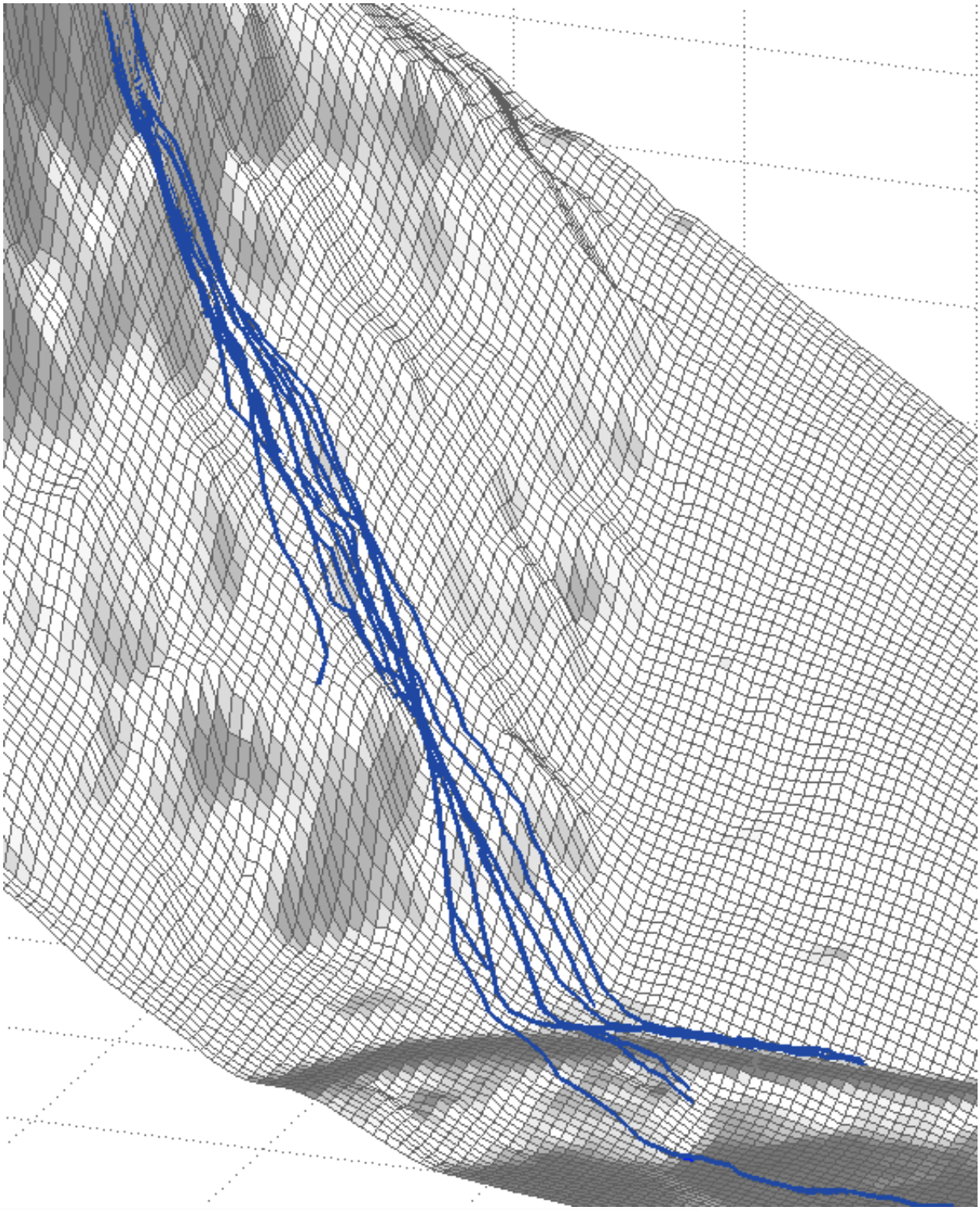
Rockyfor3D (v5.1) à cœur ouvert

Description complète du modèle 3D de chutes de blocs



ecorisQ

Experts en chutes de blocs, glissements, avalanches et forêts à fonction de protection

Colophon

Auteurs

Dr. Luuk K.A. Dorren	(Office fédérale de l'environnement OFEV, CH)
Dr. Frédéric Berger	(Irstea Grenoble, F)

Experts collaborateurs

Dr. Frédéric Berger	(Irstea Grenoble, F)
Dr. Franck Bourrier	(Irstea Grenoble, F)
Prof. Dr. Willem Bouten	(Université d'Amsterdam, NL)
Dr. Luuk K.A. Dorren	(Office fédérale de l'environnement OFEV, CH)
Mathilde Gallouet	(UJF Grenoble, F)
Roderick Kühne	(Université de Berne, CH)
Uif S. Putters	(Université d'Amsterdam, NL)
Dr. Bahjat Safadi	(LIG Grenoble, F)
Dr. Harry C. Seijmonsbergen	(Université d'Amsterdam, NL)
Dr. Sanneke van Asselen	(Université d'Amsterdam, NL)
Dr. Mark J. van Wijk	(Université d'Amsterdam, NL)
Prof. Dr. Jasper Vrugt	(Université de Californie – Irvine, USA)

Éditeur

Association ecorisQ
Saint Hilaire du Touvet
France

Source

Citation: Dorren L.K.A., Berger F., 2012. *Rockyfor3D (v5.1) à cœur ouvert – Description complète du modèle 3D de chutes de blocs*. Publication d'ecorisQ (www.ecorisq.org): 32 p.

© ecorisQ 2012 Version 27.09.2012

Reproduction autorisée, sauf pour un usage commercial, à condition de citer la source.

Remerciements aux utilisateurs par leurs retours d'informations

Dr. Ulrik Domaas (NGI, NO), Dr. Oliver Jancke (Irstea Grenoble, F), Dr. Jean-Bruno Pasquier (Géoval, CH), Stéphanie Moreau (Traductrice, F)

Sommaire

1 Introduction 1
2 Données d'entrée du modèle et démarrage rapide 2
2.1 Données d'entrée de base : les rasters 2
2.2 Simulation avec forêt 9
2.3 Simulations avec prise en compte de filets pare-pierres 11
2.4 « Ecrans » de calculs 11
2.5 Paramètres de simulation 12
2.6 Comment démarrer Rockyfor3D 12
3 Principaux composants du modèle 14
3.1 Forme du bloc 14
3.2 Chute libre parabolique 14
3.3 Rebond sur la surface de la pente 14
3.4 Impact sur un arbre 18
3.5 Calcul de la direction de chute 20
4 Données de sortie du modèle 23
5 Références 26

Liste des changements 28
Annexe I. La rugosité des sols dans Rockyfor3D 29
Annexe II. Exemples de valeurs de type de sol et de rugosités 30

1 Introduction

Rockyfor3D est un modèle de simulation en trois dimensions (3D) qui calcule les trajectoires des blocs individuelles lors de leur chute. Ce modèle associe des algorithmes déterministes basés sur des données physiques avec des approches stochastiques, ce qui fait de Rockyfor3D ce que l'on appelle un modèle probabiliste de trajectographie de type *process-based*. Rockyfor3D peut être utilisé pour simuler des chutes de blocs à l'échelle d'un versant, d'une commune et d'une région.

Rockyfor3D a été initialement développé en 1998 sous environnement Matlab. À l'origine, il s'appuyait sur des publications antérieures de travaux de recherche sur les chutes de pierres (p. ex. 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 ; Descoeudres 1997 ; Meissl 1998 ; pour un tour d'horizon détaillé, voir Guzetti et al. 2002 ou Dorren 2003). Par la suite, le développement de ce modèle a bénéficié d'observations personnelles sur le terrain, des expériences réalisées par l'équipe de Frédéric Berger (Irstea Grenoble) ainsi que des tests de simulation effectués avec de nombreux modèles d'algorithmes développés en interne ou issus des publications.

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 cette note est de donner un aperçu transparent et cohérent des algorithmes employés par la version actuelle du programme (Rockyfor3D v5.0), qui est mise à disposition par Luuk Dorren à l'association internationale ecorisQ (voir www.ecorisq.org) et ses membres.

Rockyfor3D est utilisé couramment 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 de bons résultats, Rockyfor3D nécessite des relevés terrain réalisés par un opérateur ayant une expérience en matière de chutes de blocs ainsi qu'une préparation soigneuse des données.**

Rockyfor3D simule la trajectoire d'un bloc en 3D (représentation vectorielle), en calculant des séquences de chute libre dans l'air et de rebonds sur la surface de la pente, et d'impacts contre des arbres le cas échéant (fig. 1). Le roulement est représenté par une séquence de micro rebonds et le glissement des blocs n'est pas modélisé.

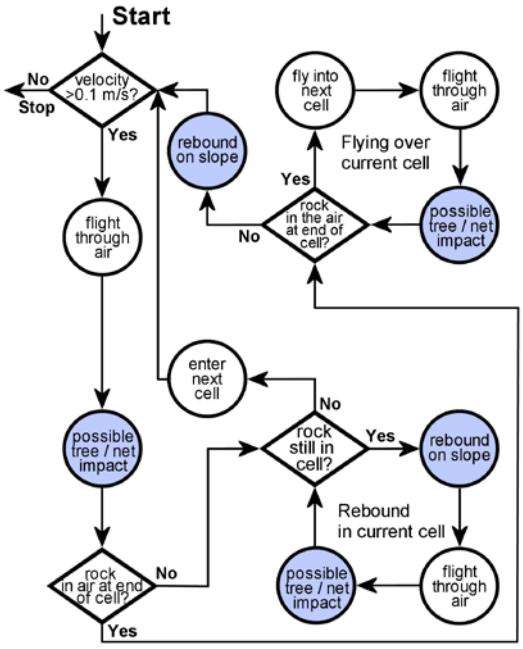


Fig. 1. Organigramme de Rockyfor3D. Les cercles colorés en bleu indiquent les étapes du modèle où des changements de direction sont susceptibles de se produire dans la chute du bloc simulé.

