

Zeitschrift: Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 25 (2013)

Artikel: Modèles de trajectographie : atout ou contrainte
Autor: Dorren, Luuk / Berger, Frédéric
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-389830>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

14. Modèles de trajectographie: atout ou contrainte

par

Luuk DORREN¹ & Frédéric BERGER²

Résumé.—DORREN L. & BERGER F., 2013. Modèles de trajectographie: atout ou contrainte. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 175-187.

Cet article présente l'axe méthodologique à mettre en œuvre pour réaliser une étude trajectographique rigoureuse et transparente. Dans cet article nous présentons les étapes clés nécessaires à la réalisation d'une étude trajectographique, puis nous abordons le rôle de l'opérateur et finalement, nous décrivons très brièvement les principaux types de modèles existants. L'axe méthodologique que nous proposons est composé de six étapes: 1) la préparation des données initiales, 2) la définition des scénarii de départ des projectiles, 3) la simulation des trajectoires, 4) la vérification du champ des possibles des résultats de simulation, 5) la détermination des résultats de simulation utilisable et 6) la transformation de ces résultats en cartes d'aléa. Avec cet article nous nous adressons aussi bien aux bureaux d'étude, qu'aux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre, ainsi qu'à tout autre bénéficiaire des expertises réalisées avec ces modèles.

Mots clés: Modèle de simulation, chutes de blocs, étude trajectographique.

Abstract.—DORREN L. & BERGER F., 2013. Rockfall trajectory models: advantage or limitation. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 175-187.

This article presents a workflow for carrying out a transparent and pertinent rockfall trajectory study. Firstly, we present the six key steps of the workflow, secondly, we will discuss the role of the expert using a trajectory model and finally we will shortly describe the main types of existing rockfall trajectory models. The six key steps are: 1) the preparation of the model input data, 2) the definition of the rockfall release scenarios, 3) the simulation of the trajectories, 4) the plausibility check or validation of the simulated results, 5) fixing the validity domain of the results and 6) transformation into a readable rockfall process maps (rockfall energy maps, jump heights map, runout zone map). This article is meant both for hazard expert bureaus and for those commissioning rockfall trajectory studies, as well as for all other beneficiaries of such studies.

Keywords: Simulation model, rockfall, trajectory study.

¹Office fédéral de l'environnement, CH-3063 Ittigen; tél.: +41 (0)31 324 10 24.

E-mail: luuk.dorren@bafu.admin.ch

²Cemagref, Grenoble, France; tél.: +33 (0)4 76 76 28 00.

E-mail: frederic.berger@cemagref.fr

INTRODUCTION

Les chutes de blocs rocheux sont des processus spontanés, rapides et pouvant s'avérer dangereux pour les biens et les personnes. Les chutes de blocs génèrent des problèmes de sécurité à l'aval de nombreuses barres rocheuses et falaises à travers le monde. Pour prévoir les menaces potentielles occasionnées par les chutes de blocs, il est non seulement nécessaire d'estimer les points d'arrêt des projectiles rocheux, mais il est également essentiel de quantifier les paramètres cinématiques régissant leurs propagations (énergies cinétiques, hauteurs de passages), ainsi que les probabilités d'atteinte en tout point de leurs trajectoires. Ainsi, la réalisation d'une étude trajectographique est, au jour d'aujourd'hui, impensable sans l'utilisation d'un modèle de simulation de propagation. Cependant et malgré les progrès récents réalisés dans le domaine de la connaissance de la trajectographie de projectiles rocheux, le seul fait de disposer d'un modèle ne suffit pas pour réaliser une étude robuste et de qualité. L'obtention d'une étude de qualité nécessite de mettre en œuvre une procédure de travail rigoureuse et vérifiable en tout point. Dans cet article, nous présentons notre vision d'un tel processus de travail. En particulier, nous explorons trois sujets importants:

- Les étapes clés nécessaires à la réalisation d'une étude trajectographique
- Le rôle de l'opérateur
- Le modèle de simulation

Dans cet article nous nous adressons aussi bien à des bureaux d'étude ayant une activité d'expertise incluant l'utilisation d'un modèle de simulation trajectographique, qu'à des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre, et tout autre bénéficiaire des expertises réalisées avec ces modèles.

ÉTAPES CLÉS DE LA TRAJECTOGRAPHIE

Le protocole de réalisation d'une étude trajectographique de chutes de blocs est composé de six étapes:

1. la préparation des données initiales
2. la définition des scénarios de départ
3. la simulation des trajectoires des blocs
4. le contrôle de la plausibilité
5. la détermination (fixation en anglais) des résultats utilisable
6. la transformation des résultats utilisable en cartes d'aléa

Degré de détail

La réalisation effective des six étapes mentionnées ci-dessus dépend du degré de détail de l'étude trajectographique. En général, trois degrés de détail peuvent être définis (OFEV 2011). Le premier degré (D1) a pour but de donner une vision générale (que l'on peut aussi qualifier d'impression générale) de l'aléa. La plupart du temps, mais pas obligatoirement, ce degré de détail est utilisé à une échelle régionale afin d'obtenir une première estimation globale des zones d'arrêt. En Suisse, ces cartes sont appelées les cartes indicatives de danger.

