de la matrice dérivée des directives suisse limite l'extension de la zone d'aléa moyen au profit de l'extension de la zone d'aléa faible.

		abscisse moyenne en mètres	écart type
abscisse probabilité d'atteinte	$\times 10^{-2}$	338	7,0
	$\times 10^{-4}$	418	5,9
	$\times 10^{-6}$	440,5	6,0
abscisse énergie moyenne en kJ	$\times E = 300 \text{ kJ}$	247,5	5,4
	$\times E = 30 \text{ kJ}$	411	1,3

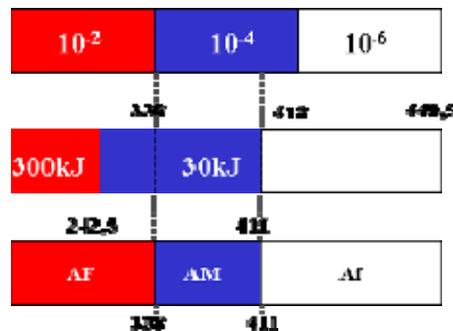


Fig.54 : Zonages de l'aléa obtenus avec les résultats de l'ADRGT et l'utilisation de la matrice de zonage « Isère » et celle dérivée des directives suisses.

Avec ces 2 matrices, le bloc de 33m^3 est situé dans la zone d'aléa faible. Les hypothèses de calculs en association avec le modèle utilisé ont donc été en mesure de déterminer une zone de propagation permettant de rendre compte des points d'arrêt observés. Il est important de préciser que les 3 organismes n'ont procédé à aucun rétro calage, à partir des points d'arrêt observés, des paramètres de propagation.

L'ADRGT n'ayant pas dans son rapport proposé de spatialisation de ces résultats obtenus sur le profil en long, le cemagref a réalisée une proposition de spatialisation en utilisant le principe utilisé par le RTM basé sur la projection des points de limite de zone suivant les courbes de niveaux.

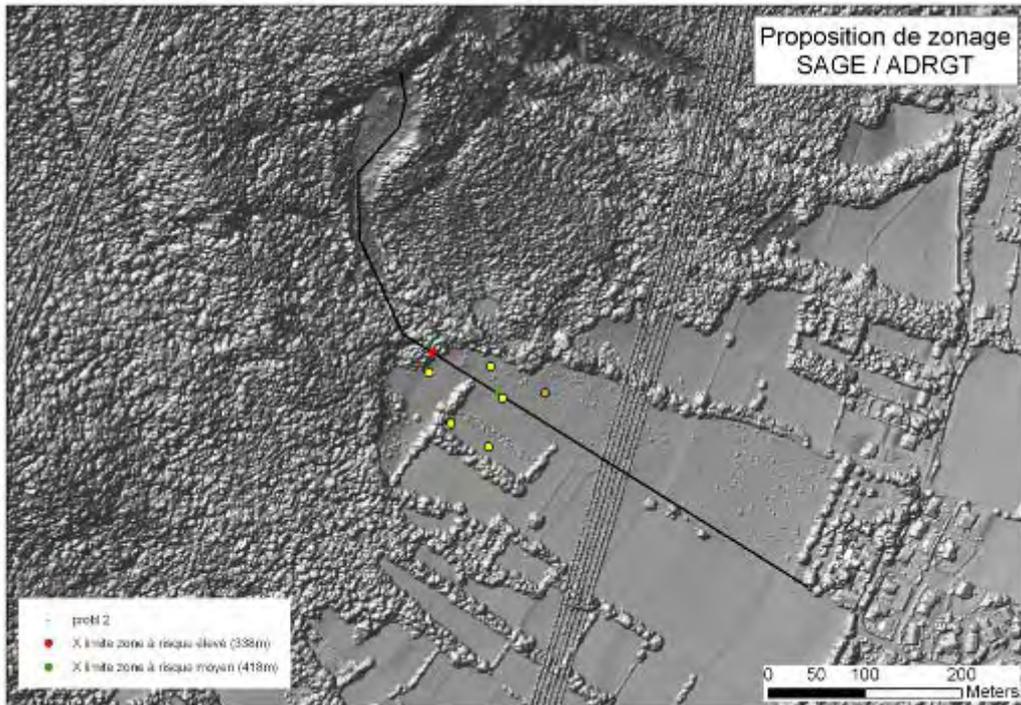


Fig.55 : Expression cartographique sur le profil en long des zonages de l'aléa obtenus avec les résultats de l'ADRGT et de la matrice dérivée des directives suisses (astérisque en rouge, astérisque en vert). Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