L'utilisation de Rockyfor3D nécessite comme données d'entrée un jeu de raster ASCII (au format ESRI, c.f. explications au chapitre 2). Ces données définissent la topographie, les caractéristiques de la surface de propagation, ainsi que les paramètres décrivant les conditions initiales de simulations. Le chapitre suivant présente ces données d'entrée ainsi que les instructions nécessaires à l'utilisation de Rockyfor3D par un opérateur. Les principaux composants du modèle Rockyfor3D sont détaillés au chapitre 3. Le chapitre 4 présente les données de sortie de Rockyfor3D.

2 Données d'entrée du modèle et démarrage rapide

2.1 Données d'entrée de base : les rasters

A minima, 10 cartes raster sont nécessaires pour utiliser Rockyfor3D. Toutes ces cartes raster doivent couvrir la même zone géographique, avoir le même nombre de lignes et même nombre de colonnes, et avoir la même taille de maille (résolution). Cependant, quand la résolution augmente, la précision spatiale des données d'entrée, et de fait, celle des résultats diminuent. La résolution optimisée se situe entre 2 m × 2 m et 10 m × 10 m (voir aussi Dorren et Heuvelink 2004). Notre expérience montre qu'une résolution de 1 m × 1 m n'améliore pas la qualité. Les rasters doivent être au format ESRI ASCII Grid, qui peut être lu 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 petit exemple d'un raster:

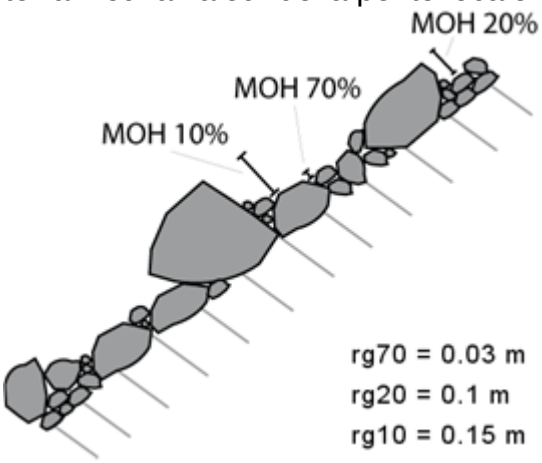
```
ncols 5
nrows 3
xllcorner 123456.123
yllcorner 1234567.123
cellsize 2
NODATA_value -9999.00
1115.81 1114.28 1109.25 1107.74 1105.01
1110.31 1109.35 1107.33 1103.57 -9999.00
1006.55 1005.00 999.62 -9999.00 -9999.00
```

Les 10 rasters nécessaires et suffisants pour utiliser Rockyfor3D sont :

Nr.	Nom du fichier raster	Description
1	*dem.asc*	Un Modèle Numérique de Terrain (MNT, en anglais Digital Elevation Model, DEM) rasterisé qui définit la topographie. Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 8 850,00 m ou indéfinies (NODATA_values)]. Un bon MNT pour Rockyfor3D est génère à partir des données LiDAR (scannérisation laser). À partir de ce MNT, Rockyfor3D calcule une carte des pentes et une carte des expositions d'après Zevenbergen et Thorne (1987 ; voir également Burrough et McDonnell 1998, p. 191). Un exemple de fichier *dem.asc* est donné ci-dessous:

		`ncols 5`
		`nrows 3`
		`xllcorner 123456.123`
		`yllcorner 1234567.123`
		`cellsize 2.5`
		`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`

2	*rockdensity.asc*	une carte raster donnant la mass volumique des blocs pour chacune des cellules source ou cellules de départ (*rockdensity.asc*). Raster de type entier, codé sur 2 ou 4 bytes ; [valeurs de 0 à 3300 kg.m^{-3}]. Ce raster définit les cellules qui correspondent aux points de départ (valeur > 0) identifiés sur le terrain. De plus, ce *raster* définit la masse volumique (en kg.m^{-3}) du bloc qui sera simulé à partir de chaque cellule de départ. Les cellules dont la valeur est 0 ne seront pas considérées comme des cellules de départ. À partir des cellules dont la valeur est par exemple 2500 ou 3000, un bloc présentant respectivement une densité de 2500 kg.m^{-3} ou de 3000 kg.m^{-3} sera simulé. **Afin d'éviter les effets de bords, les cellules sources ne doivent pas être situées dans les 2 premières ou dernières lignes et colonnes du fichier raster rockdensity.asc. Les cellules sources de ces lignes et colonnes ne sont pas prises en compte lors des calculs.**
3 4 5	*d1.asc* *d2.asc* *d3.asc*	trois cartes raster définissant la dimension des trois axes principaux du projectile : hauteur, largeur et longueur (*d1.asc, d2.asc, d3.asc*) pour chacune des cellules de départ. Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 20,00]. Les données doivent être impérativement saisies en mètre. Les cellules dont la valeur est 0 dans l'un de ces trois rasters ne seront pas considérées comme des cellules de départ. Les trois dimensions de bloc définis dans chaque cellule source varient aléatoirement en utilisant un % de variation (basé sur une variation du volume défini par l'opérateur entre ±0% et ±50%) avant chaque simulation. Cette variation aléatoire est toujours identique pour les trois valeurs de diamètres de bloc d'une même simulation. Cela signifie que si le facteur de variation du volume a été fixé à 5% par 'opérateur, alors les 3 diamètres du bloc sont réduites ou augmentées d'un coefficient appartenant à l'intervalle [0% ; 1.639%].
6	*blshape.asc*	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]. Ce raster peut contenir les valeurs suivantes : 0 Pas de forme de bloc définie 1 Bloc rectangulaire (les trois diamètres peuvent être complètement différer 2 Bloc ellipsoïdal (les trois diamètres peuvent être complètement différents) 3 Bloc sphérique (les trois diamètres sont identiques) 4 Bloc en forme de disque (le diamètre le plus petit atteint au max. 1/3 des diamètres du bloc, dont les dimensions sont plutôt comparables)

		Si aucune forme de bloc n'est définie dans une cellule source (valeur 0), Rockyfor3D simulera un bloc ellipsoïdal ou sphérique, en fonction des diamètres du bloc (attendu que d1, d2, d3, et la masse volumique sont > 0 dans cette cellule raster).
7 8 9	*rg70.asc* *rg20.asc* *rg10.asc*	trois cartes raster définissant la rugosité de la surface (*rg70.asc*, *rg20.asc*, *rg10.asc*). Raster de type double précision ; [valeurs de 0 à 100,00]. La rugosité de la surface de la pente ne représente pas la microtopographie (e.g la présence de terrasse) mais les blocs rocheux-pierres au sol et qui forment des obstacles à la propagation des projectiles. Elle est à déterminer sur le terrain en identifiant des zones homogènes dans la zone étudiée, représentées par des polygones sur une carte. Chaque polygone définit la rugosité de la surface, exprimée par l'étendue du matériau recouvrant la surface de la pente, **en regardant de l'amont vers l'aval et dans la ligne de plus grande 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 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 sur la pente étudiée (Fig. 2). **La gamme des valeurs de rugosité varie de 0 à 100 m (c.f. annexe II).** 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 les blocs simulés à s'arrêter, par exemple dans une rivière. Le choix des valeurs de MOH nécessite une grande attention car Rockyfor3D est sensible à ces paramètres. Les coefficients de rugosité de surface sont utilisés pour calculer le coefficient de restitution tangentiel. Celui-ci est donc uniquement un paramètre qui détermine la perte d'énergie lors d'un impact sur le sol; ce coefficient de restitution tangentiel n'est donc pas une rugosité qui serait ajoutée à la pente, pente qui est représenté via le MNT. Par conséquent, il n'a donc aucun effet sur la hauteur du terrain ou la valeur de la pente locale des cellules de calculs.  Fig. 2. Une 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. Pour chaque calcul de rebond, l'étendue du matériau rencontré par le projectile rocheux est choisie au hasard à partir des trois classes de probabilité de dimensions, ou de rugosité, en fonction des

		probabilités qui leur correspondent. Chaque classe de probabilité de dimension 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. La rugosité de surface est un important paramètre la fiche de relevé de terrain (tableau 1) permettant de préparer les simulations de chutes de blocs à l'aide de Rockyfor3D. La figure 3 est une aide visuelle à l'estimation du pourcentage de couverture de surface sur le terrain. L'annexe I présente des valeurs de rugosité à partir d'exemples de terrain et l'annexe II explique la précision des valeurs à utiliser.
10	*soiltype.asc*	une carte raster décrivant le type de sol (*soiltype.asc*). Raster de type entier ; [valeurs de 0 à 7]. Cette carte, qui représente l'élasticité de la surface de la pente, doit également être cartographiée par polygones sur le terrain. Par conséquent, elle est à convertir (en utilisant un SIG) en une carte raster appelée *soiltype.asc*. Rockyfor3D peut traiter 8 types de sols (types de couverture de surface/sous-sols) énumérés dans le tableau 2. Dans le modèle, ces types de sols sont directement reliés à des gammes de valeurs R_n (= coefficient de restitution normal). Pour décrire les sols, il est recommandé de réaliser une petite fosse de sondage avec un marteau de géologue afin par exemple de retirer la mousse, l'humus, la litière forestière, la couverture végétale au sol… **Remarque à propos du type de sol n°7 (route goudronnée)**: A ce jour, nous n'avons trouvé aucune données expérimentales sur la capacité d'absorption d'énergie d'une route goudronnée lors d'un impact dynamique. La valeur de notre R_n (coefficient de restitution normal), variant de 0.32 à 0.39, est légèrement inférieure à celle de 0.4 utilisée par Hoek (1987) et d'autres auteurs. Ainsi, le modèle peut sous-estimer la perte d'énergie lors de l'impact d'un projectile sur une telle route. Si l'opérateur estime que les projectiles se propagent trop loin, alors il peut utiliser un type de sol de 3, 2 ou 1 afin d'augmenter la capacité d'absorption de ce type de route. Nous attendons de la part des utilisateurs qu'ils nous fassent remonter leurs expériences (par envoi d'un mail via le site www.ecosrisq.org) à ce sujet afin que nous puissions améliorer le modèle.