Dans d'autres pays, celles-ci sont souvent dénommées cartes de susceptibilité. Le deuxième degré (D2) est une vision locale qui, en règle générale mais pas nécessairement, est mise en œuvre à l'échelle d'un territoire communal. Ce degré est souvent utilisé pour la réalisation des cartes des dangers. Le troisième degré (D3) ne concerne, quant à lui, qu'une échelle très restreinte telle que celle d'une pente voire d'un profil en long. Ce dernier niveau très détaillé peut être requis pour des questions très précises telles que, par exemple, la stabilité d'un pilier de pont menacé par des chutes de blocs.

Le D1 correspond à des échelles cartographiques allant du 1:25'000 au 1:10'000, le D2 du 1:10'000 au 1:5'000 et le D3 du 1:5'000 au 1:2'000. Dans le cadre d'une analyse trajectographique de degré D1, les étapes 4 à 6 de l'axe méthodologique ne sont généralement pas réalisées. En effet, la vérification du champ des possibles à l'échelle d'une région est rarement possible. De plus, dans les cartes indicatives de dangers, ce sont bien souvent les résultats bruts des simulations qui sont affichés plutôt que des résultats analysés et interprétés.

La préparation des données initiales

L'obtention d'une étude trajectographique rigoureuse et robuste exige une préparation conséquente. Lors de cette étape, le cadastre des événements historiques, les études antérieures aussi bien que les documents historiques locaux doivent être recensés et leur pertinence évaluée. La vue d'ensemble des événements passés permet à l'opérateur de se faire une première idée de l'activité (intensité et fréquence) des chutes de blocs sur le site d'étude. Malheureusement, des cadastres exhaustifs n'existent que rarement.

Au cours de cette phase, il est essentiel de procéder à une étude de terrain afin de caractériser et de pré-cartographier les zones de départ, de transit et d'arrêt probables, ainsi que les ouvrages de protection existants (figure 1). Dans la zone de départ, la stabilité de la masse rocheuse et ses propriétés structurales (discontinuités, etc.) doivent être analysées. Dans la zone de transit et d'arrêt, les caractéristiques de la surface de la pente doivent être cartographiées et caractérisées (figure 1). En général, l'élasticité et la rugosité de la surface des matériaux de couverture sont les paramètres utilisés pour décrire les caractéristiques de la surface de la pente. Ces données sont très importantes, car elles conditionnent en partie la cinématique des projectiles et en particulier la perte d'énergie et le transfert entre les composantes de translation et de rotation lors d'un rebond entre le projectile et le sol.

Si des forêts sont présentes sur le secteur d'étude et que l'on souhaite caractériser leur effet protecteur, alors elles doivent être inventoriées, décrites et cartographiées. Les données sylvicoles à acquérir comprennent la composition en essence, le nombre d'arbre par unité de surface (densité), la distribution des diamètres des arbres, ainsi que la distribution spatiale des différents types de peuplements forestiers. Aujourd'hui, les données Lidar permettent d'automatiser la cartographie des peuplements forestiers en utilisant la différence entre le modèle numérique de surface (MNS) et le modèle numérique de terrain (MNT) (PERSSON *et al.* 2002).

De plus, tous les témoins silencieux de l'activité de l'aléa doivent être recensés et cartographiés, comme par exemple:

- les dimensions et la forme des projectiles générés par les zones de départ, ainsi que la position de leur point d'arrêt,

- les traces d'activités dans les zones de départ,
- la distance entre les points d'impact au sol, ainsi que leur profondeur,
- la distribution spatiale et la hauteur des blessures occasionnée par des chutes de blocs sur les d'arbres (STOFFEL 2006).

La population et les experts locaux représentent des sources importantes d'informations qu'il ne faut pas négliger. Néanmoins, nous conseillons d'effectuer les relevés de terrain avant toute consultation préalable des sources de données historiques. En effet, cela permet d'éviter de biaiser le raisonnement de l'expert en partant sur le terrain avec des idées préconçues, soit sur les volumes potentiellement instables, soit des distances d'arrêt possible. Une telle démarche offre aussi l'avantage d'optimiser la possibilité d'identifier des phénomènes inattendus.

La dernière phase de cette étape de préparation, porte sur la création et la paramétrisation des données nécessaires à l'utilisation du modèle trajectographique: création d'un profil de pente ou d'un modèle numérique de terrain (MNT), vérification approfondie du MNT, définition des polygones d'entrée des cartes ou des segments de pente, exportation des données aux formats (figure 1). Tant pour les modèles 2D que 3D, la résolution des cartes d'entrée ou des profils de pente a une influence significative sur les résultats de la modélisation (CROSTA & AGLIARDI 2003).