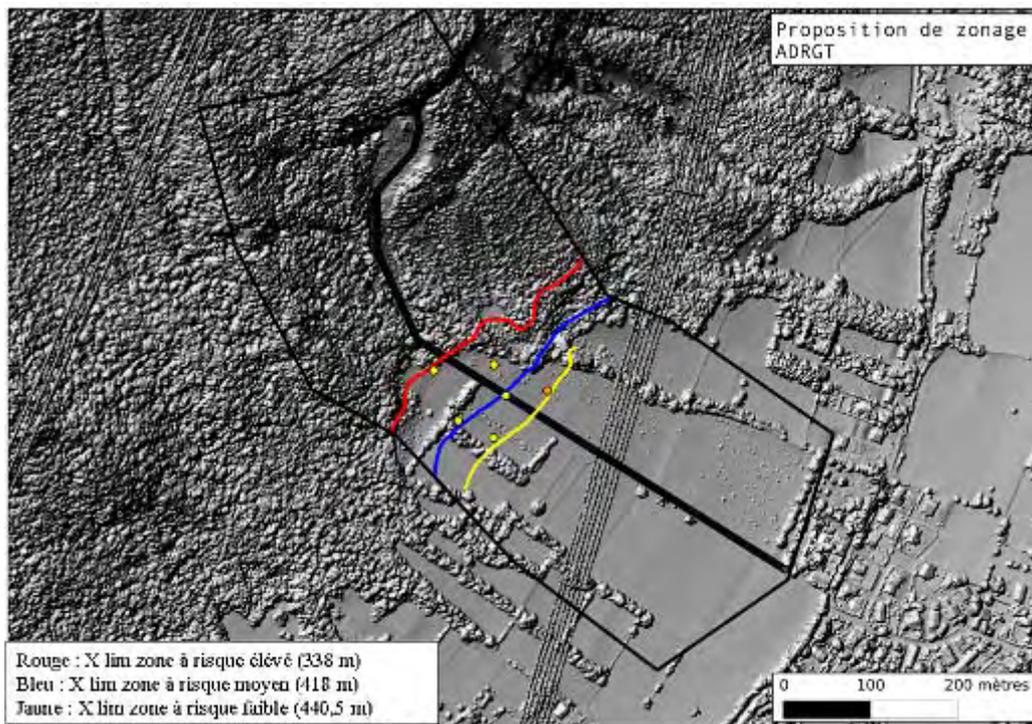


Fig.56 : Expression cartographique suivant les courbes de niveaux des zonages de l'aléa obtenus avec les résultats de l'ADRGT et de la matrice dérivée des directives suisses (ligne rouge, bleue et jaune). Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

Pour le Cemagref, nous présentons les résultats pour les scénarii avant phénomène avec et sans forêt. Les propositions de zonage sont présentées dans les figures 57, 58, 59 et 60.

La tendance de réduction de la zone d'extension de l'aléa moyen dans le cas de l'utilisation de la matrice dérivée des directives suisses est là encore confirmée.

Les résultats obtenus avec le modèle Rockyfor3D font ressortir la possibilité d'un effet « canalisateur » de la végétation forestière qui était présente avant la réalisation de l'évènement du 28/12/2008. Pour le scénario avec prise en compte de la forêt, le point d'arrêt du bloc de 33m³ est situé en zone d'aléa moyen, alors qu'avec le scénario il est situé en zone d'aléa fort. L'utilisation d'un modèle 3D permet d'obtenir directement une proposition cartographique de zonage. Il est intéressant de noter que dans le cas de cette zone d'étude, les limites d'extension des zones ne suivent pas les courbes de niveaux. De plus, il apparaît qu'il semble exister la possibilité d'un deuxième « couloir » de propagation autre que celui emprunté par l'évènement du 28/12/2008. Dans le cadre du temps imparti à cette étude, nous n'avons pas pu aller vérifier in situ la réalité de cette possibilité.

Il est important de préciser que tous les modèles de simulations trajectographiques de type probabiliste peuvent au final, et en fonction du nombre de runs réalisés, générer un certain nombre de trajectographies aberrantes. En effet, en réalisant par exemple 1 million de simulation, il est fort probable que, compte tenu de la loi des grands nombres, par tirage aléatoire une combinaison impossible, dans la réalité, de paramètres soit générée. Si c'est le cas alors cette combinaison de paramètre va générer une situation aberrante et donc une trajectoire aberrante. Il revient alors à l'opérateur d'écarter ces résultats aberrants. Les trajectographies aberrantes sont bien souvent associées à celles qui correspondent par exemple aux valeurs les plus extrêmes en termes de vitesse et de hauteur de passage, et aux valeurs les plus faibles en termes de fréquence de passage. L'utilisation de l'énergie moyenne, comme un des deux paramètres d'entrée de la matrice dérivée des directives suisses, permet de limiter la prise en compte de valeurs énergétiques aberrantes dans la proposition de zonage. En ce qui concerne les probabilités d'atteinte, il faut réaliser une étude de sensibilité du modèle utilisé afin de fixer le seuil de probabilité à partir duquel les trajectoires sont considérées comme improbables. Les résultats présentés dans ce rapport n'ont fait l'objet d'aucune correction et donc d'aucune interprétation de la part des opérateurs. Dans le cas de la réalisation d'un PPRn un tel travail d'analyse aurait été mené.

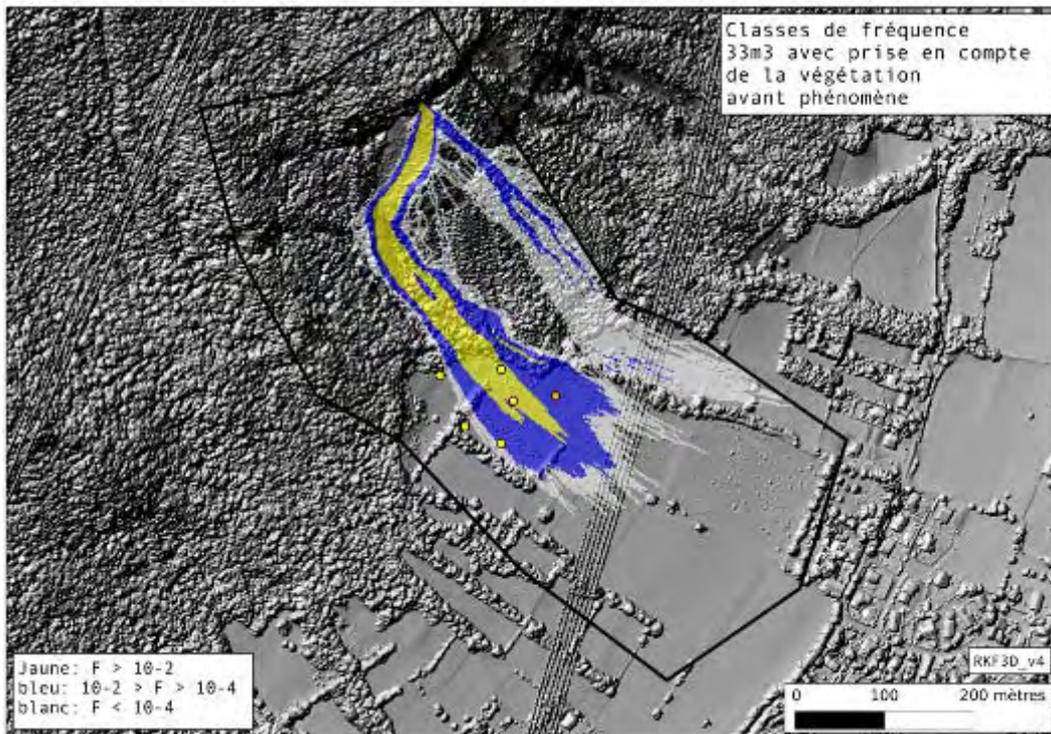


Fig.57 : Expression cartographique du zonage de l'aléa obtenu avec les résultats du Cemagref, scénario avec forêt, et de la matrice « zonage Isère ». Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

