HAL open science

Analyse des mécanismes d'interaction entre un bloc rocheux et un versant de propagation : application à l'ingénierie

Bruna da Silva Garcia

▶ **To cite this version:**

Bruna da Silva Garcia. Analyse des mécanismes d'interaction entre un bloc rocheux et un versant de propagation : application à l'ingénierie. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAI062 . tel-02445651

HAL Id: tel-02445651

https://theses.hal.science/tel-02445651

Submitted on 20 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : 2MGE : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie
Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Bruna Garcia

Thèse dirigée par **Pascal VILLARD**, **Professeur**, **Communauté Université Grenoble Alpes**

préparée au sein du **Laboratoire Sols**, **Solides**, **Structures et Risques**

dans l'**École Doctorale I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Énergétique, Procédés, Production**

Analyse des mécanismes d'interaction entre un bloc rocheux et un versant de propagation : application à l'ingénierie

Thèse soutenue publiquement le **19 novembre 2019**, devant le jury composé de :

François NICOT
Directeur de Recherche, IRSTEA Grenoble, Examinateur, (Président)

Alfredo TABOADA
Maître de Conférences, GéoSciences, Univ. Montpellier, (Rapporteur)

Luuk DORREN
Professeur, HAFL de Berne, (Rapporteur)

Marie Aurélie CHANUT
Ingénieure de Recherche, CEREMA, (Examinatrice)

Pierre PLOTTO
Docteur, Compagnie IMSRN, (Examinateur)

Pascal VILLARD
Professeur, Laboratoire 3SR, (Directeur de thèse)

Vincent RICHEFEU
Maître de Conférences, Laboratoire 3SR, Invité (Co-encadrant)

Dominique DAUDON
Maître de Conférences, Laboratoire 3SR, Invitée (Co-encadrante)

Remerciements

Les pages suivantes concernent mes 3 années de recherche effectuées au laboratoire 3SR en partenariat avec l'entreprise IMSRN. J'ai beaucoup réfléchi à la manière dont j'allais exprimer ma gratitude envers les gens qui m'ont aidé durant tout mon parcours jusqu'ici. C'est depuis 1989 que j'ai été aidée, motivée et supportée par plusieurs personnes venant de partout. Voici l'énorme liste de remerciements, qui peut être longue, mais extrêmement nécessaire : on ne me pardonnera jamais de ne pas avoir fait l'effort de me rappeler de tout le monde !

J'exprime d'abord mes remerciements aux membres du jury : M. Nicot, M. Dorren, M. Taboada et Mme Chanut, d'avoir accepté de lire et de juger ce travail de thèse, avec leurs remarques pertinentes durant les questions et les échanges que nous avions eus après la soutenance. Cela fut un plaisir d'entendre vos conseils et orientations, puisque c'est dans ces moments là qu'on arrive à voir et à tracer au plus clair nos objectifs professionnels. Je remercie également M. Plotto de m'avoir proposé ce sujet de thèse.

De même, j'exprime ma gratitude à mon directeur de thèse, Pascal Villard, qui m'a beaucoup aidé dans l'organisation et rédaction de ce mémoire et qui m'a orienté avec beaucoup d'assurance et humanité durant ces 3 années. Merci également à mon co-directeur de thèse, Vincent Richefeu, qui était toujours disponible pour me sauver des problèmes numériques, dans l'interprétation des résultats, pour m'avoir aussi aidé dans la rédaction de la thèse et de me montrer, qu'on peut toujours faire mieux. Je remercie également ma co-directrice Dominique Daudon, pour tous les échanges scientifiques (et pas que scientifiques), de nous avoir prêté plusieurs fois sa voiture personnelle pour aller faire tomber des cailloux, pour sa patience et volonté de toujours faire des choses intéressantes et de me montrer, même indirectement, qu'il est possible d'être femme dans un milieu encore très masculin. J'ai eu certainement de la chance d'avoir travaillé avec des gens très humains et très professionnels. Qui peut se permettre d'avoir côtoyé des gens pareils de nos jours ? C'est un privilège, merci ! Un grand merci au personnel du laboratoire 3SR et également aux collègues d'IMSRN, avec qui j'ai pu échanger au long de ces années sur plusieurs sujets pour mieux comprendre le domaine des risques naturels ainsi que les besoins techniques du métier.

Gostaria agora de agradecer à minha família, e não poderia ser de outra forma, vai ter que ser em Português. Muito obrigada aos meus pais, que são mais do que apenas pai e mãe, mas meus amigos ! Obrigada por me ensinarem tudo o que sei, a respeitar as pessoas, a querer evoluir sem precisar passar por cima de ninguém, por me ensinarem valores importantíssimos que nos damos conta apenas quando ficamos mais velhos : paciência, respeito, honestidade, amizade, compreensão. Obrigada Nelson

e Daisy, por terem me ajudado a sonhar e me darem condições para continuar lutando pelos meus sonhos. Obrigada também ao meu irmão Bruno e minha cunhada Patrícia, que são também mais que irmãos : são meus amigos, apoiadores, pessoas lutadoras, boas, felizes ! Amo vocês e minha gratidão é eterna !

Muito obrigada aos meus amigos do Brasil, que mesmo distantes se fazem presentes todos os dias ! Karen, Vanessa Mie, Gabriel, Coxinha, Rafael Fontebasso, Tiffany, Thaisa, Felipe Correa, Vanessa Botelho... Aos meus professores e amigos do Departamento de Engenharia Civil da FEG, George, Nélio, Ana Cláudia... e à tantos outros que fizeram parte da minha formação, pois o campus de Guaratinguetá é um campus pequeno onde os professores e demais pessoas que lá trabalham são acessíveis e parceiras.

....se eu esqueci de alguém peço mil desculpas !

Je tiens également à remercier ces personnes magnifiques que j'ai rencontrées au 3S, à IMS, à l'université, etc... : Hala Damerji, Andria Antoniou, Imane Salama, Alice Bernard, Pedro Hasselmann, João Mussi, Caroline Forestti, Steph Chaussade, Gabriel Mineiro, Gabriela Morosanu, Thibault Rémy, Pablo Pagotto, Thiago, Viviam Moura, Thibaud Syre, Ismail Benessalah, Zeinab Ftouni, Sholpan Sumbekova, Pollyanna Rodrigues, Marcus Moravia, Eduardo Mesquita, Elisa Grange, Estelle Durand, entre autres.

J'exprime toute ma gratitude à Damien Bessenay et à ses parents : Christine et Gilles pour leur patience, amitié et pour leur présence lors de ma soutenance. Damien, merci d'avoir été là pour moi, pour ton dévouement, d'être toujours à l'écoute, de m'avoir soutenue et motivée ! Ta présence fut essentielle dans cette période, je ne te remercierai jamais assez. Je t'aime ! Merci également à Mira, qui ne pourra jamais lire ce mémoire (sauf si les chiens apprennent à lire et à parler un jour), dont la présence et joie m'ont aidée à traverser la dernière ligne droite de la rédaction de ce manuscrit, que ce soit à travers nos diverses aventures au bord de mer ou à la montagne !

I stand
on the sacrifices
of a million women
before me
thinking
what can I do
to make this mountain taller
so the women after me
can see farther

Rupi Kaur
(The Sun and Her Flowers)

“My favourite road sign is 'Falling Rocks'. What exactly am I supposed to do with that information? They may as well have a sign saying ‘Random accidents ahead. Life's a lottery. Be lucky.’”
VIA 9GAG.COM

Résumé

De nombreuses incertitudes liées aux mécanismes d'interaction entre les blocs rocheux et le versant naturel lors des chutes de blocs persistent ; la prévision de tels événements reste de ce fait encore incertaine. Néanmoins, les outils numériques et la puissance de calcul ne cessent d'évoluer. Si, auparavant, les calculs trajectographiques étaient restreints à des géométries simplifiées et à des mouvements balistiques en deux dimensions, il devient désormais possible d'y intégrer des raffinements tels que la forme complexe des blocs, des modèles numériques tridimensionnels de terrain d'une grande définition ou une prise en compte fine des mécanismes dissipatifs au niveau du point d'impact entre le bloc et le versant de propagation. L'objectif principal de la thèse est d'analyser, avec un code numérique discret en trois dimensions, l'influence des paramètres de forme et d'interaction sur la nature du rebond dans un contexte d'ingénierie. Nous présentons tout d'abord une méthodologie d'identification et d'étude de sensibilité des paramètres de contact, élaborée et validée à partir d'expérimentations de laboratoire. Cette méthodologie a été appliquée par la suite à deux expérimentations de chute de blocs menées sur sites réels à moyenne et à grande échelle. L'étude réalisée à moyenne échelle a permis de confronter le modèle numérique à des données obtenues lors d'une campagne expérimentale sur voies ferroviaires commanditée par la SNCF et menée en collaboration avec IRSTEA. Les analyses qui ont été réalisées ont porté sur les vitesses d'impact des blocs avec le ballast et les distances de propagation. L'étude menée à grande échelle s'appuie sur plusieurs séries de lâchés de blocs réalisées sur le site expérimental de la carrière d'Authume dans le cadre d'un Benchmark proposé dans le cadre du Projet National C2ROP. L'objectif principal du Benchmark est de tester et de comparer entre eux des logiciels trajectographiques, des codes de calculs numériques et les pratiques d'ingénierie pour en définir la pertinence et les domaines de validité. Dans le cadre de la thèse, ce travail a été conduit en plusieurs phases (à l'aveugle puis avec des données partielles mesurées lors de la campagne d'essais) et nous présentons l'évolution de ces analyses à l'issue de chacune des phases. L'étude a porté principalement sur les vitesses, les hauteurs et les énergies de passage des blocs en certains points du profil de propagation, ainsi que sur les positions d'arrêt des blocs. Une étude sur l'influence de la forme des blocs sur les distances de propagations est également présentée. Enfin, un Benchmark interne réalisé au sein de l'entreprise IMSRN montre l'importance, sur les analyses, de l'expertise de l'opérateur, et des conséquences de l'utilisation de différents outils trajectographiques (en 2D et en 3D). Ces travaux mettent en lumière les problématiques actuelles auxquelles sont souvent confrontés les bureaux d'études et les ingénieurs en charge des études de risques.

Préambule

Les chutes de blocs isolés ou les éboulements en masse de petits volumes sont des évènements de plus en plus fréquents dans le contexte actuel du changement climatique. Les enjeux économiques résultants de la fermeture des routes ou de l'arrêt de certaines activités économiques peuvent être importants et l'impact sur les populations ou le bâti sont parfois dramatiques. La prévision de tels évènements et notamment la propagation d'un bloc isolé ou d'un mouvement en masse reste très incertaine compte tenu des méconnaissances actuelles sur les mécanismes d'interaction entre les blocs et le versant naturel ou entre les blocs eux mêmes lors d'une propagation en masse. Cette étude s'appuie sur des travaux, initiés lors d'un partenariat entre le bureau d'études IMSRN et le laboratoire 3SR, qui ont débouché sur la mise au point d'un code de calcul par éléments discrets, dédié à l'analyse de la propagation des blocs rocheux de faible volume. Son intérêt est qu'il permet d'intégrer des géométries des blocs et des modèles numériques de terrain très réalistes et de prendre en considération des mécanismes dissipatifs à chaque impact entre le sol et le versant de propagation. Les verrous scientifiques qui restent à lever sont liés à la détermination et à l'estimation des paramètres dissipatifs d'interaction entre les blocs et le versant qu'il convient d'analyser plus finement. Parmi les paramètres les plus difficiles à appréhender ou calibrer on peut citer les paramètres de la loi de résistance au roulement ou ceux liés aux mécanismes de dissipation d'énergie. Ce travail de thèse s'appuie sur la caractérisation des paramètres de contact basés sur des essais expérimentaux réalisés à petite, moyenne et grande échelle. Il est divisé de la manière suivante :

Chapitre ❶. Introduction au contexte de l'étude trajectographique et l'état de l'art : Dans ce chapitre nous abordons rapidement l'historique des cas les plus remarquables de chute de bloc et de mouvements en masse et des cas réels plus récents de l'histoire. D'une manière globale, nous introduirons les approches classiques de trajectographie les plus utilisées actuellement en bureaux d'études.