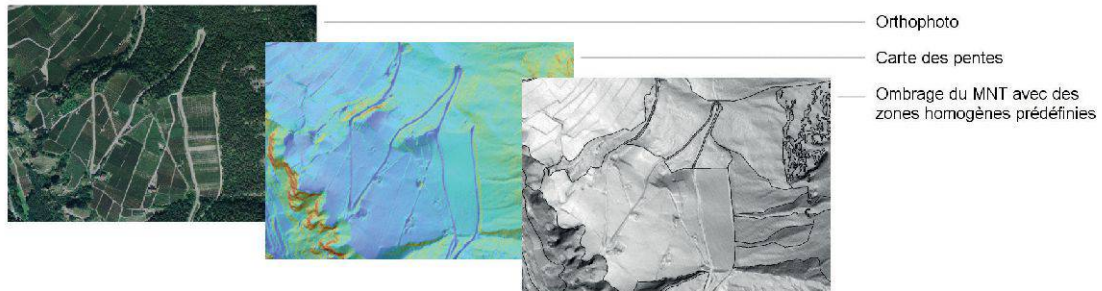
Pour le MNT, une résolution de 2 à 5 m est idéale. Des résolutions plus grandes ou plus petites ont tendance à diminuer la qualité des résultats de la modélisation. Des données d'entrée à une résolution trop grossière génèrent une trop grande généralisation des résultats et gommement des détails pouvant s'avérer importants. Une résolution trop fine va, quant à elle, générer des artéfacts dans le MNT. De plus, elle correspond à un volume de données énorme, ce qui diminue la vitesse de calcul.

Définition des scénarii de départ

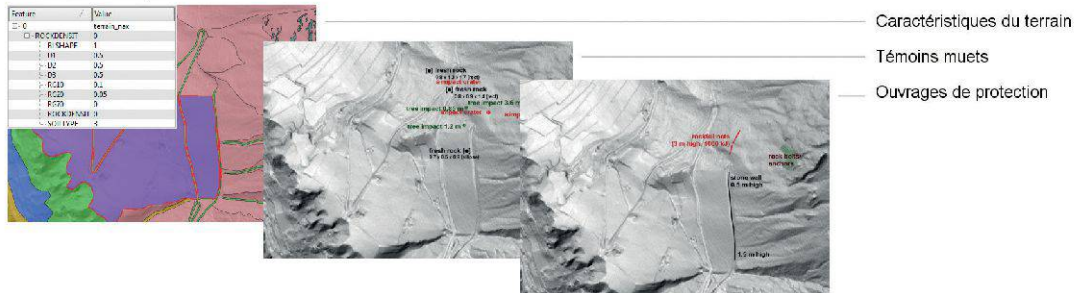
La définition des scénarii de départ a pour but de déterminer toutes les zones de départ, le volume des projectiles potentiels, et, ce qui est le plus difficile, la fréquence de production de ces projectiles. La taille des blocs est déterminée sur la base de l'analyse des discontinuités en falaise (JABOYEDOFF 2002), ainsi que sur la taille des blocs déposés à l'aval des zones sources. Toutefois, ces méthodes sont difficilement réalisable sur de grandes surfaces, car il est impossible d'établir des modèles géostructuraux/-mécaniques fiables pour plusieurs kilomètres de falaises (DUSSAUGE-PEISSER *et al.* 2002). Cela peut s'avérer être un problème délicat si une étude trajectographique est demandée pour un vaste territoire communal. Dans ce cas, la combinaison de l'étude de la distribution des pentes (LOYE *et al.* 2009) avec une analyse COLTOP-3D (JABOYEDOFF *et al.* 2009) s'avère des plus utiles.

Comme abordé précédemment, la détermination de la fréquence de chute d'un bloc d'un volume donné est extrêmement difficile. Si, pour la zone d'étude, on peut disposer d'un cadastre historique exhaustif, alors il est aisé de construire une relation fiable ampleur-fréquence des phénomènes. Malheureusement, les données historiques sont souvent fragmentaires et ne concernent généralement que les événements qui ont marqué la population. Ainsi, la fréquence des événements rares de chutes de blocs sont très difficiles à apprécier à partir de ces seules sources de données. Pour résoudre ce problème,

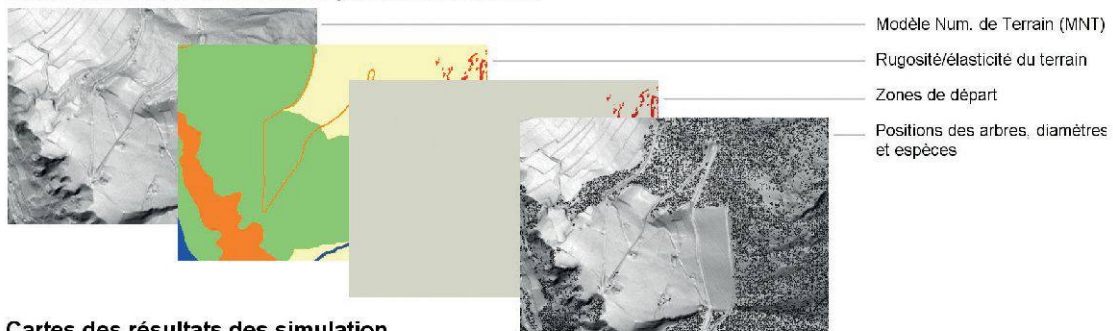
Cartes pour la réalisation des relevés de terrain



