

Modélisation numérique de l'impact d'un bloc rocheux sur un éboulis. Analyse stochastique des coefficients de réflexion

S. KECILI-LAOUAF
F. NICOT

Cemagref, Unité de
recherche ETNA
Domaine universitaire
Grenoble, France
Francois.nicot@
cemagref.grenoble.fr

Résumé

De par les destructions et dégradations importantes qu'elles occasionnent, les chutes de blocs isolés dans les régions montagneuses constituent un risque naturel majeur. Sur le plan de la prévention, la simulation de la trajectoire de ces blocs en interaction avec les éventuels obstacles naturels du versant (terrain naturel, couverture forestière), à l'aide d'outils appropriés, constitue une étape essentielle permettant de présenter une cartographie d'intensité du phénomène redouté. Dans cette vaste problématique, l'article traite plus spécifiquement de l'étude de l'impact d'un bloc rocheux sur un sol composé d'éboulis, dans l'objectif d'établir une loi de réflexion qui sera intégrée à terme dans un code de trajectographie. Le caractère fortement stochastique de cette loi a été clairement établi. Dans le cas d'un impact normal à la surface du sol, une première analyse a permis de montrer qu'il existait une dépendance linéaire entre la vitesse incidente et les vitesses réfléchies normale, tangentielle, et de rotation; de plus, il est apparu que le coefficient de réflexion normale suivait une distribution normale, alors que le coefficient de réflexion tangentielle était plutôt décrit par une loi Béta. Une modélisation plus réaliste de la phase de contact entre le bloc et le sol contribue, en effet, à une évaluation plus judicieuse des vitesses du bloc ainsi que de ses hauteurs de passage. Ce sont ces paramètres qui permettent de définir les stratégies de protection les plus adaptées (localisation et dimensionnement).

Mots-clés : méthode des éléments discrets, chutes de blocs, éboulis, analyse trajectographique, analyse stochastique, loi de réflexion.

Numerical modelling of rock impact on a course soil. Stochastic analysis of reflecting coefficients

Abstract

As rockfalls direct strong disasters, they stand as a major natural hazard. In order to manage this phenomenon, it is of great interest to predict as accurate as possible the trajectory of falling blocks. This allows the spatial extension of the risk to be assessed. But the modelling of the trajectory of a falling block requires to take into account the mechanical interaction that occurs between the boulder and natural obstacles, such as the ground or a forest stand. This paper deals with the analysis of the impact of a block onto a rocky ground; the purpose consists in expressing a reflecting law relating both incident and reflected velocities. Stochastic nature of the reflecting law was clearly established. In the case of an impact normal to the ground surface, simulations have shown that the relation between both incident and reflected velocities was quasi-linear; furthermore, it has appeared that the normal reflecting coefficient could be described by a Normal distribution, whereas a Beta distribution could be associated to the tangential reflecting coefficient. Designing protective structures requires to know the trajectory of the block, as well as the velocity of the block. Thus, the improving in the modelling of the contact between the block and the ground represents an actual challenge.

Key words : discrete elements methods, rockfalls, rocky ground, cinematic analysis, stochastic analysis, reflecting law.

NDLR : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 1^{er} avril 2005.

Introduction

1.1

Territoires de montagne et instabilités gravitaires

Dans les régions montagneuses, les éboulements rocheux constituent un aléa majeur tant pour les infrastructures que pour les populations environnantes et leurs habitations (Fig. 1). Il convient de noter que le terme éboulement rocheux est utilisé ici dans son acception générique; il se rapporte aux phénomènes de chutes de matériaux rocheux sans faire référence au mécanisme de déclenchement ni au volume ou intensité mis en jeu. Dans ces régions, les risques naturels revêtent une importance toute particulière. Les caractéristiques de ces régions se déclinent sous des aspects climatiques et géomorphologiques auxquels on peut associer une qualification structurale qui repose en partie sur l'histoire tectonique du massif considéré. Ces faits sont à l'origine des phénomènes gravitaires qu'il est usuel de rencontrer dans de telles régions: mouvements de terrains et instabilités nivologiques. On remarquera que les mouvements de terrain comprennent à la fois les instabilités rocheuses (chutes de blocs et éboulements), les glissements de terrain, mais aussi les coulées boueuses. On rappellera pour mémoire l'éboulement du mont Granier (Savoie, 1248), le glissement de terrain de Passy (Haute-Savoie, 1972), la survenue de laves torrentielles à Bourg-Saint-Maurice (Savoie, 1981), le sinistre de Moutier (Savoie, 1998) ou les éboulements qui ont bloqué les vacanciers à Val-d'Isère (Savoie, 1999). Les dénivelées souvent considérables des versants, associées aux volumes importants de matériaux mobilisables, confèrent aux phénomènes d'origine gravitaire une forte énergie potentielle, et donc une réelle capacité destructrice (Nicot, 1999).



FIG. 1. Chutes de blocs à Chablais (Haute-Savoie).
An example of rockfall (Chablais, Haute-Savoie).

Dans le cadre général des phénomènes d'origine gravitaire, il est d'usage de décrire ceux-ci en trois phases successives:

- une première phase d'initialisation permet de mobiliser un volume rocheux;

- une deuxième phase d'écoulement est décrite, quant à elle, par la cinématique des volumes rocheux mobilisés, en interaction avec le milieu naturel extérieur;
- enfin, une dernière phase d'arrêt correspond à la dissipation totale de l'énergie mécanique des blocs en mouvement. Il faut noter que cet arrêt peut être temporaire, sauf en pied de versant, et que le(s) bloc(s) rocheux en équilibre instable sur un versant abrupt, peuvent être susceptibles de se déplacer, ultérieurement, sous l'action d'une sollicitation extérieure.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse plus particulièrement à la seconde phase. De plus, on se restreint au cas de chutes de blocs isolés en interaction avec un sol composé d'éboulis. Il s'agit là d'un type de sols rencontré fréquemment en pied de versant, le long des couloirs empruntés préférentiellement par les blocs rocheux en mouvement.

1.2

Trajectographie des chutes de blocs : un aperçu de l'état de l'art

D'occurrence beaucoup plus élevée que celle des éboulements de grande masse et au vu des dégâts qu'ils occasionnent, la prévision de la trajectoire des blocs en mouvement, dans le cas des chutes de blocs isolés, constitue une donnée primordiale pour la prévision et la prévention du risque. En pratique, pour la simulation des trajectoires suivies par les blocs lors de leur propagation, des logiciels de trajectographie sont utilisés. En effet, une modélisation représentative de la trajectoire des blocs rocheux en interaction avec le milieu naturel complexe permet une meilleure prévision de la zone exposée au risque et par conséquent, un positionnement judicieux des ouvrages de protection.

L'objectif de l'analyse trajectographique est de déterminer, à partir de la position et des vitesses initiales d'un bloc rocheux de forme géométrique et de masse données, et en fonction de la topographie du versant et de sa nature, la trajectoire du bloc en mouvement au cours de sa propagation. Dans ce domaine, des recherches tant en modélisations numériques qu'expérimentales sont menées depuis de nombreuses années dans le but d'enrichir les connaissances nécessaires à la modélisation réaliste du comportement mécanique du contact pour la mise au point d'outils d'analyse trajectographique plus performants.