Tableau 2 : les types de sols utilisés par Rockyfor3D et les valeurs R_n correspondantes

Soiltype (type de sol)	Description générale	Valeur moyenne de	Gamme de variation de R_n
0	rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc peut pénétrer complètement	0	0
1	sol fin (profondeur > 100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	sol fin (profondeur < 100 cm), et/ou sol de vallée composé de sables et graviers	0.28	0.25 - 0.31
3	piste forestière, éboulis fin (Ø < ~10 cm), sol moyennement compacté avec des petites pierres	0.33	0.30 - 0.36
4	éboulis grossier – talus (Ø > ~10 cm), sol compacté avec présence de pierres	0.38	0.34 - 0.42
5	roche mère avec couvert fin de matériau altéré ou de sol	0.43	0.39 - 0.47
6	roche mère	0.53	0.48 - 0.58
7	Route goudronnée (asphalte)	0.35	0.32 – 0.39

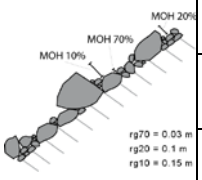
Une astuce pour créer les fichiers rasters n°2 à 10 :

Créer un fichier de polygones de type vecteur avec 9 attributs ayant le même nom que ceux des fichiers rasters d'entrés nécessaires à l'utilisation de Rockyfor3D ou télécharger le shapefile en cliquant sur ce lien. Digitaliser des unités de terrain de caractéristiques homogènes en utilisant une ortho-photographie (si possible IRC), l'ombrage du MNT, la carte des pentes, des données topographiques à haute résolution, et bien évidemment vos relevés de terrain. Puis rasteriser le fichier vecteur 9 fois en utilisant à chaque fois un des attributs de la carte vecteur contenant les polygones correspondants à vos unités de terrain homogène (consulter ce document pour obtenir plus d'information sur la préparation des données d'entrées) ***Rappel : toutes les cartes rasters doivent avoir exactement la même emprise géographique (map extent) et des cellules de mêmes tailles (cellsize).*** *Un jeu de données test peut être téléchargé ici.*

Tableau 1 : 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*	☐ départ / source ☐ transit ☐ dépôt / arrêt	

Caractéristiques du polygone							
1. Pierre / Bloc caractéristique							
Forme	☐ 1. rectangulaire	☐ 2. ellipsoïdale	☐ 3. sphère	☐ 4. dalle			
Dimensions des axes (d1, d2, d3) :	…… (m) x …… (m) x …… (m)						
Géologie (pour la densité en $kg.m^{-3}$) :							
2. Type du sous-sol							
Matériau	☐ rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc pénètre profondément	☐ sol lâche (profondeur > 100 cm)	☐ sol lâche (profondeur < 100 cm)	☐ piste forestière, éboulis fin, sol moyenne-ment compacté	☐ éboulis grossier, sol compacté avec pierres	☐ roche mère avec couvert fin de matériau altéré	☐ roche mère	☐ route goudronnée
soiltype	0	1	2	3	4	5	6	7
	Valeurs à utiliser pour Rockyfor3D							

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)	# DHP: diamètre à l'hauteur de la poitrine (cm) *Notez tous les DHP ≥ 10 cm mesurés dans la placette: p.e. 31, 17, 13, …*		
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*

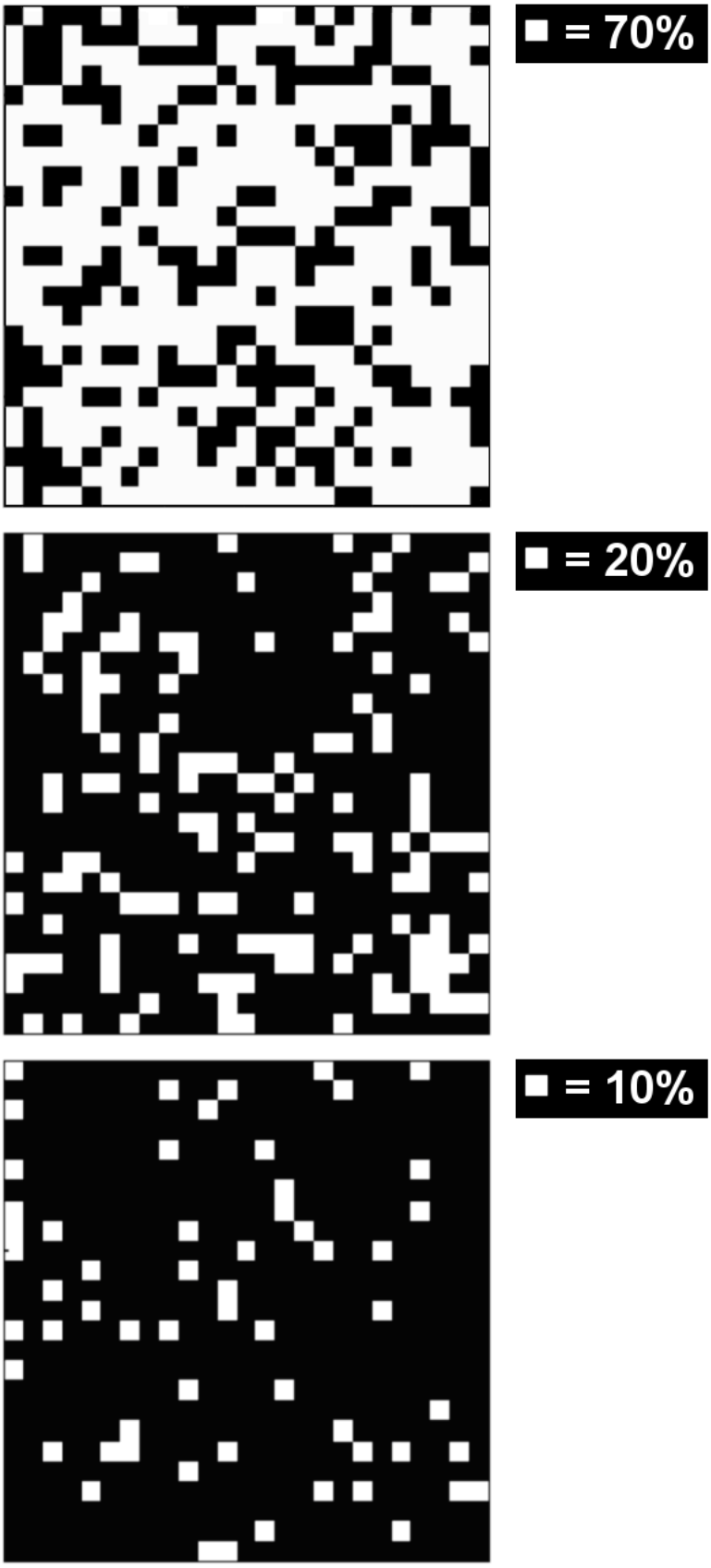


Fig. 3. Images d'aide à l'estimation des pourcentages de couverture de surface sur le terrain

2.2 Simulation avec forêt

En cas de réalisation d'une simulation avec forêt, Rockyfor3D dispose de deux possibilités pour intégrer les données forestières :

1. La première option consiste à utiliser un fichier contenant les coordonnées en x et en y de chaque arbre ainsi que les diamètres à hauteur de poitrine (en anglais *Diameter at Breast Height,* DBH, exprimé en cm). En plus de relevés exhaustifs sur le terrain, 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 Popescu et al. (2002), Dorren et al. (2007) et Monnet et al. (2010). Un algorithme pour réaliser cette opération peut être obtenu sur le site suivant: http://ssl.tamu.edu/personnel/s_popescu/treevaw/index.htm. Ce fichier d'arbres doit être impérativement nommé *treefile.txt* et doit impérativement être présent dans le répertoire de travail. Il doit présenter le format suivant **(sans en-tête !)** :

```
136578.55  2236789.45  43
136554.89  2236793.22  27
136531.39  2236801.37  34
...
```

   En plus du fichier *treefile.txt*, un fichier raster dénommé *conif_percent.asc* doit être présent dans le répertoire de travail (raster de type entier; [valeurs de 0 – 100 %]). Dans ce raster, la valeur des cellules représente le pourcentage moyen de la répartition entre les essences résineuses et celles feuillues dans chacune des cellules. Il suffit de saisir le pourcentage des essences résineuses (%) (cf. Fig. 4). Ce raster doit avoir la même emprise géographique et des cellules de la même taille que le raster *dem.asc (le MNT de la zone d'étude)*.

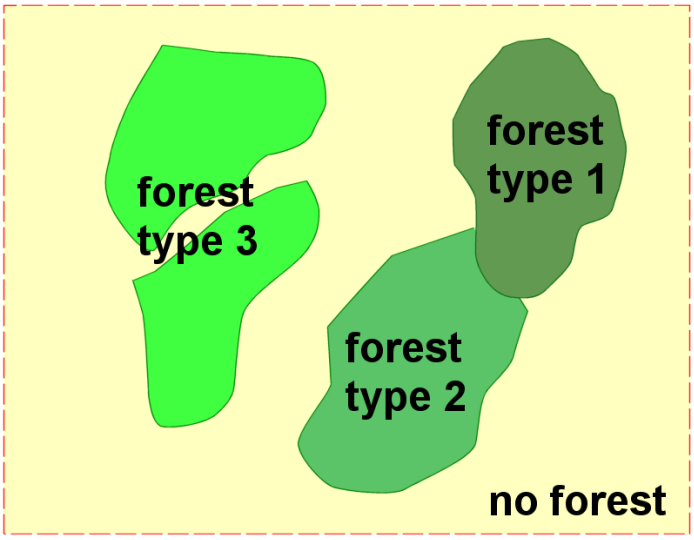
2. La seconde option consiste à représenter la forêt à l'aide de quatre cartes rasters, à savoir :
   a. *nrtrees.asc* – les valeurs des cellules représentent le nombre de tiges par hectare au sein de chaque cellule. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 – 10000 ha^{-1}]
   b. *dbhmean.asc* – 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 – 250 cm]
   c. *dbhstd.asc* – les valeurs des cellules représentent l'écart type du DBH (en cm) au sein de chaque cellule. C'est un raster de type entier ; [valeurs de 0 à 250 cm]
   d. *conif_percent*.asc (Raster de type entier ; [valeurs entre 0% et 100 %]) – dans ce raster, la valeur des cellules représente le pourcentage moyen de la répartition entre les essences résineuses et celles feuillues dans chacune des cellules. Il suffit de saisir le pourcentage des essences résineuses (%)

   Avec ces quatre *raster* (cf. Fig.4), le modèle dispose un nombre donné d'arbres au hasard dans chaque pixel, avec des diamètres donnés. Ensuite, il

élabore un fichier d'arbres avec les coordonnées en x et en y et les DBH de chacun d'eux.