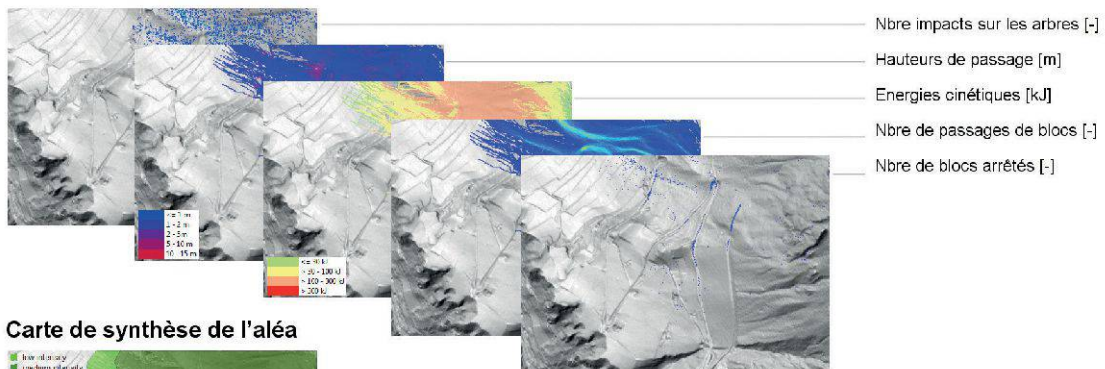
Données acquises



Cartes des données d'entrées pour les simulation



Cartes des résultats des simulation



Carte de synthèse de l'aléa

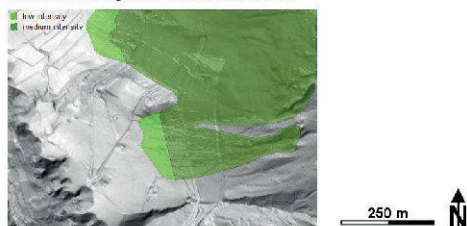


Figure 1.—Un exemple des cartes nécessaires à l'utilisation d'un modèle de trajectographie 3D.
An example of the maps required for using a 3D trajectory model.

plusieurs auteurs proposent d'utiliser une loi puissance pour la prédiction des probabilités d'événements futurs d'un volume donné (DUSSAUGE-PEISSER *et al.* 2002). Néanmoins, des problèmes persistent liés aux biais éventuels induits par la mauvaise qualité des inventaires historiques et à la sensibilité des prévisions aux variations des paramètres régissant ce type de loi.

Le cas échéant, l'évaluation de la fréquence pourra se faire avec une analyse dendrogéomorphologique. Le principe d'une telle analyse est basé sur le fait qu'il est possible, à partir de l'analyse des cernes de croissance d'un arbre, de déterminer la date de réalisation des blessures occasionnées par des projectiles sur son tronc. Dans les secteurs soumis à des chutes de blocs, il est facile de déterminer les blessures dues à l'impact d'un projectile rocheux et donc la fréquence de ce phénomène (STOFFEL 2006). Par contre, une telle analyse ne permet pas de déterminer le volume des projectiles rocheux.

Au quotidien, et en particulier pour les falaises inaccessibles, l'activité des chutes de blocs est souvent estimée via le nombre de compartiments instables et leur productivité (ARPA PIEMONTE & CEMAGREF 2009). Dans une telle situation, il est important de quantifier et de présenter les incertitudes.

Simulation des trajectoires

Après avoir défini les scénarii de départ et préparé les données d'entrée pour le modèle de trajectographie, l'opérateur peut alors réaliser la simulation de la propagation des projectiles à partir de chacun des points de départ qu'il a identifiés. La plupart de modèles calculent pour chacun des projectiles et en tout point de leurs trajectoires simulées:

- la vitesse de translation et de rotation
- la hauteur de passage
- l'énergie cinétique
- l'arrêt ou non du projectile

Un modèle 3D calcule en plus la direction de propagation en fonction de la topographie. En sortie, les modèles fournissent au minimum:

- les points d'arrêt
- les fréquences de passage en tout point des trajectoires
- la distribution de l'énergie cinétique le long de la trajectoire.
- la distribution de la hauteur de passage le long de la trajectoire

Un aspect important, relatif à l'utilisation des modèles de trajectographie, est le nombre de simulations nécessaires à l'obtention de résultats statistiquement robustes. Pour les modèles déterministes, la réponse est assez simple: une seule simulation par zone de départ est suffisante. Pour des modèles qui utilisent des approches probabilistes, des tests de convergence doivent être effectués pour déterminer le nombre minimal de simulation requis. La convergence des résultats est atteinte si, pour un point géographique donné, la différence des énergies moyennes, des hauteurs moyennes de passage et des distances d'arrêt moyennes, entre deux simulations séquentielles n et $n+1$, est inférieure à un pourcentage donné. Ce pourcentage n'a, à ce jour, jamais été fixé par les experts de la modélisation des chutes de blocs, mais on estime que des différences de 5% et moins sont acceptables.