Chapitre ❷. Modèle numérique discret de modélisation en deux et trois dimensions de la propagation de la chute des blocs isolés. Ce chapitre détaille l'approche numérique utilisée dans les simulations. Elle décrit les lois de dissipation d'énergie et les dernières mises à jour effectuées dans le cadre de cette thèse et – surtout – pourquoi nous allons utiliser cette méthode, les avantages et désavantages de son application aux mouvements gravitaires.

Chapitre ❸. Essais expérimentaux à petite échelle. Ce chapitre concerne la réalisation des essais expérimentaux en laboratoire, en utilisant une rampe métallique inclinée. Cette rampe a été conçue pour que des petits blocs académiques, lâchés dans

des conditions bien contrôlées, puissent rouler sans glisser sur une rampe qui les accélère autant en vitesse de translation qu'en rotation, en leur faisant toucher un bac rempli de matériau granulaire. Deux géométries régulières ont été testées lors de ces essais : un bloc cylindrique puis un autre triangulaire. À l'aide d'une caméra rapide, la trajectoire des blocs a pu être reconstruite à partir d'un repérage visuel des points sur chaque *frame* des vidéos enregistrées, puis les vitesses de translation et de rotation ont été estimées indirectement à partir du calcul de la dérivée de la courbe de position en fonction du temps. L'objectif final de ces essais est de parvenir à caractériser un jeu de paramètres de contact ou une fourchette de valeurs qui reproduise au mieux le rebond sur du sable fin ; puis de tester les distributions identifiées de ces paramètres, en les faisant appliquant à un couplage mécano-probabiliste (DEM – Monte–Carlo). Une analyse de sensibilité de première et deuxième ordre basée sur les rapports de variance entre les variables d'entrée et de sortie (Sobol) a donnée comme résultat l'identification des paramètres qui affectent chacune des réponses fournies par ce modèle déterministe.

Chapitre ❹. Essais expérimentaux à moyenne échelle : campagne d'essais de la SNCF. Les essais présentés dans le chapitre 4 concernent une campagne d'essais expérimentaux organisée par la SNCF en collaboration avec l'IRSTEA sur une portion de voie ferrée désactivée dans le Massif Central. L'idée était d'estimer les vitesses d'avant impact sur le ballast sur une voie ferrée et de parvenir à quantifier le pourcentage de blocs qui atteignent les rails à partir du lancer exhaustif de 100 blocs depuis le sommet de deux profils rocheux représentatifs. Les blocs lancés ont des géométries rectangulaires et ont été lancés depuis différents axes d'inertie. La méthode d'identification des paramètres de contact décrite dans le chapitre 3 a été appliquée. Une étude paramétrique sur l'effet de la variation du couple de paramètres $\mu - \mu_R$ a été également faite.

Chapitre ❺. Essais expérimentaux à grande échelle : Projet National C2ROP. Dans ce dernier chapitre, la capacité prédictive du code a été testée lors du Benchmark « logiciels trajectographiques » proposé dans le cadre du projet national C2ROP initié en 2015 (Chutes de blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection) qui donne lieu à des mesures précises de la trajectoire, des vitesses et de la déposition finale de blocs lors de leurs propagations sur un site réel. Les données récoltées permettent d'une part d'obtenir des informations cruciales pour justifier ou valider l'emploi des paramètres obtenus pour simuler d'autres évènements gravitaires sur des sites de géométrie et de configuration similaires et, d'autre part, de tester la sensibilité du code numérique vis à vis des différentes configurations de départ telles que la forme réaliste du bloc, la caractérisation du bloc en fonction de ses dimensions (coefficient de forme), le point de départ et la répartition du terrain dans des différentes zones dissipatives. Les distances d'arrêt et les déviations latérales sont également abordées. Un Benchmark interne réalisé au sein de l'entreprise a rendu possible l'évaluation de l'effet du changement de l'opérateur qui effectue le calcul trajectographique et de son expérience sur le résultat final.

Table des matières

1 Contexte et état de l'art **31**
1.1 Contexte . . . 31
1.1.1 Quelques précisions sur les notions d'aléa, d'enjeu et de risque . 37
1.2 État de l'art . . . 38
1.2.1 Modèles trajectographiques . . . 39
1.2.2 Approches empiriques . . . 43
1.2.3 Approches numériques . . . 46
1.2.4 Coefficients de restitution (CoR) . . . 51
1.2.5 Dispersion latérale . . . 55
1.3 Dimensionnement . . . 59
1.4 Trajectographie : une discipline complexe ? . . . 63

2 Modélisation par éléments discrets **67**
2.1 Synthèse des aptitudes de Rockable . . . 68
2.1.1 Formes explicites des blocs . . . 68
2.1.2 Propriétés massiques des sphéro-polyèdres (SP) . . . 68
2.1.3 Mouvement des blocs . . . 70
2.1.4 Modèle dissipatif de contact/collision . . . 72
2.2 Nouvelles fonctionnalités de Rockable . . . 74
2.2.1 Algorithme de détection des blocs voisins . . . 74
2.2.2 Pondérations des forces-multiples d'un même contact . . . 77

3 Essais à petite échelle **79**
3.1 Essais expérimentaux . . . 82
3.1.1 Rampe métallique . . . 82
3.1.2 Blocs projectiles . . . 83
3.1.3 Reconstruction des trajectoires expérimentales . . . 85
3.1.4 Résultats expérimentaux . . . 86
3.2 Sources d'erreurs et d'incertitudes . . . 91
3.2.1 Subjectivité des opérateurs . . . 92
3.2.2 Distorsion induite par le système optique . . . 92
3.2.3 Analyse des erreurs relatives au traitement des images . . . 93
3.2.4 Remarques sur les mesures de trajectoires . . . 95
3.3 Détermination des paramètres numériques de collision . . . 97
3.4 Méthode Monte-Carlo . . . 99
3.5 Analyse de sensibilité . . . 102
3.6 Conclusions . . . 105

4 Essais à moyenne échelle **107**
4.1 Introduction 107
4.2 Méthodologie 109
4.3 Modèles numériques 3D de la topographie 112
4.4 Analyse des résultats expérimentaux 112
4.5 Résultats des simulations numériques 114
4.6 Étude paramétrique 121
4.7 Conclusion 125

5 Essais à grande échelle **129**
5.1 Présentation du site expérimental, des protocoles expérimentaux et des procédures numériques 131
5.1.1 La carrière d'Authume 131
5.1.1.1 Géométrie du site et description de la procédure de lâcher de blocs 131
5.1.1.2 Reconstruction photogrammétrique & maillage numérique 133
5.1.2 Caractéristiques des blocs utilisés pour la campagne expérimentale 134
5.1.2.1 Géométrie et forme des blocs 134
5.1.2.2 Reconstruction numérique des blocs 140
5.1.3 Méthodologie, analyse et traitement des données 143
5.2 Présentation des résultats expérimentaux 143
5.2.1 Résultats expérimentaux fournis à l'issue de la Phase 1 du Benchmark 144
5.2.2 Analyses des résultats expérimentaux fournis à l'issue de la Phase 2 du Benchmark 145
5.2.2.1 Caractéristiques des zones de dépôt et probabilité de passage par les écrans 145
5.2.2.2 Influence de la forme des blocs sur les positions d'arrêt 147
5.2.2.3 Influence de la masse des blocs sur les distances de propagation 151
5.2.2.4 Influence de la forme des blocs sur la déviation latérale des trajectoires 151
5.2.2.5 Vitesses de passage des blocs lors du franchissement des écrans 153
5.3 Résultats des simulations numériques 155
5.3.1 Déroulement du Benchmark 155
5.3.2 Paramètres et hypothèses de calcul 155
5.3.2.1 Paramètres d'interaction 155
5.3.2.2 Géométries des blocs numériques 156
5.3.2.3 Orientation de départ des blocs 156
5.3.2.4 Zonage des propriétés de terrain 157
5.3.3 Résultats transmis aux organisateurs du Benchmark à l'issue de la Phase 1 158
5.3.4 Analyses et réflexions menées lors de la Phase 2 du Benchmark . 158
5.3.5 Étude paramétrique réalisée après la Phase 2 du Benchmark C2ROP – Zonage C 163

5.3.5.1 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num2A – Zonage C 165
5.3.5.2 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num1A – Zonage C 168
5.3.5.3 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num2B – Zonage C 171
5.3.5.4 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num3A – Zonage C 174
5.3.5.5 Influence de la forme et de la taille des blocs sur les distances de propagation - Zonage C 177
5.3.5.6 Influence de la forme des blocs sur la déviation latérale - Zonage C 179
5.3.5.7 Influence des conditions initiales de largage des blocs sur leurs trajectoires - Zonage C 181
5.4 Contribution Interne de IMSRN au Benchmark C2ROP 184
5.4.1 Introduction 184
5.4.2 Résultats synthétiques et comparaison entre les différents logiciels et opérateurs 185
5.4.3 Dimensionnement des écrans 190
5.4.4 Remarques et discussion 191
5.5 Conclusions et perspectives 195

Conclusions générales **197**
5.6 Remerciements 202

A Résultats Expérimentaux **203**

B Photogrammétrie **207**

C Résultats des simulations C2ROP **211**
C.1 Écran EC11 212
C.2 Écran EC12 213
C.3 Écran EC21 214
C.4 Écran EC22 215

D Influence des conditions initiales de largage des blocs **217**

E Déviation latérale des blocs numériques **219**

Références **230**

Table des figures

1.1 En 2013, les chutes de pierres représentent 19% du total des phénomènes de mouvements de masse. (Répartition des mouvements de terrain survenus en France sur la période 1900-2011). 32
1.2 Mouvements de terrain graves recensés en France depuis 1248. (SDES, 2014). 33
1.3 Extrait de la bande dessinée Le Labo par [Duhoo, 2010]. 33
1.4 Note sur l'accident produit à la carrière de la Porte de France. Fort heureusement, aucune victime n'a été déplorée suite à cet évènement. Source : [BRGM, 1873] 34
1.5 Les communautés de A) São Sebastião et B) Morin (Rue Otto Reymarus) à Petropolis, état de Rio de Janeiro. Blocs rocheux instables et sol résiduel peu épais. Source : [Dutra, 2015] 35
1.6 Éboulement rocheux du mont "Boa Vista" à Vila Velha, Brésil. 36
1.7 Éboulement rocheux de l'autorote I-70 aux États-Unis - Glenwood Springs (Colorado) (Département de Transports de l'état du Colorado - 2019). . 37
1.8 Récapitulatif des principaux termes liés à la notion d'aléa, d'enjeu et de risque [Dequincey, 2017]. 38
1.9 Distribution des fréquences cumulées en fonction du volume (m^3) rocheux mobilisé dans la région de Grenoble : 87 évènements enregistrés sur une extension de falaise calcaire d'environ 120 km dans la période comprise entre les années 1935 et 1995. [Dussauge-Peisser *et al.*, 2002] . 40
1.10 Zones typiques d'une région où l'évènement de chute de blocs est présent : (a) Zone de départ (source) (b) Zone de transition, et (c) Zone de dépôt. Adapté de [Dorren *et al.*, 2011]. 41
1.11 Prévalence des mécanismes de roulement, rebond ou de chute libre en fonction de l'inclinaison de la pente de propagation. Adapté de [Bar *et al.*, 2016] *apud* [Ritchie, 1963]. Source : `http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_rockfall_diag.htm`. 42
1.12 Définition des angles α, β, *Fahrböschung* et *Shadow angle* sur un profil type de propagation d'un bloc selon les différentes approches empiriques de la littérature. Adapté de [Massey *et al.*, 2012] 44
1.13 Configuration de versant où la méthode géométrique de la ligne d'énergie n'est plus applicable. [Mazet-Brachet, 2018] 46
1.14 Types de modèles utilisés pour la modélisation de la chute de blocs selon Kobal & Zabota [2018] 46