Plusieurs codes trajectographiques ont été développés ces dernières décennies. Dans de nombreux modèles numériques, le traitement de la phase de contact est mené en considérant le sol comme indéformable. En général, la topographie du versant est représentée en deux dimensions (Azimi *et al.*, 1982; Bozzolo et Pamini, 1986; Hungr et Evans, 1988). Quelques modèles sont néanmoins tri-dimensionnels (Descœudres et Zimmermann, 1987; Asté, 1996). Les trajectoires constituent les solutions calculées à l'aide d'équations mathématiques basées sur les lois de la mécanique et à partir d'hypothèses concernant la modélisation de la phase de contact. A chaque impact, la réflexion du bloc est traitée en considérant des fonctions de transfert traduisant les échanges et les pertes d'énergie lors des impacts. Introduites sous forme de paramètres définis pour chacun des modèles, elles permettent de prendre en compte l'état de surface du ver-

sant (rugosité, présence éventuelle de végétation, etc.), la nature du sol, etc. En fonction des modèles, ces paramètres de calculs sont estimés de différentes façons. Ils sont déterminés soit à partir d'expériences en laboratoire sur modèle réduit, soit à partir d'analyses en retour d'événements passés; de ce fait leur extrapolation à l'ensemble des sites n'est pas évidente et doit être utilisée avec précaution. Une modélisation plus élaborée du contact entre le bloc et le sol traite, quand à elle, le sol comme un objet déformable (Falcetta, 1985). Ce modèle prend en compte de façon explicite la pénétration du bloc dans le sol, lors de la phase de contact. Une autre approche du contact entre le bloc et le sol est initiée dans un code trajectographique tridimensionnel et multi-blocs (Dimnet, 2000). Les auteurs abordent le problème du contact à l'aide de la théorie classique du choc. Dans cette approche, le bloc rocheux et le sol sont considérés comme rigides avec des déformations localisées uniquement aux interfaces.

La forme du bloc rocheux est prise en compte de façon différente en fonction des modèles. En général, la forme réelle du bloc est rarement considérée. Il est représenté par une forme simple (contour circulaire ou polygonal). Par ailleurs, très peu de modèles prennent en compte la fragmentation éventuelle du bloc et donc la perte de masse lors de son fractionnement (Azimi *et al.*, 1982; Rochet, 1987).

L'examen de ces modèles, dans leurs diverses approches de modélisation du contact entre le bloc et le sol, témoigne de la complexité du problème. On peut souligner notamment, que la plupart des codes ne prennent pas en compte de façon explicite le comportement du sol. La phase de contact est en général traitée de façon globale, à travers des coefficients globaux qui ne prennent pas en compte les mécanismes locaux qui régissent la réflexion du bloc. Des fonctions de transfert sont généralement utilisées, dans lesquelles les paramètres de calcul tels que la nature du sol, la végétation, ou la forme du bloc, sont postulés *a priori* et déterminés *a posteriori* sur le terrain par retour d'expérience d'éboulements passés.

Il convient de noter, sur ce dernier point, que ces méthodes ont constitué un premier pas important pour le développement d'outils de simulation trajectographique des chutes de blocs rocheux. Mais, malheureusement, leur utilisation en ingénierie se heurte parfois à la nécessité de requérir une longue expérience d'utilisation, pour pouvoir estimer de façon réaliste les différents paramètres de calculs, dont en particuliers ceux relatifs à la nature du terrain.

1.3

Analyse phénoménologique

Désignons par D_b la taille caractéristique du bloc, et D_e la taille caractéristique moyenne des éléments constitutifs de l'éboulis. Si $D_b \ll D_e$, l'impact peut être assimilé à celui d'un bloc sur une dalle; ce cas de figure semble assez bien maîtrisé aujourd'hui. Si $D_b \gg D_e$, il s'agit de l'impact d'un bloc sur un milieu fin, tel un peu une boule de pétanque sur un tas de sable. De récents travaux menés à l'université polytechnique de Turin tendent à montrer que le sol peut être représenté par un milieu continu, rendant possible l'utilisation d'outils numériques classiques basés sur des approches continues. Le cas intermédiaire, pour lequel D_b et D_e sont du même ordre de grandeur, est en revanche mal docu-

menté. Dans ce cas de figure, au cours de l'impact, le bloc est en contact avec un faible nombre d'éléments. La réflexion du bloc est alors fortement gouvernée par la forme locale des objets au droit de la zone de contact (angle, arête, plan). Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à ce cas figure, en mettant en œuvre une approche discrète. Ce type d'approche permet de décrire de manière aisée la cinématique d'une collection d'objets, pouvant interagir les uns avec les autres au droit des zones de contact.

Dans le cas d'un éboulis, en raison du caractère discontinu du milieu, l'analyse du comportement post-impact du bloc est un phénomène complexe conditionné par plusieurs facteurs. D'une part, interviennent les facteurs liés au bloc tels que la vitesse de chute, l'angle d'impact, la forme, la taille ou la masse du bloc rocheux. D'autre part, les caractéristiques aussi bien mécaniques que géométriques du sol, tels que son épaisseur, la nature des matériaux rocheux le constituant, leur angle de frottement interne, leur rigidité de contact, la texture du milieu doivent être considérées.

1.4

Cadre méthodologique

Le travail présenté dans cet article vise à étudier l'interaction d'un bloc rocheux avec un éboulis, en essayant de mettre en évidence les différents mécanismes qui pilotent la réflexion du bloc, et à analyser l'influence de la variabilité spatiale des hétérogénéités locale du milieu, manifestement discret, sur les coefficients reliant les vitesses incidentes et réfléchies.

Afin de réduire le nombre de paramètres et de permettre une analyse quantitative et qualitative détaillée, l'étude numérique actuelle a été restreinte au cas de chutes verticales d'un bloc sur un milieu granulaire à surface horizontale; les dimensions de l'éboulis sont fixées de manière à éviter l'influence parasite des effets de bord sur le comportement post-impact du bloc rocheux. Cela signifie que l'on suppose l'absence de substratum au voisinage de la surface topographique.

Les résultats obtenus permettent d'une part de mieux comprendre les différents mécanismes qui régissent le phénomène de réflexion dans le cas de l'impact d'un bloc rocheux avec un sol à forte granulométrie tel qu'un éboulis de pente. D'autre part, ils fournissent des premiers éléments de réponse relatifs à la loi de réflexion qui régit l'interaction entre un bloc et un éboulis. L'élaboration d'une telle loi nous paraît essentielle pour la simulation trajectographique des chutes de blocs isolés.

L'article s'articule en trois parties. La première partie expose le cadre numérique dans lequel se situe la modélisation. Une analyse paramétrique est présentée en deuxième partie, portant sur l'influence des conditions d'impact sur le phénomène de réflexion du bloc. Au cours de cette étude, on s'attachera essentiellement à la compréhension des phénomènes physiques qui entrent en jeu lors de l'interaction d'un bloc rocheux avec un éboulis. Enfin, la troisième partie fournit des premiers éléments de réponse relatifs à la relation liant les vitesses incidentes et réfléchies dans le cas d'impacts normaux du bloc rocheux. On proposera une première modélisation de cette interaction sous la forme d'une loi de réflexion.

Cadre numérique

2.1

Code de calcul utilisé

Pour la modélisation de l'impact, des simulations numériques avec le logiciel PFC-2D ont été réalisées. Ce code met en œuvre la méthode des éléments discrets (Cundall, 1979) dans un cadre bidimensionnel. Ce logiciel est destiné à modéliser le comportement mécanique de milieux granulaires. Il utilise des éléments de forme circulaire (cylindrique ou sphérique). Ces derniers représentent les éléments constitutifs du milieu granulaire, et sont traités comme des corps rigides admettant des déformations infinitésimales localisées aux points de contact.

