

Pôle Grenoblois Risques Naturels



Plus proche de vous !

Programme de recherche 2007

Financé par le Conseil Général de l'Isère

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'IMPACT D'UN BLOC ROCHEUX SUR UN TERRAIN NATUREL

F. Bourrier (1)

S. Lambert (1)

F. Nicot (1)

F. Darve (2)

(1) Cemagref Grenoble, Unité ETNA, BP 76 – 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France,

(2) Laboratoire Sols Solides Structures – Risque, INPG-UJF-CNRS, BP 53 – 38041 Grenoble Cedex 9, France



1. INTRODUCTION	1
1.1. CONTEXTE GENERAL	1
1.2. BASE DE TRAVAIL	2
1.2.1. <i>Modélisation numérique de l'impact par la Méthode des Eléments Discrets</i>	2
1.2.2. <i>Loi stochastique d'impact</i>	3
1.3. OBJECTIFS	4
2. ESSAIS A ECHELLE REDUITE D'IMPACT D'UN BLOC SUR UN SOL GROSSIER	5
2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	5
2.2. CARACTERISATION DU MILIEU IMPACTE	6
2.2.1. <i>Densité des pierres constitutives</i>	6
2.2.2. <i>Angularité et élançement des pierres constitutives</i>	7
2.2.3. <i>Courbe granulométrique</i>	9
2.2.4. <i>Porosité</i>	10
2.3. MESURE DE LA CINEMATIQUE DE L'IMPACTANT	13
2.3.1. <i>Etalonnage de la taille des images</i>	13
2.3.2. <i>Traitement des images issues des films à la caméra rapide</i>	14
2.3.3. <i>Traitement des images issues des films à la caméra vidéo</i>	15
2.3.4. <i>Détermination des vitesses incidentes et réfléchies de l'impactant</i>	16
2.3.5. <i>Erreurs de mesure</i>	19
3. RESULTATS D'ESSAIS	20
3.1. DETERMINATION DU NOMBRE MINIMAL D'ESSAIS A REALISER.....	20
3.2. CINEMATIQUE REFLECHIE DE L'IMPACTANT	21
3.3. PROPAGATION DE L'ENERGIE DANS UN MATERIAU GRANULAIRE GROSSIER.....	10
4. CALIBRATION DU MODELE NUMERIQUE D'IMPACT	22
4.1. SIMULATIONS A ECHELLE REDUITE	22
4.2. SIMULATIONS EN GRANDEUR REELLE	24
4.2.1. <i>Modélisation numérique en grandeur réelle</i>	24
4.2.2. <i>Comparaison des prédictions du modèle en grandeur réelle avec les résultats expérimentaux</i>	25
4.2.3. <i>Possibilités de généralisation</i>	26
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	28
6. REFERENCES	29

1. Introduction

1.1. Contexte général

Dans les régions montagneuses, les risques naturels associés aux mouvements gravitaires revêtent une importance toute particulière. En particulier, les chutes de blocs rocheux constituent, malgré leur relativement faible intensité, un risque majeur en raison de leur probabilité d'occurrence très élevée. Comme tout phénomène d'origine gravitaire, la chute de blocs peut être décomposée en trois phases successives : le détachement de la falaise, la chute en interaction avec le milieu naturel et l'arrêt sur le sol ou sur une structure de protection. De même que la détermination des conditions de détachement et d'arrêt des blocs sont des éléments importants pour la caractérisation du risque de chute de blocs, la caractérisation de la trajectoire des blocs est cruciale pour la prévention de ce risque.

En pratique, la simulation des trajectoires suivies par les blocs est menée à l'aide de logiciels de trajectographie. La trajectoire de chaque bloc est, dans la plupart des cas, décrite dans ces logiciels comme une succession de phases de vol et d'impacts sur le sol. La modélisation de la phase de vol n'oppose aucun verrou scientifique ; par contre, celle de la phase d'impact mérite d'être approfondie.

La modélisation de l'impact est généralement faite à travers l'introduction de coefficients de restitution reliant les paramètres cinématiques du bloc avant et après impact. Les valeurs de ces coefficients sont soit calibrées à partir de données expérimentales, soit évaluées par retour d'expérience, soit calculées à partir de modélisations mécaniques trop simplifiées pour retranscrire de façon satisfaisante la complexité des mécanismes en jeu. Par ailleurs, la variabilité des vitesses du bloc après impact due à la forte variabilité des propriétés du sol au voisinage du point d'impact est généralement prise en compte de manière très simplifiée en faisant varier de façon aléatoire, selon une distribution choisie par l'utilisateur, les paramètres de la loi d'impact.

Par conséquent, la modélisation de l'impact, et de la variabilité qui lui est associée, dans les logiciels d'analyse trajectographique n'est actuellement pas satisfaisante (Laouafa et Nicot, 2003). Le but de ce travail de recherche est donc d'étudier localement l'impact entre le bloc et le milieu naturel dans la perspective de développer une nouvelle loi d'impact intégrable au sein des logiciels de trajectographie existants. Cette loi doit permettre à la fois d'apporter une amélioration significative de la modélisation mécanique de l'impact et d'intégrer de façon représentative la variabilité du rebond du bloc.

L'approche privilégiée dans ce travail consiste à développer une loi stochastique d'impact suite à l'analyse statistique de résultats de simulations. Ces résultats de simulations sont obtenus par la modélisation numérique par la méthode des éléments discrets de l'impact d'un bloc sur un sol naturel. Cette approche est développée afin de pallier aux problèmes de contrôle des conditions expérimentales et de représentativité des jeux de données rencontrés lors de l'analyse de résultats d'essais expérimentaux ou d'observations d'événements passés. L'utilisation de l'outil numérique offre la possibilité de simuler un grand nombre d'impacts

dans des conditions très variées. La taille importante de la base de données obtenue assure ainsi une représentativité statistique des résultats dans l'optique d'établir une loi stochastique d'impact reliant la vitesse du bloc après impact à la vitesse du bloc avant impact.

La définition du modèle numérique de l'impact par la méthode des éléments discrets ainsi que le protocole de caractérisation d'une loi stochastique d'impact basée sur l'utilisation de résultats de simulation DEM ont été réalisés auparavant (programme PGRN 2005 : Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel – Application à la trajectographie des chutes de blocs).

Néanmoins, pour que la pertinence de la loi stochastique d'impact ainsi développée soit assurée, il semble indispensable de s'assurer de la validité de la modélisation numérique de l'impact par la méthode des éléments discrets mise en place. L'objectif principal du programme de recherche PGRN 2007 « Etude expérimentale de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel » est donc d'évaluer la validité du modèle DEM de l'impact. Pour cela, il est envisagé de mettre en œuvre une campagne d'essais à échelle réduite d'impact ; puis, de comparer les résultats expérimentaux issus de ces essais aux prédictions du modèle numérique de l'impact dans des conditions similaires.

1.2. Base de travail

1.2.1. Modélisation numérique de l'impact par la Méthode des Eléments Discrets

L'éboulis étant un milieu granulaire non cohésif, la modélisation numérique de l'impact a été développée en utilisant la Méthode des Eléments Discrets (logiciel : PFC2D – Itasca, 1999). La M.E.D. (Cundall et Strack, 1979) 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. Les interactions entre particules sont régies par une loi de contact de Hertz-Mindlin (Mindlin et Deresiewicz, 1953). Les valeurs des paramètres régissant la loi de contact sont choisies en accord avec les valeurs utilisées classiquement en mécanique des roches: le module de cisaillement est de $40GPa$ et le coefficient de Poisson est fixé à 0,25. De plus, l'angle de frottement local est pris égal à 30° en accord avec les valeurs classiquement utilisées en géomécanique.

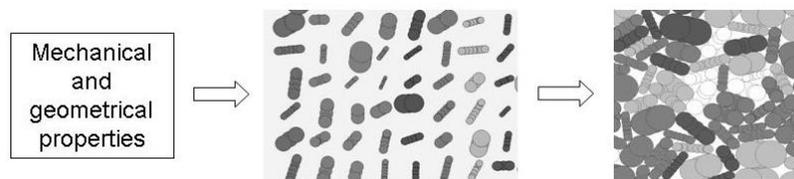


Figure 1. Génération d'un échantillon numérique de sol.

Les caractéristiques de l'échantillon numérique de sol généré ainsi que le protocole de génération de l'échantillon (Figure 1) sont exposés de façon détaillée dans Bourrier et al. (2008a ; 2008c). Il est cependant important de noter que le diamètre moyen des particules du milieu est de l'ordre du rayon R_b du bloc. Par ailleurs, pour tenir compte de la poly-dispersité

des éboulis naturels, la répartition volumique des particules suit une loi Normale centrée sur la valeur moyenne définie précédemment et bornée de façon à ce que le rapport entre le volume de la plus grosse particule et celui de la plus petite soit de 10. Enfin, deux types d'échantillons numériques composés soit de particules sphériques soit de particules « clumps » (agglomérats insécables de particules sphériques - Figure 1) sont utilisés de façon à étudier l'influence de la forme des particules.

1.2.2. Loi stochastique d'impact

Une fois le protocole de simulation établi, une campagne de simulation est menée dans l'optique de définir une loi stochastique d'impact. Lors de la simulation, les caractéristiques de l'échantillon de sol et du bloc sont donc tout d'abord fixées. Puis, plusieurs points d'impact sont choisis. Les conditions cinématiques incidentes sont ensuite définies par la norme de la vitesse incidente V^{in} , l'angle d'incidence α^{in} et la vitesse de rotation incidente ω^{in} (Figure 2). Pour tous les points d'impact choisis préalablement, toutes les combinaisons des valeurs des paramètres cinématiques incidents choisies (Tableau 1) sont explorées.

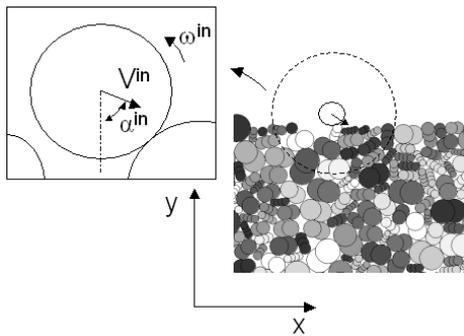


Figure 2. Conditions cinématiques incidentes du bloc.

Paramètres incidents	Valeurs explorées
$V^{in} (m/s)$	5; 10; 15; 20; 25
$\alpha^{in} (deg)$	0; 15; 30; 45; 60; 75
$\omega^{in} (rad/s)$	-6; -3; 0; 3; 6

Tableau 1 : Valeurs des paramètres cinématiques incidents explorées.

L'ensemble des résultats obtenus constitue un jeu de données. Ce jeu de données est analysé par l'intermédiaire de méthodes statistiques avancées utilisant l'inférence Bayésienne de façon à définir une loi stochastique d'impact permettant de relier les vitesses incidentes et réfléchies du bloc.

Les paramètres cinématiques du bloc sont décrits de façon exhaustive par un vecteur \mathbf{V} ayant pour composantes la vitesse du bloc v_x selon la direction tangentielle à la surface du sol, la vitesse du bloc v_y selon la direction normale à la surface du sol et la vitesse de rotation ω du bloc : $\mathbf{V} = (v_x \ v_y \ R_b \omega)^t$. Les vecteurs vitesses incidents \mathbf{V}^{in} et réfléchis \mathbf{V}^{re} du bloc sont reliés par l'intermédiaire de l'opérateur \mathbf{A} :

$$\mathbf{V}^{re} = \mathbf{A}\mathbf{V}^{in} \text{ avec } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Etant donné la grande variabilité des configurations locales du sol au voisinage du point d'impact et des conditions cinématiques incidentes du bloc, une approche statistique est nécessaire à la quantification de la variabilité associée à l'opérateur A .