1.15 Représentation schématique de la projection d'une trajectoire 2.5D (pseudo-3D) : le vecteur des vitesses avant impact sont liées au plan incident $\boldsymbol{V}_- = \{V_{n-}, V_{n-}, \omega_-\}$ (vitesses incidentes) ; et le vecteur des vitesses après impact sont liées au plan réfléchi $\boldsymbol{V}_+ = \{V_{n+}, V_{t+}, \omega_+\}$ (vitesses réfléchies), qui sont fonction de l'angle d'impact avant α_- et après α_+ rebond. Adapté de Volkwein *et al.* [2011]. 48

1.16 La figure en haut montre les forces résultantes sur un bloc rocheux lors de sa propagation par un profil type, en deux dimensions. Nous pouvons par la suite distinguer : (1) Approche "point matériel" (*Lumped Mass*), sans prise en compte de la forme, ni de la rotation ; (2) Approche Hybride : ici on distingue la trajectoire avant impact du bloc, considéré comme un point matériel, puis lors de la collision le bloc a sa vraie géométrie ; (3) Approche de corps rigide avec détail de la forme, contenant ou pas le réseau de fracturation. Adapté de [Masuya *et al.*, 2009] *apud* [Chen *et al.*, 2013]. 49

1.17 Effet de la forme des blocs sur une pente de propagation type. [Chen *et al.*, 2013] 50

1.18 Effet de forme de l'approche DDA en deux et trois dimensions [Chen *et al.*, 2013]. 50

1.19 Différents logiciels trajectographiques existants – Adapté de [Guzzetti *et al.*, 2002]*apud* [Volkwein *et al.*, 2011]. 51

1.20 Valeurs caractéristiques des coefficients de restitution dans les directions normales (e_n) et tangentielles (e_t). Adapté de [Chau *et al.*, 2002]. . . . 54

1.21 Méthode de calcul de la dispersion latérale à partir de l'extension de la méthode de la ligne d'énergie – Logiciel Rollfree [Toe & Berger, 2015] Adapté de [Mazet-Brachet, 2018]. 56

1.22 Méthode empirique proposée dans Massey *et al.* [2012]. 56

1.23 Méthode d'estimation de la dispersion latérale "pseudo-3D" en utilisant la méthode du *Shadow Cone* [Jaboyedoff *et al.*, 2005]. Les zones en rouge, bleu et jaune affichent la probabilité d'occurrence en termes d'énergie de propagation, qui fait appel au *zonage de danger* suisse. Ces données probabilistes sont utilisées dans les codes de calcul de type stochastique. 57

1.24 Méthode d'estimation de la dispersion latérale en fonction de l'étalement (L) et de la longueur maximale d'atteinte (S) d'un bloc. L'angle β est l'éventail de l'ouverture du cône [Masuya *et al.*, 2009]. 57

1.25 Probabilité de propagation d'un bloc dans la ligne de plus grande pente (*Slope Aspect*) [Dorren *et al.*, 2006]. 58

1.26 Solutions de dimensionnement en fonction des zones (a) Zone de détachement, (b) Zone de transit et d'impact et (c) limite de la zone à risque. Adapté de [Green, 2016]. 60

1.27 À gauche, un exemple de protection active appliquée à un massif instable (ancrages) ; à droite, un schéma représentatif d'un ouvrage passif (merlon) qui piège les blocs avant l'enjeu [Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), 2012]. 61

1.28 Filet de protection flexible après éboulement rocheux dans le Val d'Hérens, près d'Evolène (Suisse). La zone est suivie depuis très longtemps, et présentait récemment des mouvements excessifs. Grâce à un système d'alerte, la population a reçu l'alerte suite à l'évènement en détectant la rétention par l'ouvrage d'un bloc d'environ 20 mètres cubes. 62

1.29 Capactité des structures de protection passives en fonction de l'énergie de l'impact selon Descoeudres [1997]. 62

1.30 Mécanisme de rupture plane 2D d'un ouvrage type Merlon par Durville *et al.* [2010]. 63

2.1 Modèle géométrique sphéro-polyédrique d'une pierre scannée par la technique de photogrammétrie. Concrètement, un sphéro-polyèdre est un assemblage rigide de 3 formes : des sphères pour les sommets, des tubes pour les arrêtes, et des polygones pour les faces. Le processus de reconstruction de cet objet, à partir de photographies, est décrit dans l'Annexe B). 68

2.2 Configurations élémentaires pour gérer tout contact multiple entre deux sphéro-polyèdres quelconques (convexe, concave ou même évidé) dans Rockable. 69

2.3 Illustration des lois de contact pour : (a) la force normale f_n, (b) la force résistance tangente à f_n constant, et (c) le moment résistant à f_n constant. Les raideurs respectives k_n, k_t, k_r, ainsi que les paramètres de dissipation e_n^2, μ et μ_R y sont représentés. Les zones grisées représentent le travail des différentes forces jusqu'au moment où le contact est subitement perdu. 72

2.4 Illustration bidimensionnelle de l'emploi des boîtes englobantes de type (a) AABB ou (b) OBB. Les limites en pointillés correspondent aux boîtes les plus resserrées sur la forme, et les limites en traits pleins correspondent à leurs dilatations à une distance D_v (ou d_v pour les sous-éléments). Lorsque deux boîtes de lignes pleines se chevauchent, les sphéro-polyèdres sont désignés comme étant "proches". Cette image montre que, même si les positions relatives des objets et les distances de dilatation sont les mêmes, ils sont déclarés à tort comme étant proches avec des AABB, alors qu'ils ne le sont pas avec les OBB. 75

2.5 Stratégie de détection des éléments voisins selon la stratégie *linked-cells*. Le test de proximité de l'élément rouge dans la cellule (i, j) n'est réalisé qu'avec les éléments verts appartenant aux 9 cellules allant de $(i-1, j-1)$ à $(i+1, j+1)$. 76

2.6 Exemple d'arbre binaire *OBB* de profondeurs (a) 0, (b) 3, (c) 6 et (d) 12. 77

3.1 Schéma de la rampe métallique avec les dimensions caractéristiques (dispositif conçu et réalisé par G. Vian au Laboratoire 3SR). 82

3.2 Vue d'ensemble du dispositif expérimental lors d'un essai. L'inclinaison θ de la rampe peut varier entre 30 et 60 degrés. Un appareil photo numérique de type reflex (DLSR) est positionné au pied de la rampe pour obtenir des photographies du bloc lors de l'impact avec le sol d'une qualité suffisante pour permettre leurs traitements. L'appareil photo est positionné suffisamment loin du point d'impact pour limiter (1) la distorsion "grand angle" de l'objectif, et (2) les effets de vibration qui peuvent affecter la qualité des images. 83

3.3 Géométries des blocs utilisés lors des essais expérimentaux - Blocs cylindrique et triangulaire, de masses respectives 13.9 kg et 10.89 kg. Les inerties des blocs par rapport à leur axe de rotation valent respectivement 44.5 $\mathrm{g\,m^2}$ et 38.3 $\mathrm{g\,m^2}$. Les côtes présentées sur la figure sont données en millimètres. 84

3.4 Capture écran des expérimentations : (a) bloc triangulaire et (b) bloc cylindrique. 84

3.5 Repères tracés sur un bloc cylindrique – procédure de pointage d'un point excentrique et du centre de masse du projectile (capture d'enregistrement vidéo d'un essai expérimental). 85

3.6 Reconstruction de la trajectoire d'un bloc. (A) Localisation des vitesses d'intérêt. (B) Identification des trajectoires avant et après collision (respectivement rouges et bleues) illustrées ici sur une courbe d'évolution temporelle de l'altitude du centre d'un bloc. 85

3.7 Trajectoire du centre de masse : la zone grisée correspond au moment où le bloc entre en contact avec le sol ; (a) Évolution de la position avant (-) et après l'impact (+) d'un bloc sur l'axe horizontal X (sens positif depuis l'origine au moment de l'impact) ; (b) Évolution pour la position verticale (sens de l'axe Y positif) et (c) Évolution de la position angulaire dans le temps par rapport à l'axe de rotation (Axe Z, positif dans le sens anti-horaire). On notera que dans (b), la ligne pointillée délimite un référentiel horizontal égal à 0.08 m ce qui correspond au rayon du bloc dans le cas d'un bloc cylindrique. La notion de contact est établie à partir de considérations géométriques basées sur la distance entre le centre de gravité du bloc et l'horizontalité du sol. 86

3.8 Distributions cumulées des vitesses de rebond pour les 28 et 31 lâchers de blocs respectivement cylindriques et triangulaires. Les symboles évidés correspondent aux vitesses incidentes (V_{x-}, V_{y-} et ω_-) et les symboles pleins aux vitesses réfléchies (V_{x+}, V_{y+} et ω_+). Les graphiques du haut correspondent aux résultats obtenus pour les cylindres. Ceux du bas correspondent aux triangles. Les points rouges signalent les lâchers pour lesquels $V_{x-} > 3.5$. Les courbes vertes correspondent aux vitesses réfléchies prédites par le modèle cinématique de rebond (Équation (3.2)) avec les paramètres du Tableau 3.2. Les vitesses de translation sont données en mètres par seconde (m/s) et les vitesses de rotation en radians par seconde (rad/s). 88

3.9 Distributions cumulées des vitesses de rebond en faisant la distinction entre les deux configurations d'incidence des blocs triangulaires : incidences les plus lentes (figures du haut) et les plus rapides (figures du bas). Les symboles évidés correspondent aux vitesses incidentes (V_{x-}, V_{y-} et ω_-) et les symboles pleins aux vitesses réfléchies (V_{x+}, V_{y+} et ω_+). Les courbes vertes correspondent aux vitesses réfléchies prédites par le modèle cinématique de rebond (Equation (3.2)) avec les paramètres du Tableau 3.2. Les vitesses de translation sont données en mètres par seconde (m/s) et les vitesses de rotation en radians par seconde (rad/s). 91

3.10 Illustration des distorsions typiquement rencontrées. 93

3.11 Distributions cumulées des vitesses incidentes (graphiques du haut) et des vitesses réfléchies (graphiques du bas) pour les éprouvettes cylindriques en fonction de l'opérateur et de la correction des images. Cercles évidés (opérateur #1, images non corrigées), cercles noirs pleins (opérateur #2, images non corrigées), et cercles gris pleins (opérateur #2, images corrigées). Les vitesses de translation sont données en m/s et les vitesses de rotation en rad/s. 95

3.12 Vitesses moyennes incidentes (-) et réfléchies (+) mesurées par les opérateurs à partir d'images corrigées ou non pour les éprouvettes cylindriques. Barres gris clair (opérateur #1, images non corrigées), barres blanches (opérateur #2, images non corrigées), et barres gris foncé (opérateur #2, images corrigées). Les symboles ✓ ou ✗ indiquent si les distributions des données obéissent à la même loi statistique selon le test de Kolmogorov-Smirnov, lorsque l'une des distributions concerne les images corrigées. 96

3.13 Capture d'écran d'un enregistrement vidéo pour un essai réalisé avec un bloc triangulaire. Les repères sont difficilement visibles, ce qui pousse l'opérateur à réaliser la procédure de pointage à la souris de manière approximative. 96

3.14 Configurations initiales, au début de chaque simulation DEM, identifiées sur les vidéos expérimentales pour les blocs : (a) cylindrique et (b) triangulaire. Les vitesses initiales sont les vitesses incidentes ($V_0 = V_{(-)}$, $\omega_0 = \omega_{(-)}$). L'angle incident $\alpha_{(-)}$ correspond à l'inclinaison du bloc triangulaire par rapport au plan horizontal mesuré sur les images. La hauteur initiale $Y_{(-)}$ est choisie pour avoir un écart bloc-sol positif et quasiment nul. 98