La limitation la plus importante liée au logiciel utilisé est liée à la forme des particules. En effet, les éléments constituant un éboulis présentent la plupart du temps des topologies angulaires, dont une représentation polyédrique (ou polygonale) paraît plus réaliste qu'une représentation sphérique (ou cylindrique). D'un point de vue mécanique, le caractère anguleux et élané des éléments constituant l'éboulis s'oppose à leur rotation, induisant ainsi un caractère déviatoire au milieu ; de même, les irrégularités de surface tendent à augmenter la résistance au glissement entre les éléments en contact. Ce dernier point, qui sera développé dans la dernière section de l'article, peut être contourné artificiellement, au moins dans le cadre d'une première approximation, par le choix d'une valeur élevée de l'angle de frottement local. A notre connaissance, il n'existe pas de logiciels commerciaux, fondés sur la méthode des éléments discrets, traitant d'objets polyédriques. De tels outils appartiennent encore au domaine de la recherche ; citons par exemple le code LMGC (Moreau, 1988). Toutefois, il convient de signaler que le caractère élané des éléments sera pris en compte, dans le cadre de développements futurs, par l'intermédiaire d'agglomérats de particules (clusters). Cette fonctionnalité, offerte par le logiciel PFC, permet de limiter artificiellement la rotation des éléments.

Par ailleurs, le traitement du contact entre les particules en contact, au sein d'un assemblage, demeure un aspect fondamental de la méthode des éléments discrets. Il est d'usage (Cundall, 1979) de distinguer deux grandes classes d'approche : les approches permettant la pénétration (ou recouvrement) des objets (*soft contact*), et les approches résolvant les équations de la mécanique en introduisant une contrainte cinématique d'impénétrabilité des objets en contact (*hard contact*). Le logiciel PFC est basé sur la première approche. Il est difficile de statuer de la validité de ces deux approches ; il s'agit là d'une question fondamentale qui reste encore très ouverte aujourd'hui, et dont la discussion dépasse le cadre de cet article. Néanmoins, il est bon de signaler que ces deux approches prennent en compte, chacune, une partie des phénomènes physiques impliqués : au cours du contact, il y a déformation des objets, sans recouvrement ; c'est cette déformation qui génère au sein de chacun d'eux un champ de contraintes, résultant en des efforts de contact à l'interface des objets. Ces efforts résultent donc de la déformation des objets, et non pas de leur caractère rigide et impénétrable ; en revanche, les efforts de contact proviennent du champ de déformation des

objets, et pas seulement de l'évolution de la distance séparant leurs centres de gravité. Par ailleurs, lorsque la rigidité des objets est importante, l'hypothèse d'objets parfaitement rigide devient pertinente pour traiter du contact et des efforts générés.

2.2

Modélisation des contacts entre éléments

Le caractère « tendre » des contacts permet l'utilisation d'un schéma de discrétisation temporelle totalement explicite. Le contact entre deux particules, dans la direction normale au plan de contact, est décrit par une loi élastique linéaire ; la force normale est proportionnelle au déplacement relatif des particules dans la direction normale :

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (1)$$

où K^n est la rigidité normale sécante du contact, F_i^n la force de contact normale, et U^n le déplacement normal.

Le contact dans la direction tangentielle est décrit par une formulation élastoplastique intégrant le critère de Mohr-Coulomb avec une cohésion nulle. La force tangentielle agissant entre les deux particules en contact est déterminée de manière incrémentale par la relation :

$$F_i^s(t + \Delta t) = \text{signe} \{ F_i^s(t) + k^s \Delta U_i^s \} \min \left\{ |F_i^s(t) + k^s \Delta U_i^s|, \mu |F_i^n(t + \Delta t)| \right\} \quad (2)$$

où F_i^s est la force de contact tangentielle, μ est le coefficient de frottement intergranulaire, k^s la rigidité tangentielle du contact et ΔU_i^s l'incrément de déplacement tangential au pas de temps Δt , défini par $\Delta U_i^s = V_i^s \Delta t$, V_i^s étant la composante tangentielle de la vitesse relative des particules au contact i .

2.3

Présentation du milieu granulaire étudié

La figure 2 illustre le milieu granulaire étudié modélisant un éboulis. Les traits noirs représentent les réseaux de forces normales. Les trois parois sont considérées fixes. Le tableau I reporte les différentes caractéristiques géométriques et mécaniques du milieu considéré.

Afin de caractériser un sol grossier, une décade est considérée entre les diamètres minimal et maximal des grains ($D_{\max}/D_{\min} = 10$).

TABLEAU I Paramètres géométriques et mécaniques.
Mechanical and geometrical parameters.

Hauteur de l'échantillon	$H = 7 \text{ m}$
Largeur de l'échantillon	$L = 17 \text{ m}$
Nombre de grains	4 500
Taille de grains	$D_{\max} = 28 \text{ cm} ; D_{\min} = 3 \text{ cm}$
Porosité du milieu	$n = 0,18$
Densité des éléments	$\rho_e = 25 \text{ kN.m}^{-3}$
Rigidité normale de contact	$k_n = 10^9 \text{ N.m}^{-1}$
Rigidité tangentielle de contact	$k_s = 10^8 \text{ N.m}^{-1}$
Angle de frottement interne local	$\phi = 30^\circ$

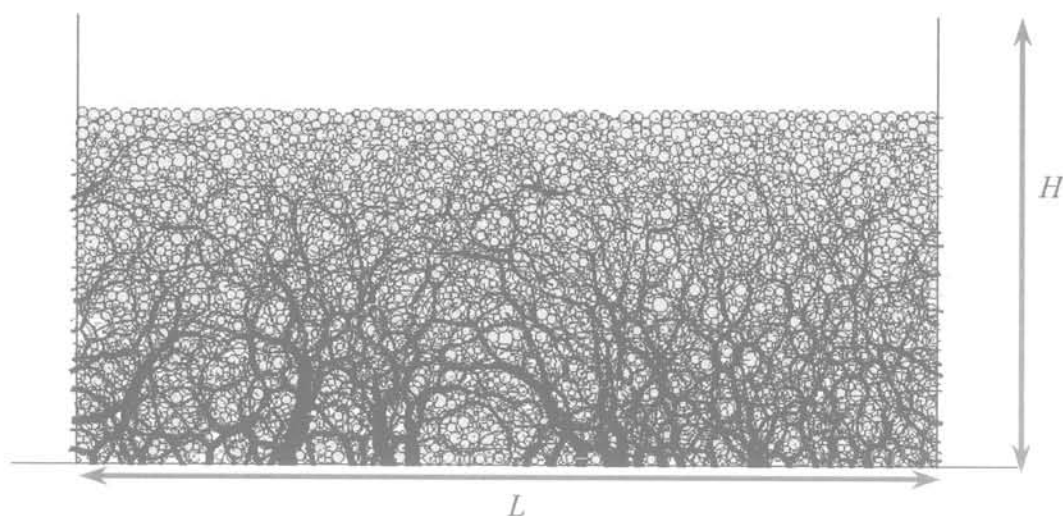


FIG. 2 Représentation de l'état initial du milieu granulaire généré.
Initial state of the analysed granuler medium.

3

Analyse locale de l'impact

Selon les conditions d'impact, lorsque le bloc entre en contact avec le sol, il subit au cours d'un laps de temps très court des variations de vitesses très importantes qui peuvent selon sa cinématique, ses caractéristiques mécaniques, géométriques ainsi que celles du terrain modifier son mode de déplacement : rebond avec trajectoire aérienne jusqu'à un prochain impact, roulement avec ou sans glissement, arrêt. Dans cette partie, l'influence capitale de la microstructure du milieu, de même que la configuration géométrique de la surface, est examinée.