La variabilité des valeurs des coefficients de l'opérateur A est traduite par une loi normale de dimension 9 totalement caractérisée par un vecteur moyen M^a et une matrice de covariance Σ^a . Les paramètres M^a et Σ^a sont déterminés en utilisant les algorithmes MCMC, basés sur l'inférence Bayésienne (Bayes, 1763), implémentés au sein du logiciel libre Winbugs® (Spiegelhalter and al., 2000).

Les résultats obtenus montrent qu'une grande part de la variabilité des résultats (plus de 75 % de la totalité de la variabilité des vitesses réfléchies) est traduite par l'intermédiaire de la variable aléatoire AV^m (Bourrier et al., 2007 ; 2008c). Par ailleurs, l'étude détaillée de la loi stochastique d'impact montre donc que le domaine de validité de cette loi couvre une large gamme de configurations. Notamment, elle permet de modéliser de façon pertinente les résultats de simulation pour des rapports entre le rayon de l'impactant et le rayon moyen des particules du sol compris entre 1 et 5.

1.3. Objectifs

L'objectif du programme de recherche PGRN 2007 « Etude expérimentale de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel » est l'évaluation de la capacité du modèle numérique de l'impact par la Méthode des Eléments Discrets développé à prédire de façon pertinente le rebond du bloc.

Une campagne expérimentale d'essais à échelle réduite d'impacts d'un bloc sur un milieu grossier composé de roches calcaires est tout d'abord menée dans l'optique de réaliser une étude comparative entre les résultats expérimentaux obtenus et les prédictions du modèle numérique. Lors de cette étude comparative, une attention particulière est apportée à la définition des paramètres du modèle numérique influant fortement sur les résultats de simulation (Bourrier et al., 2008c). Ces paramètres sont la forme des particules, la granulométrie du sol, la porosité et la dissipation d'énergie au droit des contacts.

Bien que la taille de l'impactant et la profondeur du sol aient une influence importante (Bourrier et al., 2008a ; 2008c), ces paramètres ne seront pas étudiés dans ces essais car l'objectif est de caractériser la capacité du modèle à traduire le comportement du sol au cours de l'impact. Seuls les paramètres de caractérisation du sol sont donc étudiés pour des conditions incidentes (taille de l'impactant) et des conditions aux limites (profondeur du sol) données.

Lors de ces expériences, des mesures de propagation de l'énergie dans un matériau granulaire grossier sont également réalisées de manière à fournir des éléments de réponse en relation à d'autres travaux menés par ailleurs au Cemagref. En effet, la mesure de cette propagation est un point clé de l'optimisation des merlons cellulaires constitués de matériaux grossiers (*cf.* PGRN 2004, projet sur les cellules constitutives de merlons cellulaire).

2. Essais à échelle réduite d'impact d'un bloc sur un sol grossier

2.1. Protocole expérimental

Les essais à échelle réduite (Figure 3, Figure 4) consistent en l'impact d'un objet quasi-sphérique sur un milieu grossier composé de pierres dont la taille est du même ordre de grandeur que celle de l'impactant. Cette configuration permet d'obtenir une variabilité importante des conditions locales d'impact.

Le milieu impacté est un assemblage de pierres de calcaire déposées dans un récipient rigide. Aucun processus de compaction du milieu n'est réalisé. L'impactant est un galet de forme quasi-sphérique de 6,8 cm de diamètre équivalent. Afin que l'impactant puisse être utilisé pour tous les essais sans se fracturer, le choix est fait d'utiliser un impactant en granit car il s'agit d'un matériau rocheux très résistant de densité équivalente à celle du calcaire. Etant donné que le calcaire est bien moins résistant que le granit, on peut considérer que les essais sont réalisés sous l'hypothèse que la détérioration de l'impactant est négligeable devant celle des pierres du sol.

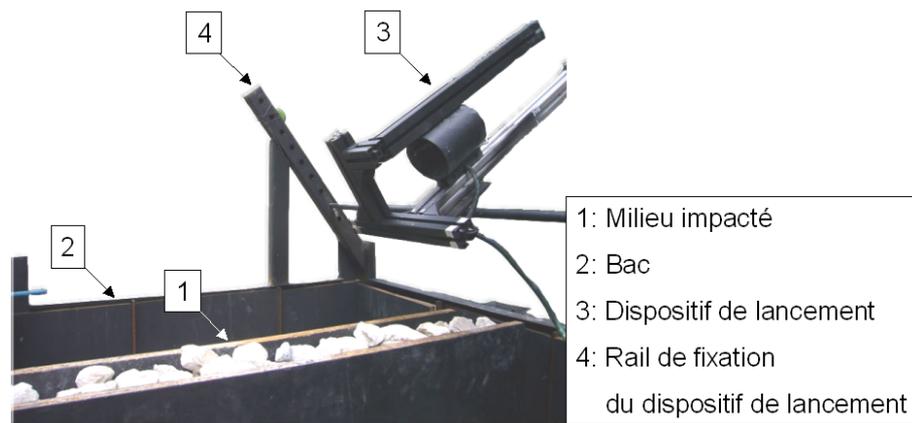


Figure 3. Dispositif expérimental.

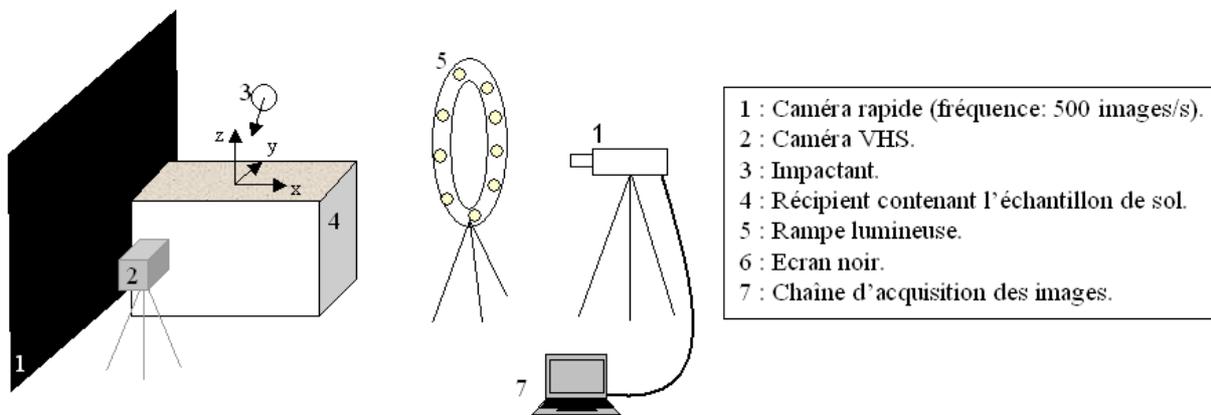


Figure 4. Dispositif de mesure.

Le récipient contenant les pierres du sol est un bac parallélépipédique de 1 m de côté et de 0,5 m de hauteur. Les dimensions de ce récipient ont été déterminées de façon à supprimer

l'influence des parois sur la base des résultats numériques obtenus dans Bourrier et al. (2008c). Le choix est également fait de se rapprocher dans un premier temps d'une modélisation bidimensionnelle. La largeur de l'échantillon de sol est réduite à 110% de la plus grande dimension de la plus grande particule du milieu. Dans cette configuration, le réarrangement des pierres du sol est donc toujours possible lors de l'impact mais leur mouvement n'est possible que dans un plan. Le dispositif de lancement de l'impactant doit permettre d'explorer la gamme de variation des conditions incidentes du bloc. Il n'est cependant pas possible de faire varier tous les paramètres incidents étant donné le nombre d'essais à réaliser dans chaque configuration. Le choix est donc fait de fixer la vitesse incidente à une valeur de 6 m/s et la vitesse de rotation à une valeur nulle pour tous les essais. L'impactant est projeté à l'aide d'un dispositif de lancement fonctionnant sur le principe d'une arbalète. Le dispositif de lancement est monté sur un axe. Cet axe est inséré dans des trous percés dans deux montants obliques situés de part et d'autre du récipient. Ce montage permet de faire varier l'angle d'incidence de 0° à 75° et d'ajuster précisément le point d'impact pour que le bloc impacte toujours le sol approximativement au milieu du récipient. Il permet également de contrôler les valeurs de la vitesse incidente et de la vitesse de rotation afin de réaliser tous les essais dans des conditions similaires et reproductibles.

Chaque essai d'impact est filmé à l'aide de deux caméras. Dans le plan d'incidence du bloc, défini comme le plan dans lequel se situe la vitesse incidente du bloc et passant par le point d'impact (plan yz), l'impact est filmé à l'aide d'une caméra rapide à une fréquence de 500 images par seconde. L'impact est également filmé à l'aide d'une caméra vidéo à une fréquence de 25 images par seconde dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence passant par le point d'impact (plan xz).

2.2. Caractérisation du milieu impacté

Les pierres constitutives du milieu impacté proviennent de la carrière Socafi située à Domène dans l'Isère (38). Ce sont des granulats concassés de calcaire. Les mesures des principales caractéristiques du milieu impacté sont faites sur un échantillon représentatif de 100 kg de matériau.

2.2.1. Densité des pierres constitutives

Pour mesurer la densité des pierres, l'échantillon représentatif de sol est tout d'abord pesé. La masse mesurée est la masse totale des pierres de l'échantillon. Les pierres de l'échantillon sont ensuite immergées dans un volume défini d'eau contenu dans une éprouvette graduée. La différence entre le volume occupé après et avant immersion des pierres correspond au volume total des pierres immergées. La densité est enfin calculée en faisant le rapport entre la masse et le volume des pierres mesurés. Cinq mesures de densité ont été réalisées. Les valeurs mesurées sont comprises entre $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ et $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$. Ces résultats sont en accord avec les valeurs classiques pour le calcaire.

2.2.2. Angularité et élancement des pierres constitutives

Différents indices de forme (Krumbein, 1941 ; Rittenhouse, 1943) peuvent être définis pour quantifier la sphéricité et l'angularité des roches étudiées en fonction de leur forme générale. Différentes classes peuvent également être attribuées aux pierres constitutives de l'éboulis en fonction d'une estimation qualitative de leur angularité et de leur origine (Barton et Kjaernsli, 1981). L'utilisation de ces indices est cependant très subjective.



Figure 5. Pierres constitutives de l'échantillon de sol

Pour décrire l'angularité des pierres (Figure 5), il est également possible de compter le nombre de sommets ou de faces les composant. Les sommets des pierres étant peu marqués, le choix est fait de compter le nombre de faces. Une face n'est comptabilisée que si elle représente plus de $N\%$ de la surface totale du bloc. Les résultats de cette description, réalisée pour 288 blocs de l'échantillon de sol, montrent que, avec $N = 10\%$, les pierres ont en moyenne 6 faces (Figure 6).

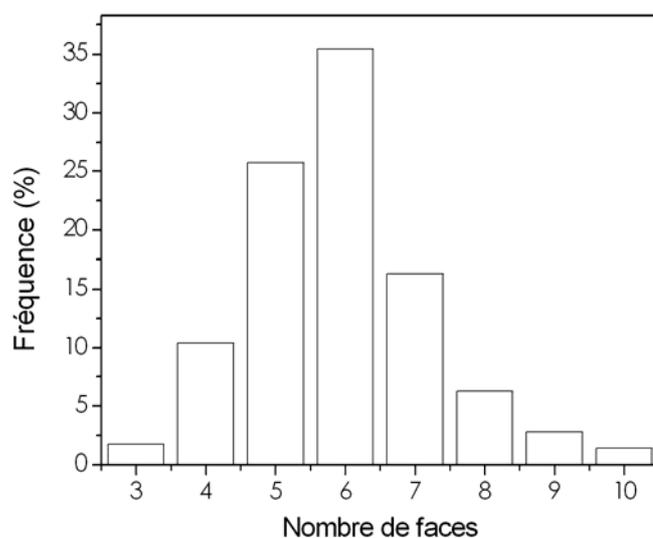


Figure 6. Distribution du nombre de faces des pierres de l'échantillon de sol. La surface d'une face est supérieure à 10% de la surface totale des pierres.