3.15 Schéma de l'application de la méthode de Monte-Carlo. Chaque variable d'entrée $\boldsymbol{\mathcal{Y}} = \{e_n^2,\ \mu,\ \mu_R\}$ est tirée d'une distribution probabiliste $P_{\mathcal{Y}}$ connue. Elles servent de paramètre mécanique de dissipation au modèle DEM de collision (déterministe). Il en résulte des variables de sortie, ici $\boldsymbol{\mathcal{Z}} = \{V_{x+},\ V_{y+}, \omega_+\}$, distribuées selon des distributions probabilistes $P_{\mathcal{Z}}$ sans *a priori*. Le nombre N de simulations est de 50 000. 100

3.16 Distributions de fréquence cumulées des paramètres identifiées par l'opérateur #2 (optimisation) comparées aux distributions uniformes retenues. 101

3.17 Distributions de fréquences cumulées (CDF) des vitesses réfléchies pour les blocs cylindriques. 101

3.18 Distributions cumulées des vitesses réfléchies obtenues par simulations DEM– Monte-Carlo à partir de deux fonctions de distribution différentes du paramètre d'entrée μ : la distribution GEV (courbe grise) sensée mieux représenter la distribution de μ, une distribution uniforme (courbe noire). 102

3.19 (a) Indice de Sobol de premier ordre et (b) Indice de Sobol de deuxième ordre pour le bloc cylindrique. 104

3.20 Indice total de sensibilité de Sobol (ST). Matrice 3×3 affichant les valeurs de la contribution de chaque paramètre de dissipation sur chaque donnée de sortie. 104

4.1 Trajectoire d'un bloc après lâcher. Le bloc effectue plusieurs rebonds et s'arrête définitivement après 3.3 s. 108

4.2 Géométrie des blocs B1 et B2. 109

4.3 Positions initiales des blocs avant lâcher référencées 1, 2 et 3. Les trois dimensions principales sont désignées L_1 (plus grande dimension du bloc), L_2 (dimension intermédiaire) et L_3 (dimension la plus petite) : $L_1 > L_2 > L_3$. 110

4.4 Dispositif de lancement utilisé pendant les essais expérimentaux. Les blocs sont en contact avec la porte métallique qui s'ouvre mécaniquement sous le poids des blocs. L'angle d'inclinaison initiale des blocs par rapport au plan horizontal (θ) est de 60 degrés. 111

4.5 Transformation du nuage de points initial en Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le nuage de points de base présente une densité d'environ 2 millions de points (a). Le maillage est reconstruit par la méthode de Poisson (Kazhdan & Hoppe [2013]) (b). Un plan horizontal ajouté au pied du talus rocheux sert d'extension au ballast (c). Les rails sont générés numériquement en fonction de leur géométrie exacte et implantés au bon endroit grâce au nuage de points initial. 112

4.6 Positions d'arrêt des blocs : les points bleus caractérisent les blocs de type B1 (les plus petits et positionnés verticalement lors du lâché – Position 1) et les points rouges correspondent aux blocs de type B2 (les plus volumineux et positionnés à plat lors du lancement – Position 2). La distance maximale entre la position d'arrêt des blocs et la position de départ P est d'environ 6.52 m alors que l'éloignement maximal du bloc avec la paroi rocheuse après arrêt est de 2.45 m. L'étalement maximal du dépôt dans le plan XZ est de 1.90 m. La direction de largage des blocs est donnée par la flèche rouge (direction de l'axe X positif). . . . 114

4.7 Modèle numérique de terrain et conditions initiales de lancer du bloc B1 (Configuration 1) pour le profil P2 sur Rockable. 115

4.8 Exemple de capture vidéo utilisée lors de l'optimisation des paramètres de contact entre le bloc et le ballast. 115

4.9 Exemple de cinématique et de position d'arrêt du bloc B1 - Configuration de lancer 1. 116

4.10 Trajectoires du bloc B1 – Position 1 pour différentes valeurs du couple μ et μ_R tel que défini dans le Tableau 4.5. On notera que certaines trajectoires dépassent les limites du maillage qui définit la surface du terrain. 117
4.11 Différentes géométries d'impact du bloc B1 lâché suivant la configuration de départ 1. Certains mécanismes spécifiques ont été observés lors de l'impact : A) Le bloc s'enfonce et roule sans glisser. B) Le bloc glisse excessivement avec des distances de propagation supérieure à 30 cm. . . 118
4.12 Les *HeatMap* représentent l'effet de la variation du couple $\mu - \mu_R$ sur la distance de propagation dx dans la direction de l'axe X (distance horizontale). Sur la Figure (a) μ varie de 0.001 à 0.6 et μ_R de 0.001 à 0.2. Ces valeurs, issues du Tableau 4.5, correspondent aux valeurs proposées pour les distributions uniformes du chapitre 3. Sur la Figure (b), les valeurs des paramètres μ et μ_R varient de 0 à 1. L'échelle de couleur présentée à droite caractérise la distance parcourue par le centre de masse du bloc, exprimée en centimètre, pour des amplitudes comprises entre 0 et 80 cm. 119
4.13 Visualisation des couples μ et μ_R des 6 simulations analysées. 120
4.14 (a) Évolution du moment des forces résultantes agissant sur le bloc (kN.m) en fonction du temps (s).(b) Évolution de la force tangentielle Ft (kN) en fonction du temps (s). (c) Évolution de la distance de propagation du centre de masse des blocs dx (m) en fonction du temps (s). 121
4.15 Positions d'arrêt des blocs B1 (en haut) et B2 (en bas) en fonction de la configuration initiale du lancer (verticale de coté – Position 1, couchée – Position 2, verticale de face – Position 3). Les dépôts sont classés en : A) avant le fossé ; B) zone de ballast située entre le fossé et les rails et C) entre les rails. 123
4.16 Trajectoires des blocs B1 suivant deux angles de vue. L'échelle de couleur présente l'évolution des vitesses verticales (V_Y). La déviation latérale des blocs est au maximum de 48.16°et au minimum de 7.85°. La déviation latérale moyenne est de 30°. 125
4.17 Trajectoires des blocs B2 suivant deux angles de vue. L'échelle de couleur présente l'évolution des vitesses verticales (V_Y). La déviation maximale des blocs est au maximum de 43.86°et au minimum de 12.64°. La déviation moyenne est de 32.3°. 125

5.1 Carrière d'Authume - Vue d'ensemble. 132
5.2 Carrière d'Authume – Position des deux profils de propagation P1 et P2 d'après *Google Maps*. 132
5.3 Carrière d'Authume - Géométrie des deux profils de propagation retenus. (a) Profil P1 et (b) Profil P2. 133
5.4 Modèle LiDAR transformé en maillage triangulaire (TIN). Les zones en dehors des Profils P1 et P2 sont dégradées, alors que les régions où se trouvent les couloirs de propagation sont discrétisées avec plus de précision. 134
5.5 Définition des zones de lâcher pour les Profils P1 et P2. 134

5.6 Schéma d'un Bloc reconstruit par photogrammétrie englobé par la *Bounding Box*. 135
5.7 Fréquence, en pourcentage, du nombre de blocs par la masse des blocs pour les Profils P1 et P2. 135
5.8 Diagramme de Classification de Forme de [Zingg, 1935]) adapté de [Wright *et al.*, 1991]. 137
5.9 Classification de Zingg pour les blocs expérimentaux. 137
5.10 Géométries des Blocs 71 (a), 89 (b) et 91 (c). 138
5.11 Fréquence en nombre de la masse des blocs en fonction de leur forme (chaque couleur est associée à une forme spécifique) selon le critère de Zingg [Zingg, 1935]. 138
5.12 Fréquence, en nombre, des blocs expérimentaux en fonction de l'indice de forme de Williams (W). 139
5.13 Fréquence en nombre de blocs de la masse des blocs en fonction de leur indice de forme (chaque couleur est associée à une forme spécifique) selon le critère de Williams [1965]. Les blocs dits "Oblate" (W>0) sont de forme "Aplati" et les blocs dits "Prolate" (W<0) sont "Allongé". A un indice W proche de zéro, correspond un bloc de forme uniforme référencée "Cube". 140
5.14 Géométrie des blocs de Forme 1. 141
5.15 Nuage de points associé aux blocs de Forme 1 : 340k points 141
5.16 Géométrie des blocs de Forme 2. 142
5.17 Nuage de points associé aux blocs de Forme 2 : 900k points. 142
5.18 Géométrie des blocs de Forme 3. 142
5.19 Nuage de points associé aux blocs de Forme 3 : 2M de points. 142
5.20 Emplacement des écrans : (a) Benchmark interne IMSRN, (b) Benchmark C2ROP. 143
5.21 Position d'arrêt des blocs : 89 positions repérées et représentées par des points noirs. (a) En jaune, l'étalement des dépôts entre les points les plus éloignés pour chaque profil. (b) Les zones de dépôts sont référencées "A" pour le Profil P1 et "B" pour le Profil P2. 146
5.22 Résultats des distributions cumulées (CDF) pour les deux profils en fonction de la distance de propagation (m). 148
5.23 Position et distance de propagation des blocs. (a) Vue de dessus et latérale du dépôt : Les blocs "Rectangulaire" sont représentés en bleu et les blocs "Cubique" en rouge. (b) Distribution de la distance de propagation des blocs par rapport au coefficient de forme c_f. 149
5.24 Classification de Zingg : Distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les blocs de type "Lame" sont de couleur rose, les "Plat" en vert, les blocs "Allongé" en bleu et les "Equant" en rouge. . . 149
5.25 Classification de Williams : Distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les points en bleu correspondent aux blocs "Allongé" (51 Blocs) et les points rouges aux blocs "Aplati" (37 Blocs). Les blocs "Sphèrique" (1 bloc) sont représentés en vert. 150
5.26 Classification de Erdogan : distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les blocs "Allongé" sont en bleu (7 blocs), les blocs de forme "Aplati" en rouge (22 blocs) et les blocs sans classement en gris (60 blocs). 150

5.27 Distance de propagation des blocs (m) en fonction de la masse (kg). Chaque point représente un bloc du dépôt dont la couleur est fonction du coefficient de forme c_f. 152
5.28 Site expérimental situé dans les Alpes Suisses, près du lieu-dit Chant Sura. Position des points d'arrêt des blocs "Aplati" (rose) et des blocs "Equant" (bleu). Le point de départ est matérialisé par une croix rouge. (A. Caviezel et al., non publié, communication personnelle). 153
5.29 Vue de dessus de la zone de dépôt des blocs. L'angle de déviation des blocs est défini par rapport à l'axe X perpendiculaire au pan de la carrière. La convention de signe retenue est : valeurs positives (+) à gauche ; et valeurs négatives (-) à droite. 153
5.30 Capture d'écran d'une vidéo utilisée pour l'estimation des paramètres de contact. 156
5.31 Orientation de départ des blocs dans le plan XY. 157
5.32 Zonages A, B et C utilisés lors des simulations numériques. 157
5.33 Influence de μ_R sur la trajectoire et la vitesse de passage du Bloc Num1A-07 par l'écran EC11 : Les courbes représentent la position et les vitesses sur l'axe X (V_x) du bloc. Pour des valeurs de μ_R supérieures à 0.35, le bloc s'arrête avant de franchir l'écran positionné en X = 25 m). 164
5.34 Bloc Num2A - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b). 165
5.35 Bloc Num2A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 166
5.36 Bloc Num2A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 166
5.37 Bloc Num2A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +5.21$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +12.25$). 167
5.38 Bloc Num1A - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b). 169
5.39 Bloc Num1A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 169
5.40 Bloc Num1A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 170
5.41 Bloc Num1A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +5.25$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +10.49$). 171
5.42 Bloc Num2B - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b). 172
5.43 Bloc Num2B – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 172
5.44 Bloc Num2B – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 173
5.45 Bloc Num2B – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +7.62$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +11.59$). 173
5.46 Bloc Num3A - Points d'arrêt numérique des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b). La position expérimentale d'arrêt du Bloc 89 est représentée par une croix. 174