Contrôle de la plausibilité

Étape 1: Dans la majorité des cas, le premier contrôle de la plausibilité des résultats est basé sur l'intuition et l'expérience des opérateurs. L'intuition est un sentiment naturel qu'il ne faut pas négliger dans le contexte des analyses de risque. Il est inutile de dire que ce premier contrôle, bien que très important, n'est pas suffisant et nécessite d'être complété par une comparaison objective avec la réalité. La vérification des résultats obtenus doit donc aussi faire appel à la comparaison de ceux-ci aux témoins silencieux observés sur le terrain, ainsi qu'aux données historiques. Si les résultats obtenus correspondent bien à la réalité observée, on peut en conclure que ceux-ci sont réalistes et fiables. Si tel est le cas, on accorde alors le statut «d'utilisable» aux résultats. Le processus d'analyse peut ainsi passer à l'étape suivante, à savoir, utiliser et agréger les données simulées pour créer les cartes d'intensité et la carte d'aléa. Il va de soi que ces derniers documents doivent être lisibles et compréhensibles par tous.

Étape 2: Si les résultats obtenus ne correspondent pas aux données observées, cela ne signifie pas nécessairement que le modèle a généré des erreurs. Il faut donc identifier et vérifier les sources d'erreurs possibles dans les jeux de données d'entrée, en d'autres termes les éléments présents dans la réalité ont-ils été bien représentés dans le modèle (les fossés, les pistes, la forme complexe des projectiles rocheux, ...). Si aucune source d'erreur de ce type n'est identifiée, alors l'opérateur peut refaire des simulations en faisant varier la résolution des données topographiques, et/ou utiliser une autre forme de projectile rocheux.

Étape 3: En parallèle, il est logique et souhaitable de comparer les résultats obtenus avec ceux d'autres méthodes, comme par exemple celle de la ligne d'énergie (JABOYEDOFF & LABIOUSE 2011) qui peut donner une bonne indication sur les zones d'arrêt extrêmes (par exemple, avec un angle de ligne d'énergie de 28°). En effet, si les simulations ne reproduisent pas les observations de terrain, il est tout à fait possible que les résultats obtenus correspondent à un ou des événements ne s'étant pas encore réalisé(s).

Si à l'issue des étapes 1, 2 et 3, les différences ne sont toujours pas explicables, alors il est nécessaire de relancer un processus de simulations avec une légère modification des paramètres les plus sensibles caractérisant la surface de la pente, et dont la caractérisation sur le terrain a été difficile (p. ex. l'élasticité de la pente). Il est conseillé de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois.

Si toutefois et après plusieurs variations des paramètres, l'enveloppe des points d'arrêt simulés dépasse encore les points d'arrêt extrêmes calculés avec la méthode de l'énergie, il peut être sage d'abandonner le modèle 2D ou 3D utilisé jusqu'alors et de travailler avec des outils plus simple, p. ex. Conefall (JABOYEDOFF & LABIOUSE 2011) basé sur le principe de la ligne d'énergie. Tout dépend du nombre de ces blocs «extrêmes» dépassant le champ des possibles.

«Fixer» et présenter les résultats

La «fixation» des résultats calculés signifie, qu'au regard du champ des possibles, les valeurs aberrantes doivent être éliminées (i.e., des blocs avec des déviations latérales ou des points d'arrêt extrêmes). Lors de cette étape, l'utilisateur doit déterminer une zone de

propagation «valide» au regard des hypothèses et de la pertinence des résultats. Dans cette zone, l'énergie moyenne et maximale, ainsi que les hauteurs de passage doivent être fixées. Actuellement, aucune règle n'a été définie pour réaliser ce choix. Ainsi, la communauté des experts mène-t-elle actuellement une réflexion sur la définition des valeurs seuils à utiliser. Cette réflexion s'appuie, entre autre, sur l'analyse statistique des données calculées, la formalisation d'intervalles de données statistiques et la confrontation des résultats obtenus avec ces intervalles à des cas réels.

La dernière étape consiste à transformer les résultats considérés comme utilisable («fixés») dans une carte lisible et compréhensible. Pour ce faire, les résultats simulés doivent être classés dans des catégories prédéfinies par un tiers (i.e. le législateur ou les services en charge de la mise en œuvre de la politique de prévention des risques naturels) ou définies par l'utilisateur. Puis, sur la base des données classifiées, une ou plusieurs cartes d'intensité ou cartes d'aléa peuvent être créées. Le cas échéant, une probabilité d'occurrence temporelle peut être associée à chacune de ces cartes, mais tout dépend de la précision avec laquelle cette probabilité temporelle est définissable.