Selon Marsal (1973), la forme d'une pierre constitutive d'un sol est définie par la mesure de ses dimensions selon trois axes perpendiculaires, donnant par ordre décroissant la longueur L , la profondeur h et la largeur l de la pierre considérée. L'élancement est défini comme le rapport de la longueur L sur la largeur l d'une pierre. Ce paramètre est représentatif de la sphéricité des pierres constitutives du sol étudié.

L'élancement a été calculé pour 62 pierres constitutives du sol impacté. Les résultats de ces mesures fournissent la distribution de l'élancement des pierres du sol (Figure 7). La moyenne de la distribution de l'élancement est de 2,5 et son écart type est de 0,75.

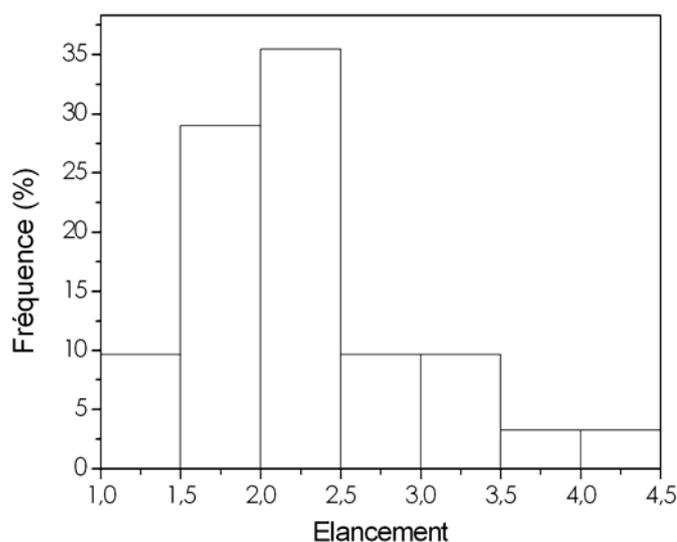


Figure 7. Distribution de l'élancement des pierres de l'échantillon de sol.

2.2.3. Courbe granulométrique

Les pierres constitutives de l'échantillon de sol ont été choisies pour que la moyenne de leur diamètre équivalent soit d'environ 5 cm et pour que la gamme de variation de leur volume soit de 10. De cette façon, les caractéristiques générales du modèle numérique de sol sont a priori conservées.

Pour obtenir une courbe granulométrique de l'échantillon de sol, une analyse granulométrique est réalisée. Cette analyse a nécessité des adaptations de la méthode classique de tamisage à sec après lavage, notamment, car les tamis nécessaires à l'analyse granulométrique des matériaux grossiers ne sont pas des instruments communément utilisés. La taille maximale des tamis disponibles au laboratoire étant de 10 mm, nous avons fabriqué et utilisé des tamis à mailles carrées de grandes dimensions dont les ouvertures respectives sont de 90, 70, 55, 30, 25 et 13 mm (Figure 8). Il est important de noter qu'aucun processus de vibration des tamis n'a été réalisé durant l'analyse granulométrique car la mise en place de ces processus pour des tamis de grandes tailles tels que ceux utilisés s'avère complexe.

L'application de ce protocole d'analyse granulométrique permet d'obtenir la courbe granulométrique de l'échantillon de sol impacté (Figure 9).



Figure 8. Tamisage à sec de l'échantillon de sol.

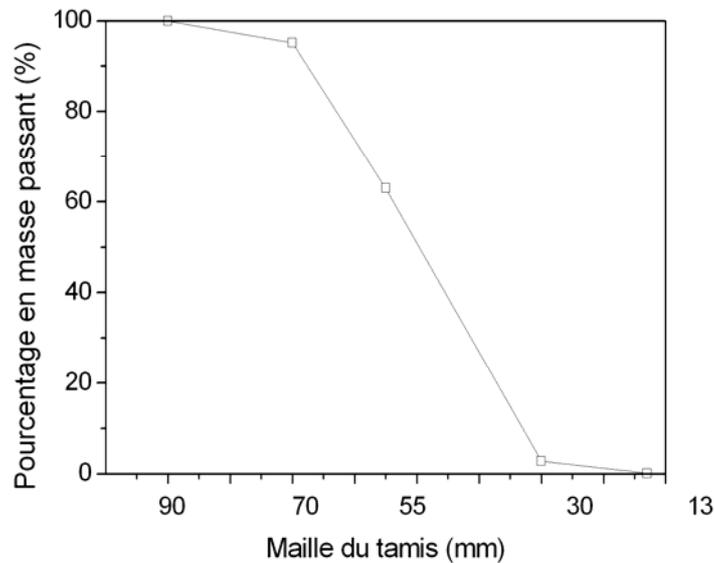


Figure 9. Courbe granulométrique de l'échantillon de sol.

2.2.4. Porosité

Bien que la porosité de l'échantillon ne puisse pas être comparée à celle du modèle numérique de sol car celui-ci est bi-dimensionnel, il est important de déterminer ce paramètre afin d'estimer si le sol est dense ou lâche. La porosité est le pourcentage volumique de vide dans un sol. Pour déterminer cette grandeur, il faut mesurer, pour un échantillon donné, le volume occupé par l'échantillon ainsi que le volume réel des pierres constitutives de cet échantillon.

Pour cela, un récipient de volume V_t connu est rempli de pierres constitutives de l'éboulis. Les pierres ayant servi au remplissage du récipient sont ensuite pesées. Le volume réel V_r des pierres est calculé à partir de leur masse totale puisque leur densité est connue. La porosité p est enfin calculée par la relation: $p=(V_t - V_r) / V_t$.

Il est important de noter que, lors de cette mesure de la porosité, le protocole de génération du sol est comparable à celui utilisé lors des essais. Il s'agit d'un simple dépôt sous l'action de la gravité. La porosité mesurée est donc représentative de celle de l'échantillon de sol impacté lors des essais.

La détermination de la porosité selon ce protocole a été réalisée 5 fois. Les résultats obtenus sont, dans tous les cas, comparables. On peut en déduire que la porosité moyenne de l'échantillon de sol est de l'ordre de 40%. La comparaison de cette valeur avec celles obtenues pour différents sols grossiers (Marsal, 1973) tend à montrer que l'échantillon de sol est dans un état lâche.

2.3. Propagation de l'énergie dans un matériau granulaire grossier

Le développement et la réalisation du dispositif expérimental offrait la possibilité, en parallèle de l'étude du rebond, de s'intéresser à la propagation de l'énergie au sein du massif granulaire grossier. Ce phénomène influence en effet la présence du rebond lorsque la profondeur de

l'éboullis est faible. L'objectif était à la fois de confronter l'approche numérique à des données expérimentales mais également de produire des données sur cette question peu abordée.

Le principe général consiste à instrumenter le massif granulaire pour en déduire des informations relatives à la propagation de l'énergie. Deux grandeurs semblent d'intérêt à cette fin, la vitesse de propagation des ondes et l'amplitude de l'accélération particulière. Ce second paramètre doit permettre d'évaluer la dissipation de l'énergie au sein d'un milieu granulaire.

Des accéléromètres placés dans le milieu granulaire sont envisagés pour obtenir ces deux grandeurs. Les accéléromètres utilisés sont des accéléromètres uniaxiaux piézorésistifs (+/- 100g, bande passante : 0-1kHz).

Pour mesurer de façon satisfaisante l'accélération particulière la solution retenue consiste à noyer les accéléromètres dans des fausses particules de sol, en béton. Toute autre solution semble présenter des biais importants. Compte tenu de la granulométrie à la fois grossière et ouverte du sol, une mesure faite par un accéléromètre simplement posé ne semble pas pertinente. Et, fixer les accéléromètres sur un grain semble délicat.

Ces fausses particules sont des éprouvettes en béton taillées pour atteindre une taille et une forme proche des particules de sol réelles, ce afin de ne pas modifier les propriétés géométriques et mécaniques du milieu. Ces blocs sont percés de façon à loger l'accéléromètre en son centre. L'orientation de l'axe de mesure est repérée. Le logement est ensuite noyé d'un mortier fortement chargé en sable, permettant la récupération des accéléromètres sans détérioration (Figure 10).



Figure 10. Granulat en béton test.

Lors de chaque essai deux accéléromètres sont utilisés. Ils sont placés à l'aplomb du point d'impact à 35 cm l'un de l'autre : le premier est placé à une couche de particules sous la surface du milieu et le second est à une couche de particules au dessus du fond du milieu. L'axe de mesure est aligné sur la verticale.

Pour valider l'approche, 6 essais ont été réalisés sur un même assemblage granulaire (Tableau 2). Ce tableau fait état des conditions d'essais et de remarques éventuelles. On constate qu'une des difficultés réside dans l'alignement des axes de propagation de l'onde de compression avec l'axe de mesure des accéléromètres.

	Position pt d'impact	Projection	F. acquisition (kHz)	Remarque/validité
T1	au dessus	Arbalète	10	ok
T2	au dessus	Manuelle	20	Non valide : point d'impact
T3	au dessus	Manuel	20	ok
T4	au dessus	Arbalète	20	ok
T5	décalé de 40cm	Arbalète	20	Non valide : accélero pas dans l'axe
T6	décalé de 40cm	Arbalète	20	Non valide : accélero pas dans l'axe

Tableau 2. Caractéristiques des essais avec les accéléromètres.

La Figure 11 présente les enregistrements faits lors du tir 4 (T4), le capteur S1 étant celui sous la surface, et le capteur S2 étant celui du fond. L'irrégularité des accélérations présentées en Figure 11 (a) traduit la nature granulaire grossière du milieu. La différence de temps d'arrivée de l'onde aux deux capteurs apparaît ici être de 0,4ms (Figure 11 (b)). Compte tenu de la distance inter-capteurs, ce temps donne une valeur de vitesse de l'onde de compression d'environ 800m/s. Cette valeur est proche de celle obtenue à partir du modèle numérique (environ 1000 m/s). Néanmoins, la valeur est assortie d'une très forte incertitude.

En termes d'amplitude de l'accélération, on observe une très forte réduction du premier pic, avec un rapport de 100 entre les deux capteurs S1 et S2.

Des valeurs très proches ont été obtenues lors des tirs T3 et T1.

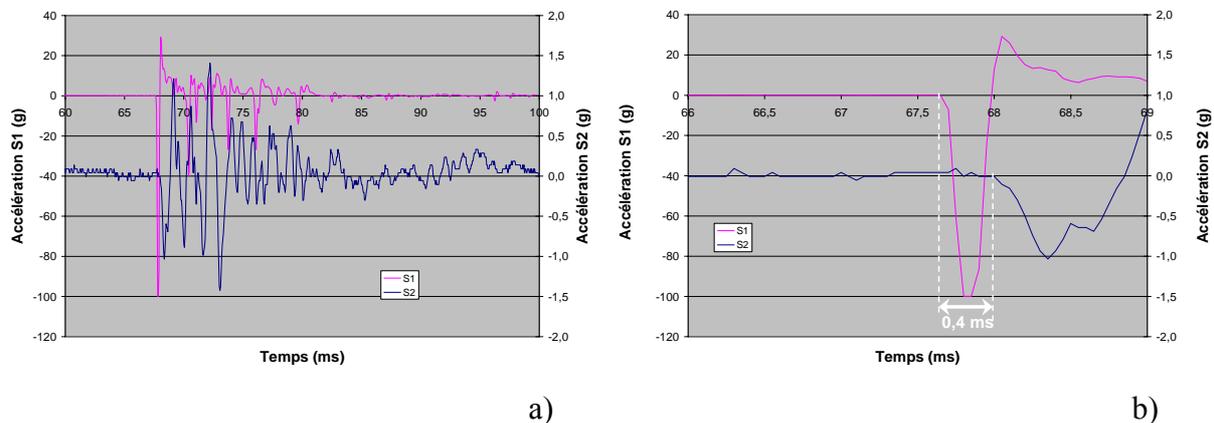


Figure 11. Signaux enregistrés par les accéléromètres. a) signal entier, b) zoom sur le premier pic d'excitation.