5.47 Bloc Num3A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 175
5.48 Bloc Num3A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b). 175
5.49 Bloc Num3A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 (α_{ref-1}) et P2 (α_{ref-2}). 176
5.50 Distance de propagation des blocs Num1A, Num2A, Num2B et Num3A : (a) Distribution en pourcentage du nombre de blocs par catégorie pour le Profil P1, (b) Distribution en pourcentage du nombre de blocs par catégorie pour le Profil P2. 177
5.51 (a) Points d'arrêt des blocs lors de la campagne d'essais, (b) Points d'arrêt obtenus numériquement pour l'ensemble des simulations effectuées (Zonage C) et (c) Trajectoires des blocs pour l'ensemble des simulations effectuées. 180
5.52 (a) trajectoires des blocs pour 9 points de départ (espacement de 2 m entre les points) dans une zone de 4 m x 4 m. (b) exemple de trajectoires qui démontrent l'influence de l'orientation initiale des blocs. 182
5.53 Profil P1 : Dispersion latérale des blocs Num1A et Num2A lors du décalage de la zone de départ de 10 mètre sur la droite. Vue de dessus (a) et perspective (b). Les poins rouges représentent les points d'arrêt du Bloc Num1A et les points bleus les points d'arrêt du Bloc Num2A. 183
5.54 Fréquence en pourcentage des blocs Num1A (a) et Num2A (b) par rapport à la déviation relative calculée pour le Profil P1. 183
5.55 Profils-type retenus pour les simulations en 2D par l'opérateur 2. (a) Profils P–1A et P–1B, (b) Profils P–2A et P–2B. 186
5.56 *Boxplot* des résultats partiels du Benchmark C2ROP en vitesses moyennes (V_{moy}) de passage [Bourrier, 2018] : valeurs expérimentales en rouge (quartiles à Q_{50}) et vert (valeurs moyennes) ; résultats théoriques en noir : valeurs minimales et maximales en traits fins, valeurs moyennes représentées par des points bleus, et valeurs du quartile à 50% en traits pleins. 193
5.57 *Boxplot* des résultats partiels du Benchmark C2ROP en vitesses maximales (V_{max}) de passage [Bourrier, 2018] : valeurs expérimentales en rouge (quartiles à Q_{50}) et vert (valeurs moyennes) ; résultats théorique en noir : valeurs minimales et maximales en traits fins, valeurs moyennes représentées par des points bleus, et valeurs du quartile à 50% en traits pleins. 194

B.1 Aperçu du protocôle de prise de vue 3D utilisé. Pour la mise à l'échelle, un damier de dimensions 60 cm x 60 cm est positionné à côté du bloc. . 208
B.2 (a) Nuage de points obtenu par acquisition photogrammétrique et reconstruit avec le logiciel *PhotoScan*. Vue de haut avec l'emplacement des caméras autour de l'objet (protocole 3D) (b) Caillou réel (c) Nuage de points nettoyé (9 Million de points) (d) Maillage résultant : 3939 vertices, 7874 faces, reconstruit à partir de la triangulation de Delaunay sur *Meshlab* [Cignoni *et al.*, 2008]. 209

E.1 Bloc Num1A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement. 220
E.2 Bloc Num2A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b). 220
E.3 Bloc Num2B – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement. 220
E.4 Bloc Num3A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement. 220

Liste des tableaux

1.1 Classes I, II et III des vitesses d'impact et les tranches de probabilités de déviation latérale associées (α). 58

3.1 Vitesses incidentes et réfléchies (a) des 28 blocs cylindriques et (b) des 19 blocs triangulaires retenus. 87

3.2 Paramètres de rebond (modèle de l'Equation (3.2)) pour les données expérimentales : $A_{\bullet\bullet} = \langle V_{\bullet+}/V_{\bullet-}\rangle \pm \Delta A_{\bullet\bullet}$. Pour un rebond, les valeurs sont tirées dans des distributions uniformes entre $A_{\bullet\bullet}-\Delta A_{\bullet\bullet}$ et $A_{\bullet\bullet}+\Delta A_{\bullet\bullet}$. 89

3.3 Ordres de grandeur des paramètres de calibration de l'appareil photo. . 93

3.4 Vitesses moyennes et écart type des vitesses obtenues par les deux opérateurs (#1 and #2) effectuant le traitement pour le bloc cylindrique. L'opérateur #2 a également effectué une analyse en utilisant des images dont la distorsion a été corrigée. 94

3.5 Paramètres de dissipation obtenus par optimisation pour les opérateurs #1 et #2, et pour les images corrigées (Moyenne ± écart type). 99

4.1 Caractéristiques des blocs : masse M, dimensions L_1, L_2, L_3, volume V et moments d'inertie (I_1, I_2 et I_3) définis en fonction des directions 1,2 et 3. 110

4.2 Caractéristiques des vitesses d'impact expérimentales pour un total de 18 lâchers (9 blocs de type B1 orientés suivant la Configuration 1 et 9 blocs de type B2 orientés suivant la Configuration 2). 113

4.3 Angles de déviation des blocs (θ) et distances de propagation horizontales (dx) des blocs par rapport au point de départ, pour un total de 18 lâchers (9 blocs de type B1 orientés suivant la Configuration 1 et 9 blocs de type B2 orientés suivant la Configuration 2). 113

4.4 Paramètres de contact pour chaque type d'interaction. k_n et k_t sont donnés en N.m et k_r en N.m/rad. 116

4.5 Caractéristiques de la variabilité des paramètres de contact : μ et μ_R choisis aléatoires dans des distributions uniformes similaires à celles utilisées dans le chapitre 2. 116

4.6 Vitesses d'impact numériques du bloc avec le ballast et probabilité de dépôt. 117

4.7 Valeurs des paramètres μ, μ_R et distance de propagation dx, pour les 6 simulations analysées. 119

4.8 Vitesses numériques obtenues lors de l'impact et probabilités de dépôt des blocs pour les couples de μ et μ_R qui satisfont aux critères définis par l'Équation (4.1). 122
4.9 Angle de déviation des blocs (θ) et distance de propagation du centre de masse du bloc (dx) pour les couples de μ et μ_R qui satisfont aux critères définis par l'Équation (4.1). 122

5.1 Caractéristiques des blocs utilisés lors de la campagne d'essais C2ROP : Masses moyenne, maximale et minimale des blocs, données en kilos. . . 136
5.2 Classification des blocs expérimentaux suivant leur forme. 140
5.3 Classification des blocs reconstruits par photogrammétrie, selon le critère de forme c_f appliqué à la *Bounding Box*. 142
5.4 Caractéristiques des blocs retenus pour la Phase 2 du Benchmark. . . . 144
5.5 Résultats fournis pour la Phase 2 du Benchmark - Profil P1. 144
5.6 Résultats fournis pour la Phase 2 du Benchmark - Profil P2. 145
5.7 Pourcentage des blocs appartenant aux dépôts A et B pour un total de 89 blocs (41 blocs pour le Profil P1 et 47 pour le Profil P2). 147
5.8 Probabilité de passage des blocs par les écrans virtuels. 147
5.9 Répartition des blocs dans les dépôts A et B des Profils P1 et P2 (Figure 5.21) en fonction de leur forme (Classement selon le critère de forme c_f). 151
5.10 Déviation latérale des blocs selon leurs formes - "Cube", "Equant", "Plat" et "Rectangle" (classement de Zingg [1935]) en termes de déviation moyenne, maximale et minimale, mesurées à partir des points d'arrêt par rapport à l'axe X. 154
5.11 Vitesses de translation en m/s - Essais expérimentaux. 154
5.12 Vitesses de rotation en rps - Essais expérimentaux. 154
5.13 Paramètres de contact obtenus par F. Asadi avec une éprouvette de béton (Valeurs moyennes obtenues à partir de 5 lâchers de blocs). . . . 156
5.14 Caractéristiques des blocs numériques utilisés. 157
5.15 Principaux paramètres de contact pour les zonages A, B et C. 158
5.16 Bloc Num1A - EC11 - Profil P1 - Zonage A. 159
5.17 Bloc Num1A - EC12 - Profil P1 - Zonage A. 159
5.18 Bloc Num1A - EC21 - Profil P2 - Zonage A. 159
5.19 Bloc Num1A - EC22 - Profil P2 - Zonage A. 159
5.20 Bloc Num2A - EC11 - Profil P1 - Zonage A. 160
5.21 Bloc Num2A - EC12 - Profil P1 - Zonage A. 160
5.22 Bloc Num2A - EC21 - Profil P2 - Zonage A. 160
5.23 Bloc Num2A - EC22 - Profil P2 - Zonage A. 160
5.24 Pourcentage de blocs franchissant les écrans EC11, EC12, EC21 et EC22 en fonction de leur forme (Num1A ou Num2A). 161
5.25 Résultats des simulations numériques - Profil P1 - Zonage A. 161
5.26 Résultats des simulations numériques - Profil P2 - Zonage A. 162
5.27 Distribution des blocs numériques en fonction de leur forme (Classement selon le critère c_f) au sein des dépôts A et B. 178
5.28 Probabilité de passage des blocs numériques par les écrans virtuels suivant leur forme. 178

5.29 Valeurs expérimentales de l'angle de déviation de l'axe de référence (α_{ref}) et déviation latérale totale (calculée à partir de la somme des valeurs maximale et minimale de déviation, en valeurs absolues, pour chacun des blocs et pour chaque profil, en degrés (Annexe E). 181
5.30 Valeur de la dispersion latérale, en degrés (°) d'après Jaboyedoff *et al.* [2005] en fonction de l'étalement du dépôt (W) et de la distance maximale de propagation (L). 181
5.31 Angle de déviation de l'axe de référence en degré (α_{ref}) pour les Blocs Num1A et Num2A après décalage de la zone de départ. 183
5.32 Nombre d'années d'expérience de l'opérateur qui a réalisé les simulations. 185
5.33 Résultats au passage de l'écran EC11 - Kayass 2D. 187
5.34 Résultats au passage de l'écran EC11 - Rockyfor3D. 187
5.35 Résultats au passage de l'écran EC12 - Kayass 2D. 188
5.36 Résultats au passage de l'écran EC12 - Rockyfor3D. 188
5.37 Résultats au passage de l'écran EC21 - Kayass 2D. 189
5.38 Résultats au passage de l'écran EC21 - Rockyfor3D. 189
5.39 Résultats au passage de l'écran EC22 - Kayass 2D. 189
5.40 Résultats au passage de l'écran EC22 - Rockyfor3D. 189
5.41 Proposition de dimensionnement : Simulations 2D. 190
5.42 Proposition de dimensionnement : Simulations 3D. 190
5.43 Tableau comparatif des vitesses maximales (V_{max}), moyennes (V_{moy}) et du quartile à 95% ($V_{95\%P}$), en mètres par seconde, en fonction des résultats expérimentaux (A) ; résultats numériques issus de la Phase 1 qui ont été transmis à l'organisation du Benchmark C2ROP (B) ; et des résultats numériques obtenus à partir du Zonage C (C). 193

A.1 Vitesses incidentes et réfléchies des 28 répétitions pour les blocs cylindriques. 204
A.2 Vitesses incidentes et réfléchies des 31 répétitions pour les blocs triangulaires 205

D.1 Bloc Num1A : Écran EC11 – Profil P1 – Zonage C 217
D.2 Bloc Num2A : Écran EC11 – Profil P1 – Zonage C 217
D.3 Bloc Num1A : Écran EC12 – Profil P1 – Zonage C 218
D.4 Bloc Num2A : Écran EC12 – Profil P1 – Zonage C 218

Chapitre 1

Contexte et état de l'art

1.1 Contexte

Le changement climatique, couplé à une très forte interdépendance des systèmes, a pour conséquence une aggravation et une intensification des évènements gravitaires ainsi qu'une extension des zones exposées aux risques naturels [Nicolas & Bousquet, 2018]. Par ailleurs, tout risque, qui a pour conséquence un aléa d'origine naturelle ou anthropique dont les effets peuvent, impliquer un grand nombre de personnes, occasionner des dégâts importants, est considéré comme risque majeur. Il peut ainsi dépasser les capacités de réaction des instances directement concernées (DGPR[1], 2012). Aussi, la chute de blocs et les éboulements rocheux sont également classifiés parmi les évènements dits rapides, qui, lorsqu'ils menacent directement ou indirectement la vie humaine, l'environnement et les biens matériels, ou qu'ils peuvent affecter des enjeux économiques importants, sont reconnus comme "risque naturel majeur".