LE RÔLE DE L'OPÉRATEUR

L'opérateur est la personne qui a en charge la réalisation de l'étude trajectographique. A ce titre, il choisit le modèle de simulation, les zones et scénarii de départ, réalise les relevés de terrain, détermine les valeurs des paramètres du sol, ainsi que la résolution des données d'entrées, etc. Il est donc important de dire clairement que l'utilisateur est le maillon le plus important de la chaîne d'analyse. A ce titre il est bien plus important que le modèle utilisé. L'opération d'étalonnage de logiciels de trajectographie menée par BERGER (2003) a confirmé objectivement l'importance du rôle de l'utilisateur. Cette opération a été réalisée en utilisant les données d'une expérimentation grandeur nature parfaitement documentée. Elle a permis de fournir aux bureaux d'étude participant, aux maîtres d'œuvre et d'ouvrage, un premier panorama anonyme des produits utilisés en termes de familles de logiciels, ainsi qu'une information comparative et anonyme concernant les écarts entre les résultats des simulations et les données réellement observées. Sur les 12 candidats, il s'avère que les prestations «trajectographiques», réalisées dans le cadre de cette opération d'étalonnage, sont plus en adéquation avec les valeurs observées dans le domaine des calculs de propagation (7 candidats sur 12) que dans celui des calculs des paramètres cinématiques (3 candidats sur 12). Les résultats ont montré que 4 des 12 candidats ont 5 des 9 variables simulées (énergies, hauteurs, distance d'arrêt, etc.) pour lesquelles les valeurs calculées appartiennent à l'intervalle d'écart de ratio $[-20\%, +20\%]$ et sont par conséquent considérées comme étant en adéquation avec les valeurs observées pendant l'expérimentation. On observe une tendance générale à une sous-estimation des paramètres cinématiques: la hauteur de passage, la vitesse de translation et l'énergie cinétique de translation.

Il est important de préciser que 6 candidats ont utilisé un logiciel développé en interne et non commercialisé. Les 6 autres ont utilisé quant à eux des logiciels du commerce: 2 \times RocFall (Rocscience), 2 \times CRSP (Colorado Geological Survey) et 2 \times ROCKFALL (Dr. Spang GmbH). Les résultats de l'opération montrent que pour un même logiciel, la variation des ratios (entre simulation et observation) d'un candidat à l'autre met en évidence la part

substantielle de l'expertise dans l'utilisation de ce logiciel. Ces variations s'expliquent par le choix des hypothèses initiales caractérisant le mouvement des projectiles (i.e. blocs développant une phase aérienne ou roulant au sol), des coefficients utilisés pour caractériser le sol, les rebonds, et des paramètres décrivant la géométrie des blocs. L'importance du rôle de l'opérateur se manifeste aussi dans le nombre de types de sol défini par les candidats pour ce même site d'étude: de 3 à plus de 10!

LE MODÈLE DE SIMULATION

Modèle 3D ou non

Les modèles de trajectographie peuvent être classés en fonction de la prise en compte ou non de la 3ème dimension. En général, on parle des modèles 2D (en deux dimensions) et des modèles 3D. Dans les plupart des cas, les modèles 2D réalisent des calculs le long d'un profil de pente (altitude = $f(\text{abscisse})$) défini par l'utilisateur, qui suit bien souvent la ligne de plus grande pente (BOZZOLO & PAMINI 1986, PFEIFFER & BOWEN 1989). Tous les modèles dits 2D dans lesquels le bloc est associé à un point mathématique, peuvent aussi être définie comme étant des modèles 1D. Les variables qui sont calculées pour ce point sont: la vitesse de translation et de rotation, ainsi que la hauteur de passage au-dessus de la topographie.

Au sein de la famille des outils de modélisation, il existe un groupe à part: celui des modèles 2.5D, aussi appelé quasi 3D. La caractéristique principale de ces modèles est que la direction de la trajectoire du projectile rocheux simulés dans le plan x,y est indépendante de sa cinématique et de sa trajectoire dans le plan vertical. En fait, dans ces modèles, le calcul de la direction de la chute (dans le plan x, y) peut être complètement séparé du calcul de la cinématique ou des positions et hauteurs de rebond. Cela signifie que ces modèles font appel à deux opérations distinctes de la 2D. La première détermine la position d'un profil de pente dans le plan (x, y) et la seconde est une simulation de chutes de blocs 2D le long du profil de pente ainsi prédéfini (VAN DIJKE & VAN WESTEN 1990).

Les modèles de trajectographie en 3D réelle calculent quant à eux la trajectoire d'un projectile dans un espace 3D (x, y, z) et ce à chaque pas de temps. Dans ces modèles, il doit y avoir interdépendance entre la direction de la trajectoire dans le plan (x, y) , la cinématique du projectile, les positions et hauteurs de rebond (GUZZETTI *et al.* 2002) et s'ils sont pris en compte, les impacts sur les arbres (DORREN & BERGER 2012). Le principal avantage des modèles 3D, est que les effets divergents et convergents de la topographie, ainsi que les trajectographies exceptionnelles ou surprenantes, sont clairement visibles lors de la visualisation cartographique des résultats. L'inconvénient des modèles 3D est la nécessité de disposer de cartes représentatives de la répartition spatiale des paramètres relatifs aux propriétés mécaniques des sols (et des arbres), ce qui exigent une phase de terrain plus conséquente que pour les simulations de trajectoire le long d'un profil de pente.