En cas de réalisation d'une simulation avec forêt en utilisant le fichier « treefile.txt », le fichier doit être disponible dans votre répertoire de travail, ce fichier peut être par la suite utilisé pour réaliser d'autres simulations. L'attribution du DBH est basée sur l'utilisation d'une loi de distribution statistique gamma. Les valeurs des paramètres (forme et échelle) de cette loi sont derivées pour chaque celluke de calcul de la valeur moyenne du DBH et de l'écart type associé saisis par l'opérateur. Toutes les cartes forestières en rasters doivent avoir exactement la même emprise géographique et des cellules de mêmes tailles que le fichier *dem.asc*.

Step 1: Digitise a polygon vector forest map



Step 2: Enter forest attribute data

stand	nrtrees	dbhmean	dhbstd	conif_percent
1	290	32	11	56
2	400	27	9	26
3	800	20	5	0

Step 3: Convert the vector map into rasters using the different attribute fields

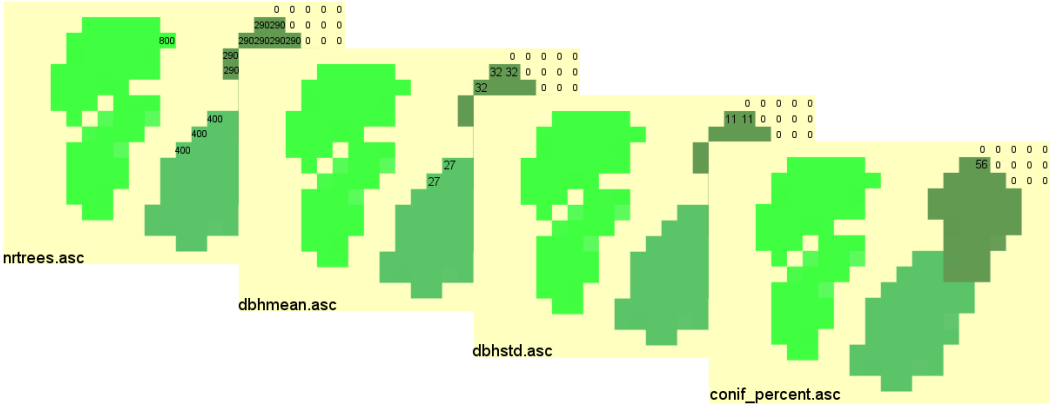


Fig. 4. Les principales étapes pour créer les fichiers forestiers rasters necessaires à la réalisation de l'option B

L'avantage de l'option A est que la structure horizontale des peuplements forestiers est bien représentée. Ainsi les couloirs de propagations les plus importants sont eux aussi bien représentés. Si le choix c'est porté sur l'option B, alors un long travail de digitalisation très précis est nécessaire pour obtenir la même précision structurale.. L'avantage de l'option B est que les strates forestières situées sous les arbres dominants sont mieux représentées qu'avec des données Lidar. Même si ces strates sont bien souvent constituées d'arbres de faibles diamètres mais en nombre important, elles peuvent avoir une action de protection significative complémentaire de celle des arbres dominants.

2.3 Simulations avec prise en compte de filets pare-pierres

Si l'opérateur souhaite réaliser une simulation avec prise en compte de filets pare-pierres, alors les 3 fichiers rasters suivants doivent être présents dans le répertoire de travail :

1. *net_number.asc* (raster de type entier; [valeurs de 0 – 999])
2. *net_energy.asc* (raster de type entier; [valeurs de 0 – 20000 kJ])
3. *net_height.asc* (raster de type entier ou double précision; [valeurs de 0 – 10 m])

Ces rasters peuvent être créés en utilisant la conversion de vecteur en raster d'une ou plusieurs lignes , qui ont les attributs suivants : net_number (-), net_energy (la capacité d'absorption d'énergie du filet en kJ) et net_height (en m, **mesurée selon la normale à la pente !**). Là encore, tous les fichiers rasters correspondant aux filet doivent avoir exactement la même emprise géographique et des cellules de mêmes tailles que le fichier *dem.asc*. Chacune des lignes saisies représentante un filet doit avoir un identifiant (net_number) unique. Il n'y a aucune limitation sur le nombre de filets, mais ceux-ci ne doivent pas se croiser dans la carte raster.

2.4 « Ecrans » de calculs

Si une simulation avec des "filets" est réalisée, des informations détaillées sur la cinématique des projectiles sont enregistrées au point de passage des "filets", ceux-ci sont donc des écrans de calculs ou de contrôles. Les données ainsi enregistrées au regard des filets sont sauvegardées dans le fichier "*Rockyfor3D_v50_CalC_SCR_ _dd-mm-yy_HHhMM.txt*".

En utilisant pour les parametres net_energy et net_height une valeur de 0, on peut ainsi récupérer pour une ligne de filet fictive les paramètres cinématiques des projectiles sans pour autant perturber leur propagation. Même si le paramètre net_height est à 0, les données seront enregistrées chaque fois qu'un projectile entrera et /ou passera par les cellules correspondantes à la localisation de ce filet virtuel. Il n'y a aucune limitation au nombre de filets/écrans de calculs.

Au niveau de chacun des « filets » les données suivantes sont enregistrées pour chacun des projectiles :

- L'énergie cinétique (*E* = translationelle et rotationelle en kJ)
- La hauteur (normale à la pente) de passage (*Ph* en m)
- La vitesse (*V* en $m.s^{-1}$)
- La vitesse de rotation (V_{rot} en $rad.s^{-1}$)
- L'angle d'impact (*Imp_a* en degrés = l'angle entre la plan horizontal et la trajectoire du projectile, une valeur négative représente une trajectoire descendante et une valeur positive une trajectoire ascendante.

Le nombre total de projectile arrivant dans le "filet" (*n*) est aussi enregistré. Le fichier texte contient les données brutes enregistrées et les résultats d'analyses statistiques réalisées avec les données brutes. Ainsi pour chacune des variables le fichier contient la médiane, les valeurs à 90%, 95% et 98% value (resp. x50, x90, x95 ou x98) de la function de la densité de probabilité des variables citées précedemment , et ce pour chacun des écrans de calculs (*scr_nr*). scr_nr est le numéro de la ligne schématisant un « filet » tel que décrit dans la section 2.3.

2.5 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation pouvant être définis dans l'interface utilisateur graphique (*graphical user interface*, GUI) de Rockyfor3D sont les suivants :

- Le nombre de simulations par cellule source, c'est-à-dire le nombre de trajectoires de chutes de blocs qui seront simulées à partir de chaque cellule source.
- La variation du volume du projectile en % représente le pourcentage qui est utilisé aléatoirement pour faire varier les 3 dimensions du projectile et ce à chaque simulation d'une trajectoire.
- 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. Cette valeur peut également être utile lors de l'utilisation de modèles MNT de faible résolution, où les petits à-pics sont mal représentés. 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 2.2).
- La fait que des filets ou des écrans de calculs soient ou non pris en compte dans la simulation (voir section 2.4).

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

2.6 Comment démarrer Rockyfor3D

Pour utiliser Rockyfor3D, le fichier ***setup.exe*** doit être utilisé pour installer le programme. Une fois cette installation réalisée, le programme peut être ouvert classiquement comme tout autre programme. Après avoir cliqué sur l'icône du programme, l'interface utilisateur graphique (GUI) s'ouvrira. La première étape est de

choisir le répertoire de travail (cf. Fig. 5) qui **doit contenir tous les fichiers rasters des données d'entrées** (*dem.asc*, *d1.asc*, etc.). Après avoir sélectionné le répertoire de travail, l'ombrage du MNT du raster *dem.asc* s'affichera. A ce stade tous les autres paramètres de simulation peuvent être saisis et la simulation lancée en appuyant sur le bouton (Run Simulation). Si une erreur reconnue par le logiciel se produit, alors l'opérateur sera informé par un message d'erreur ; une erreur inconnue du logiciel peut conduire au « crash » du programme. Dans un tel cas, contactez nous via le site www.ecorisq.org. Quand la simulation est terminée, les fichiers raster contenant les données calculées (cf. chapitre 4) sont sauvegardés dans le répertoire de travail initialement sélectionné par l'opérateur et dans le GUI apparaît une vue "ombrée" sur laquelle le raster *nr_passages.asc* est drapé. Ces fichiers peuvent être importés ou bien ouverts directement dans un SIG, comme le logiciel libre SAGA GIS (www.saga-gis.org), QGIS (www.qgis.org), ou bien ArcGIS d'ESRI.