L'accroissement de l'impact économique sur les zones à risque gravitaire est imputable majoritairement à la densification de la population, à la hausse de l'industrialisation et du tourisme, et à la création de nouvelles infrastructures de transport. *Pour protéger les populations, les risques naturels sont pris en compte dans les documents d'urbanisme des communes. Des règles d'urbanisme peuvent interdire les constructions dans les zones les plus à risques ou imposer une adaptation des projets selon des règles locales établies par l'État ou par le maire par le biais des plans de prévention des risques naturels prévisibles* (PPRN - loi du 2 février 1995). Le plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) est *l'outil privilégié de l'État pour réglementer l'usage et l'occupation du sol dans les secteurs soumis à un ou plusieurs risques. Il s'adresse à la fois aux services mandatés et chargés de leur réalisation par les préfets, et aux spécialistes auxquels est confiée l'étude technique. Il doit aussi permettre aux élus et aux populations concernées de mesurer les enjeux identifiés par le PPRN*[2].

En fréquence, les principaux risques naturels environnementaux en France sont les

1. Direction générale de la prévention des risques
2. PPR : Guide Méthodologique - Plan de prévention des risques naturels - Avalanches. Disponible au 1/08/2019 sur : `https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/`

inondations qui correspondent à deux tiers de tous les événements naturels, suivies par les mouvements de terrain, les avalanches, les séismes et les feux de forêt. Le gouvernement français classe la dangerosité des principaux événements naturels selon une échelle de gravité. Une classe 0 correspondrait à un événement où il n'y aurait aucun blessé et moins de 0,3 millions d'euros de dommages matériels, alors qu'un évènement de classe 5 occasionnerait un dégât d'au moins 3 milliards d'euros et à plus de 1000 morts. (Medde-DGPR-SRNH, 2012, [Nicolas & Bousquet, 2018]).

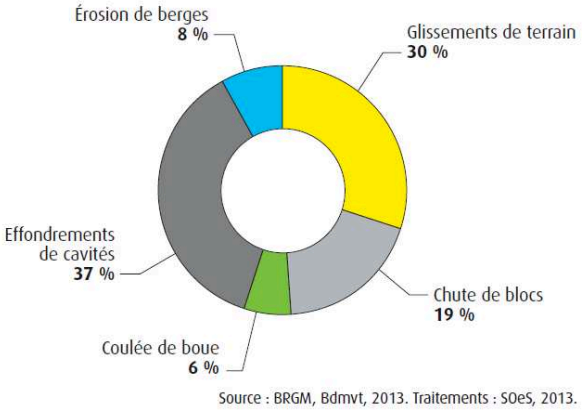


FIGURE 1.1 – En 2013, les chutes de pierres représentent 19% du total des phénomènes de mouvements de masse. (Répartition des mouvements de terrain survenus en France sur la période 1900-2011).

Bien que les risques gravitaires liés aux éboulements rocheux soient relativement faibles à l'échelle nationale (Figure 1.1), ces risques, présents dans tout le territoire, ont une incidence plus forte dans les régions montagneuses [3].

La Figure 1.2 répertorie, par ordre chronologique, les catastrophes naturelles les plus importantes, recensées sur le territoire français, relatives aux mouvements de masses. En France, 117 événements naturels classifiés comme "graves" ont eu lieu entre 1950 et 2012. On remarque une plus forte concentration de ces événements dans les dernières décennies qui sont très probablement liées à une forte augmentation de l'activité anthropique générée par l'ère de post-révolution industrielle. Ce n'est pas sans raison que les scientifiques relient les catastrophes récentes à l'activité humaine et au changement climatique : les facteurs déclencheurs des événements sont interdépendants. Une roche peut se détacher d'une falaise suite à des cycles de gel/dégel comme c'est le plus souvent le cas en France. De même, des fortes vagues de chaleur et/ou une sécheresse intense engendrent une remontée de la limite de gélification, et/ou une dilatation thermique plus importante des blocs granitiques fracturés comme on a pu le constater récemment, dans la vallée de Chamonix, ou au Brésil [Dutra, 2015]. À cela, on peut également ajouter d'autres facteurs déclencheurs, tels que les tremblements de terre, et la pluviométrie, par exemple [Pazzi *et al.*, 2016; Valagussa *et al.*, 2014]. Les conséquences d'une combinaison de ces éléments peuvent être catastrophiques. De manière générale, la conquête du territoire par l'homme, quelle que soit sa nature (montagne, littoral,

3. Les Figures 1.1 et 1.2 sont tirées d'un document du Ministère de la transition écologique et solidaire : Service de la donnée et des études statistiques (SDES) - L'environnement en France. Octobre 2014.

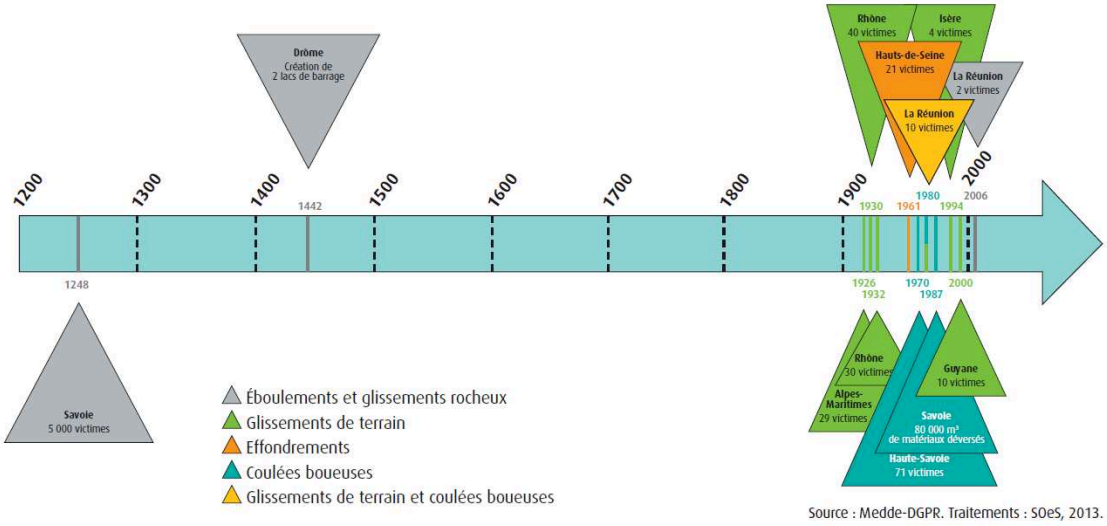


FIGURE 1.2 – Mouvements de terrain graves recensés en France depuis 1248. (SDES, 2014).

etc.), suscite le besoin de mettre en œuvre un système de sécurité adapté à la protection des éventuels dangers. Et ce n'est pas une problématique nouvelle dans l'histoire de l'humanité. Un des épisodes les plus connus des savoyards est celui de l'écroulement du Mont Granier en Novembre 1248, où plusieurs villages ont été ensevelis et dévastés, en faisant des milliers de morts. Cet événement est illustré par Jean-Yves Duhoo, lors d'une visite réalisée au laboratoire ISTerre, à Grenoble (Figure 1.3).

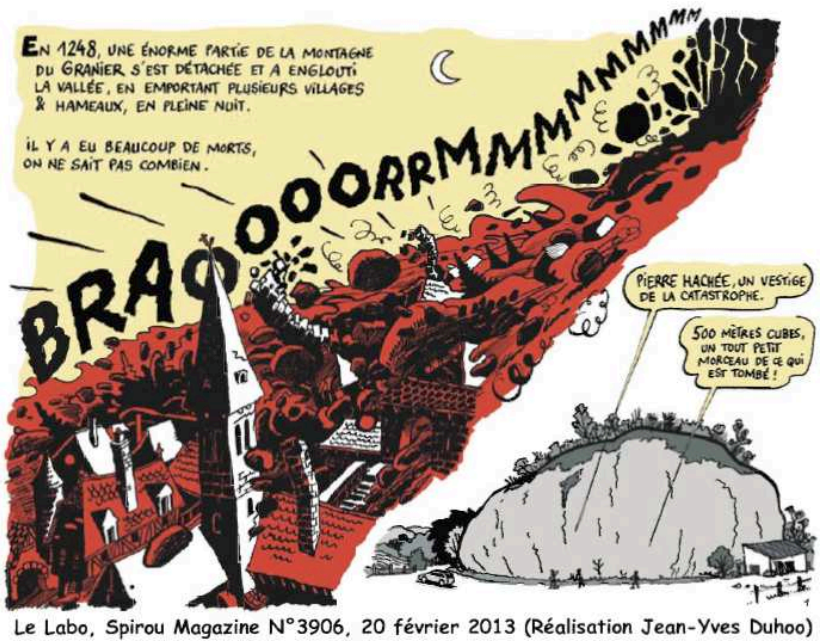


FIGURE 1.3 – Extrait de la bande dessinée Le Labo par [Duhoo, 2010].

En 2016, le Mont Granier bouge à nouveau : plus de 10 000 m^3 de roches se détachent du massif rocheux le 9 Janvier 2016 puis à nouveau 30 000 m^3 au mois de mai.

Dans la presse locale[4], D. Amitrano, chercheur du laboratoire ISTerre à Grenoble, explique : *"dans le cas du Granier, il s'agit d'un secteur assez fracturé, prédisposé aux éboulements. Mais, on commence à évoquer la fatigue du matériau rocheux. Les montagnes s'effondrent sous leur propre poids, à cause des fractures qui se propagent dans la roche sous les sollicitations cycliques thermiques journalières, saisonnières,.... D'autres phénomènes peuvent être des facteurs aggravants, comme les fortes pluies qui mettent les fractures sous pression et les ouvrent. Le gel en surface aussi, qui va bloquer les issues de l'eau..."*.

Les évènements de masse liés aux éboulements rocheux peuvent également être de nature anthropique et survenir suite à l'activité humaine. C'est le cas de l'éboulement de l'ancienne carrière de la Porte de France à Grenoble. Exploitée dans les années 1820 suite à la découverte de *l'or gris grenoblois* par Louis Vicat (considéré comme l'"inventeur du ciment moderne"), l'effondrement partiel de la carrière a eu lieu le 12 Août 1873. Une note de la presse locale nous permet d'avoir une idée de l'extension du volume rocheux éboulé ; Figure 1.4.

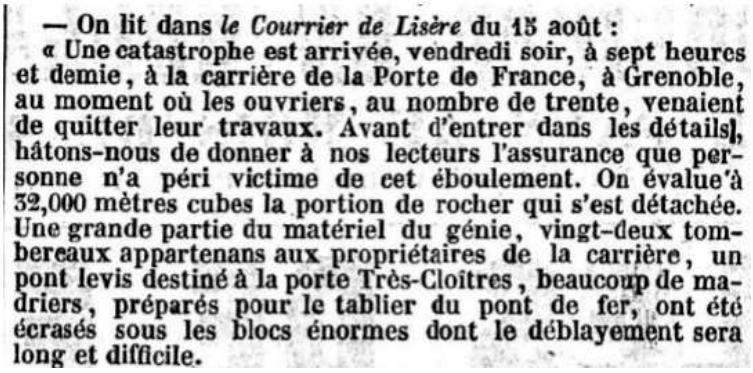

— On lit dans *le Courrier de Lisère* du 15 août :
« Une catastrophe est arrivée, vendredi soir, à sept heures et demie, à la carrière de la Porte de France, à Grenoble, au moment où les ouvriers, au nombre de trente, venaient de quitter leur travaux. Avant d'entrer dans les détails, hâtons-nous de donner à nos lecteurs l'assurance que personne n'a péri victime de cet éboulement. On évalue à 32,000 mètres cubes la portion de rocher qui s'est détachée. Une grande partie du matériel du génie, vingt-deux tombereaux appartenans aux propriétaires de la carrière, un pont levis destiné à la porte Très-Cloîtres, beaucoup de madriers, préparés pour le tablier du pont de fer, ont été écrasés sous les blocs énormes dont le déblayement sera long et difficile.