LABIOUSE (2004) a réalisé une retro-analyse à l'aide de trois modèles de trajectographie très différents (2D vs. 3D, déterministe vs. probabiliste). Cette étude a conclu que, si les paramètres du modèle sont bien calibrés, alors les trois modèles semblent appropriés pour l'estimation des zones d'arrêt. Cependant, tout en reproduisant des zones d'arrêt similaires,

les trois modèles utilisés ont calculé des hauteurs de passage et des énergies cinétiques très différentes. Une des conclusions de cette étude est que les modèles 2D ne produisent pas de résultats satisfaisants sur des sites ayant une topographie complexe.

La cinématique des blocs

Une caractéristique très importante de tous les modèles de trajectographie concerne les modalités de calcul des types de mouvements simulés. Certains modèles simulent le mouvement du bloc avec des algorithmes permettant de détailler les phases de rebond, glissement et roulement (BOZZOLO & PAMINI 1986). D'autres, par contre, considèrent ces trois modes de déplacement comme des mouvements similaires, qui sont décrits par une succession d'impacts et de rebonds (PFEIFFER & BOWEN 1989). Les phases de chute libre (phase de vol) sont calculées avec les algorithmes standards du mouvement uniformément accéléré.

Le phénomène le plus complexe dont il faut rendre compte dans la simulation trajectographique d'un projectile rocheux est celui du rebond. Pour cela, la plupart des modèles utilisent des coefficients de restitution (normal R_n et tangentiel R_t). Si ces coefficients sont mal utilisés dans les algorithmes, c'est-à-dire, quand ils servent à calculer une perte de vitesse à la place d'une dissipation d'énergie, alors le modèle n'est physiquement pas réaliste et robuste. Dans ce cas, des blocs de 100 m³ arrivent au même endroit que des blocs de 0.1 m³.

Un autre aspect important lié au calcul du rebond est celui de la pénétration du projectile dans le sol (figure 2). Plutôt que de prendre indirectement en compte cet effet via les coefficients de restitution, un modèle doit pouvoir le calculer. Cette pénétration intervient sur la perte d'énergie et le transfert entre les composantes des vitesses de rotation et de translation. La profondeur de pénétration est influencée par les caractéristiques de sol, l'énergie et l'angle d'impact, ainsi que la forme du projectile. Un exemple d'algorithme permettant un calcul réaliste de la pénétration est décrit dans PICHLER *et al.* (2005). DORREN (2010) a développé un algorithme qui calcule les rebonds sur la base des dimensions du projectile rocheux et de la rugosité mesurée sur le terrain. Dans cet algorithme, la profondeur de pénétration est calculée selon PICHLER *et al.* (2009).

La forme du bloc

L'effet de la forme du bloc sur sa trajectoire est elle aussi non-négligeable. Plusieurs modèles actuels offrent la possibilité d'utiliser différents types de formes de blocs (rectangulaires, ellipsoïdaux, sphériques et/ou en forme de disque). Il faut préciser que, dans la majorité des modèles qui proposent différentes formes de projectile, la forme n'intervient que dans 1) la définition du volume du bloc (et donc sa masse) et 2) du calcul du moment d'inertie. Afin de calculer la position du bloc dans l'air et son rebond sur la surface de la pente, ces modèles assimilent bien souvent le projectile à un point mathématique représentant le centre de masse.

Les autres formes de blocs plus complexes, ainsi que les effets explicites de la forme du bloc sur la direction de chute ne sont actuellement pas prises en compte. Pour ce faire, cela nécessiterait de disposer d'un algorithme complexe permettant de calculer à la fois



Figure 2.—Photo illustrant que la profondeur de pénétration doit être prise en compte dans le calcul de trajectoires, en particulier dans le cas d'un sous-sol mou (Photo: T. Vernang, NGI).

Photo showing that the impact depth should be taken into account in the calculation of the rebound, in particular in cases of a soft underground (Photo: T. Vernang, NGI).

un nombre de trajectoires statistiquement valable 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 à ces deux conditions.

Les algorithmes employés pour calculer la direction de chute dans le modèle Rockyfor3D (DORREN & BERGER 2012) sont basés sur des observations de terrain et des expérimentations grandeur nature, incluant des formes de blocs multiples. En conséquence, la forme est implicitement prise en compte par les algorithmes de calculs stochastiques de direction de chute de ce logiciel.