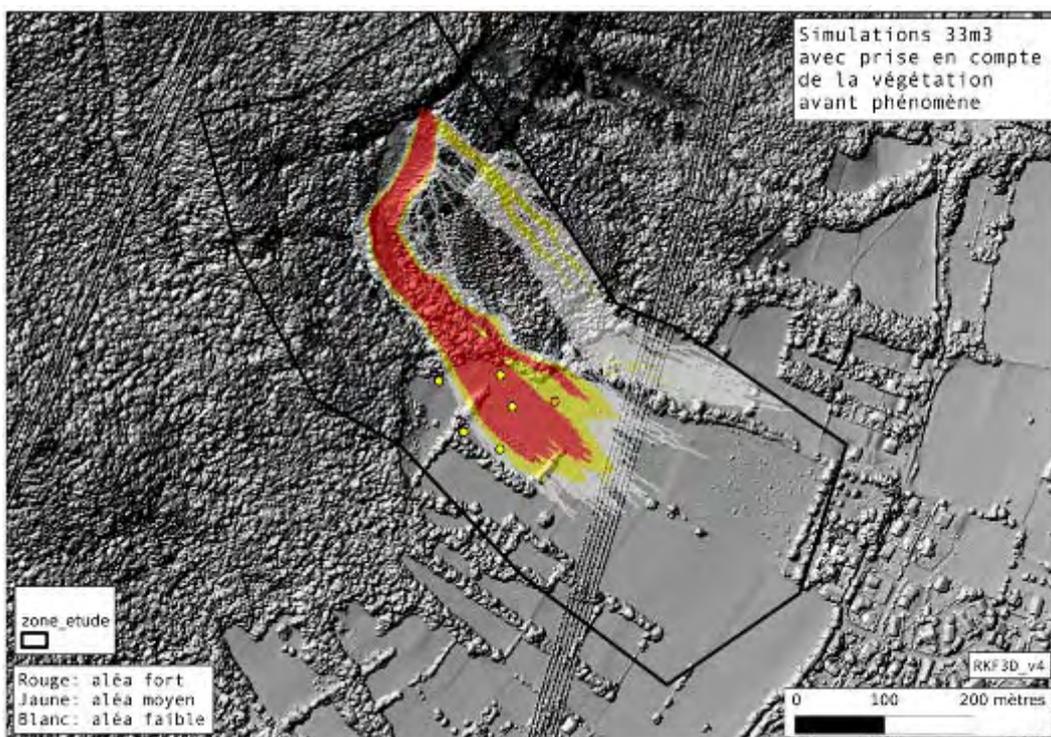


Fig.58 : Expression cartographique du zonage de l'aléa obtenu avec les résultats du Cemagref, scénario avec forêt, et de la matrice dérivée des directives suisses. Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

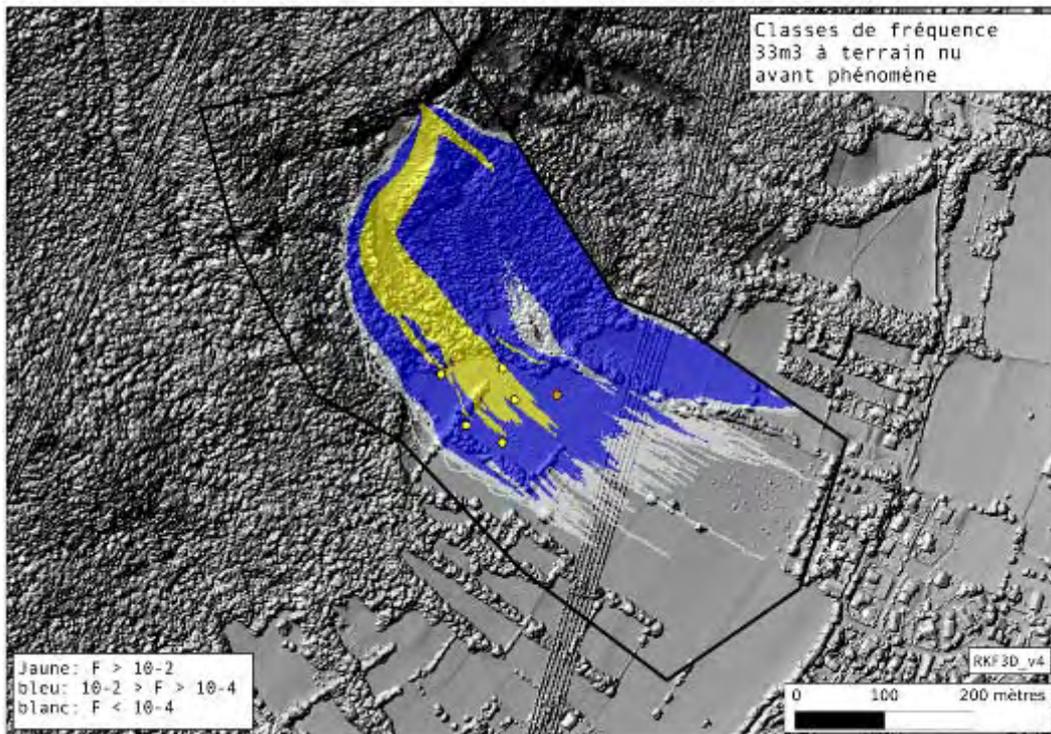


Fig.59 : Expression cartographique du zonage de l'aléa obtenu avec les résultats du Cemagref, scénario sans forêt, et de la matrice « zonage Isère ». Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³