3.1

Influence de la microstructure

La microstructure est définie par l'arrangement géométrique des grains. Cet arrangement peut être décrit, en première approximation, par la distribution granulométrique des grains et la compacité du milieu. La microstructure est une propriété locale du matériau, qui est susceptible de varier d'un point à un autre. Par conséquent, afin d'évaluer l'influence de celle-ci, une campagne de simulations d'impacts en différents points a été menée. La variabilité texturale du matériau a permis d'avoir une évolution de la microstructure sur

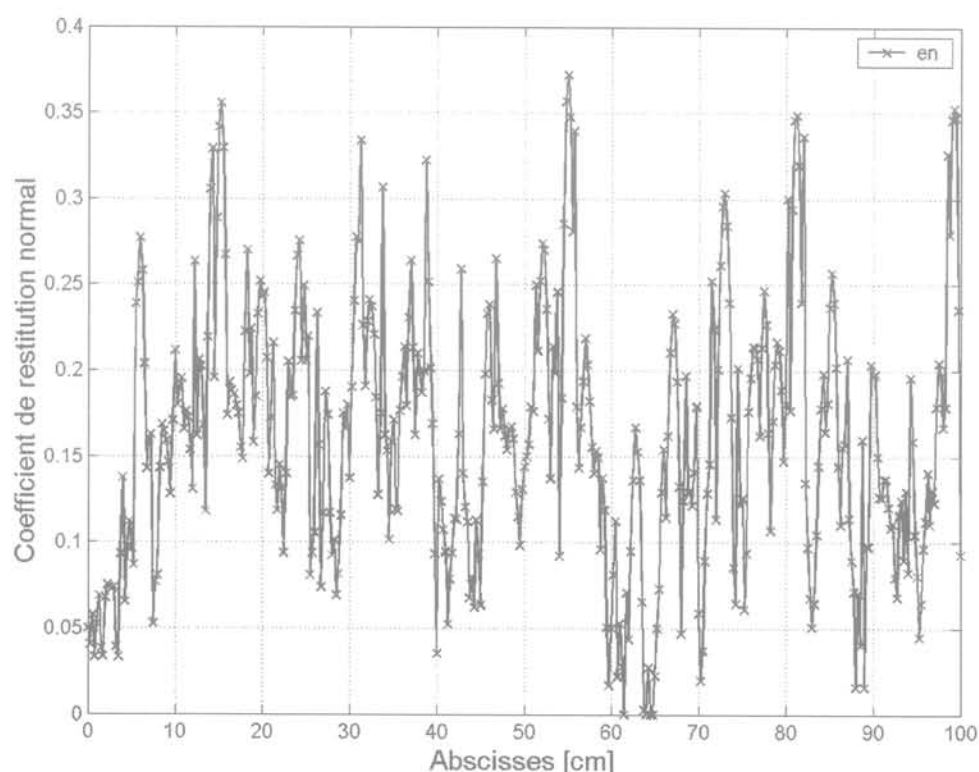


FIG. 3 Évolution du coefficient de réflexion normale (e_n) en fonction du point d'impact.
Change of the normal reflecting coefficient (e_n) in terms of the location of the impact point.

la longueur d'échantillonnage. Afin d'évaluer l'influence de ces caractéristiques sur les coefficients de réflexion, des simulations d'impacts normaux à la surface de l'éboulis en différents points de celui-ci ont été réalisées avec une vitesse incidente du bloc de 30 m/s et une masse de 100 kg (ce qui correspond à un bloc de 47 cm de diamètre, et de 2 700 kg/m³ de masse volumique). Les divers impacts ont porté sur une longueur d'échantillonnage L_e de 10 m centrée sur la longueur de l'échantillon. Le pas d'échantillonnage λ_e est pris égal à 0,025 m, soit de l'ordre de la taille du plus petit grain du milieu. On définit l'abscisse x_i de la position du point d'impact 'i' par la relation $x_i = i\lambda_e$; x_i varie entre $x_0 = 0$ et $x_N = L_e$. Dans la suite de l'article, on définit le coefficient de réflexion normale (e_n) comme le rapport entre la vitesse réfléchie normale et la vitesse incidente. La figure 3 représente l'évolution, sur la longueur d'étude considérée, du coefficient de réflexion normale (e_n) en fonction de la position du point d'impact. Le graphique met en évidence une très forte variabilité du coefficient de réflexion normale, qui varie entre 0 et 0,372. Cette dispersion exhibe l'influence des hétérogénéités locales du milieu granulaire.

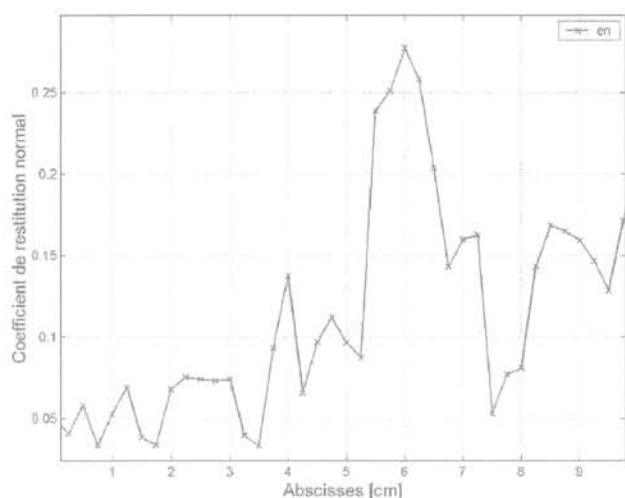


FIG. 4 Variabilité locale du coefficient de réflexion normale.
Local variability of the normal reflecting coefficient.

La figure 4 correspond à un agrandissement de la courbe précédente dans la zone comprise entre les points d'abscisse $x_0 = 0$ cm et $x_i = 10$ cm. Le graphique met en évidence une variation locale relativement importante du coefficient de réflexion normale entre deux points d'impact successifs, comme par exemple entre les deux points d'abscisses 5,25 et 5,50 cm. Les figures 7 et 8 illustrent respectivement les deux points d'impact correspondants. L'étude au voisinage de la zone d'impact montre qu'à l'abscisse 5,25 cm, le bloc sollicite une zone locale de faible compacité (Fig. 5a), plus lâche et donc plus dissipative; au contraire, à l'abscisse 5,50 cm (Fig. 5b), le bloc sollicite une famille de grains fortement chargés, peu dissipative, pouvant transmettre des efforts.

Ces résultats permettent de retrouver un comportement relativement bien connu, lié au fait qu'on peut considérer que le milieu granulaire est constitué de deux phases (Fig. 6): l'une d'entre elles est formée par les grains fortement chargés, organisés en un réseau de chaînes de forces capables de transmettre des efforts de cisaillement (population peu dissipative), tandis que la population des grains faiblement chargés, « spectateurs », est comparable à un fluide (Radjai, 1996). De ce fait, lorsque le bloc rocheux impacte une famille dense de grains, la dissipation d'énergie est relativement faible.

Ces premiers résultats soulignent l'influence de la texture du milieu granulaire, c'est-à-dire l'arrangement spatial des grains, sur les coefficients de réflexion.

3.2

Influence de la topographie de surface de l'éboulis

La topographie de surface d'un sol composé d'éboulis est rarement plane, elle présente des irrégularités de surface dont la dimension est liée à la distribution granulométrique du sol. Comme les dimensions du bloc impactant et des éléments de l'éboulis ont été choisis du même ordre de grandeur, la réflexion du bloc dépend fortement de l'orientation du plan tangentiel de contact par rapport à la direction verticale. Lors de l'impact, en fonction de l'orientation du plan de contact, des transferts d'énergie sont susceptibles d'intervenir, générant un couplage entre les composantes des vitesses de translation et les vitesses de rotation.