CONCLUSIONS

Au regard de cet article, la conclusion selon laquelle les modèles de trajectographie offrent plus de contraintes que d'atouts peut paraître justifiée, surtout pour un public qui n'a pas l'habitude de travailler avec ce genre de modèles. En effet, l'utilisation d'un tel outil peut

très vite donner l'impression d'un volume de travail énorme. La cartographie de l'aléa de propagation peut, en fonction des outils utilisés, se limiter à la seule cartographie de la limite maximale de la zone de propagation des projectiles ou, au contraire, être exprimée en zones correspondantes à différents seuils de paramètres calculés: probabilité d'atteinte, énergie maximale de passage, énergie moyenne de passage, hauteur maximale de passage, etc. Autant la première cartographie peut être réalisée à dire d'expert et avec un inventaire de terrain, autant le calcul des paramètres cinématiques ne peut se faire qu'avec l'aide d'un outil de simulation trajectographique. Depuis plus de 40 ans, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de la simulation numérique trajectographique et ces outils sont de plus en plus utilisés comme outil d'aide à la réalisation de cartes d'aléa de chutes de blocs. En parallèle à ces progrès dans le domaine des outils d'analyse trajectographique, ceux réalisés dans le développement et l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (permettant de croiser et d'analyser différentes couches d'informations spatiales) permettent d'offrir également aux experts de nouveaux outils pour mieux déterminer l'emprise des aléas. Par conséquent, un modèle de simulation peut être considéré comme un véritable atout. Une étude trajectographique, sans l'utilisation d'un modèle, est impensable de nos jours.

La mise en œuvre de l'axe méthodologique que nous venons de présenter, permet d'optimiser et de réaliser une étude rigoureuse. En conséquence, si un modèle de trajectographie est utilisé pour réaliser une étude d'aléa de chutes de blocs, toutes les étapes décrites dans cet article devraient être présentées d'une façon transparente et vérifiable dans le rapport technique de l'étude. De plus, toutes les hypothèses prises par l'opérateur sont particulièrement importantes pour expliciter et comprendre les résultats, elles doivent donc être clairement présentées dans le rapport de synthèse. La présentation du modèle, des hypothèses, des données, de la démarche méthodologique et des résultats doivent être compréhensible aussi bien par l'utilisateur que par le maître d'ouvrage de l'étude. Actuellement la mise en pratique de ces trois deniers points est loin d'être chose acquise. A ce titre, le chemin est encore long pour une mise en œuvre opérationnelle d'une procédure harmonisée de présentation transparente et comparable des études de simulation trajectographiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Ulrik Domaas pour la mise à disposition de la photo.

RÉFÉRENCES

- ARPA PIEMONTE & CEMAGREF, 2009. Rapport final du projet Interreg n°165 PROVIALP – Protection de la viabilité alpine. ISBN 978-88-7479-070-8.
- BERGER F., 2003. Réalisation d'un test d'étalonnage des modèles de trajectographie en utilisant des données provenant d'expérimentations grandeur nature. Rapport de synthèse, Cemagref / Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, France, 88 pp.
- BOZZOLO D. & PAMINI R., 1986. Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica* 63, 113-130.
- CROSTA G.B. & AGLIARDI F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3: 407-422.

- DORREN L.K.A., BERGER F., 2012. ROCKYFOR3D (v5.1) À COEUR OUVERT – DESCRIPTION COMPLÈTE DU MODÈLE 3D DE CHUTES DE BLOCS. PUBLICATION D'ECORISQ (WWW.ECORISQ.ORG): 32 p.
- DUSSAUGE-PEISSER C., HELMSTETTER A., GRASSO J.-R., HANTZ D., DESVAREUX P., JEANNIN M. & GIRAUD A., 2002. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2: 15-26.
- GUZZETTI F., CROSTA G., DETTI R. & AGLIARDI F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences* 28(9), 1079-1093.
- JABOYEDOFF, M. (2002): Matterocking v2.0: a program for detecting rockslide instabilities. CREALP, www.crealp.ch/images/files/logiciels/manual_matterocking.pdf, 25 pp.
- JABOYEDOFF M. & LABIOUSE V., 2011. Technical note on CONEFALL: a computer program for the preliminary estimation of rockfall runout zones. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 11, 819-828.
- JABOYEDOFF M., COUTURE R. & LOCAT P., 2009. Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: Toward a progressive failure. *Geomorphology*, 103(1): 5–16.
- LABIOUSE V., 2004. Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on alpine sites and experimental investigation of boulder impacts. 9th International Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Balkema: pp. 457-466.
- LOYE A., JABOYEDOFF M. & PEDRAZZINI A., 2009. Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 9: 1643-1653.
- OFEV (2011): Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug, Bern (parution fin 2011).
- PERSSON A., HOLMGREN J. & SODERMAN U., 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, pp. 925–932.
- PFEIFFER T.J. & BOWEN T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bulletin Association Engineering Geologists* XXVI(1), 135-146.
- PICHLER B., HELLMICH CH. & MANG H.A., 2005. Impact of rocks onto gravel. Design and evaluation of experiments. *International Journal of Impact Engineering* 31: 559-578.
- STOFFEL M., 2006. A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards* 39(1), 51-70.
- VAN DIJKE J.J. & VAN WESTEN C.J., 1990. Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS. *ITC Journal* 1, 40–44.s.