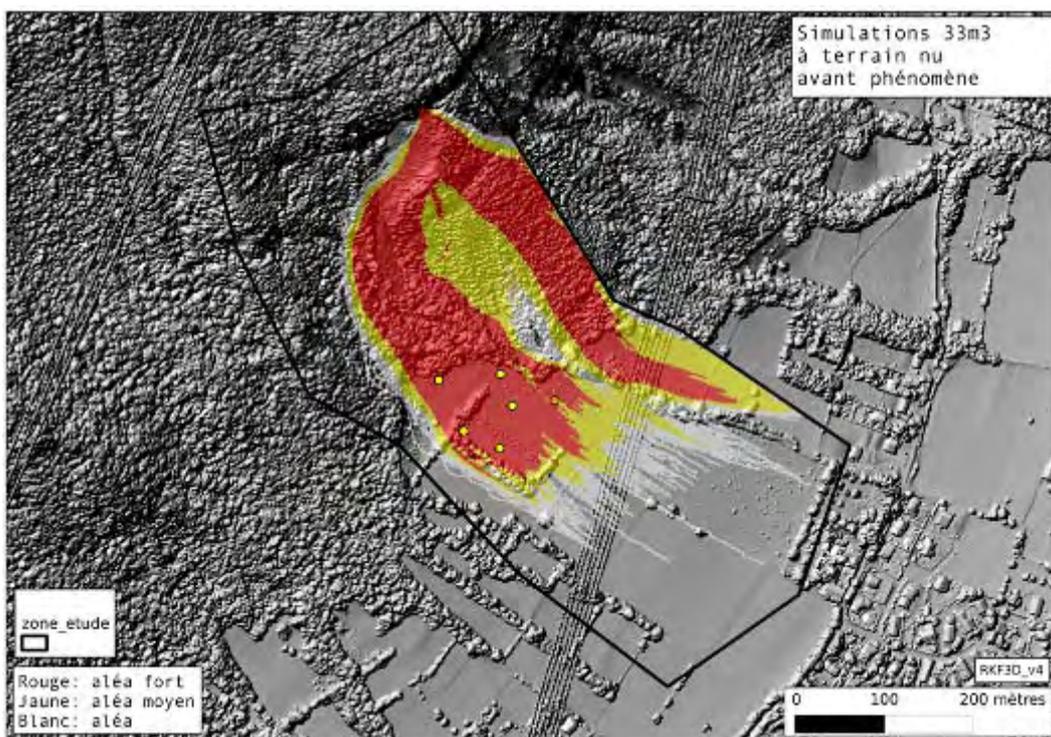


Fig.60 : Expression cartographique du zonage de l'aléa obtenu avec les résultats du Cemagref, scénario sans forêt, et de la matrice dérivée des directives suisses. Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

La figure 61 présente la proposition de zonage de l'aléa obtenu en utilisant le principe de la ligne d'énergie et la matrice de zonage qui lui est associé. De l'analyse de cette figure, il ressort que le principe de la ligne d'énergie permet de rendre compte de la répartition des points d'arrêt maximal du phénomène du 28/12/2008. De plus, il permet d'obtenir une proposition de zonage tenant compte de la morphologie du site, ce qui se traduit par des limites de zones qui ne suivent pas obligatoirement les courbes de niveaux.

Comme nous l'avons déjà précisé dans ce rapport : « l'utilisation de la ligne d'énergie permet à l'expert de se faire une première idée réaliste des potentialités d'atteintes d'un point donné. Il représente à notre avis, de par la nature de ses résultats, sa facilité et sa rapidité d'utilisation ; un outil incontournable pour l'aide à l'expertise ». Ce principe peut offrir à l'expert la possibilité d'identifier des résultats aberrants dans une étude de simulation réalisée avec un outil en 2 ou 3D. Il convient ici de rappeler que le RTM, au regard de la nature du phénomène du 28/12/2008 a préconisé dans son rapport d'étude d'utiliser le principe de la ligne d'énergie avec une valeur de 32 ou 28°. Avec une valeur de 32°, ce principe permet de cartographier 5 des 6 points d'arrêt maximal et avec une valeur de 28° la totalité de ces points, sachant que le point le plus éloigné est à une valeur proche de 32°.

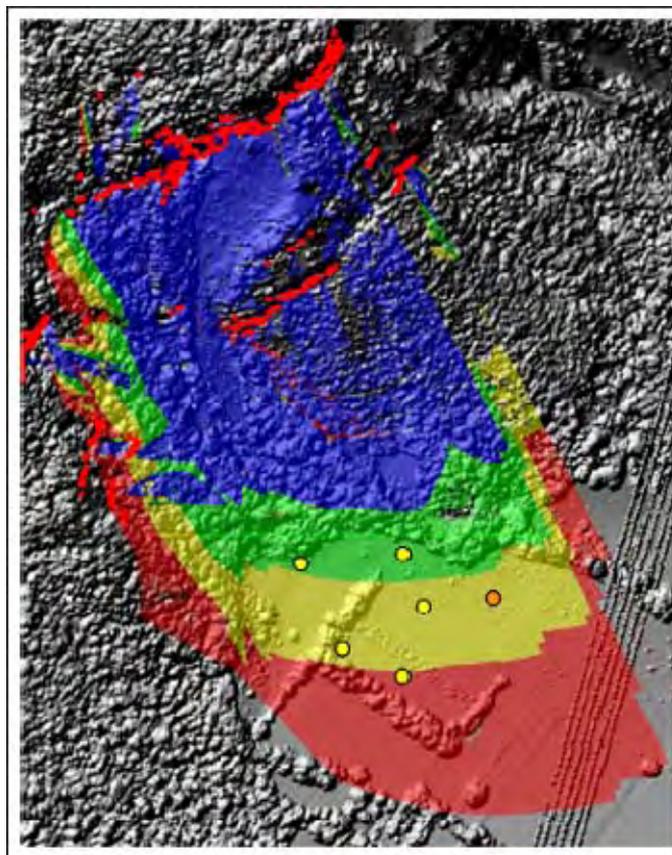


Fig. 61 : Expression cartographique de zonage de l'aléa obtenu avec le principe de la ligne d'énergie. Le point en orange correspond au point réel d'arrêt du projectile de 33m³.