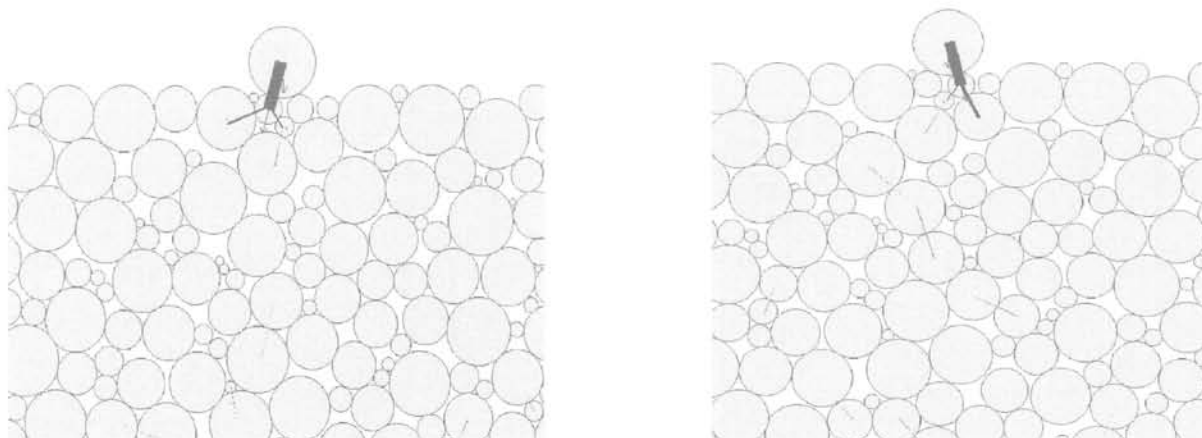


FIG. 5 Influence de la texture locale. a) abscisse 5,25 cm; b) abscisse 5,50 cm.
Influence of the local fabric. a) abscissa 5.25 cm; b) abscissa 5.50 cm.

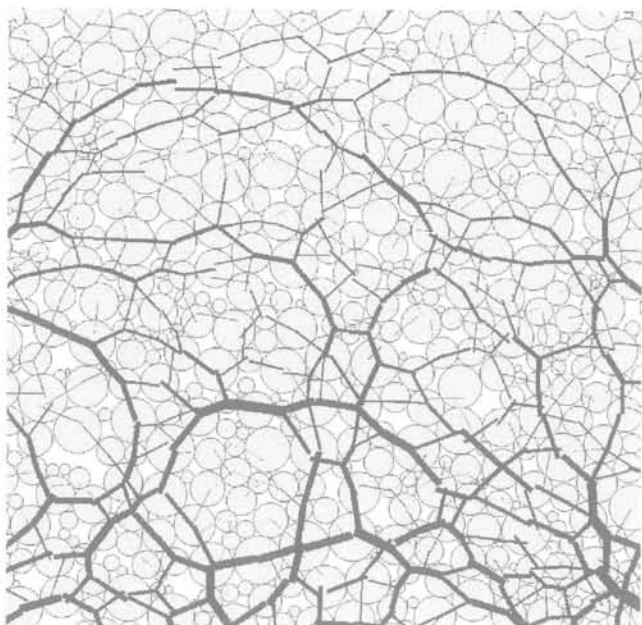


FIG. 6 Distribution des réseaux de forces normales dans un milieu granulaire.
Patterns of normal force chains within a granular medium.

Afin d'illustrer ceci, l'influence de l'orientation du plan de contact a été examinée sur un cas simple, en faisant varier celle-ci entre les deux positions indiquées sur le figure 7.

Le figure 8 reporte l'évolution des énergies restituées normale E_n^r , tangentielle E_t^r et de rotation E_ω^r , en fonction de l'inclinaison de plan de contact. On observe les deux tendance suivantes :

- l'énergie cinétique réfléchie totale du bloc augmente avec l'inclinaison du plan de contact. Elle s'élève à 3 % de l'énergie incidente lorsque le plan est normal à la direction d'impact, et atteint 23 % de l'énergie incidente lorsque l'obliquité du plan est de 45 degrés. Des valeurs plus importantes d'inclinaison n'ont pas été examinées ;
- la part des énergies de translation tangentielle et de rotation dans l'énergie réfléchie totale augmente avec l'inclinaison du plan de contact.

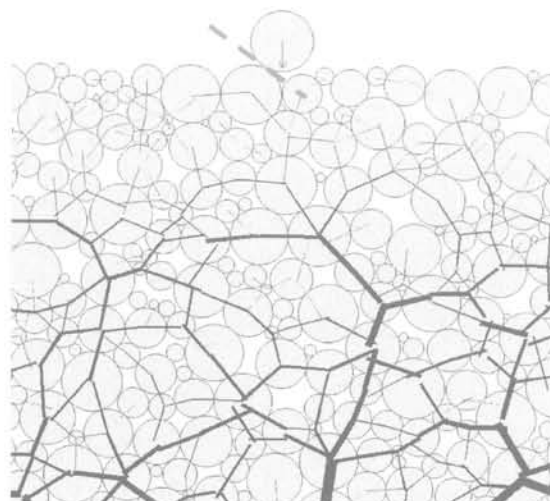
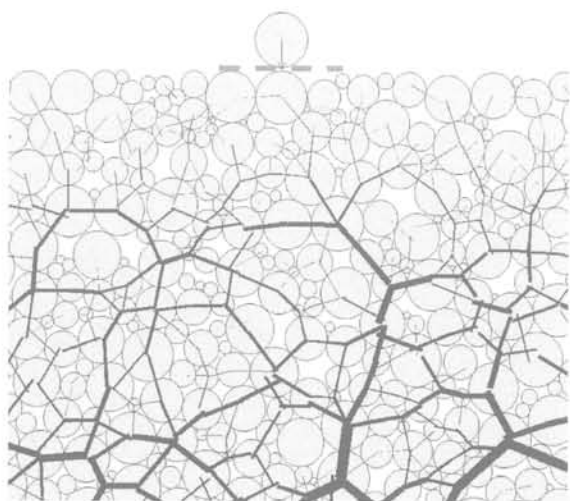


FIG. 7 Influence de l'orientation du plan de contact.
Influence of the orientation of the contact plane.

En conclusion, on peut donc observer que la topographie de surface de l'éboulis joue un rôle important sur les phénomènes de transfert d'énergie. Lorsque le plan de contact est normal à la direction incidente du bloc, la direction de réflexion du bloc reste voisine de la direction incidente. La restitution d'énergie est alors d'autant plus élevée que la compacité du milieu est localement importante au voisinage de la zone d'impact. En revanche, lorsque le plan de contact est incliné par rapport à la direction incidente du bloc, l'énergie cinétique totale restituée par le bloc est dans ce cas plus importante, mais la part d'énergie liée aux vitesses réfléchies tangentielle et de rotation augmente.

4

Loi de réflexion

4.1

Formulation du problème

L'interaction entre un bloc et le sol est un problème de nature dynamique dont la réponse peut être caractérisée par une relation du type :

$$Y = f(X) \quad (3)$$

où X est les processus d'excitation, Y le processus de réponse, et f la fonction d'état qui traduit le comportement mécanique du problème considéré, de nature aléatoire ou déterministe. Dans le cas présent, X et Y représentent respectivement les vitesses incidente et réfléchie du bloc ; la fonction f dépend des différentes caractéristiques mécaniques et géométriques du système « bloc - éboulis ».