Pour les essais non valides (T2, T5 et T6), l'interprétation en est délicate, les accéléromètres sont sollicités hors de leur axe de mesure et/ou ils ne sont pas alignés à partir du point d'impact. Les résultats n'ont pas été exploités.

Quelques remarques complémentaires doivent être faites quant à ces essais :

- Du fait de la taille réduite de l'échantillon les signaux sont perturbés par des vibrations transitant par la structure en acier/bois. Ces perturbations parviennent avant l'arrivée de l'onde.
- La distance très courte entre les deux accéléromètres rend peu fiable la mesure de la vitesse de propagation.

Concernant la faisabilité de ces mesures, ces expérimentations ont montré que la plage d'accélération dans ces conditions d'essais allait de 0 à 100g, que la bande passante doit dépasser les 1000Hz et qu'un capteur triaxial permettrait de s'affranchir du problème de l'alignement des accéléromètres par rapport au point d'impact.

Néanmoins, si l'essai est valide, cette expérimentation peut facilement permettre une mesure de la vitesse de propagation des ondes et fournir des éléments quant à la réduction de l'amplitude de l'accélération des particules. D'autres campagnes d'essais et l'acquisition d'accéléromètres plus adaptés sont donc envisagées pour étudier plus en détails la propagation d'une onde de choc dans un milieu granulaire grossier.

2.4. Mesure de la cinématique de l'impactant

Le traitement des images issues des films à la caméra rapide et à la caméra vidéo permet de déterminer la trajectoire du bloc au cours de l'impact. Les données obtenues sont analysées, dans un deuxième temps, afin de déterminer les vitesses incidentes et réfléchies de l'impactant.

2.4.1. Etalonnage de la taille des images

Les images issues des films à la caméra rapide sont représentées par des matrices de 1024 lignes par 1280 colonnes; celles des films vidéo par des matrices de 480 lignes par 720 colonnes. Chaque coefficient de ces matrices représente un pixel. Les images étant en niveaux de gris, la valeur de chaque pixel est comprise entre 0 et 255. La valeur 0 correspond à un pixel de couleur noire et la valeur 255 à un pixel de couleur blanche.

Pour quantifier le déplacement du bloc, la taille d'un pixel de chacune de ces images doit être connue. Avant chaque essai, une mire quadrillée est donc filmée à l'aide de chacune des caméras utilisées pour déterminer la taille d'un pixel dans les deux cas. Les images de ces mires permettent également de vérifier que les distorsions sont négligeables.

L'image de la mire est seuillée afin d'obtenir l'image d'un quadrillage noir sur un fond blanc. L'opération de seuillage consiste à construire une image en noir et blanc, appelée image binaire, à partir d'une image en niveaux de gris. Pour cela, une valeur seuil comprise entre 1 et 255 est choisie. Tous les pixels ayant une valeur supérieure à cette valeur seuil sont transformés en pixels blancs. Au contraire, tous les pixels ayant une valeur inférieure à cette valeur sont transformés en pixels noirs. La matrice représentative d'une image binaire est de la même taille que la matrice d'une image similaire en niveaux de gris. Par contre, les valeurs correspondant à chaque pixel sont soit 0 si le pixel est noir, soit 1 si le pixel est blanc.

Un algorithme de comptage permet de calculer l'aire totale des carreaux noirs de l'image seuillée de la mire. Cette valeur en $pixel^2$ est comparée à l'aire réelle de ces carreaux en mm^2 .

Cette comparaison permet de calculer le facteur de conversion F_c permettant de passer d'une longueur en *pixel* sur l'image à une longueur réelle en *mm*.

2.4.2. Traitement des images issues des films à la caméra rapide

Un algorithme de traitement d'images automatisé réalisé à l'aide du logiciel Matlab est utilisé pour analyser les films à la caméra rapide. Cet algorithme permet un traitement automatique de la totalité des images d'un essai. Pour chaque image, ce traitement permet d'obtenir la position du centre de gravité de l'impactant ainsi que le déplacement de trois points de l'impactant entre l'image considérée et l'image suivante.

Le positionnement du centre de gravité est déterminé dans l'optique de calculer l'évolution de la vitesse de translation du bloc dans le plan de la caméra. La mesure du déplacement de trois points de l'impactant d'une image à l'autre a pour but de déterminer l'évolution de la vitesse de rotation de l'impactant dans le plan de la caméra.

Les données d'entrée de l'algorithme sont les images issues d'un film à la caméra rapide, le facteur de conversion F_c et la fréquence d'acquisition f_a de la caméra ($f_a = 500 \text{ images/s}$). Préalablement au traitement de chaque essai, une image de fond est créée. Cette image correspond à la première image du film traité pour laquelle le bloc a été supprimé. Pour chaque image de l'essai, le traitement débute par la soustraction de l'image de fond à l'image considérée (Figure 12). Cela permet d'isoler l'impactant. L'image en niveau de gris de l'impactant isolé est ensuite seuillée (Figure 13) de manière à obtenir une image en noir et blanc. L'image obtenue est celle d'un impactant blanc sur fond noir (Figure 14). Le calcul des coordonnées du centre de gravité de cet objet blanc permet d'obtenir les coordonnées du centre de gravité de l'impactant à chaque image. A partir des coordonnées du centre de gravité de l'impactant à chaque image il est possible de calculer l'évolution de la vitesse du bloc dans le plan de la caméra rapide.

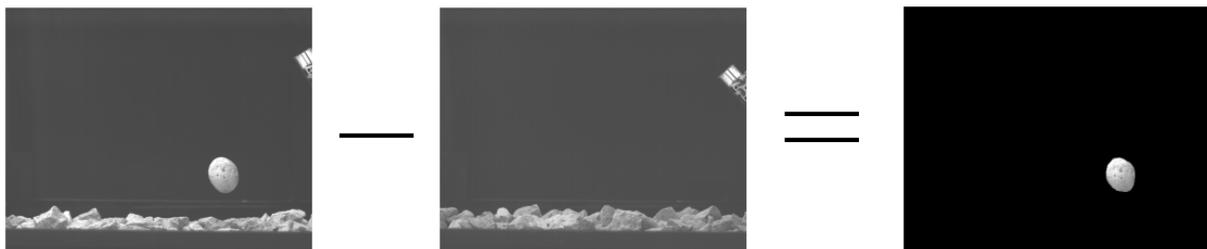


Figure 12. Soustraction d'une image de fond à chaque image traitée pour isoler l'impactant.

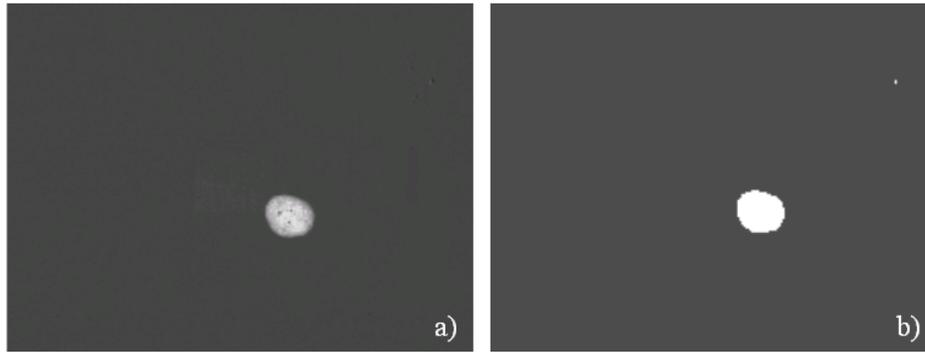


Figure 13. Seuillage de l'image en niveau de gris (a) de l'impactant pour définir une image binaire de l'impactant (b).

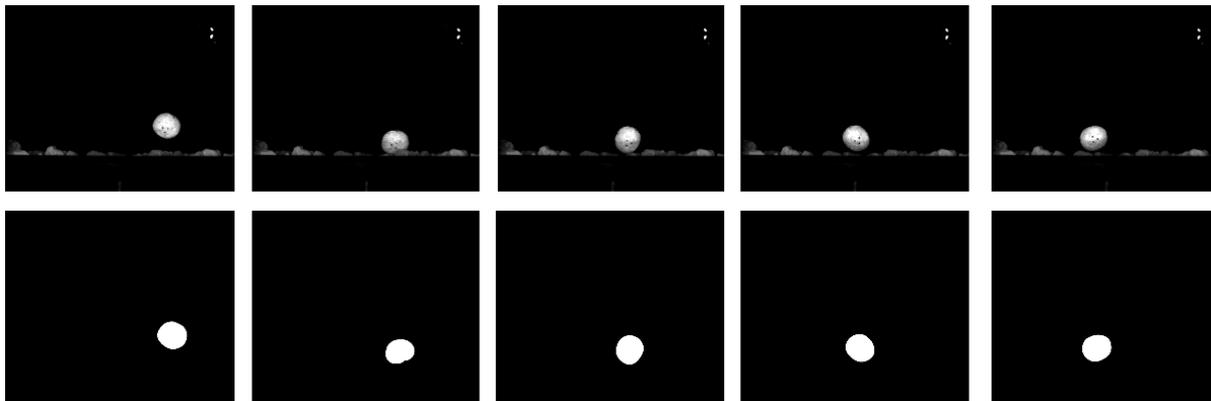


Figure 14. Images brutes (haut) et traitées (bas) issues du film à la caméra rapide d'un essai.

2.4.3. Traitement des images issues des films à la caméra vidéo

Le traitement des films vidéo est plus complexe que celui des films à la caméra rapide car les images issues de films vidéo sont entrelacées (L'entrelacement est une technique destinée à réduire l'impression de scintillement sur un écran à faible fréquence de balayage (50 à 60 Hz)). Chaque image, enregistrée tous les $1/25^{\text{ème}}$ de seconde, est composée de deux trames. Chaque trame correspond à la moitié des lignes d'une image : la trame paire (resp. impaire) est composée des lignes paires (resp. impaire) de l'image. Les deux trames ne sont pas enregistrées au même instant. La trame paire est enregistrée $1/50^{\text{ème}}$ de seconde après la trame impaire. Dans les mouvements rapides, tels que les essais filmés ici, cet entrelacement des images est très préjudiciable.

Le traitement des films consiste tout d'abord à désentrelacer les images (Figure 15). Cette opération permet de doubler la fréquence d'acquisition des images : 50 images par seconde sont alors disponibles. Cependant, la définition de ces images est plus faible. Puis, l'évolution du déplacement horizontal de l'impactant dans le plan de la caméra vidéo est déterminée par un traitement identique à celui réalisé pour les images issues des films à la caméra rapide. L'analyse de chaque essai permet d'obtenir le déplacement horizontal de l'impactant dans le plan perpendiculaire au plan incidence.

Etant donné la faible fréquence d'acquisition de la caméra vidéo (25 images/s), on dispose en général de peu d'images (de 5 à 15 images) entre le moment où le bloc est éjecté du dispositif

de lancement et celui où il quitte le champ de la caméra. L'analyse des films VHS ne permet donc pas de quantifier le déplacement du bloc dans le plan de la caméra vidéo de façon précise.