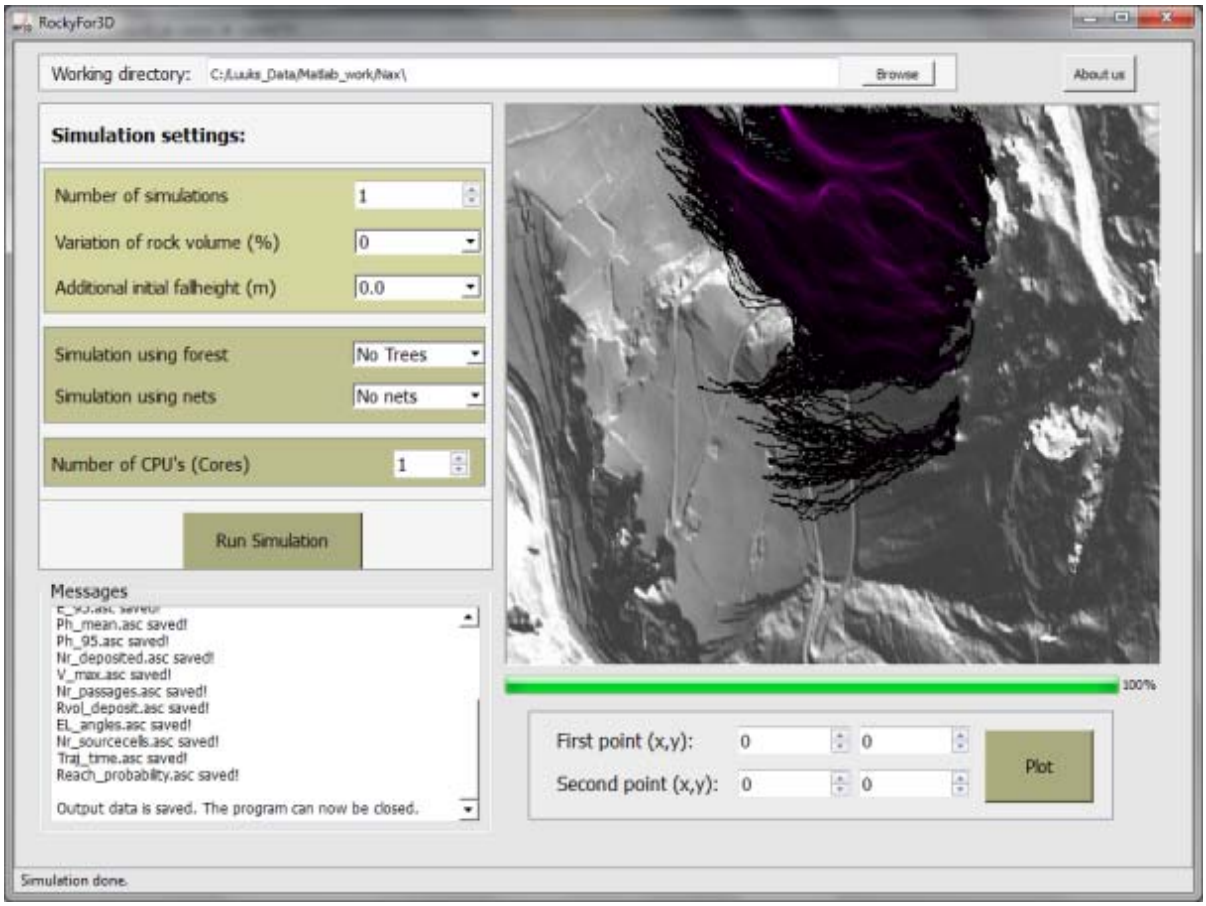


Fig. 5 L'interface utilisateur graphique (GUI) de Rockyfor3D.

Une fois les simulations terminées, il est possible d'effectuer une première analyse des données en utilisant le GUI. L'utilisateur peut visualiser une enveloppe d'énergies, de hauteurs de passage et de zones de propagation simulées dans un profil en 2D à définir par deux points : un point de départ et un point d'arrivé (placer le curseur de la souris sur le carte pour voir comment fonctionne le système). Les coordonnées des deux points doivent être saisis dans les cellules correspondantes puis l'opérateur valide le profile en cliquant sur le bouton plot. Le programme affiche le profil de l'analyse en 2D dans une seconde fenêtre 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_v50_ProfileData_dd-mmm-yyyy.txt*".

3 Principaux composants du modèle

3.1 Forme du bloc

Pour les données d'entrée des simulations, Rockyfor3D offre la possibilité d'utiliser des types de formes de blocs rectangulaires, ellipsoïdaux, sphériques et/ou en forme de disque. Cette forme de bloc définit la façon dont 1) le volume du bloc (et donc sa masse) et 2) le moment d'inertie sont calculés sur la base de trois diamètres de blocs définis d1, d2 et d3. Afin de calculer la position du bloc, le rebond sur la surface de la pente et les impacts contre les arbres, Rockyfor3D emploie toujours une forme circulaire (voir également fig. 4) pouvant présenter 2 diamètres différents : 1) le plus petit des diamètres d1, d2 et d3 définis, qui est utilisé pour calculer si le bloc frappe un arbre et 2) un diamètre plus grand, qui est la moyenne des deux plus grands diamètres de d1, d2 et d3. Ce dernier permet de calculer la perte d'énergie lors des impacts sur le sol, c'est-à-dire le rapport entre la rugosité de surface et le rayon du plus grand périmètre du bloc (voir également l'équation 7).

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 pris en compte. Cela impliquerait un algorithme qui permette de calculer un nombre de trajectoires statistiquement valable, c'est-à-dire un grand nombre, tout en tenant compte de tous les effets de la forme du bloc sur la nature du rebond se produisant dans la réalité. Il n'existe pas actuellement d'algorithme satisfaisant ces deux conditions. Etant donné que les algorithmes employés pour calculer la direction de chute dans Rockyfor3D sont basés sur des observations sur le terrain, incluant des formes de blocs multiples, la forme est implicitement prise en compte par les algorithmes de direction de chute probabilistes employés dans la simulation.

3.2 Chute libre parabolique

La chute libre parabolique se calcule 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 à l'intersection au moyen d'une topographie en 3D représentée par le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ainsi, Rockyfor3D simule une trajectoire en 3D en calculant l'évolution de sa position le long des axes x, y et z. Ici, 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 sa position verticale. Au moyen de ses coordonnées en x et en y, la trajectoire en 3D est reliée aux cartes *raster* initiales et finales. En connaissant la position du rebond, les caractéristiques de la surface de la pente définies par les cartes *raster* d'entrée à cet endroit, ainsi que la vitesse d'arrivée, il est possible de lancer le calcul du rebond.

3.3 Rebond sur la surface de la pente

La vitesse après un rebond sur la surface de la pente, aussi appelé *bounce*, se calcule principalement avec 10 algorithmes. Une première étape importante est la conversion de la vitesse d'arrivée dans le plan horizontal xy (V_{hor}) et de celle dans le

plan vertical z (V_{vert}) en une vitesse d'arrivée normale Vn et tangentielle Vt (par rapport à la pente locale) (voir fig. 6).

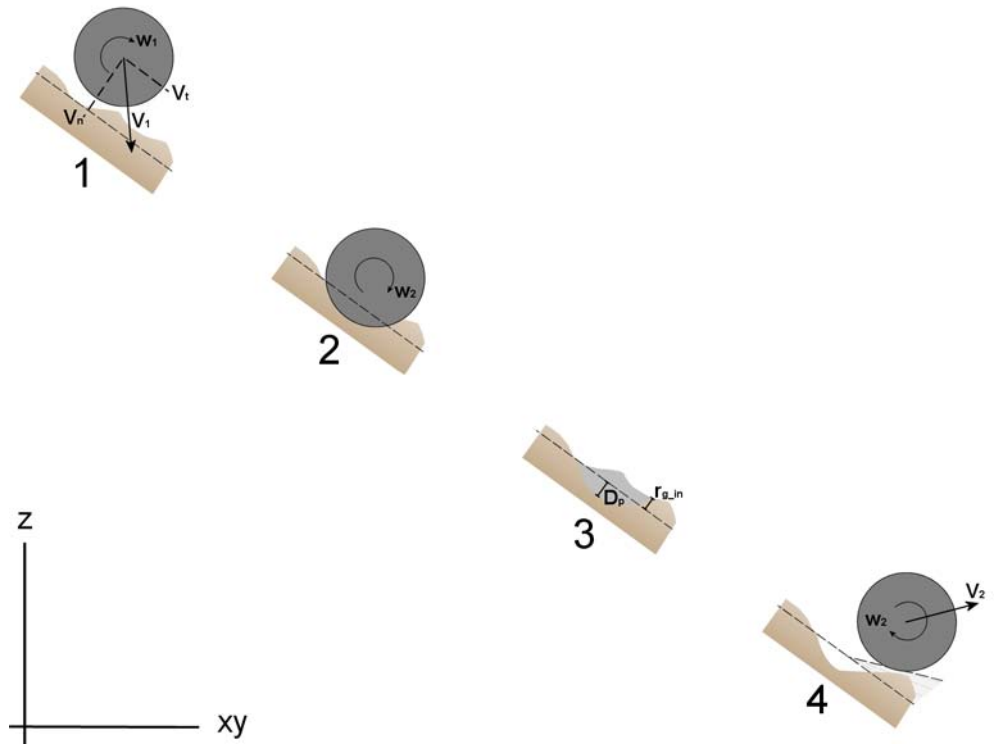


Fig. 6. Le rebond tel qu'il est représenté par les algorithmes employés par Rockyfor3D.

Ensuite, la profondeur de pénétration du bloc sur le lieu de l'impact est calculée d'après les travaux de Pichler et al. 2005 :

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

- Le coefficient de restitution normal (R_n)
- Le diamètre du projectile (d en m)
- La masse du projectile (RockMass en kg)
- La vitesse d'impact du projectile (V en m/s)

Les constantes utilisées sont :

- k = 1.207 (constante représentant la forme sphérique du bloc)
- B = 1.2 (paramètre de compressibilité du matériau touché ; varie peu pour les différents matériaux)

Les principales fonctions de profondeur de pénétration (D_p) sont les suivantes :

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

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

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)

où R_i est la résistance à l'indentation du matériel impacté (en MPa) et calculé avec la formule,

$$Ri = 55 * 10^9 * R_n^{\ 7} \quad (4)$$

Cette fonction donne des valeurs entre 1 - 5 MPa pour de sols fins et de 200 - 250 MPa pour la roche mère.

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} * d^3 * B * 0.5} \quad (5)$$

où ρ_{soil} est la densité du matériel impacté (en kg/m^3 et calculé avec la formule,

$$\rho_{soil} = 1200 * \ln(R_n) + 3300 \quad (6)$$

Cette fonction donne des valeurs entre 1500 kg/m^3 pour des sols fins et de 2500 kg/m^3 pour la roche mère.

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

Dans ce but, 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 surface et par le rayon du bloc en chute, étant donné que pour des blocs de plus grandes dimensions, la rugosité de surface effective est moins importante que pour les blocs de petites dimensions (voir Kirkby et Statham 1975; Dorren 2003), et analogue au principe du coefficient de variation de pente utilisé par exemple par Pfeiffer et Bowen (1989), Spang et Krauter (2001) et Dorren et al. (2004). Par conséquent, Dorren et al. (2006) ont proposé l'algorithme suivant pour calculer le R_t :

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p)/R)} \quad (7)$$

où MOH est 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).