L'expression 3 peut être formulée de la manière suivante :

$$v_n^r = \tilde{f}_n(v_n^i, v_t^i, \omega_i) \quad (4a)$$

$$v_t^r = \tilde{f}_t(v_n^i, v_t^i, \omega_i) \quad (4b)$$

$$\omega^r = \tilde{f}_\omega(v_n^i, v_t^i, \omega_i) \quad (4c)$$

où v_n^i , v_t^i et ω_i désignent les vitesses incidentes normale, tangentielle et de rotation, et v_n^r , v_t^r et ω^r les vitesses réfléchies normale, tangentielle et de rotation (Fig. 9).

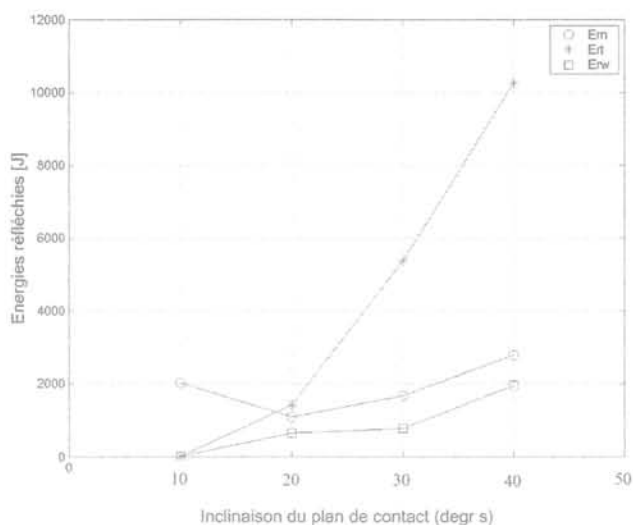


FIG. 8 Évolution des énergies restituées en fonction de l'orientation du pan de contact.
Evolution of the restored energy parts as a function of the orientation of the contact plane.

On cherche à établir une relation liant les vitesses incidentes et réfléchies au point d'impact. Cela conduit à proposer une estimation des opérateurs $\tilde{F}_n$, $\tilde{F}_t$ et $\tilde{F}_\omega$. En admettant que ces opérateurs soient suffisamment réguliers, ils peuvent être développés en séries entières, de telle sorte que l'on puisse écrire :

$$v_n^r = \sum_{(j,k,l)=1}^{\infty} a_{jkl} (v_n^i)^j (v_t^i)^k (\omega^i)^l \quad (5a)$$

$$v_t^r = \sum_{(j,k,l)=1}^{\infty} b_{jkl} (v_n^i)^j (v_t^i)^k (\omega^i)^l \quad (5b)$$

$$\omega^r = \sum_{(j,k,l)=1}^{\infty} c_{jkl} (v_n^i)^j (v_t^i)^k (\omega^i)^l \quad (5c)$$

Tout revient donc à déterminer les coefficients a_{jkl} , b_{jkl} et c_{jkl} . La nature très irrégulière du phénomène étudié, clairement mis en évidence dans les sections précédentes, ne permet pas de rechercher une expression analytique pour ces coefficients. Il s'agira par conséquent de décrire le caractère stochastique de ces coefficients, en recherchant à leur associer une densité de probabilité.

4.2

Cas d'un impact normal

4.2.1

Forme du développement

Dans le cadre d'une première approche, seul le cas où la composante incidente v_n^i est non nulle a été considéré, de sorte que le développement précédent devient :

$$v_n^r = \sum_{j=1}^{\infty} a_{j00} (v_n^i)^j \quad (6a)$$

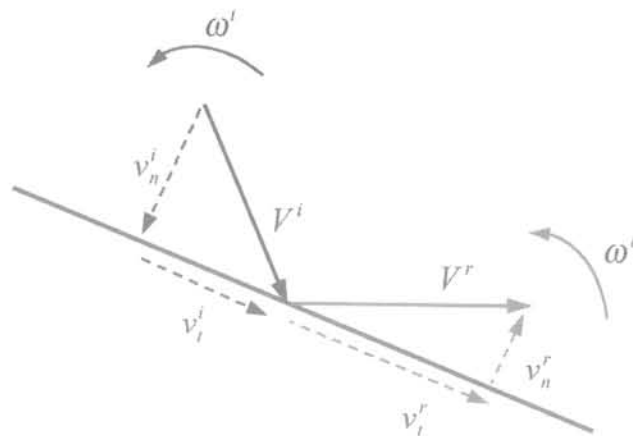


FIG. 9 Décomposition des vitesses incidente et réfléchie.
Decomposition of both incident and reflected velocities.

$$v_t^r = \sum_{j=1}^{\infty} b_{j00} (v_n^i)^j \quad (6b)$$

$$\omega^r = \sum_{j=1}^{\infty} c_{j00} (v_n^i)^j \quad (6c)$$

L'objet des simulations a été de montrer que les développements des opérateurs $\tilde{F}_n$, $\tilde{F}_t$ et $\tilde{F}_\omega$ pouvaient être limités à un ordre n , puis de déterminer les coefficients a_{j00} , b_{j00} et c_{j00} pour $j = 1, \dots, n$. Dans cette perspective, des simulations impliquant des vitesses normales variant de 0,5 à 10 m.s⁻¹, ont été réalisées en deux points d'impact de la surface de l'éboulis (Figs. 10 et 11). Au cours de ces simulations, dont les paramètres sont consignés dans le tableau I, le pas de variation de la vitesse incidente normale a été fixé à 0,5 m.s⁻¹ ; la masse du bloc a été choisie égale à 100 kg. Les courbes représentant l'évolution des vitesses réfléchies normale, tangentielle et de rotation en fonction des vitesses incidentes normales, exhibent une allure quasi linéaire. Par conséquent, il semble légitime de considérer que le développement des opérateurs $\tilde{F}_n$, $\tilde{F}_t$ et $\tilde{F}_\omega$ puisse être limité au premier ordre, de telle sorte que les équations 6a, 6b et 6c deviennent :

$$v_n^r = a_{100} v_n^i \quad (7a)$$

$$v_t^r = b_{100} v_n^i \quad (7b)$$

$$\omega^r = c_{100} v_n^i \quad (7c)$$

Un commentaire mérite d'être apporté. Le caractère linéaire du développement ne peut être généralisé au cas d'un impact quelconque, non traité dans cet article, pour lequel les vitesses initiales tangentielle (v_t^i) et de rotation (ω^i) ne seraient pas nulles. Par conséquent, la notion de développement en séries entières conserve tout son sens, la dégénérescence linéaire du modèle pouvant disparaître dès lors que les termes v_t^i et ω^i sont non nuls. Les non-linéarités susceptibles d'intervenir ont essentiellement deux origines :

- une origine constitutive, liée à la nature du contact. La partie élastique de la loi de contact utilisée est linéaire ; en revanche, la partie plastique de la loi introduit de fortes non-linéarités sur la composante tangentielle des efforts de contact. On ne peut donc assimiler la loi de contact à un modèle purement linéaire ; toutefois, des simulations complémentaires sont envisagées

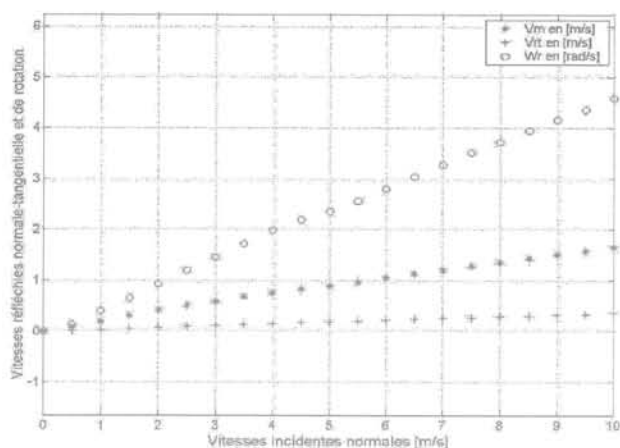


FIG. 10 Évolution des vitesses réfléchies en fonction de la vitesse incidente normale.
Evolution of reflected velocities in terms of the normal incident velocity.

afin d'examiner l'influence de non-linéarités élastiques, normale et tangentielle. Dans ce cadre, la loi non linéaire de Hertz-Mindlin (Mindlin, 1953) sera mise en œuvre ;

– une origine géométrique, liée à l'assemblage des particules ; la texture même du milieu induit des non-linéarités au niveau de la loi de réflexion.