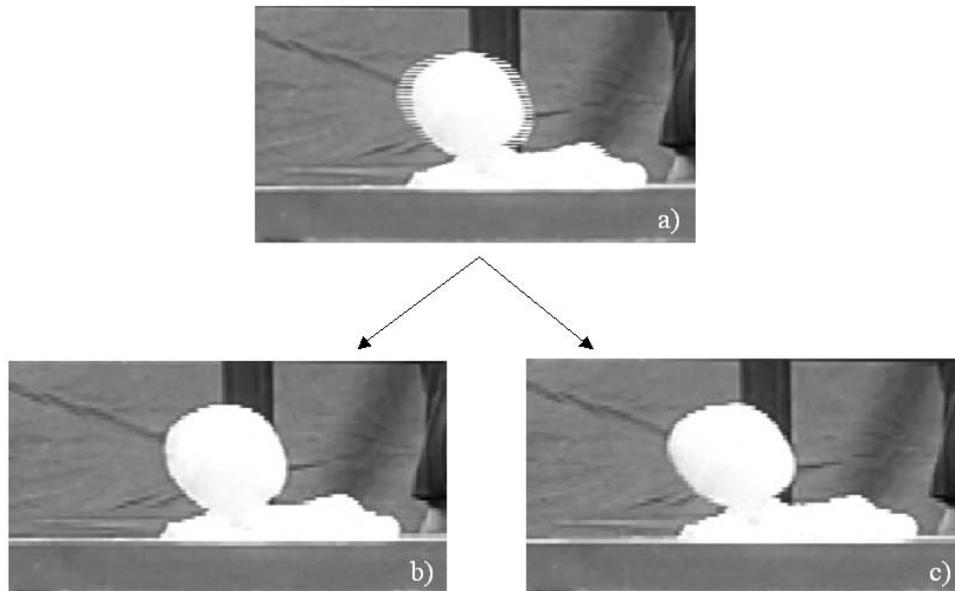


Figure 15. Traitement des images issues de films à la caméra vidéo: deux images correspondant à la trame impaire (b) et à la trame paire (c) sont définies à partir de l'image vidéo initiale (a).

2.4.4. Détermination des vitesses incidentes et réfléchies de l'impactant

Les données dont nous disposons pour le calcul des vitesses incidentes et réfléchies du bloc sont le déplacement du bloc en 3D et sa rotation dans le plan d'incidence.

Le déplacement vertical du bloc ne dépend que de l'analyse des images à la caméra rapide. Par contre, le déplacement horizontal du bloc est fonction de l'analyse des films à la caméra rapide et à la caméra vidéo. Enfin, les rotations du bloc ne sont pas mesurées. Il est seulement possible de les évaluer à partir des films à la caméra rapide par analyse qualitative du déplacement des points de repère tracés sur l'impactant (Figure 16).



Figure 16. Zoom d'images brutes issues du film à la caméra rapide d'un essai. Lors de l'impact, l'impactant est caché par les pierres de l'éboulis. Le mouvement des points marqués sur l'impactant met en évidence la rotation de l'impactant.

L'évolution des coordonnées du centre de gravité de l'impactant au cours de l'impact dans le plan d'incidence permet de tracer sa trajectoire dans ce plan. Avant et après impact, les trajectoires des blocs dans le plan d'incidence sont en général bien représentées par deux

paraboles correspondant au vol libre du bloc (Figure 17). Au contraire, la trajectoire durant l'impact est très irrégulière à la fois à cause du mouvement complexe du bloc en interaction avec le sol et à cause de difficultés à obtenir une analyse d'image précise durant l'impact. En effet, durant l'impact, le bloc est très souvent caché sur les films par les pierres situées devant le plan d'incidence (Figure 16). De plus, l'étape de soustraction du fond peut occasionner la suppression d'une partie de l'impactant lorsque celui-ci est en contact avec le sol (Figure 14). Ainsi, la présence d'un contact entre l'impactant et une pierre du sol est difficile à détecter à partir de l'analyse de sa trajectoire dans le plan d'incidence (Figure 16). La définition du début et de la fin de l'impact ne peut donc pas être faite en fonction du déplacement du bloc.

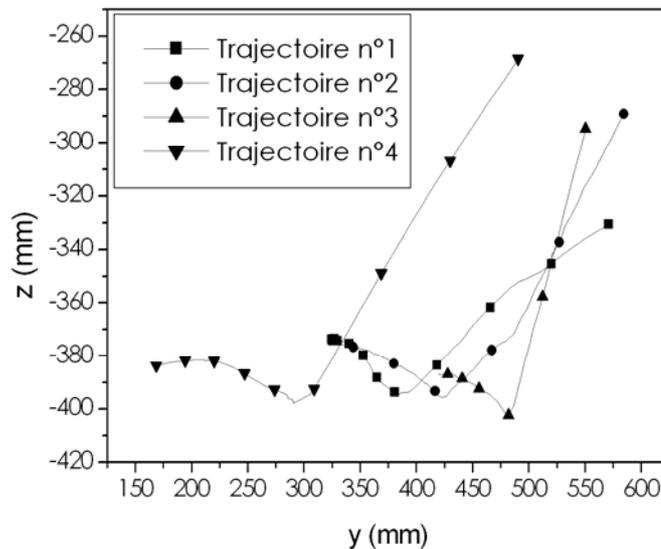


Figure 17. Trajectoires de l'impactant dans le plan incident au cours de quatre essais.

Le calcul de l'évolution des vitesses de l'impactant au cours de l'essai permet de définir plus facilement le début et la fin de l'impact car ces grandeurs varient fortement au moment de l'impact.

La composante verticale de la vitesse de l'impactant entre deux images est calculée par la formule élémentaire:

$$V_z(i \rightarrow i+1) = F_c f_a (z(i+1) - z(i)) \quad (2)$$

où $V_z(i \rightarrow i+1)$ est la composante verticale de la vitesse de l'impactant dans le plan incident entre les images i et $i+1$; $z(i)$ (resp. $z(i+1)$) est la position verticale de l'impactant dans le plan incident à l'image i (resp. $i+1$), F_c est le facteur de conversion permettant de passer d'une longueur en *pixel* sur l'image à une longueur réelle en *mm* et f_a est la fréquence d'acquisition de la caméra.

De même, la composante horizontale de la vitesse de l'impactant dans le plan incident entre deux images est calculée par la formule :

$$V_y(i \rightarrow i+1) = F_c f_a (y(i+1) - y(i)) \quad (3)$$

où $V_y(i \rightarrow i+1)$ est la composante horizontale de la vitesse de l'impactant dans le plan incident entre les images i et $i+1$; $y(i)$ (resp. $y(i+1)$) est la position horizontale de l'impactant dans le plan incident à l'image i (resp. $i+1$).

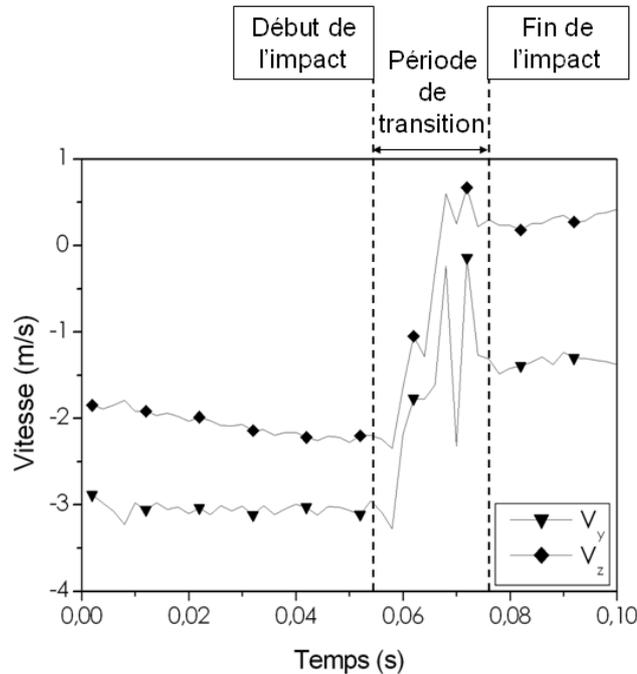


Figure 18. Evolution des composantes horizontale V_y et verticale V_z de la vitesse de l'impactant dans le plan incident au cours d'un essai.

Ces calculs de vitesse permettent d'obtenir des résultats bruts pour lesquels les variations sont mises en exergue (Figure 18). Avant et après impact, l'évolution de la composante verticale de la vitesse du bloc est linéaire et celle de la composante horizontale de cette vitesse est constante. Ces deux grandeurs présentent de plus une variation brutale au cours de l'impact. La définition du début et de la fin de l'impact est faite à partir de l'évolution de la composante verticale de la vitesse. En effet, la variation de cette grandeur au cours de l'impact est très marquée. De plus, cette grandeur est mesurée avec précision car elle n'est calculée qu'à partir de données issues de l'analyse des films à la caméra rapide.

L'impact est matérialisé par un saut sur la courbe d'évolution de la composante verticale de la vitesse de l'impactant (Figure 18). Ce saut de vitesse s'accompagne d'une période de transition. Le dernier instant avant cette période de transition sera donc choisie comme début de l'impact et l'instant successif à cette période sera défini comme étant la fin de l'impact (Figure 18).

Les composantes de la vitesse incidente sont les moyennes des vitesses mesurées pour les 10 points de mesure précédant le début de l'impact et les composantes de la vitesse réfléchi sont les moyennes des vitesses pour les 10 points de mesure postérieurs à la fin de l'impact.

L'analyse de plusieurs essais met en évidence que l'utilisation de 10 points de mesure donne lieu à une erreur moyenne sur les vitesses faible.

La composante tangentielle de la vitesse réfléchi de l'impactant dans le plan perpendiculaire au plan incident est calculée à partir des images issues des films vidéo. Dans ce cas, seulement une image correspond à l'impact car la fréquence d'acquisition de la caméra vidéo est faible (25 images/s). La composante tangentielle de la vitesse incidente de l'impactant dans le plan de la caméra vidéo est, par définition, nulle. La composante tangentielle de la vitesse réfléchi dans ce plan est calculée sur l'ensemble des images disponibles après impact car, si le frottement de l'air est négligé, la vitesse tangentielle de l'impactant est constante après impact. Le nombre de points de mesure disponibles pour ce calcul est, selon les essais, compris entre 2 et 10. L'erreur sur le calcul de cette composante est donc grande étant donné le nombre réduit de points, la qualité médiocre des images vidéo et les imprécisions liées à leur traitement.

2.4.5. Erreurs de mesure

Les erreurs de mesure sur chacune des composantes du vecteur vitesse réfléchi et incident de l'impactant sont calculées de manière globale. Pour chaque grandeur g mesurée, on considère que la mesure de cette grandeur est la moyenne \bar{g} des valeurs obtenues pour les p points de mesure. L'erreur Δg sur la mesure de la grandeur g peut être reliée à l'écart type σ_g associé à la valeur \bar{g} . En effet, la variation des mesures autour de la valeur moyenne \bar{g} , caractérisée par σ_g , est due aux actions couplées de toutes les sources d'erreurs possibles.

La moyenne \bar{g} est calculée à partir de p mesures g_i par la relation:

$$\bar{g} = \frac{1}{p} \sum_i g_i \quad (4)$$

L'écart type σ_g associée à cette valeur moyenne \bar{g} est :

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_i (g_i - \bar{g})^2} \quad (5)$$

L'erreur Δg sur la mesure de la grandeur g est reliée à l'écart type σ_g par la relation :

$$\Delta g = \frac{1}{\sqrt{p}} \sigma_g \quad (6)$$

Cette méthode est appliquée pour le calcul de l'erreur réalisée sur la mesure de chacune des grandeurs mesurées (vitesses de translation et de rotation incidentes et réfléchies). L'erreur sur chaque grandeur tracée à partir de ces mesures est déterminée par application des méthodes de calcul d'erreur classiques à partir des erreurs de mesure Δg .

De plus, afin de mettre en évidence la variabilité des grandeurs étudiées, les fonctions de répartition de ces grandeurs sont en général déterminées et tracées. Il est intéressant de noter

que les erreurs de mesure sur les fonctions de répartition des mesures \bar{g} de ces grandeurs g sont composées à la fois des erreurs de mesures Δg calculées selon la méthode définie précédemment et d'une erreur $\Delta F(\bar{g})$ liée à l'estimation d'une fonction de répartition F à l'aide d'un nombre fini de N valeurs. Cette erreur d'estimation de la fonction de répartition F se reporte sur chaque valeur estimée en supplément de l'erreur de mesure Δg définie précédemment. Elle est calculée pour chaque valeur \bar{g} ayant une probabilité cumulée $F(\bar{g})$ estimée par la valeur $\hat{F}(\bar{g})$ par l'expression:

$$F(\bar{g}) = \hat{F}(\bar{g}) \pm \Delta F(\bar{g}) \quad (7)$$

Avec

$$\Delta F(\bar{g}) = 2\sqrt{\frac{\hat{F}(\bar{g})(1-\hat{F}(\bar{g}))}{N}} \quad (8)$$

Afin de ne pas alourdir les courbes de résultats, les erreurs ne seront données explicitement dans la suite que lorsqu'elles seront indispensables.