Un modèle de simulation retranscrit, principalement, le choix par l'opérateur des coefficients régissant les rebonds des projectiles avec le sol. Ainsi un des opérateurs a estimé que le sol agricole du bas de versant était très amortissant ce qui explique que le modèle utilisé fait que les blocs s'arrêtent rapidement en pied de versant. Les deux autres partenaires ont considéré que les terrains agricoles étaient certes amortissant mais pas autant, ce qui explique que les distances de propagation des projectiles obtenues par simulations sont plus grandes.

Au final on observe une convergence des 4 modèles si on utilise uniquement une matrice de seuillage basée sur les probabilités d'atteinte. A ce titre, le modèle basé sur l'utilisation de la ligne d'énergie s'avère un outil performant et rapide à mettre en œuvre car ne nécessitant pas de caractérisation des sols. L'utilisation de la matrice de seuillage intégrant l'énergie moyenne des projectiles, se traduit par une augmentation de l'enveloppe d'extension de la zone d'aléa fort et une réduction de celles des zones d'aléas moyen et faible. La réduction des zones d'aléas moyen et faible est en accord avec les observations des trajectoires réelles sur le site expérimental de Vaujany. En effet, dans la zone d'arrêt un projectile va très vite perdre son énergie de propagation et s'arrêter.

L'un des principaux résultats de cette étude est l'apport de l'utilisation d'une matrice « standardisée » pour la comparaison des propositions de zonages de l'aléa chutes de pierres, de différents prestataires, propositions basées sur la réalisation de simulations trajectographiques. Il nous semble important que l'utilisation d'une telle matrice soit demandée par les commanditaires d'études trajectographiques pour l'aide à la réalisation d'un PPRn. L'utilisation de cette matrice sera d'autant plus importante en cas de contentieux, car elle permettra de comparer rapidement sur les mêmes bases les différentes études réalisées.

En conclusion et au regard des résultats de cette étude, nous préconisons pour l'aide à la réalisation d'un PPRn chutes de pierres à partir de travaux de simulations trajectographiques :

- d'utiliser des données topographiques issues soit de relevés de terrain soit de données LiDAR
- de vérifier systématiquement la qualité des MNT utilisés par comparaisons de profils en long calculés avec les MNT et ceux relevés sur le terrain
- de réaliser une phase de pré-détermination des enveloppes maximales de propagation en utilisant le principe de la ligne d'énergie
- d'utiliser la matrice de seuillage basée sur le croisement seuil d'énergie moyenne* seuils de probabilité d'atteinte
- de réaliser une analyse comparative entre les résultats obtenus avec le principe de la ligne d'énergie et ceux issus du modèle de trajectographie utilisé

- de fournir tous les éléments permettant une analyse critique des paramètres de modélisation et un retour terrain par le commanditaire de l'étude.

VIII Perspectives

Il serait intéressant de donner une suite à cette étude, en réalisant sur un autre site une analyse similaire mais en associant l'ensemble des prestataires utilisant des outils de simulations trajectographiques. De plus, il nous semble nécessaire de réaliser une étude sur la définition et qualification de la notion de résultat aberrant dans le contexte de l'utilisation d'un outil de simulation trajectographique. Une telle étude ne pourra être réalisée que si l'on dispose de jeux de données robustes, comme par exemple ceux issus de travaux d'expérimentations in situ ou sur modèles réduits.

Par ailleurs, dans le cadre de cette étude chacun des prestataires ont présenté leurs outils, démarches et résultats de la manière la plus transparente possible. Cette transparence a grandement facilité le travail d'analyse et de comparaison des résultats. Il nous semble important dans les années à venir de rédiger une charte de l'expertise trajectographique afin de cadrer la démarche méthodologique, la présentation des résultats et la traçabilité des données et travaux. A ce titre nous proposons dans un premier temps de rédiger un cahier de recommandation pour la réalisation d'une étude trajectographique. La proposition ci-dessous est un projet de rédaction en cours d'élaboration au sein du groupe de travail MEZAP (Méthodologie de Zonage de l'Aléa chutes de Pierres) animé par le Cemagref pour le MEDDTL.

Version provisoire d'une proposition de rédaction pour un cahier de recommandation pour la réalisation et la présentation d'une étude trajectographique.

Afin de faciliter la compréhension et l'analyse critique d'une étude trajectographique, il est demandé au prestataire de service de faire acte de transparence dans la présentation de ses travaux et d'assurer la traçabilité des outils utilisés, des données et des résultats. Le présent document se veut être un cahier de recommandations afin de faciliter ces démarches de transparence et de traçabilité.

Préambule

Il est recommandé au prestataire d'utiliser la matrice de seuillage de l'aléa chutes de pierres présentée ci-dessous. Cette matrice est construite sur le principe de croisement de la probabilité d'atteinte d'un point donné avec l'énergie moyenne du projectile rocheux.

Bien évidemment, l'utilisation de cette matrice ne peut être faite que si l'outil de simulation du prestataire permet à minima de calculer en un point donné sa probabilité d'atteinte par un projectile rocheux et l'énergie moyenne développée par celui-ci.



Présentation de l'outil de simulation utilisé

La qualité d'une étude trajectographique dépend principalement du savoir faire et de la connaissance de l'expert. Néanmoins, les réflexions de l'expert sont en partie construites à partir des résultats de l'outil de simulation qu'il a utilisé. Il est important de préciser que les résultats obtenus un modèle de simulation ne font que retranscrire les hypothèses de calcul fixées par l'opérateur. Ainsi afin d'assurer une parfaite compréhension, sans équivoque, de sa démarche et de ses résultats l'expert doit donner au commanditaire de l'étude un document de synthèse qui décrit parfaitement à la fois l'outil utilisé et les données d'entrées des travaux utilisées avec cet outil.