En conclusion, on peut penser que le caractère linéaire de la loi de réflexion ne provient pas strictement de la linéarité de la partie élastique de la loi de contact, d'autres sources de non-linéarités étant potentiellement activables. Ce point devra faire l'objet d'investigations complémentaires, à partir du modèle non-linéaire de Hertz-Mindlin.

4.2.2

Analyse stochastique des coefficients de réflexion

Stratégie de modélisation

Il a été établi, au moins dans le cas d'un impact normal, qu'il existait une dépendance linéaire entre les vitesses incidentes et réfléchies. En revanche, les coefficients a_{100} , b_{100} et c_{100} intervenant dans les relations linéaires 7a, 7b et 7c, présentent une forte sensibilité vis-à-vis de la position du point d'impact. Par conséquent, il est pertinent de rechercher à associer à ces coefficients une loi de probabilité, traduisant le caractère stochastique du phénomène d'impact d'un bloc sur un éboulis. Dans cette perspective, il a été simulé une série d'impacts portant sur une longueur d'échantillonnage L_e de 10 mètres. Le pas d'échantillonnage λ_e a été choisi égal à 0,025 mètres. Comme précédemment, l'abscisse x_i de la position du point d'impact ' i ' a été définie par la relation $x_i = i \lambda_e$; x_i varie entre $x_i = 0$ et $x_N = L_e$. A chaque position d'impact x_i sont associées des valeurs α_i , β_i et λ_i des coefficients a_{100} , b_{100} et c_{100} . Il est alors possible de définir la probabilité $P_a(\alpha)$ pour que a_{100} soit compris entre α et $\alpha + \Delta\alpha$. La même démarche s'applique bien sûr pour les deux autres coefficients b_{100} et c_{100} . Toutefois, dans ce qui suit, seuls les coefficients a_{100} et b_{100} sont examinés.

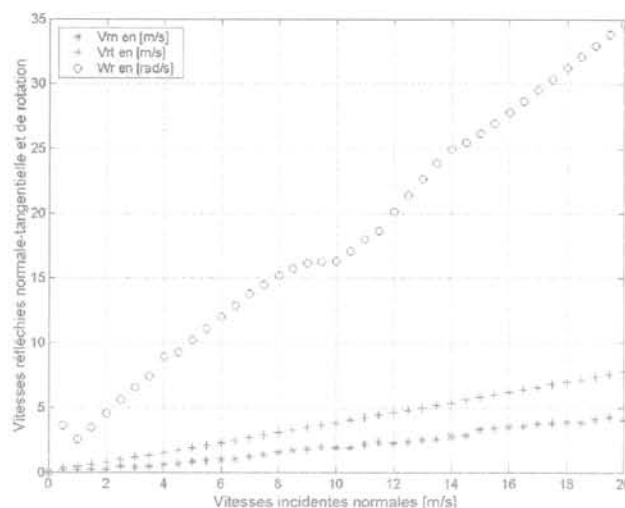


FIG. 11 Évolution des vitesses réfléchies en fonction de la vitesse incidente normale.
Evolution of reflected velocities in terms of the normal incident velocity.

Lois de distribution des coefficients de réflexion normale et tangentielle

Les paramètres numériques utilisés au cours des simulations sont ceux définis dans le tableau 1. Les distributions représentées sur les figures 12 et 13 montrent, d'une part, que la distribution du coefficient obéit à une loi Normale, avec une moyenne $\bar{a}_{100}$ de 0,161 et un écart type $e(a_{100})$ de 0,077, et d'autre part que la distribution du coefficient b_{100} obéit à une loi Bêta, avec une moyenne $\bar{b}_{100}$ de 0,142 et un écart type $e(b_{100})$ de 0,052. On peut également noter une tendance bimodale pour la distribution du coefficient de réflexion normale.

Influence de la microstructure sur les coefficients de réflexion

Pour étudier l'influence de la microstructure du milieu sur les lois de distribution ainsi obtenues, deux nouveaux milieux granulaires ont été générés (milieux 2 et 3). Ces derniers présentent les mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques que le milieu investigué précédemment (milieu 1), et en particulier une même compacité moyenne ; ils se distinguent simplement par un arrangement spatial différent des grains. Le choix de milieux granulaires de même compacité ne nous paraît pas restrictif, dans la mesure où les éboulis observés sur le terrain présentent des valeurs de compacité très voisines. Les simulations d'impact ont été effectuées avec les paramètres indiqués dans le tableau I. Il convient de préciser que la préparation des

TABLEAU II Synthèse des éléments statistiques relatifs à a_{100} et b_{100} .
A synthesis of statistic results for both a_{100} and b_{100} .

	Milieu 1	Milieu 2	Milieu 3
Moyenne $\bar{a}_{100}$	0,161	0,146	0,175
Écart type $e(a_{100})$	0,077	0,076	0,071
Moyenne $\bar{b}_{100}$	0,143	0,159	0,137
Écart type $e(b_{100})$	0,052	0,057	0,053

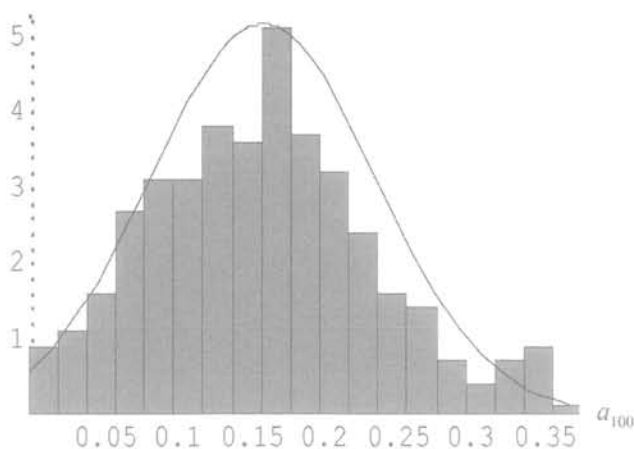


FIG. 12 Loi de distribution du coefficient a_{100} .
Distribution law for coefficient a_{100} .

milieux granulaires a été menée de telle sorte que la structure de la partie superficielle de chacun d'eux, d'une épaisseur de l'ordre d'un mètre, soit modifiée : des arrangements géométriques différents ont été générés. Il ne nous a pas semblé pertinent de décrire la structure à l'aide de représentations globales telles que l'histogramme polaire des directions de contacts ; celui-ci permet en effet de décrire, en moyenne seulement, l'anisotropie de structure. La réflexion du bloc est gouvernée par des phénomènes beaucoup plus locaux qui échappent à une statistique trop large.