FIGURE 1.4 – Note sur l'accident produit à la carrière de la Porte de France. Fort heureusement, aucune victime n'a été déplorée suite à cet évènement. Source : [BRGM, 1873]

Depuis la moitié du 20ème siècle, la métropole grenobloise a subi une grande expansion territoriale et donc l'augmentation de sa population (INSEE, 2008). Comme conséquence, certaines zones auparavant inhabitées sont dorénavant occupées, notamment les pieds de falaises (anciens espaces agricoles). Si les risques étaient initialement peu élevés, l'occupation humaine croissante des zones les plus défavorables fait augmenter la demande de sécurisation.

À Crolles, dans le sud-est de la métropole grenobloise, l'occupation humaine a progressé vers les zones au pied du massif de la Chartreuse. Ceci est la conséquence d'une forte industrialisation depuis les années 1990 dans la région et à la transformation des espaces ruraux en quartiers résidentiels[5]. Depuis, plusieurs ouvrages de protection ont été conçus afin de protéger les habitants [Farvacque M. & N., 2019]. De fait, l'urbanisation crée les enjeux sur les bâtiments et, par conséquent, les risques qui y sont associés.

4. Source : article Pourquoi le mont Granier s'éboule-t-il plus que d'autres ? `https://www.placegrenet.fr/2016/05/12/mont-granier-seboule-t-plus-dautres/89842`

5. INSEE, 2008 - `http://www.territoires.rhonealpes.fr/IMG/pdf_insee_gresivaudan.pdf`

Le même type de problématique, liée à l'occupation des terrains proches des falaises, est observé dans la région montagneuse de l'état de Rio de Janeiro. La décentralisation de l'industrie et son éloignement des zones métropolitaines ont fait augmenter l'attractivité des régions jusqu'alors inoccupées. Par exemple, suite à la création de la Compagnie Sidérurgique Nationale et de la construction de l'autoroute (BR-040) qui relie les mines de fer au port de Rio, une partie de la population, soucieuse de rester à proximité de son lieu de travail, a investi les zones périphériques à fort risque, tels que les flancs de collines et les massifs rocheux, entre autres (Figure 1.5).

Cette population est exposée à des épisodes de glissements de terrain et d'éboulements rocheux, comme celui qui a eu lieu à Petropolis et Nova Friburgo en 2011, faisant au moins 500 morts et laissant plus de 10 milles personnes sans logement [6]. Le montant versé par le gouvernement pour la réhabilitation de ces zones s'élevait à 188M R$ (équivalent à 49M US$). Les habitations sont en général construites sur du sol meuble, instable, et de très faible épaisseur qui repose sur des roches granitiques et des gneiss. Les roches de la région s'avèrent très fracturées et se déstructurent en "plaquettes". Des blocs rocheux, partiellement détachés de la falaise, peuvent à tout moment dévaler la pente et écraser les maisons construites de manière anarchique en contrebas. Les périodes de sécheresse intense qui s'y produisent, accentuent les phénomènes de dilatation thermique qui participent à l'augmentation de la fréquence des chutes de blocs [Dutra, 2015].

FIGURE 1.5 – Les communautés de A) São Sebastião et B) Morin (Rue Otto Reymarus) à Petropolis, état de Rio de Janeiro. Blocs rocheux instables et sol résiduel peu épais. Source : [Dutra, 2015]

En Janvier 2015, un éboulement rocheux de grande ampleur a lieu dans la ville de Vila Velha, également située au Brésil. Localisé dans une zone dite "à risques imminents" (dans la réglementation brésilienne), un petit village a été impacté par une roche d'environ 1000 tonnes (Figure 1.6). Malgré le rapport qui avait été fourni par le Service Géologique du Brésil (CPRM) en 2012, les autorités locales ont négligé les alertes d'un possible mouvement des roches granitiques très fracturées et instables se trouvant en

6. Le Bilan des Intempéries au Brésil (L'Express) : `https://www.lexpress.fr/actualites/2/le-bilan-des-intemperies-au-bresil-depasse-les-500-morts_952374.html`

haut du Mont Boa Vista. Aucune victime n'a été déplorée. Cependant, le bloc, qui a dévalé en roulant, a ravagé sur son passage le quartier, en écrasant plusieurs maisons. Le bilan est de 14 blessés sans gravité et environ 1000 habitants évacués (Figure 1.6 [7]).

FIGURE 1.6 – Éboulement rocheux du mont "Boa Vista" à Vila Velha, Brésil.

Si l'on analyse l'impact que les mouvements de masse peuvent avoir sur les infrastructures de transport, on remarquera que les coupures des voies ferrées et des autoroutes entraînent à la fois des coûts socio-économiques et des coûts matériels, très importants. Un retour d'expérience sur l'impact socio-économique d'un éboulement rocheux, qui a enseveli le 25 janvier 2013 une partie de la voie ferrée Brest-Morlaix (29), a été menée par la SNCF. Le phénomène d'éboulement rocheux observé a été déclenché à la suite des fortes pluies qui s'étaient abattues dans la région. Une des voies de circulation a pu être rapidement dégagée afin de permettre une reprise minimale du trafic ferroviaire, *"mais il a fallu plus de deux mois (du 25 janvier au 29 mars 2013) avant que la situation ne revienne à la normalité [sic]"*.Pour la collectivité, le coût de la coupure ferroviaire entre Brest et Morlaix, sur l'ensemble des deux mois, a été estimé à 2,5 M€ (2013) [Belut *et al.*, 2014].

Au début de 2019, le Département des Transports du Colorado aux États-Unis (Glenwood Springs) avait décidé de fermer l'accès vers l'autoroute I-70, suite à un éboulement rocheux qui l'avait touché dans le deux sens. Selon les informations de la presse locale, le volume total éboulé pouvait facilement remplir 30 camions de transport. En réponse à la coupure de l'I-70, *Google Maps* affichait un seul itinéraire de délestage possible : au lieu des 45 minutes habituelles, les usagers avaient, soit la possibilité de se loger dans une ville proche, soit de faire un détour d'au moins 4h23min (Figure 1.7). Cette région est connue aux États-Unis pour ces évènements fréquents de chutes de blocs. En 2004, pendant le *Thanksgiving Day* (Jour d'action des grâces, dans la tradition américaine), l'autoroute a été coupée après une séquence d'éboulements

7. Source Fig. 1.6 : `http://g1.globo.com/espirito-santo/noticia/2016/01/ministerio-publico-vai-investigar-desastre-no-morro-da-boa-vista-es.html`

rocheux : aucune victime n'a été signalée, mais les travaux de remise en état ont coûté environ 700.000 US$ [8] [9].

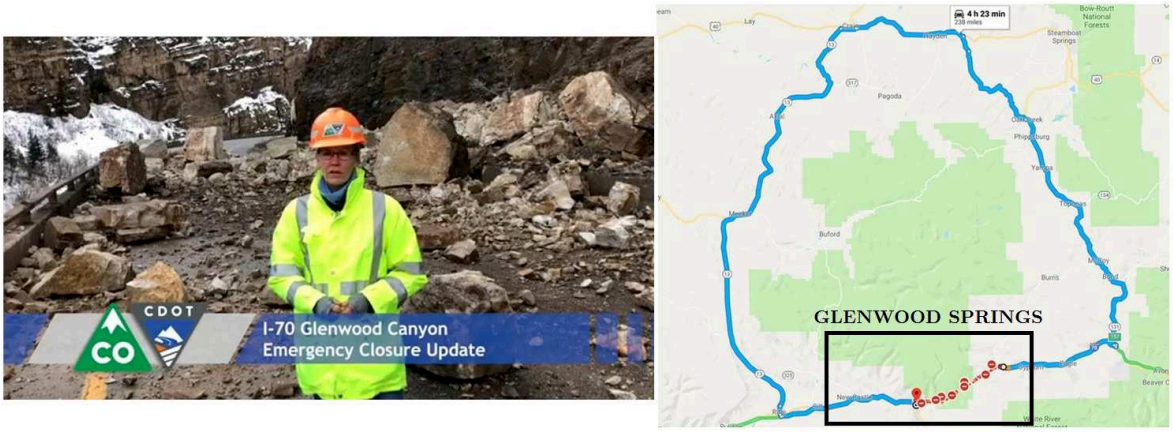


FIGURE 1.7 – Éboulement rocheux de l'autorote I-70 aux États-Unis - Glenwood Springs (Colorado) (Département de Transports de l'état du Colorado - 2019).

1.1.1 Quelques précisions sur les notions d'aléa, d'enjeu et de risque

La définition de risque naturel peut être résumée de la manière suivante : il s'agit d'un *événement dommageable, doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa survenant dans un milieu vulnérable (enjeux). Le risque résulte, donc, de la conjonction de l'aléa et d'un enjeu, la vulnérabilité étant la mesure des dommages de toutes sortes rapportés à l'intensité de l'aléa. À cette définition technique du risque, doit être associée la notion d'acceptabilité pour y intégrer sa composante sociale* [10]. En bref, le risque est le croisement entre la probabilité d'occurrence de l'aléa et de ces conséquences. L'aléa est, quant à lui, la *manifestation d'un phénomène naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche) ou anthropique, d'occurrence et d'intensité données* (Figure 1.8). L'enjeu constitue l'ensemble des personnes, des biens et des activités susceptibles d'être affectées par l'occurrence de l'aléa. [11].

À l'heure actuelle, l'aléa est généralement bien identifié par les autorités responsables, et les plans de prévention des risques et de détection des éboulements sont relativement au point (notamment avec l'avènement des nouvelles technologies tels les suivis d'instabilités rocheuses *via*, entre autres, des relevés avec les lasers lidar, des interféromètres et des analyses d'images satellites). En revanche, il est, encore aujourd'hui, difficile d'estimer la date exacte de déclenchement des évènements gravitaires et, encore moins, leur ampleur exacte (volume mis en mouvement). Des techniques d'instrumentation permettent le suivi des mouvements au centimètre près [Hungr *et al.*,

8. Source : Workers break up boulder in Glenwood Canyon : `https://www.steamboatpilot.com/news/workers-break-up-boulder-in-glenwood-canyon/`
9. Source : Département de Transports de l'état du Colorado - 2019 : `https://www.codot.gov`
10. Glossaire Georisques, disponible sur : `http://www.georisques.gouv.fr/glossaire/risque-naturel-0`
11. Glossaire Georisques, disponible sur : `http://www.georisques.gouv.fr/glossaire/alea-0`

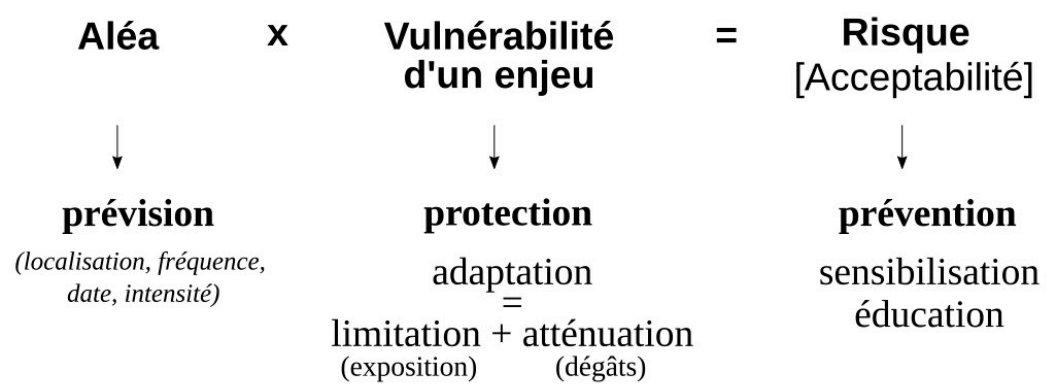


FIGURE 1.8 – Récapitulatif des principaux termes liés à la notion d'aléa, d'enjeu et de risque [Dequincey, 2017].