Tous les spécialistes savent qu'il n'est pas possible de mesurer le MOH en détail et à chaque endroit sur une pente active de chutes de pierres. Etant donné qu'il est possible de réaliser une carte de polygones présentant les diamètres moyens du matériau recouvrant la surface classée par différentes classes de diamètres, la

valeur de R_t devrait être déduite d'une telle carte. Nous avons choisi de cartographier trois classes de MOH représentant la hauteur moyenne des obstacles rencontrés par un bloc lors de 70%, 20%, et 10% des rebonds dans un polygone cartographié. Ensuite, l'algorithme de rebond de Rockyfor3D choisit le MOH sur la base des trois classes de couverture dans le polygone en utilisant un nombre aléatoire. Ainsi, les valeurs données par les trois classes de probabilité Rg70, Rg20 et Rg10 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 de vitesse tangentielle du bloc après le rebond (V_{t2}) d'après Pfeiffer et Bowen (1989) :

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 * (I * V_{rot1}{}^2 + RockMass * V_{t1}{}^2) * R_t}{I + RockMass * R^2}} \qquad (8)$$

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

Avant le calcul réel de V_{t2}, le modèle opère une variation aléatoire de la valeur calculée de R_t de +/-10% afin de représenter la variance de la rugosité de surface observée dans la nature. Il en va de même pour le coefficient normal de restitution (R_n), utilisé pour calculer la composante de vitesse normale du bloc après le rebond V_{n2} d'après Pfeiffer et Bowen (1989) :

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

où V_{n1} est la composante de vitesse normale du bloc avant le rebond. Le facteur $(abs(V_{n1})/9)^2$ ajuste 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 beaucoup moins élastique provoqué par une fracturation croissante du bloc et une formation de cratères à la surface de la pente, à 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} se calcule comme suit :

$$V_{rot2} = \min\left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(Vt1 - Vt2) * 2}{5 * R}\right] \qquad (10)$$

Tout comme dans Pfeiffer et Bowen (1989), l'angle de la pente sur le lieu du rebond est uniformément diminué de façon aléatoire lors de chaque rebond. Cependant, la réduction maximale de l'angle de pente est fixée à 4°.Le roulement est représenté par une séquence de rebonds sur une faible distance, la distance entre deux rebonds est égale au rayon du projectile et avec une valeur minimale fixée à 0.2 m. Ces deux dernières conditions ne sont utilisées que pour des pentes entre 0° et 30°.

3.4 Impact sur un arbre

Étant donné que le modèle utilise des solutions analytiques et non des itérations temporelles, la position exacte du bloc simulé est connue à chaque instant. Ainsi, il est possible de calculer la position des impacts sur les troncs et son influence sur la dissipation d'énergie lors de ces impacts. En plus de la position de l'impact sur le tronc de l'arbre, le modèle utilise le diamètre de l'arbre touché, le type d'arbre (conifère ou feuillu) et l'énergie du bloc. Les positions et les diamètres des arbres dans l'entourage immédiat du bloc simulé sont disponibles en permanence dans une sous-liste contenant leurs coordonnées en x et en y ainsi que les valeurs de leurs DBH. En cas d'impact contre un arbre, le bloc perd une fraction de son énergie cinétique d'après quatre fonctions principales visualisées dans la fig. 7. Ces fonctions seront expliquées dans les paragraphes suivants.

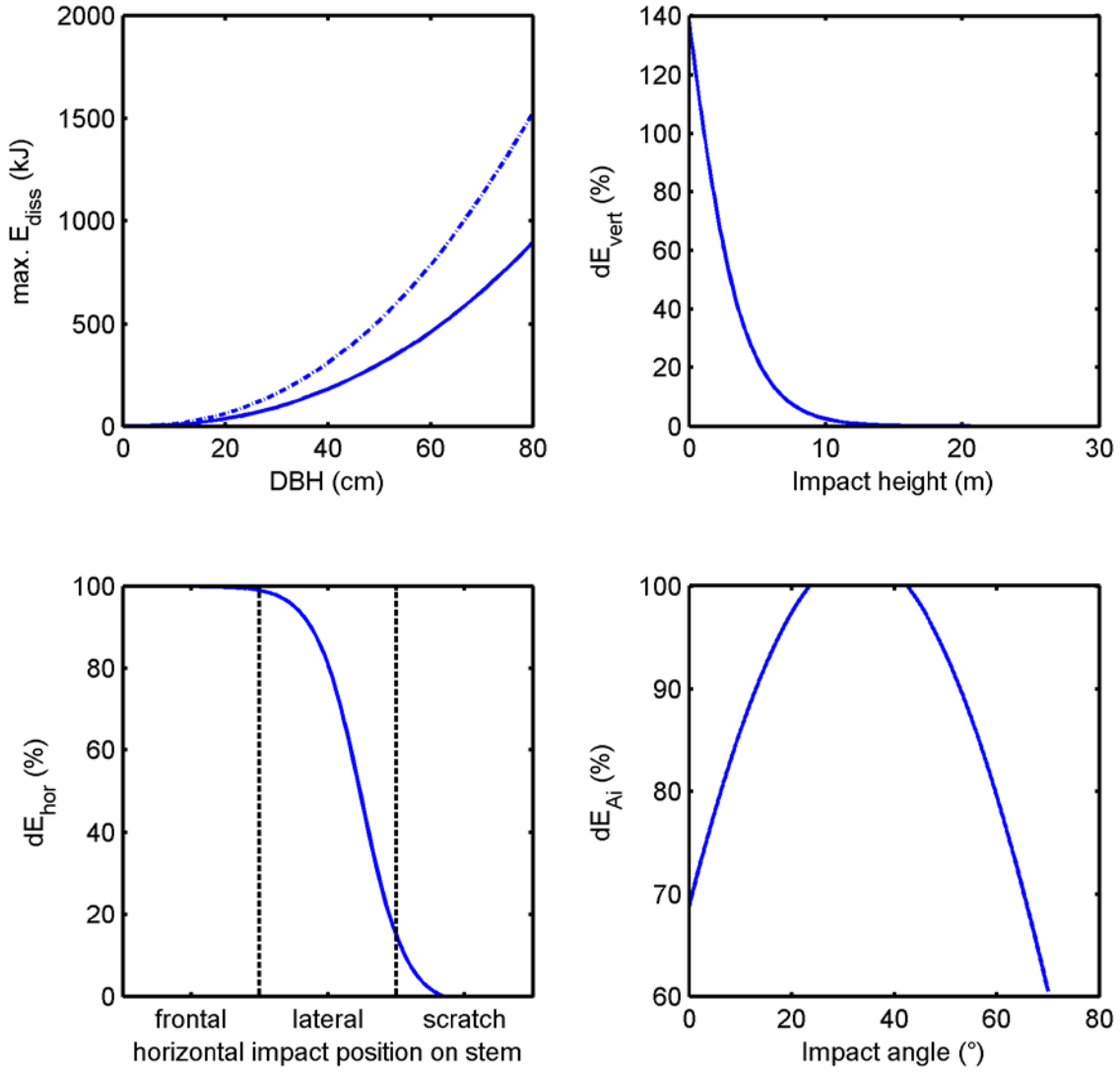


Fig. 7. Visualisation des quatre principales fonctions de calcul de dissipation d'énergie lors d'un impact sur un arbre. Le graphique situé en haut à droite est calculé avec une hauteur d'arbre de ~13 m (DBH = 20 cm).

D'après Dorren et Berger (2006), la quantité maximale d'énergie cinétique (E_{dissM}) susceptible d'être absorbée puis dissipée par un arbre se détermine en fonction du diamètre du tronc et du type d'arbre par l'équation suivante :

$$E_{dissM} = FEratio * 38.7 * DBH^{2.31} \quad (11)$$

où, E_{dissM} = quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être dissipée par l'arbre (en J), FE_{ratio} = taux d'énergie de rupture du type d'arbre (d'après Dorren et Berger 2006), et le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) du tronc en cm. Rockyfor3D utilise seulement deux valeurs moyennes pour le FE_{ratio} : 0.93 pour les conifères et 1.59 pour les feuillus.

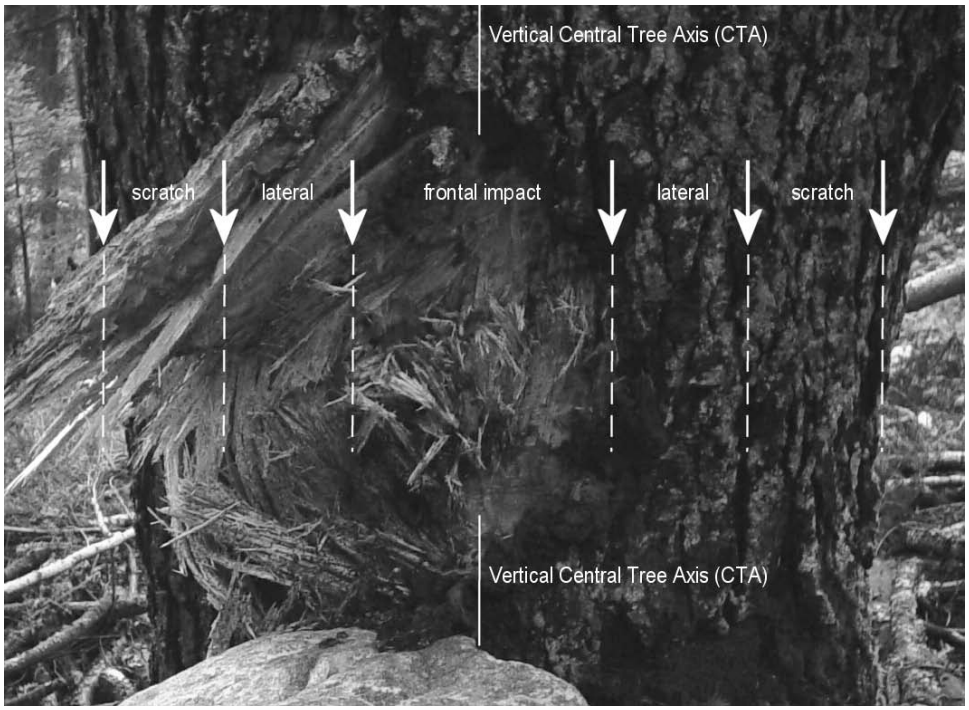


Fig. 8. Trois principaux types d'impact d'après la distance horizontale entre le centre de l'impact et l'axe vertical central de l'arbre (*Central Tree Axis*, CTA), vus depuis la direction de l'impact.