L'analyse des distributions des coefficients a_{100} et b_{100} révèle que celles-ci obéissent bien respectivement à une loi Normale et à une loi Bêta. Le tableau II récapitule les résultats obtenus pour les coefficients a_{100} et b_{100} avec les trois échantillons considérés. Il ressort de cette première analyse que les lois de distribution qui peuvent être associées aux coefficients a_{100} et b_{100} sont faiblement sensibles à la microstructure du milieu ; un écart relatif inférieur à 10 % autour de la valeur moyenne est enregistré pour a_{100} et b_{100} . Il s'agit d'un résultat important, car il tend à établir que la forme et les paramètres des distributions obtenues pour ces coefficients possèdent un caractère intrinsèque. Des travaux complémentaires sont en cours pour confirmer ce résultat.

CONCLUSION

Influence de la forme des grains

La forme circulaire des grains favorise au cours des simulations la rotation de ces derniers. Il a été évoqué que ce degré de liberté cinématique est d'autant plus mobilisé lorsque l'impact sollicite une famille de grains faiblement chargés. Or, dans la plupart des éboulis, les matériaux rocheux présentent une géométrie plutôt irrégulière. La mobilisation des rotations, dans ce cas, est beaucoup plus difficile. Dans le cadre de la modélisation proposée, une manière possible de prendre en compte la morphologie irrégulière des grains, consiste à bloquer la rotation de ces derniers. Afin d'estimer l'influence de cette contrainte cinématique, une campagne de simulations, portant sur le milieu 1, et reprenant les paramètres consignés dans le tableau I, a été réalisée en bloquant alors la rotation des grains. Les résultats obtenus fournissent à nouveau une loi de distribution Normale pour le coefficient a_{100} et une loi de distribution Bêta pour le coefficient b_{100} . On observe

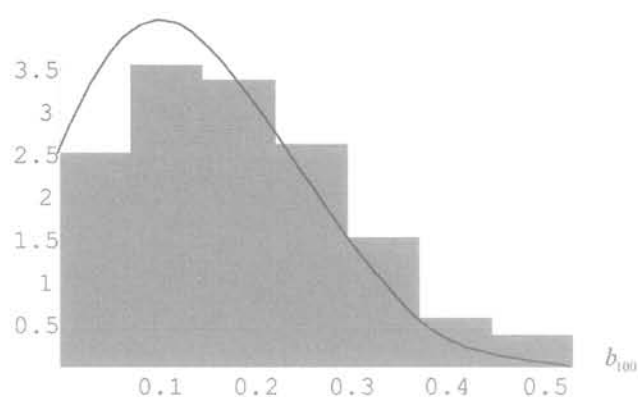


FIG. 13 Loi de distribution du coefficient b_{100} .
Distribution law for coefficient b_{100} .

que la valeur moyenne $\bar{a}_{100}$ est égale à 0,181, et la valeur moyenne $\bar{b}_{100}$ égale à 0,164. Ces valeurs sont donc légèrement supérieures aux valeurs obtenues en laissant les rotations libres. Il s'agit là d'un résultat tout à fait cohérent. En effet, dans un assemblage granulaire, trois modes de déplacement relatif des grains en contact peuvent s'observer : le glissement, le roulement et le contact frontal (régime collisionnel). Les deux premiers modes sont très dissipatifs et ne permettent pas de diffuser au sein du milieu des réseaux de forces importantes. Au contraire, le dernier mode est peu dissipatif, et est à l'origine de la génération de réseaux de forces. Le fait de bloquer les rotations supprime donc une source de dissipation d'énergie, et induit donc une augmentation de la part relative du mode de contact frontal. Cela conduit à des valeurs moyennes des coefficients de réflexion sensiblement plus élevées.

Il importe de souligner que ce sont là des premiers éléments qui devront être consolidés par des simulations complémentaires. Néanmoins, en première approximation, on peut penser que le blocage des rotations constitue un artifice cinématique permettant de prendre en compte de manière globale la forme irrégulière des éléments rocheux.

5

Conclusion

Cet article a porté sur la modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un éboulis composé d'éléments dont la taille moyenne est voisine des celle du bloc. Les relations macroscopiques reliant les vitesses incidente et réfléchie du bloc au point d'impact ont été approchées à partir d'une investigation locale prenant en compte la microstructure du milieu. Dans le cadre d'une première approche, considérant un sol horizontal sollicité par un impact normal, il a été établi qu'il existait une relation linéaire entre la vitesse incidente normale, et les vitesses réfléchies normale, tangentielle et de rotation. Par ailleurs, les simulations réalisées ont également révélé que les coefficients de réflexion intervenant dans ces relations linéaires étaient fortement sensibles à la position du point d'impact, c'est-à-dire à la texture locale du milieu au droit de l'impact, de même qu'aux variations locales de la topographie de surface de l'éboulis. Cette propriété a justifié l'intro-

duction d'une approche stochastique pour décrire ces coefficients de réflexion. Cette approche a fourni des premiers éléments permettant de penser que, sous impact normal, le coefficient de réflexion normale peut être décrit par une loi de distribution Normale, et le coefficient de réflexion tangentielle par une loi de distribution Bêta. Il semble de plus que les éléments caractéristiques de ces lois soient peu sensibles à l'arrangement spatial des éléments constituant le sol.

Ce sont bien sûr là des premiers éléments, qui exigent pour être confirmés, des simulations complémentaires; en particulier, l'influence de la compacité moyenne du milieu et de la distribution granulométrique de l'assemblage granulaire n'a pas été examinée.

Par ailleurs, l'extension au cas d'impacts non normaux, avec une vitesse de rotation incidente, devra être envisagée.

Néanmoins, ce type d'approche semble fructueux, en permettant par changement d'échelles, d'évaluer les relations gouvernant les vitesses incidentes et réfléchies en intégrant les mécanismes locaux pilotés par la microstructure du milieu. Il s'agit là d'une avancée importante, établissant par ailleurs qu'il est nécessaire de traiter ces relations dans un cadre stochastique. C'est un résultat tout à fait fondamental, signifiant que la trajectographie des chutes de blocs, au moins dans le cas de sols constitués d'éboulis, ne peut être traitée dans un cadre déterministe.

Bibliographie

- Asté J.-P., Asté T., Badjin N. – 3D.BLOC, photogrammetry, block theory and cliff equilibrium, some recent development. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, vol. 1, Balkema, Trondheim, 1996, p. 605-610.
- Azimi C., Desvareux P., Giraud A., Martin-Cochet J., Rochet L. – Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs, application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors). *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 122, 1982, p. 93-102.
- Bozzolo D., Pamini R., Hutter K. – Chutes de pierres, un modèle mathématique et sa vérification avec des données réelles. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, vol. 1, Balkema, Rotterdam, 1988, p. 555-560.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. – A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, n° 29, 1979, p. 47-65.
- Descoeudres F., Zimmermann T.H. – Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. *Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics*, Lausanne, 1987, p. 337-342.
- Dimnet E., Fremont M. – Instantaneous collisions of solids. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, 2000, p. 11-17.
- Falcetta J.-L. – Étude cinématique et dynamique de chutes de blocs rocheux. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1985.
- Hungr O., Evans S.G. – Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, vol. 1, Balkema, Rotterdam, 1988, p. 685-690.
- Mindlin R.D., Deresiewicz H. – Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 20, 1953, p. 327-344.
- Moreau J. – Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics. *CISM Courses and Lectures*, n° 302, Springer-Verlag, New York, 1988, p. 1-82.
- Nicot F. – Étude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux. Thèse de doctorat, École centrale de Lyon, 1999.
- PFC2D. – *User's Manual*. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA, 1999.
- Radjai F., Jean M., Moreau J.-J., Roux S. – Force distribution in dense two-dimensional granular system. *Physical Review Letters*, n° 77, 1996, p. 274-277.
- Rochet L. – Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 151, 1987, p. 84-95.