La description de l'outil doit permettre au commanditaire :

- De connaître la version de l'outil utilisé pour cette étude
- De connaître parfaitement les limites de l'outil et son domaine de validité
- De comprendre les principes utilisés pour la construction du modèle :
 - Nature des mouvements pris en compte
 - Comment est décrit le projectile ; si celui-ci est assimilé à un point mathématique comment sont réalisés les calculs d'énergie,
 - Comment sont calculés les rebonds avec les obstacles, combien de coefficient sont nécessaires pour réaliser ces calculs,
 - Quelles sont les sources des principes et algorithmes utilisés, quelle est la bibliographie utilisée pour la construction de ce modèle ?
- De connaître la nature précise du modèle :
 - Modèle du commerce ou non : si oui pourquoi avoir choisi celui-ci ?

- 2D ou 3D : si le modèle est un modèle de type 3D comment sont calculer les déviations latérales ?
- Probabiliste ou déterministe : si le modèle est probabiliste qu'elles sont les lois statistiques utilisées, et pourquoi ce choix, si le modèle utilise une population de projectiles comment celle-ci est construite et utilisée, comment est représentée la variabilité des sols, si le modèle est déterministe comment celui-ci permet-il de calculer des probabilités d'atteinte, comment est décrit et représenté le projectile ?
- De comprendre comment sont caractérisés les différents types de sols :
 - Combien de types de sol le modèle peut il utiliser,
 - Quels sont les paramètres utilisés pour décrire ces sols,
 - Combien de coefficients sont utilisé pour décrire un type de sol,
 - Comment est décrite la variabilité existante au sein d'un même type de sol,
 - Quelle est la plus petite unité de description ?
- De comprendre parfaitement la nature des paramètres calculés et leurs modes de calcul :
 - L'énergie de rotation est-elle prise en compte dans le calcul de l'énergie totale du projectile, et pour qu'elle raison l'est-elle ou pas,
 - La hauteur de passage est elle calculée par rapport à la normale ou la verticale de la pente,
 - Des résultats sont-ils extrapolés à partir du jeu de données calculées et si oui de quelle manière (i.e. : 10^{-4} simulations réalisées et calculs d'une fréquence d'atteinte de 1.10^{-6}) ?
- De comprendre comment le nombre de simulations (runs) réalisé a été fixé par l'opérateur :
 - Une étude de convergence a-t-elle été réalisée pour expliciter le nombre de « runs » qui est utilisé,
 - Dans le cas contraire quels sont les paramètres qui déterminent le nombre de « runs » ?
- De savoir si cet outil a déjà été utilisé pour des travaux similaires et de connaître les commanditaires de ces études.

Présentation des données topographiques et des relevés de terrain

L'utilisation d'un modèle de simulation trajectographique nécessite de disposer entrer autre de données topographiques. La résolution et la qualité de ces données ont une influence sur la robustesse et la fiabilité des résultats. Il en est de même pour les données relatives à la description de sols et des obstacles. Il est donc très important que le prestataire présente la source de ces données et les modalités de réalisation des relevés de terrain.

En ce qui concerne les données topographiques, le rapport doit contenir à minima les informations suivantes :

- Dans le cas de l'utilisation de profils en long :
 - Comment l'implantation et le nombre des profils sont choisis,
 - Comment sont-ils réalisés : utilisation des courbes de niveaux des cartes de l'IGN si oui laquelle (date de réalisation, type de série...), à partir d'un Modèle Numérique de Terrain si oui lequel (date, résolution, MNT commercialisé ou non...), par un relevé de terrain si oui, suivant quel protocole et avec quels instruments de mesures ?
 - Comment les profils réalisés à partir de cartes ou de MNT sont-ils vérifiés sur le terrain ?
- Dans le cas de l'utilisation d'un MNT :
 - Quelle est la source de ce MNT (IGN, géomètre...),
 - Quelle est sa résolution et pourquoi celle-ci a été choisie par l'opérateur ? Ceci est d'autant plus important si un ré-échantillonnage du MNT a été réalisé.
 - La précision et la robustesse du MNT ont-elles été vérifiées ? Si oui comment ?

Afin d'assurer la traçabilité et le cas échéant la vérification des données terrain, il est recommandé au prestataire de :

- Préciser le référentiel géographique des données cartographiques utilisées,
- De matérialiser sur le terrain les implantations des profils en long : a minima il faut que le point de départ et que le point d'arrivé soient clairement identifiés et visibles sur le terrain par un piquet ou jalon. Ces piquets doivent contenir une information permettant d'identifier le numéro du profil en long. On ne peut que recommander de réaliser aussi un levé GPS de ces points. Le cas échéant le prestataire pourra aussi matérialiser tous les points du profil sur lesquels il a réalisé une ou des mesures.
- Pour les modèles 3D, il est nécessaire de matérialiser sur le terrain les centres des placettes de relevés. Cette matérialisation doit être faite avec des piquets précisant le numéro de la placette. Là encore et en fonction de la possibilité un GPS, on peut que recommander un relevé GPS des coordonnées de ces piquets.
- De fournir sous format numérique toutes les données d'entrées relevées sur le site d'étude. Pour les profils en long ces données doivent permettre de reconstruire ces profils et d'associer à chacun des tronçons d'un profil les caractéristiques de sols et des obstacles utilisés. Il en est de même pour les données utilisées avec un modèle 3D. Il est impératif de fournir la carte de localisation des points de relevés. Chacun des points doit être identifié par un numéro faisant référence à un

fichier ou un enregistrement dans un fichier contenant la totalité des données relevées à ce point.

- On ne peut que recommander l'utilisation d'un Système d'Information Géographique pour la présentation des données cartographiques. Si tel est le cas, alors il est impératif de préciser le logiciel utilisé et sa version. Il existe des logiciels en accès libre et téléchargeables sur internet : GRASS, QGIS... Si un SIG est utilisé, il faut alors que le prestataire fournisse la base de données cartographique dans un format compatible avec une utilisation par le commanditaire.
- Il est impératif que le prestataire archive sous format papier et sous format numérique l'étude réalisée (données, résultats, rapport). Cet archivage numérique doit impérativement contenir une copie de la version du modèle qui a été utilisé.