3. Résultats des essais d'impact

Le traitement des films des essais met tout d'abord en évidence que la composante tangentielle à la surface du sol de la vitesse réfléchie de l'impactant selon l'axe perpendiculaire au plan d'incidence (axe x) est négligeable devant les autres composantes de la vitesse réfléchie. Seules les composantes du vecteur vitesse réfléchi de l'impactant dans le plan de la caméra rapide (plan yz) sont donc analysées en détail.

3.1. Détermination du nombre minimal d'essais à réaliser

La première étape de la campagne d'essai est la détermination du nombre minimal n d'essais nécessaires pour obtenir une représentativité statistique de la variabilité des vitesses réfléchies pour des conditions incidentes fixées ($\alpha^n = 45^\circ$). Le nombre minimal d'essais assurant la représentativité statistique des résultats correspond au nombre d'essais à partir duquel les valeurs de ces moyennes et écart-types se stabilisent.

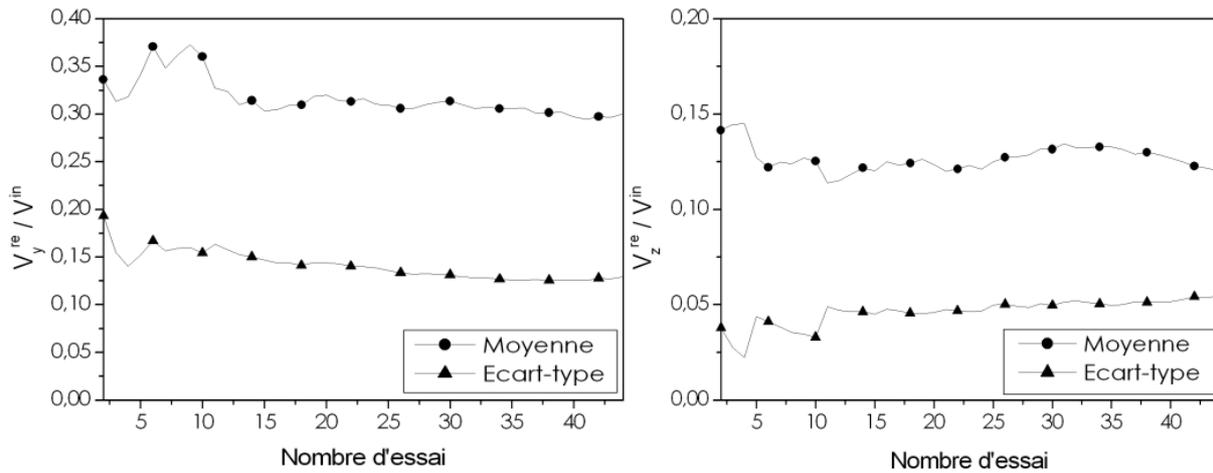


Figure 19. Influence du nombre d'essais réalisés pour des conditions incidentes données sur les valeurs moyennes et les écart-types des composantes tangentielle et normale à la surface du sol du vecteur vitesse réfléchi de l'impactant.

Les résultats montrent que des valeurs stables des moyennes et écart-types de la composante normale et de la composante tangentielle de la vitesse réfléchie sont obtenues pour un nombre minimal $n_{min} = 15$ essais (Figure 19). Il sera donc nécessaire de réaliser au moins 15 essais pour chaque angle d'incidence α^{in} considéré afin d'assurer la représentativité des résultats.

3.2. Cinématique réfléchie de l'impactant

Les résultats obtenus lors de cette campagne d'expérimentation à échelle réduite fournissent des informations intéressantes concernant les aspects du rebond de l'impactant classiquement étudiés en trajectographie.

Les valeurs des coefficients de restitution R_t et R_n mesurés lors des essais (Figure 20) mettent en évidence une importante variabilité de ces coefficients.

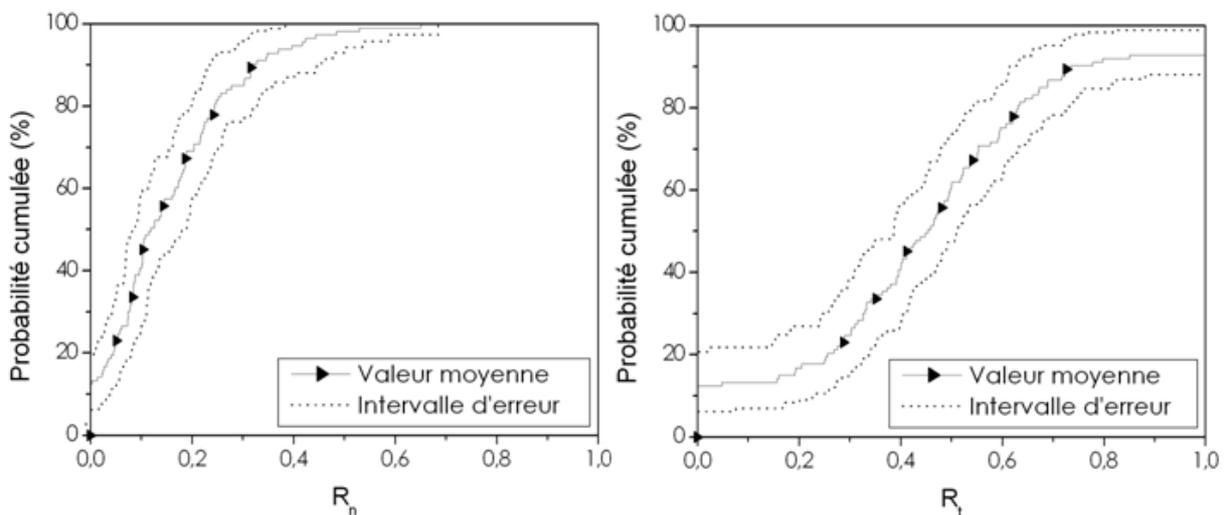


Figure 20. Fonctions de répartition des coefficients de restitution R_t et R_n obtenus lors des essais.

Les valeurs obtenues expérimentalement sont dans une gamme de variation tout à fait en accord avec les résultats expérimentaux classiques (95% des valeurs des coefficients telles que : $0,2 < R_n < 0,5$ - $0,4 < R_t < 0,9$) bien que les essais révèlent un pourcentage important de valeurs faibles de ces coefficients. Ce nombre important de valeurs faibles induit que les moyennes des coefficients mesurées (moyenne (R_t) = 0,43 - moyenne (R_n) = 0,15) sont un peu faibles par rapport aux valeurs classiquement mesurées pour l'impact d'un bloc sur un sol grossier. Ces nombreuses valeurs faibles induisent également une importante variabilité des résultats qui se traduit par des valeurs très importantes des écart-types associés aux coefficients R_t et R_n (écart-type (R_t) = 0,30 - écart-type (R_n) = 0,13) par rapport aux valeurs classiquement utilisées (écart-type (R_t) \approx 0,1 - écart-type (R_n) \approx 0,05 - Dudt et al., 2001 ; Guzzetti et al., 2002 ; Frattini et al., 2008) lors des analyses trajectographiques.

Les différences observées sont en premier lieu dues aux différences entre les conditions d'essais définies et les conditions d'essais classiques. Ainsi, la largeur du milieu impacté lors des essais étant faible (110% de la taille maximale des pierres constitutives du sol), les réarrangements des particules du sol au cours de l'impact sont plus difficiles au sein de ce sol qu'au sein des sols rencontrés sur le terrain. De plus, pour les essais réalisés, comme la taille du bloc est du même ordre de grandeur que celle des particules du sol, la surface du milieu impacté est fortement variable à l'échelle du bloc impactant. Cela modifie totalement les conditions locales d'impact par rapport aux situations classiques où la surface du sol est peu variable à l'échelle du bloc car le bloc est de taille plus importante que les particules du sol.

Les différences observées peuvent également s'expliquer par le fait que la gamme d'angles incidence utilisée lors des essais ($0^\circ < \alpha^n < 75^\circ$) est notablement différente de celle utilisée classiquement lors des mesures des coefficients de restitution ($\alpha^n \sim 50^\circ$).

4. Calibration du modèle numérique d'impact

4.1. Simulations à échelle réduite

Afin de limiter le nombre de paramètres différents entre les essais et les simulations et afin de supprimer tout éventuel effet d'échelle, les simulations des essais à échelle réduite sont tout d'abord menées dans un contexte identique à celui des essais. Cette étape permet la calibration des paramètres de simulation sur les données expérimentales. Les propriétés mécaniques et géométriques principales du modèle numérique du sol sont définies en adéquation avec celles du milieu impacté lors des essais.

Le modèle numérique de sol utilisé est similaire au modèle décrit dans la section 1.2.1. Les pierres constitutives du milieu expérimental étant de formes complexes, des "clumps" sont utilisés pour ces simulations. Leur forme est identique à celle décrite dans la section 1.2.1 ce qui permet de modéliser chaque pierre du sol par une particule de forme élançée.

La longueur et l'élançement des particules sont modifiées afin de traduire le plus précisément possible la courbe granulométrique et la distribution de l'élançement des particules du milieu expérimental mesurées (Figure 21).

L'impactant est une sphère de rayon $R_b = 3,4$ cm, correspondant au rayon équivalent de l'impactant utilisé lors des essais. Les conditions cinématiques incidentes sont similaires à

celles des essais ($V^{in} = 6 \text{ m/s}$ - $\omega^{in} = 0 \text{ rad/s}$ - $\alpha^{in} = 15^\circ ; 30^\circ ; 45^\circ ; 60^\circ ; 75^\circ$). Néanmoins, 100 simulations sont menées pour chacune des valeurs de l'angle d'incidence explorée. Enfin, bien que la porosité du milieu expérimental ait été mesurée, il n'est pas possible de calibrer directement ce paramètre par rapport à la mesure réalisée lors des essais car les simulations sont réalisées en 2D. Ce paramètre est donc tout d'abord calibré de façon à obtenir la meilleure adéquation entre les résultats des essais et les prédictions des simulations. L'influence de la valeur de la porosité sur les prédictions du modèle numérique est ensuite étudiée par comparaison entre les résultats de simulations réalisées pour différentes porosités du modèle numérique de sol.

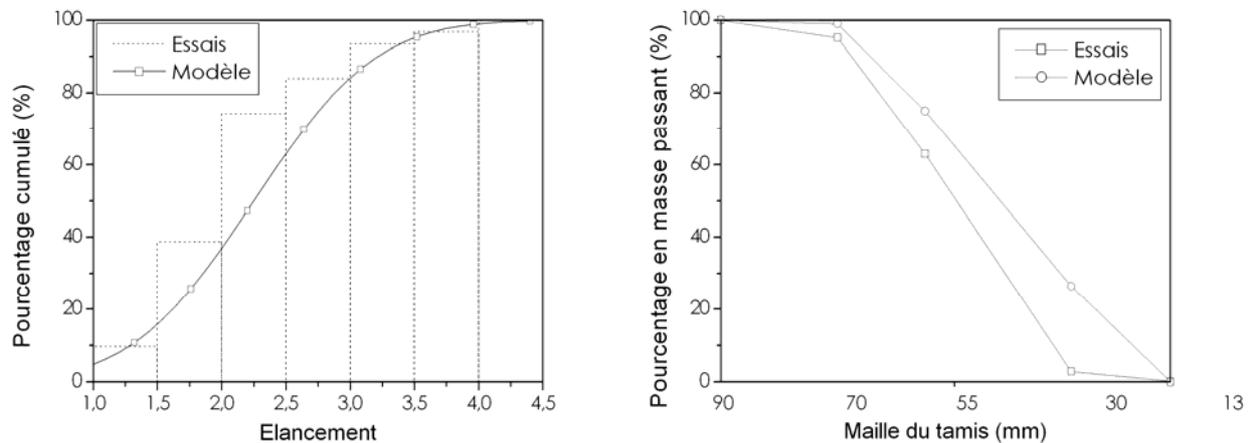


Figure 21. Courbes granulométrique et distributions de l'élanement des particules du sol mesurées lors des essais et utilisées lors des simulations.