La question de savoir si cette quantité maximale d'énergie est réellement dissipée lors de l'impact dépend de la position horizontale (voir fig. 7) 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) :

$$dE_{hor} = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{(0.58 - ((Pi - CTA)/0.5 \times DBH)) \times (-8)}} \quad (12)$$

où, dE_{hor} = quantité maximale d'énergie pouvant être dissipée par l'arbre, en relation avec 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) :

$$H_{tree} = 1.22 * DBH^{0.8} \quad (13)$$

Ensuite, on calcule le pourcentage de quantité maximale d'énergie pouvant être dissipée par l'arbre (dE_{vert} [-]), en relation avec la hauteur d'impact (Z_i en m) :

$$dE_{vert} = 1.62 * \left(\frac{1}{1+e^{18.04*(Z_i / Htree)+0.02*DBH-2.35}} - \frac{1}{1+e^{15.69+0.02*DBH}} \right) \qquad (14)$$

Ici, l'équation 11 s'appuie sur l'analyse de centaines d'arbres mesurés dans toutes les Alpes. 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_{α_imp} en %) se calcule d'après Jonsson (2007) :

$$dE_{\alpha_imp} = \min(100, (1.03 * \sin(1.46 * \frac{\min(\alpha_imp, 70)}{180°} * \pi + 0.73)) \qquad (15)$$

Enfin, la quantité totale d'énergie dissipée par l'arbre (E_{dtree} en kJ) se calcule comme suit :

$$E_{dtree} = E_{dissM} * dE_{vert} * dE_{hor} * dE_{\alpha_imp} / 1000 \qquad (16)$$

3.5 Calcul de la direction de chute

Changement de direction du à un rebond sur la surface de la pente

Initialement, c'est l'orientation de la cellule source qui détermine la direction de chute du bloc simulé. Ensuite, la direction du projectile change en raison de rebonds sur la surface de la pente ou d'impacts contre des arbres. L'angle de déviation après un rebond sur la surface de la pente est déterminé par la topographie, par la direction de chute du bloc avant le rebond et par sa vitesse.

Lors de chaque rebond, le modèle permet au bloc de dévier de sa direction antérieure au rebond vers la direction de l'orientation de la cellule *raster* dans laquelle il rebondit (fig. 9). L'orientation de la pente est la direction vers l'aval du taux maximum de changement de valeur à partir de chaque cellule d'un *raster* vers les quatre cellules voisines (les 2 cellules au-dessus et en-dessous et les 2 cellules à gauche et à droite). Ainsi, l'orientation représente la direction de pente la plus raide dans chaque cellule et se calcule d'après Zevenbergen et Thorne (1987). Enfin, la déviation du bloc par rapport à sa direction de chute avant le rebond vers l'orientation de la pente dans la cellule *raster* est déterminée par un chiffre aléatoire et par la vitesse du bloc (voir tableau 3).

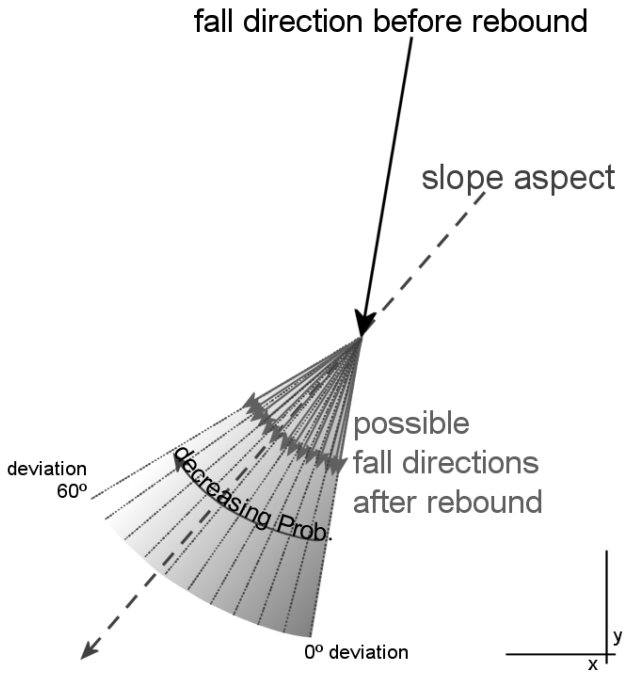


Fig. 9. Le principe de l'algorithme calculant la direction de chute après un rebond à la surface de la pente.

Le chiffre aléatoire définit 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°. Tous ces cas de figure s'accompagnent de probabilités d'occurrence prédéfinies et déterminées par la vitesse du bloc avant le rebond comme présenté dans le tableau 3.

Tableau 3 : Probabilités (en %) de gammes d'angles de déviation après le 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≤V<15 m/s	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
V≥15 m/s	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Les valeurs du tableau 3 reposent sur des analyses statistiques de trajectoires de chutes de blocs et de vitesses observées lors des expériences présentées dans Dorren et al. (2006). Si le déplacement du bloc est ascendant dans le modèle, les gammes de déviation décrites ci-dessus sont autorisées dans les deux directions latérales à la direction avant le rebond. 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 peut être déviée latéralement jusqu'à 76° par rapport à sa direction initiale de chute suite à un impact contre un arbre. Ceci est valable pour la direction d'arrivée et de départ dans un cercle d'un rayon de 5 m autour de l'arbre frappé. Localement, c'est-à-dire près du tronc, cette déviation entre la direction de

chute avant et après l'impact peut même atteindre 180°. La déviation du bloc après un impact sur un arbre dépend de la position du centre du bloc par rapport au tronc de l'arbre au moment de l'impact. Ainsi, trois principaux types d'impacts ont été définis sur cette base (voir également fig. 8). À l'appui de ces trois types, les probabilités indiquées dans le tableau 4 sont utilisées en combinaison avec un chiffre aléatoire uniformément distribué afin de calculer la déviation.

Tableau 4. Probabilités de déviation de la direction de chute suite à un impact sur un arbre.

Type d'impact	Probabilités		
	Angle de déviation 0 – 22.5°	Angle de déviation 22.5° - 67.5°	Angle de déviation 67.5° - 76°
Frontal	44	50	6
Latéral	11	84	5
Frôlé	72	24	4

4 Données de sortie du modèle

À chaque fois qu'un bloc simulé passe sur une cellule *raster* donnée ou rebondit dessus, les valeurs maximales des différentes variables simulées dans cette cellule sont enregistrées (voir également fig. 10) dans des *raster* distincts dans la cellule concernée. **Ainsi, tous les résultats de Rockyfor3D se présentent en format *raster*, avec la même couverture de zone, la même taille de maille et le même format que les *raster* d'entrée.**

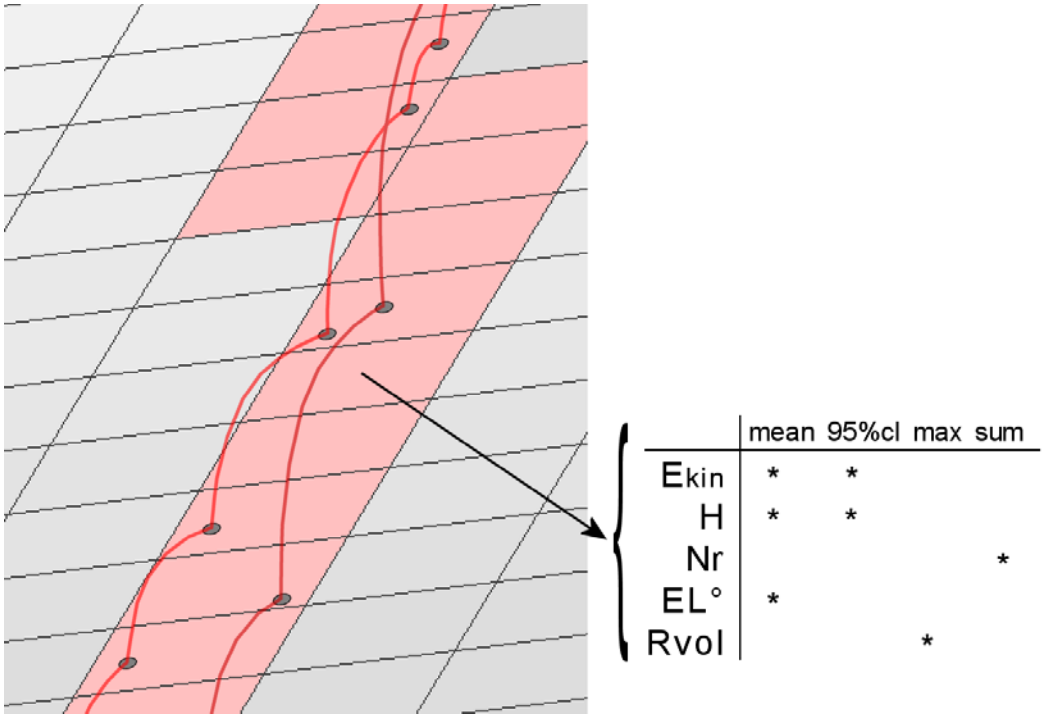


Fig. 10. D'une trajectoire en 3D à des données de sortie en format raster.

Les *rasters* de sortie créés par Rockyfor3D sont les suivants :

- *E_mean.asc* : la moyenne des énergies cinétiques maximales (translationnelle + rotationnelle, en kJ) par cellule
- *E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc* : ces *rasters* représentent resp. le médian, la 90ème, 95ème, 98ème et la 99ème percentile des énergies simulées par cellule. Les *rasters* de sortie sont de type entier et correspondent à les limites de classes d'énergie suivantes :
  ≤3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 270, 285, 300, 500, 1'000, 1'500, 3'000, 5'000, 10'000, >10'000 (en kJ).
- *E_95CI.asc* : le niveau de confiance de 95% (LC) (**95% LC = E_mean + 2 * écart type des valeurs maximales dans la cellule de calcul, en supposant une distribution normale**) de toutes les valeurs d'énergie cinétique maximale (en kJ) enregistrées dans chaque cellule. L'écart type (σ) est calculé dans Rockyfor3D en utilisant la formule:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\left(n\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2} - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2\right)} \qquad (17)$$

La valeur E_95CI peut être considérée comme étant représentative de l'énergie maximale enregistrée dans une cellule de calcul. Pour le dimensionnement d'ouvrages de protection nous recommandons d'utiliser le 95ème percentile de l'énergie et des hauteurs de passages enregistrées au niveau des écrans de calculs.