Présentation de la démarche de déterminations de l'aléa de référence pour la réalisation des calculs trajectographiques

La réalisation d'une étude trajectographique nécessite de déterminer un aléa de référence pour lequel les calculs seront effectués. En fait, dans ce cas précis, la détermination de cet aléa de référence correspond à celle d'un volume de référence et le cas échéant associé à une forme (tout dépend du type de modèle utilisé). La valeur de ce volume de référence peut être une des sources de contentieux et de remise en question de l'étude. Il est donc très important que le rapport d'étude donne tous les éléments d'analyse et de diagnostique qui ont été utilisés.

Dans le cadre de la réalisation de la carte d'aléa pour l'aide à la réalisation d'un PPRn, il est très important de clairement identifier et localiser chacune des zones de départ en, fonction du volume de référence qui leur est associé. Bien souvent dans les PPRn un aléa de référence centennal est utilisé. Dans le domaine de l'aléa chutes de pierres, l'aléa de référence centennal est associé au volume maximal du projectile rocheux susceptible de se propager avec une période de retour de cent ans. Une fois que ce volume est estimé alors les outils de simulation sont utilisés à « risque de départ acquis ». En effet, si on considère que sur une période de cent ans un projectile ayant le volume de référence déterminé a une probabilité de départ proche de 100%, alors la question se résume à apprécier son enveloppe de propagation maximales et les paramètres qui lui sont associés.

L'objectif d'un PPRn est réaliser un zonage de risque en fonction d'un aléa de référence. En aucun cas, il a pour objectif de réaliser un zonage en fonction de l'imminence de réalisation de l'aléa de référence. En effet, ce document a pour vocation la prévention par l'affichage du risque et non la détermination et la planification des stratégies de mise en sécurité ainsi que le dimensionnement des ouvrages de protection associés à ces stratégies.

Par conséquent, il est recommandé de ne pas utiliser dans les calculs, un croisement de la probabilité d'atteinte d'un point avec la probabilité de départ du projectile. Dans le cadre d'un aléa de référence pour une période donnée, l'espérance mathématique de réalisation de cet aléa de référence tend par définition vers 1 sur cette période.

Par contre l'opérateur peut dans son rapport fournir des éléments sur l'imminence de départ de projectiles, si lors de ses relevés de terrain il a identifié ce type de situation. Il est même de son devoir d'en avertir les services en charge de la mise en œuvre de la politique de prévention des risques naturels en France.

Comme pour les étapes précédentes, il est nécessaire que le rapport de présentation contiennent tous les éléments d'analyse permettant à l'opérateur de comprendre la démarche, les choix réalisés et le cas échéant vérifier in situ ces données.

Il, faut donc que le rapport présente:

- La démarche et les paramètres utilisés
- Les événements passés identifiés et utilisés pour déterminer l'aléa de référence :
 - Si une carte des phénomènes historiques a été utilisée ou établie, il faut qu'elle soit fournie en format papier et numérique. Pour la carte numérique il faut que le système de géoréférencement soit le même que celui de tous les autres documents cartographiques,
 - Si un inventaire de terrain a été réalisé, il faut que tous les projectiles inventoriés et qui ont été utilisés pour la définition du volume de référence soient cartographiés. Chacun de ces projectiles doit faire l'objet d'une description contenant a minima les dimensions mesurées, la forme et la nature géologique du bloc. Tous les blocs ainsi cartographiés et décrits doivent être facilement localisables sur le terrain par le commanditaire de l'étude. Pour ce faire il faut que tous ces blocs aient un identifiant unique sous la forme d'un numéro, numéro qui doit être inscrit sur le bloc in situ, si possible réaliser un relevé GPS de la position du bloc, photographier chacun des projectiles a minima avec 3 angles de prise de vue différents, sur chacune des photos il est obligatoire de positionner un élément d'échelle tel qu'un jalon (marqué de 5cm en 5cm) ou un mètre ruban par exemple.
- Si une analyse en falaise a été réalisée (descente en rappel, photogrammétrie, survol en hélicoptère), le rapport doit dans la mesure du possible fournir des éléments similaires à ceux décrits ci-dessus.

A partir de la cartographie des points d'arrêt connus il est possible de réaliser une rétro analyse rapide en utilisant le principe de la ligne d'énergie. Cette méthode développée par HEIM A. en 1932 repose sur un principe simple et trivial :

- un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide.

Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Cf. Figure. 3). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

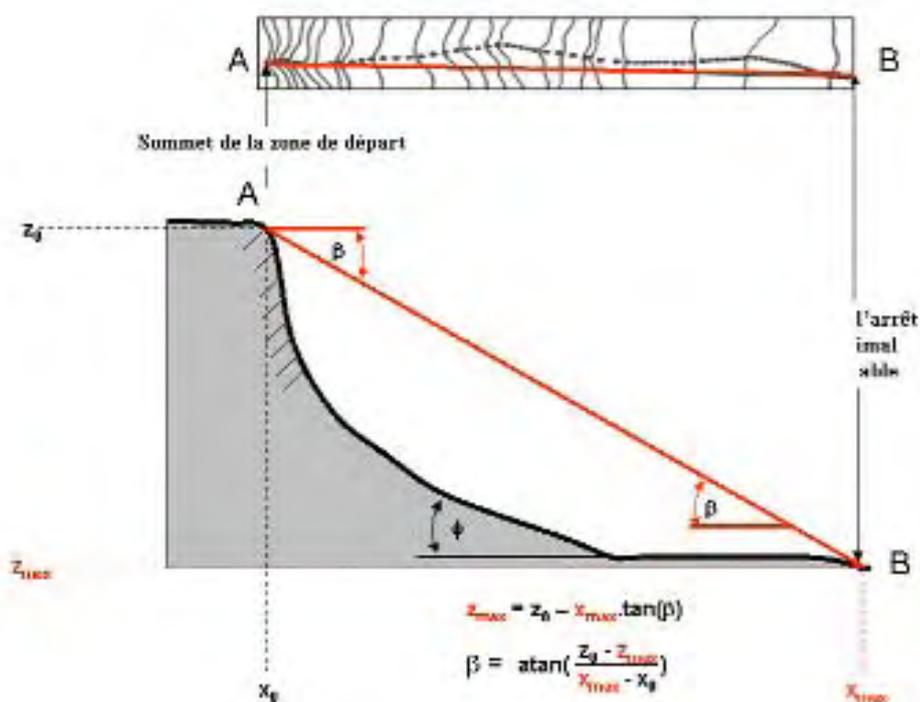


Fig. 3 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

A partir du profil en long de la pente à partir d'une zone de départ, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ A.