La calibration de la porosité du modèle numérique de sol permet d'obtenir une adéquation satisfaisante entre les prédictions du modèle numérique et les résultats expérimentaux pour une valeur de la porosité 2D du modèle numérique de sol de 0,235 (Figure 22).

Quelle que soit la porosité du modèle numérique de sol, l'adéquation est particulièrement bonne pour la composante tangentielle de la vitesse réfléchie car la fonction de répartition des résultats de simulation est, en grande majorité, comprise à l'intérieur du domaine défini par l'intervalle d'erreur sur les résultats expérimentaux.

Au contraire, l'influence de la porosité sur les prédictions du modèle numérique est importante pour la composante normale : plus le milieu est dense, plus la valeur de la composante normale de la vitesse réfléchie est élevée. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un milieu dense se déforme moins qu'un milieu lâche ce qui permet une dissipation et une diffusion moindres de l'énergie. Par ailleurs, l'adéquation avec les résultats expérimentaux est légèrement moins satisfaisante pour la composante normale. Les différences observées sont dues à l'influence des différentes hypothèses réalisées dans le modèle numérique : non prise en compte des effets 3D, de la fissuration des blocs, simplification de la forme des blocs...La prise en compte de ces aspects dans le modèle numérique permettrait certainement de mieux simuler les résultats expérimentaux.

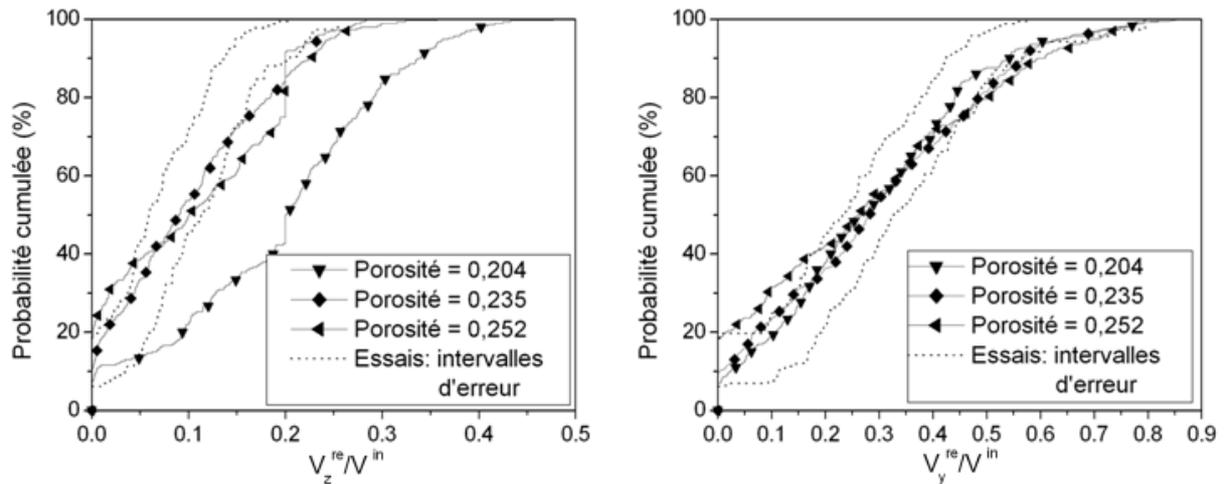


Figure 22. Comparaison des fonctions de répartition des composantes et de la vitesse réfléchie de l'impactant pour les essais et les simulations d'impact sur des échantillons de porosités différentes.

4.2. Simulations en grandeur réelle

Les résultats expérimentaux sont également comparés aux prédictions de simulations en grandeur réelle. L'objectif de cette étude est d'évaluer les différences induites par le passage de l'échelle réduite à l'échelle réelle et de comparer les résultats des essais aux prédictions réalisées dans le cadre général défini dans la section 1.2.1.

4.2.1. Modélisation numérique en grandeur réelle

Le modèle numérique en grandeur réelle du sol impacté est similaire à celui du modèle numérique à échelle réduite. En particulier, les propriétés mécaniques des particules ainsi que la loi de contact sont identiques.

La porosité du sol choisie est celle pour laquelle les prédictions du modèle à échelle réduite traduisent au mieux les résultats expérimentaux: la porosité 2D du modèle numérique de sol en grandeur réelle est donc de 0,235. Les dimensions de l'échantillon de sol, la taille de l'impactant et des pierres constitutives du sol sont définies de façon à conserver les proportions entre ces différentes grandeurs. Les dimensions du modèle numérique en grandeur réelle sont donc toutes définies par transformation homothétique des dimensions du modèle à échelle réduite. Le rapport d'homothétie est défini de façon à ce que le rayon de l'impactant soit, en grandeur réelle, de $R_b=0,4 \text{ m}$. Par ailleurs, lors des simulations en grandeur réelle, les vitesses incidentes sont choisies de manière à ce que le rapport entre l'énergie cinétique incidente et l'énergie nécessaire à l'élévation de l'impactant d'une hauteur égale à son diamètre soit du même ordre de grandeur pour les essais à échelle réduite et pour les conditions de simulation en grandeur réelle. Le respect de ce critère de similitude est assuré par la conservation du nombre de Froude Fr défini de la façon suivante :

$$Fr = \frac{V^{in}}{\sqrt{2gR_b}} \quad (9)$$

Ce critère de similitude simple (Rioual, 2002 ; Beladjine, 2007) n'intègre pas la totalité des règles de similitude à respecter étant donné la complexité du système étudié. En particulier, il ne prend pas en compte la complexité du comportement mécanique de la roche et ne permet donc pas d'assurer la conservation du rapport entre la contrainte maximale appliquée sur les particules du sol au cours de l'impact et la contrainte à la rupture du matériau. Malgré ce désavantage non négligeable, le critère de similitude basé sur l'utilisation du nombre Froude est utilisé en première approximation.

Afin d'explorer une gamme de vitesse correspondant à des nombres de Froude de l'ordre de celui utilisé dans les essais à échelle réduite ($Fr=7,5$), les simulations en grandeur réelle sont réalisées pour des nombres de Froude de 3,5 - 5 et 7,5, c'est à dire pour des vitesses incidentes V^{in} de 10 m/s, 15 m/s et 20 m/s. Les autres conditions cinématiques incidentes sont identiques à celles définies pour les simulations à échelle réduite: $\omega^{in}=0$ rad/s, $0^\circ \leq \alpha^{in} \leq 75^\circ$.

4.2.2. Comparaison des prédictions du modèle en grandeur réelle avec les résultats expérimentaux

Le premier objectif de la comparaison entre les essais à échelle réduite et les simulations en grandeur réelle est l'évaluation de la pertinence d'une augmentation homothétique des longueurs et d'une augmentation des vitesses en accord avec le nombre de Froude Fr pour passer d'un modèle à échelle réduite à un modèle en grandeur réelle.

Quelle que soit la vitesse incidente, les prédictions des simulations en grandeur réelle (Figure 23) sont en moins bonne adéquation avec les résultats expérimentaux que celles obtenues pour les simulations à échelle réduite (Figure 22). Bien que la composante tangentielle du vecteur vitesse réfléchi soit bien prédite par le modèle en grandeur réelle, la prédiction de la composante normale est en moins bon accord avec les résultats expérimentaux que celles obtenues pour les simulations à échelle réduite.

Ces résultats montrent qu'il est difficile de définir un critère de similitude permettant d'assurer une adéquation complète entre les essais à échelle réduite et les simulations en grandeur réelle. Néanmoins, les gammes de variation similaires obtenues pour les vitesses adimensionnées en grandeur réelle et à échelle réduite tendent à montrer que le respect de critères de similitude simples, tels que la conservation du nombre de Froude Fr couplée à une transformation homothétique des grandeurs caractéristiques des essais réalisés, permet d'assurer une représentativité minimale des résultats.

Les différences observées sont certainement dues au fait que ce type de critère de similitude ne prend pas en compte les différences de transferts énergétiques, en particulier de dissipation d'énergie par frottement, entre les essais (et les simulations) à échelle réduite et les simulations en grandeur réelle. Par ailleurs, les hypothèses et les approximations réalisées dans les simulations (effet 3D, granulométrie, angularité, friction...) peuvent expliquer le manque de similitude sur la composante normale. En effet, l'erreur commise par rapport à la réalité est différente pour les simulations à échelle réduite et en grandeur réelle.

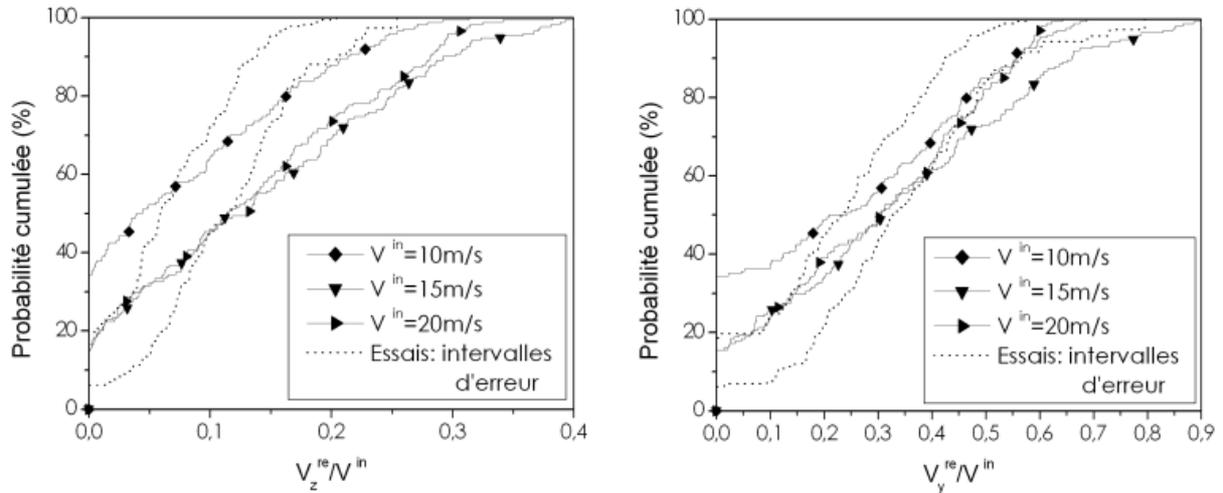


Figure 23. Influence de la vitesse incidente V^{in} sur les prédictions par des simulations en grandeur réelle des fonctions de répartition des composantes normale V_z^{re} et tangentielle V_y^{re} adimensionnées par la vitesse incidente V^{in} .

4.2.3. Possibilités de généralisation

Le second objectif de la comparaison des résultats d'essais à échelle réduite aux prédictions de simulations en grandeur réelle est d'évaluer la possibilité de prédiction des essais par des simulations d'impact sur un milieu type ayant les caractéristiques les plus simples possibles. Dans cette optique, l'influence de la granulométrie du sol est tout d'abord étudiée par comparaison entre les résultats de simulations menées en utilisant le milieu défini dans la section 4.1 (Granulométrie 1) et un milieu de caractéristiques identiques excepté une courbe granulométrique différente. La courbe granulométrique du second milieu est celle définie dans la section 1.2.1 (Granulométrie 2).