- *Ph_mean.asc* : la hauteur moyenne de passage du centre du bloc (en m, mesurée dans la direction normale par rapport à la surface de la pente) par cellule
- *Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc* : ces *rasters* représentent resp. le médian, la 90ème, 95ème, 98ème et la 99ème percentile des hauteurs moyennes de passage du centre du bloc par cellule. Les *rasters* de sortie sont de type entier et correspondent à les limites d'hauteur de passage suivantes : ≤0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, >20 (in m).
- *Ph_95CI.asc* : le niveau de confiance de 95% de toutes les valeurs de hauteur de passage du centre du bloc (en m, mesurées dans la direction normale) enregistrées dans chaque cellule. Le principe de calcul de Ph_95CI est identique à celui utilisé pour E_95CI. Ph_95CI peut donc être considéré comme étant la hauteur maximale de passage dans chacune des cellules de calcul.
- *Nr_passage.asc* : le nombre de blocs ayant traversé chaque cellule
- *Nr_sourcecells.asc* : le nombre de cellules sources alimentant une cellule donnée [-]. La carte ainsi obtenue donne pour chaque cellule de quelles cellules de départ sont issus les projectiles passant par celle-ci.
- *Reach_probability.asc* : (Nr_passages*100) / (Nr_simulations_per_source_cell * Nr_sourcecells) [%]. La traduction cartographqiue de ce paramètre représente la probabilité d'atteinte d'une cellule par un projectile rocheux. Une forte probabilité correspond au plus forte valeur dans la carte et une faible probabilité correspond au plus faibles valeurs positives.
- *Nr_deposited.asc* : le nombre de blocs s'arrêtant dans chaque cellule. La traduction cartographique de cette donnée **est une excellente source d'information pour délimiter les zones d'arrêt des projectiles et est une base de la réflexion pour la réalisation de la carte d'aléa.**
- *Rvol_deposit.asc* : le volume max. de bloc (en m^3) 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 lieu d'arrêt et le lieu d'origine d'un bloc tombé. 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).
- *Traj_time.asc* : le temps minimum nécessaire pour atteindre une cellule à partir des cellules de départ alimentant celle-ci [s]
- *V_max.asc* : la vitesse maximale absolue par cellule de calcul the (m/s). Cette donnée doit être utilisée avec précaution en absence d'information sur la

distribution statistique des vitesses. Ce paramètre a été ajouté à la liste des paramètres calculées à la demande de certains utilisateurs.

Dans le cas d'une simulation avec prise en compte de la forêt, deux rasters supplémentaires sont générés :

- *Tree_impact_heights.asc* : la hauteur d'impact maximal par arbre et par cellule de calcul [m]
- *Nr_tree_impacts.asc* : le nombre d'impact par arbre et par cellule de calcul [-]

Tous ces fichiers raster sont au format ESRI ASCII Grid et peuvent être directement ouverts et visualisés dans la plus part des logiciels. Dans certain cas la réalisation d'une importation (commande import en règle générale) peut être nécessaire.

Après chaque simulation, Rockyfor3D crée un fichier journal, appelé « *Rockyfor3D_v50_logfile_dd-mm-yyyy_HHhMM.txt* », qui contient les informations présentées ci-dessous.

```
Rockyfor3D v5.0 - Simulations completed on Tue Jan 24 15:12:39 2012

simulation started on Tue Jan 24 15:12:33 2012

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 0
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2382
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and with nets

Overall simulated block volumes:
- min = 0.100000 m3
- mean = 0.100000 m3
- max = 0.100000 m3

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 323.900000 kj
- maximum energy value = 462.100000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated
trajectories:
EL_angle[°]  frequency[-]  frequency[%]
      24.00       1.00       0.04

Output rasters (for explanation see also:
www.ecorisq.org/docs/Rockyfor3D.pdf, chapter 4)

REMARKS
```

Il est recommandé d'ajouter des informations spécifiques concernant la simulation terminée dans la section remarques et de sauvegarder ce fichier journal dans un répertoire séparé en plus des *raster* de sortie. Ainsi, il est toujours possible de reconstruire les scénarios utilisés pour la simulation terminée.

5 Références

Azimi, C., Desvarreux, P., Giraud, A. and 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. and McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographic information systems. Oxford University Press, Oxford, Great Britain: 333 p.

Bozzolo D. and 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 and F., Darve, 2009. Toward objective rockfall trajectory modelling using a stochastic rebound algorithm. Geomorphology 110: 68-79.

Chau, K.T., Wong, R.H.C. and 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. and Maier, B., 2001. GIS basierte Felssturz-Modellierung auf regionalem Maßstab im Montafon (Vorarlberg, Össterreich). Forschen und Entdecken 9: 227-236.

Dorren, L.K.A. and 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. and 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. and 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. and Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. Forest Ecol. Manage. 215(1-3): 183-195.

Dorren, L.K.A. and Berger, F., 2006. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Phys. 26: 63-71.

Dorren, L.K.A., Berger, F. and 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. and 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 noveau modèle de calcul de trajectories 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. and 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.

Hoek, E. 1987. Rockfall - a program in Basic for the analysis of rockfall from slopes. Unpubl. Notes, University of Toronto/Golder Associates.

Jaboyedoff, M. and 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. and Statham, I., 1975. Surface stone movement and scree formation, J. Geol. 83: 349–362.

Lundström, T., Jonsson, M.J., Volkwein, A. and Stoffel, M., 2009. 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.

Monnet, J.-M., Mermin, E., Chanussot, J., Berger, F. 2010. Tree top detection using local maxima filtering: a parameter sensitivity analysis. Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, September 14-17, Freiburg, Germany, 9 p.

Pichler, B., Hellmich, Ch. and Mang, H.A., 2005. Impact of rocks onto gravel - design and evaluation of experiments. Int. J. Impact Eng. 31: 559–578.

Pfeiffer T.J. and Bowen T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. Bull. Ass. Eng. Geol. XXVI: 135-146.

Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. Comp. Elec. Agric. 37:71-95.

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. and 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. and 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. and 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. and 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.

Liste des changements

Rockyfor3D Version	Date	Changement dans le modèle (*m*) ou dans cette note (*n*)
5.0	24.01.2012	– Adapté la note pour la version 5.0 (*n*) – Changé la condition de roulement (petits rebonds) des blocs qui remontent une pente (*m*) – treefile.txt sans en-tête (*m*)
5.0	15.02.2012	– Changé la valeur Rn pour des routes goudronnées (*m* / *n*) – Rajouté les liens de téléchargements (p. 5) (*n*)
5.0	1.03.2012	– Corrigé la description de la distribution (gamma) utilisée pour les valeurs DHP des arbres (p. 8) (*n*)
5.1	20.09.2012	– Adapté la note pour la version 5.1 (*n*) – Rajouté des données de sortie : E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc, Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc (*m*)

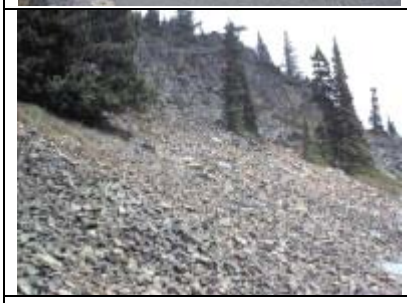
Annexe I. La rugosité des sols dans Rockyfor3D

Dans Rockyfor3D, la rugosité des unités géomorphologiques est uniquement déterminée par la taille des matériaux présents en surface et dans le sol : du gravier au bloc rocheux (c.f. http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_size_(grain_size)). La rugosité, telle que définie dans Rockyfor3D, ne représente en aucun cas la microtopographie (i.e. les banquettes résultantes du passage répété de vaches sur une pente herbeuse). Cette rugosité représente, lors de l'impact d'un projectile rocheux, la capacité du sol impacté à agir comme un obstacle à la propagation du projectile. Nous proposons de n'utiliser que les valeurs du tableau ci-dessous pour caractériser les coefficients Rg70, Rg20 et Rg10.

Taille des éléments constituant la rugosité (MOH)	**Valeurs possibles du coefficient de rugosité : Rg (en m)**
Aucune rugosité, aucun obstacle	0
> 0 – 10 cm	0.03, 0.05, 0.08, 0.1
> 10 – 50 cm	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5
> 50 cm – 1 m	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1
> 1 – 2.5 m	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2, 2.5
> 2.5 – 10 m	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
> 10 m	100
	Aide visuelle pour la détermination des proportions de 70%, 20% et 10%

Annexe II. Exemples de valeurs de type de sol et de rugosités

Photo	rg70	rg20	rg10	soiltype
	0	0	0.05	6
	0	0.05	0.1	5
	0.25	0.5	0.9	4
	0.03	0.05	0.05	3
	0.05	0.05	0.1	4

	0.05	0.1	0.2	4
	0.03	0.03	0.03	3
	0	0	0.05	3
	0	0	0	7
	0.15	0.15	0.25	4
	0.1	0.35	0.15	4

	0	0	0	1
	100	100	100	0

Soiltype (type de sol)	Description générale	Valeur moyenne de R_n	Gamme de variation de R_n
0	rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc peut pénétrer complètement	0	0
1	sol fin (profondeur > 100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	sol fin (profondeur < 100 cm), et/ou sol de vallée composé de sables et graviers	0.28	0.25 - 0.31
3	piste forestière, éboulis fin (Ø < ~10 cm), sol moyennement compacté avec des petites pierres	0.33	0.30 - 0.36
4	éboulis grossier – talus (Ø > ~10 cm), sol compacté avec présence de pierres	0.38	0.34 - 0.42
5	roche mère avec couvert fin de matériau altéré ou de sol	0.43	0.39 - 0.47
6	roche mère	0.53	0.48 - 0.58
7	Route goudronnée (asphalte)	0.35	0.32 – 0.39