Ce principe peut être utilisé pour déterminer la valeur de l'angle de la ligne d'énergie de chacun des points d'arrêt connus des événements passés. Nous recommandons son utilisation afin de mieux explorer le champ des possibles en termes de distance de

propagation. La valeur de l'angle d'énergie, si elle est calculée, doit être précisée dans les données descriptives de chacun des projectiles passés inventoriés.

Présentation des résultats

Le rapport de présentation d'une étude trajectographique doit présenter clairement et de manière compréhensible la totalité des étapes réalisées et qui ont permis d'aboutir à, la proposition de zonage de l'aléa chutes de pierres pour la zone d'étude. Si les résultats intermédiaires sont présentés sous format cartographique il est important que ces cartes soient accompagnées d'une notice de présentation claire et précise. Il est très important que l'échelle de ces documents soit indiquée sous la forme d'une barre d'échelle.

Si les propositions de zonage sont issues d'une analyse basée sur l'emploi de profil en long, le rapport doit alors présenter la méthodologie utilisée pour spatialiser les données des profils : extrapolation en suivant les tracés des courbes de niveaux, comment sont prises en compte les particularités topographiques générant soit une concentration soit une dispersion des projectiles, ... De plus, dans le cas de l'utilisation de profils en long, ceux-ci doivent être représentés sur les cartes de zonage.

Si on utilise un seuil de zonage basé sur l'emploi d'une probabilité d'atteinte d'une valeur de 10^{-n} , plusieurs cas de figures sont possibles :

- Pour un modèle de type 2D :
 - Réaliser un nombre de simulations supérieur à 10^n
 - Réaliser un nombre de simulations inférieur à 10^n et utiliser une méthodologie d'extrapolation pour calculer l'abscisse correspondant au seuil de probabilité d'atteinte fixé. Le rapport doit clairement présenter cette méthode d'extrapolation (i.e. extrapolation linéaire sur une échelle logarithmique)
- Pour un modèle en 3D :
 - Le calcul de la probabilité d'atteinte doit tenir compte de toutes les zones de départ en mesure d'alimenter chacun des points de calcul. Le rapport doit donc clairement préciser comment est réalisé ce calcul de détermination de toutes les zones de départ en mesure d'alimenter un point donnée du MNT.
 - Si le nombre de cellule de départ x le nombre de runs est inférieur au seuil de probabilité d'atteinte de 10^n , alors la méthode d'extrapolation des résultats doit être clairement présentée.

Quelque soit le type de modèle utilisé, les résultats des analyses de convergence et de sensibilité du modèle doivent être présentés en annexe du rapport d'étude.

L'analyse de convergence permet en effet d'explicitier le choix du nombre de runs : si par exemple à partir de 10^4 runs on n'observe plus aucune différence de résultats alors effectivement pour des questions de temps de calcul cela ne sert à rien de réaliser 10^6 et plus simulations.

De plus, l'analyse critique des résultats des travaux de modélisation effectuée par l'opérateur doit être décrite. En effet, si des résultats ont été jugés aberrants par l'opérateur, il faut que celui-ci donne la définition de « résultats aberrants » et qu'il précise le nombre de runs considérés comme tels et donc écartés de l'analyse. Dans ce contexte il est très important que le domaine de validité du modèle utilisé soit clairement présenté dans le chapitre consacré à la description du modèle

Si la zone d'étude a été redécoupée, en fonction de différents volumes de référence, en plusieurs secteurs alors le rapport doit décrire comment sont prises en compte, dans la méthodologie de zonage, les zones frontières des différents secteurs.

Le rapport d'étude doit à minima contenir les cartes suivantes :

- La carte de localisation des événements passés.
- La carte de localisation des zones de départ et de découpage en secteurs d'étude en fonction du volume de l'aléa de référence de chacun des secteurs identifiés.
- La carte d'implantation des profils en long avec la limite des secteurs d'étude.
- La position des points, sur chacun des profils, correspondant aux seuils de zonages utilisés. Si deux paramètres sont utilisés, i.e. probabilité d'atteinte et énergie moyenne, alors il faut réaliser une carte pour chacun des paramètres
- La carte de spatialisation des limites des zones de propagation correspondantes aux seuils et paramètres utilisés.
- Les cartes issues du croisement des cartes de spatialisation des résultats avec celle de localisation des points d'arrêt des phénomènes passés.
- La carte finale de proposition de zonage de l'aléa avec positionnement des points d'arrêt observés de par le passé.

Si le modèle utilisé est un modèle 3D alors il faut retirer de la liste ci-dessus les demandes relatives aux profils en long.

Dans tous les cas de figure, nous recommandons d'effectuer une analyse complémentaire et critique en utilisant le principe de la ligne d'énergie. Il est vivement recommandé de :

- Soit calculer la valeur de l'angle d'énergie en tout point des limites d'extension de chacune des zones d'aléas

- Soit réaliser un calcul avec les valeurs de 38, 35, 32 et 28° et réaliser un croisement cartographique des zones ainsi obtenues avec la carte de proposition de zonage.

Tous les documents cartographiques doivent contenir le nom de la personne qui les a réalisés ainsi que leur date de réalisation.

Au final, toutes les données relevées sur le terrain doivent être données en annexe du rapport d'étude.