Cette comparaison met en évidence que l'influence de la granulométrie du sol semble moins importante que celle de la porosité, et de la taille relative entre l'impactant et les pierres constitutives du sol (Figure 24). Bien que ce paramètre puisse avoir une influence plus importante lorsque les courbes granulométriques sont radicalement différentes (c'est à dire, pour des granulométries très resserrées ou très étendues), son influence peut être négligée dans un premier temps.

Enfin, la comparaison des prédictions obtenues pour des milieux de caractéristiques similaires composés soit de clumps soit de sphères montre que l'influence de la forme des particules sur les résultats doit absolument être intégrée car les différences entre les prédictions obtenues dans ces deux cas sont importantes (Figure 25).

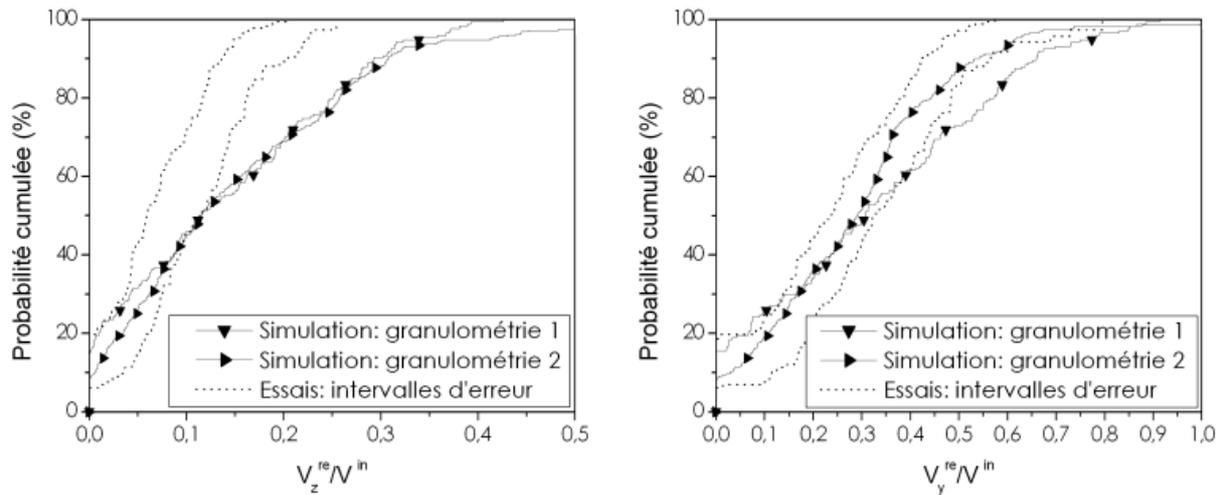


Figure 24. Influence de la granulométrie du sol impacté sur les prédictions par des simulations en grandeur réelle des fonctions de répartition des composantes normale V_z^{re} et tangentielle V_y^{re} adimensionnées par la vitesse incidente V^{in} .

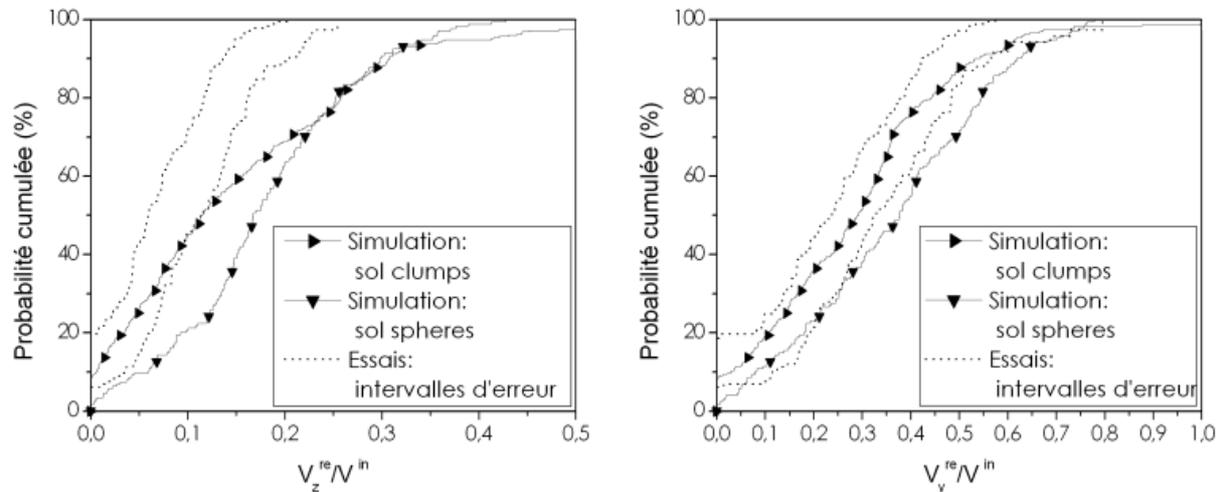


Figure 25. Influence de la forme des particules sur les prédictions par des simulations en grandeur réelle des fonctions de répartition des composantes normale V_z^{re} et tangentielle V_y^{re} adimensionnées par la vitesse incidente V^{in} .

Par conséquent, malgré la simplicité du critère de similitude utilisé, le modèle numérique en grandeur réelle développé permet d'assurer une représentativité correcte des essais à échelle réduite. Il est donc possible d'utiliser ce modèle numérique pour la simulation de l'impact d'un bloc rocheux sur un éboulis si certaines précautions sont prises. En particulier, la porosité du sol doit être calibrée et le rapport entre la taille de l'impactant et la taille des pierres constitutives du sol ainsi que la forme des particules doivent être clairement définis. Au contraire, la connaissance détaillée de la granulométrie du sol n'est, dans ce cas, pas déterminante.

5. Conclusion et Perspectives

Le financement accordé par le PGRN dans le cadre du programme de recherche 2007 a permis la réalisation d'une campagne d'essais d'impact à échelle réduite. Cette campagne d'essai est un élément essentiel du travail de recherche mené au Cemagref dans le cadre de la caractérisation du rebond d'un bloc rocheux sur un terrain naturel.

Cette campagne d'essais a tout d'abord conduit à l'obtention de résultats très intéressants concernant les aspects du rebond du bloc classiquement étudiés dans le contexte de l'analyse trajectographique. Les essais ont, en particulier, mis en évidence la forte variabilité des coefficients de restitution mesurés en fonction des caractéristiques locales du sol et de l'angle d'incidence. Par ailleurs, cette campagne d'essai a permis de fournir des résultats expérimentaux essentiels pour la calibration et la validation du modèle numérique d'impact par la Méthode des Eléments Discrets. Cette étude comparative a montré que l'utilisation du modèle numérique développé est pertinente pour prédire le rebond de l'impactant, étape indispensable notamment en vue de l'utilisation de ce modèle à des fins opérationnelles.

Les résultats de ce programme de recherche financé par le PGRN ont, par conséquent, clairement mis en évidence la pertinence loi stochastique d'impact développée en utilisant ce modèle numérique pour la caractérisation de la variabilité des vitesses réfléchies d'un bloc en fonction de sa vitesse incidente.

Suite à ce travail de validation, rendu possible par le financement accordé par le PGRN, la loi stochastique d'impact a été intégrée dans le logiciel d'analyse trajectographique 3D Rockyfor développé par Luuk Dorren (Dorren et al., 2004). Et, la pertinence de la procédure d'intégration de la loi a été étayée par la bonne adéquation entre les résultats d'essais en grandeur réelle menés au Cemagref de Grenoble et les prédictions d'une analyse trajectographique du site d'essais utilisant cette procédure.

Bien que la loi stochastique de rebond n'ait été intégrée que dans le logiciel Rockyfor, un protocole d'intégration de cette loi dans tout code de trajectographie classique est possible. Dans l'éventualité d'une telle intégration, l'ensemble des informations nécessaires à l'implémentation de la loi peuvent être mises à disposition des personnes intéressées.

Sur la base de cette procédure d'analyse trajectographique, une approche probabiliste de caractérisation de l'aléa de propagation des blocs a, enfin, été proposée. Cette approche est basée sur la connaissance, en tout point du site d'étude, de la probabilité de passage d'un bloc en fonction de la hauteur de passage des blocs et de l'énergie cinétique des blocs. Le traitement statistique de cette information conduit à la caractérisation probabiliste de l'aléa de chute de blocs ainsi qu'à l'optimisation du positionnement et du dimensionnement des ouvrages de protection.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour la quantification probabiliste de l'aléa de chute de blocs et le dimensionnement probabiliste d'ouvrages de protection. En particulier, il serait intéressant de compléter la méthodologie d'optimisation du positionnement et de la taille d'ouvrages de protection développée par le dimensionnement probabiliste de ces ouvrages de protection. Pour cela, l'approche probabiliste pourrait être couplée aux méthodes analytiques et numériques de calcul de la tenue des ouvrages de protection existantes. Cela permettrait de développer une méthode de dimensionnement probabiliste basée sur la

connaissance, grâce à l'approche développée dans ce travail, des distributions des conditions de sollicitation de ces ouvrages. L'objectif de cette méthode de dimensionnement probabiliste des ouvrages de protection serait de déterminer la probabilité de tenue des ouvrages lorsque les distributions des conditions de sollicitation leur sont appliquées.

6. Références

- Beladjine, D. 2007. Etude expérimentale du processus de collision d'une bille sur un empilement granulaire : application au mécanisme de saltation dans le transport éolien. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- Barton, N. and Kjaernsli, B. 1981. Shear strength of rockfill. *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE* 107(7) : 873–891.
- Bayes, T. 1763. Essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53: 370-418; 54: 296-325.
- Bourrier F., Nicot F., Darve F. 2007. « Rockfall modelling: Numerical simulation of the impact of a particle on a coarse granular medium. » *Proc. 10th Int. Congr. on Numerical Model in Geomechanics*, Rhodes, p. 699-705.
- Bourrier, F.; Nicot, F.; Darve, F. 2008a. Physical processes within a 2D granular layer during an impact., *Granular Matter* 10(6): 415-437.
- Bourrier, F.; Eckert, N.; Bellot, H.; Heymann, A.; Nicot, F.; Darve, F. 2008b. Numerical modelling of physical processes involved during the impact of a rock on a coarse soil. *Proc. 2nd Euro Med. Symp. On Advances in Geomaterial and Structures (Hammamet, Tunisia)*: (3) 501-506.
- Bourrier, F. 2008c. Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel. Application à la trajectographie des chutes de blocs. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble.
- Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29: 47-65.
- Dorren, L.K.A.; Maier, B.; Putters, U.S.; 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.
- Dudt, J.P.; Heidenreich, B. 2001. Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model of rockfalls. *International Conference on Landslides*, Davos: 507-514.
- Fratini, P.; Crosta, G.B.; Carrara, A.; Agliardi, F. 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*. 94 (3-4): 419-437.
- Guzzetti, F.; Crosta, G.; Detti, R.; Agliardi F. 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computer & Geosciences* 28: 1079-1093.
- Itasca Consulting Group. 1999. PFC2D User's manual. Minneapolis: Itasca.
- Krumbein, W. 1941. Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particules. *Journal of sedimentary petrology* 11 : 64–72.

- Marsal, J. 1973. *Mechanical properties of rockfill*. Embankment - dam engineering – Casagrande volume. J. Wiley & sons.
- Mindlin, R.D. & Deresiewicz, H. 1953. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *Journal of Applied Mechanics* 20: 327-344.
- Laouafa, S. and Nicot, F. 2003. Modélisation numérique de l'impact d'un bloc rocheux sur un sol composé d'éboulis. *Revue Française de Géotechnique* 109: 87-97.
- Rioual, F. 2002. Etude de quelques aspects du transport éolien : processus de saltation et formation des rides. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- Rittenhouse, G. 1943. A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology* 13 : 79–81.
- Spiegelhalter, D.J.; Thomas, A.; Best, N. 2000. WinBUGS Version 1.3 User Manual: MRC Biostatistics Unit.