2014] ; et il est désormais possible, avec les outils informatiques, de prévoir avec une relative précision : les couloirs de propagation, les énergies, les hauteurs de passage, les vitesses et les zones d'arrêt des blocs ; ainsi que d'anticiper les mesures nécessaires à prendre, si jamais ces phénomènes se produisent.

Les solutions de protection qui peuvent être proposées aujourd'hui sont-elles toujours adaptées ? Sont-elles toujours financièrement viables ? Dans une ambiance envisageant à la fois le risque zéro et la maîtrise des coûts, comment optimiser le dimensionnement des protections dans l'incertitude sur l'ampleur (volume, nombre de blocs...), sur la date d'occurrence (étalement des chantiers et des coûts), et sur la zone probable (distance d'arrêts...) ? C'est à ces questions que veut répondre (non exhaustivement) ce travail de thèse.

1.2 État de l'art

Dans cette section, nous allons présenter de manière synthétique les différents outils numériques qui existent à l'heure actuelle pour étudier la cinématique de propagation des blocs rocheux et des éboulements de masse en termes de trajectoires possibles, des distances d'arrêt, des vitesses et des énergies d'impact. Ces outils ne concernent pas l'aléa de déclenchement, qui consiste à estimer la probabilité d'occurrence d'un événement d'éboulement rocheux [Frayssines, 2005] et qui est lié à la fois à des paramètres intrinsèques, tels que les propriétés de la masse rocheuse et du terrain, à des paramètres extrinsèques comme, par exemple, l'activité sismique, la pluviométrie et l'érosion [Green, 2016]. Quoi qu'il en soit, ces paramètres ont une influence sur la vitesse maximale que ces corps atteignent au cours du temps [Hungr & Evans, 1988; Pirulli, 2009; Rochet, 1987; Varnes, 1978]. En effet, les éléments déclencheurs sont directement liés aux discontinuités déjà présentes dans les massifs, due à l'instabilité des ponts rocheux internes ou à d'autres mécanismes auxquels ces matériaux sont soumis. Ces variables ne seront pas abordées dans ce travail de thèse, mais le lecteur peut se référer aux travaux suivants pour plus de détails : Belheine *et al.* [2009]; Bonilla-Sierra *et al.* [2015]; Cundall *et al.* [2008]; Donzé [2008]; Hoek & Bray [1981]; Scavia [1990]. Les

outils trajectographiques traitent les mouvements de blocs isolés qui sont supposés déjà détachés et qui interagissent quasi uniquement avec la pente de propagation [Evans & Hungr, 1993; Hungr & Evans, 1988].

1.2.1 Modèles trajectographiques

Un modèle trajectographique est un modèle qui rend possible le calcul de la trajectoire complète d'une série de blocs isolés, détachés, et subissant une succession de vols libres dans l'air et de rebonds avec le substrat [Asteriou & Tsiambaos, 2016; Bourrier *et al.*, 2009; Dorren, 2003; Hungr & Evans, 1988; Piteau & R., 1977]. Ce bloc est souvent considéré comme un bloc indépendant ou un sous-produit de la rupture d'un bloc en plusieurs morceaux. Dans ce sens, les fragments rocheux sont considérés comme des corps rigides, isolés, qui se meuvent de manière indépendante les uns des autres ou qui interagissent très peu entre eux. On appelle ce phénomène *Fragmental Rockfall* [Hungr & Evans, 1988]. Ce comportement se distingue des avalanches rocheuses, où la quantité de blocs est telle que la masse en mouvement se comporte comme un écoulement granulaire dense, qui ne relève pas des modèles trajectographiques. La trajectoire de la phase de vol libre d'un bloc se réduit à des équations classiques du mouvement uniformément accéléré sous gravité, [Dorren & Berger, 2013], où l'effet de l'air est négligé. Toute la problématique réside dans la capacité de prévoir, de façon statistiquement perspicace, les vitesses et directions des blocs après rebond. Cette prévision doit s'appuyer sur des hypothèses valides qui incorporent la nature du terrain et des blocs impliqués dans la propagation, ainsi que les différents facteurs qui peuvent influencer la trajectoire d'un bloc (*e.g.* la rugosité de la pente de propagation, la cohésion du sol, le relief, la précision des discrétisations numériques, des équations, et des maillages, entre autres).

Le volume impliqué lors de la chute de blocs varie en fonction de l'extension de la zone d'étude et de la définition d'une ou de plusieurs zones de départ. Rochet [1987] a élaboré une classification qui associe le volume mobilisé aux types de mouvements gravitaires existants. Elle se divise en quatre catégories, notamment :

- Les chutes de pierres ou de blocs isolés, dont le volume varie entre 10^{-2} m^3 et 10^2 m^3 ;
- Les éboulements en masse, dont le volume varie entre 10^2 m^3 et 10^5 m^3 (englobant une partie du classement précédent) ;
- Éboulement en très grande masse (catastrophique) : volume des blocs ayant une masse supérieure à 10^5 m^3 ;
- Déplacement en masse de plus de 10^7 m^3.

De façon intuitive, la définition quantitative du phénomène des *Fragmental Rockfalls* correspond ainsi aux deux premiers cas. Les mouvements en masse présentant des volumes au delà de 10^6 m^3 subissent une *pseudo-fluidisation*, où les interactions au sein de la masse deviennent importantes, et en résulte une propagation accrue et des pertes d'énergies plus faibles [Rochet, 1987]. Une autre classification des mouvements gravi-

taires est celle de [Cruden & Varnes, 1996; Varnes, 1978] révisée récemment par Hungr *et al.* [2014]. Elle figure comme l'une des classifications de mouvements en masse les plus reconnues au monde, en les organisant en fonction du type de matériau impliqué dans le processus. Ils sont classés en : chutes de blocs, glissements, et écoulements ; mais une combinaison des deux ou plus de ces mécanismes est tout à fait possible. Pour Cruden & Varnes [1996], bien que les chutes de blocs présentent des volumes relativement faibles en comparaison avec d'autres mouvements en masse, elles peuvent être très destructives : souvent associées à des vitesses élevées et, par conséquent, à des énergies très élevées qui peuvent être facilement atteintes. Les vitesses maximales varient entre 25 et 30m/s ($\approx$ 100 km/h) [Ronco *et al.*, 2009; Volkwein *et al.*, 2011]. Un phénomène en telle proportion peut provoquer des dégâts aussi dramatiques que ceux qui sont produits par les plus grands mouvements en masse [Hoek & Bray, 1981]. Ces derniers ne seront pas pris en compte dans cette thèse. La Figure 1.9 montre un pourcentage important des petits volumes dans des évènements historiques répertoriés dans un espace de temps de 60 ans, en Isère. Ces données temporelles nous permettent d'identifier les volumes de blocs qui influent le plus et qui causent le plus de dégâts.

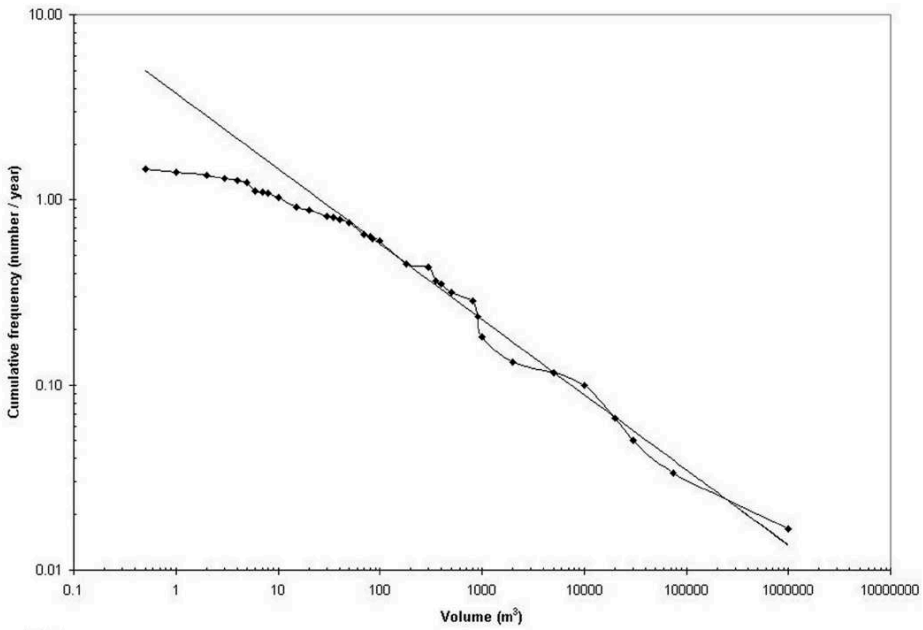


FIGURE 1.9 – Distribution des fréquences cumulées en fonction du volume (m^3) rocheux mobilisé dans la région de Grenoble : 87 évènements enregistrés sur une extension de falaise calcaire d'environ 120 km dans la période comprise entre les années 1935 et 1995. [Dussauge-Peisser *et al.*, 2002]

En effet, les chutes de blocs de moins de 100 m^3 constituent la gamme de volume la plus fréquemment mobilisée et ce n'est pas surprenant qu'elles soient l'objet principal de l'analyse et de la gestion des risques, car de tels événements se produisent avec une plus forte incidence que d'autres. Ils peuvent s'étendre sur une période de plusieurs années jusqu'à plusieurs décennies [Copons *et al.*, 2009].

Enfin, la chute de blocs est un mouvement rapide, initié par le détachement d'un volume de roche instable en haut de falaise. Dans leur propagation, les projectiles peuvent chuter librement, rouler, glisser et rebondir tout au long de leur parcours. La

Figure 1.10 montre les trois zones représentatives des mouvements gravitaires : elles sont désignées (a) zone de départ, (b) zone de transition (avec ou sans présence de couverture forestière) et (c) zone de dépôt.

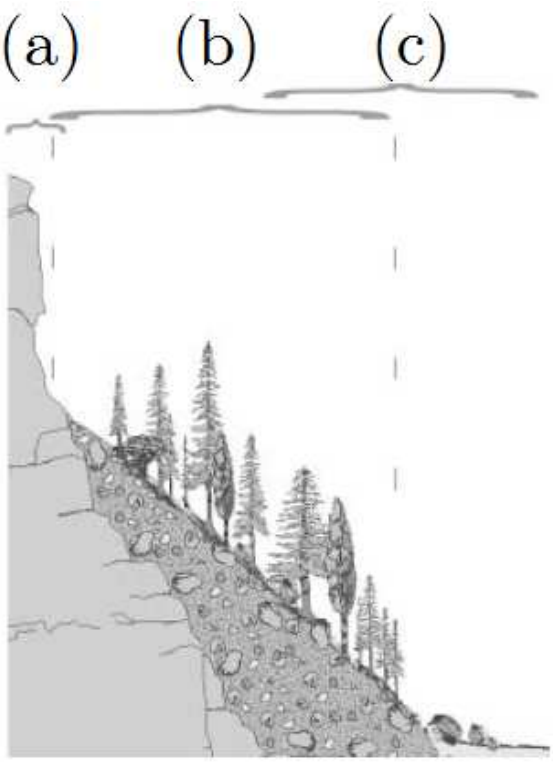


FIGURE 1.10 – Zones typiques d'une région où l'évènement de chute de blocs est présent : (a) Zone de départ (source) (b) Zone de transition, et (c) Zone de dépôt. Adapté de [Dorren *et al.*, 2011].

L'énergie potentielle d'un bloc qui chute depuis une falaise (Figure 1.10(a)) est libérée tout au long de la pente de propagation (Figure 1.10(b)), en se transformant en énergie cinétique qui est peu à peu dissipée. Lors de son parcours, les modes de dissipation jusqu'à l'arrêt complet du bloc peuvent être de différentes natures (Figure 1.10(c)) :

- Déformation plastique ;
- Propagation d'onde en dehors du système ;
- Frottement ;
- Roulement ;
- Fragmentation.

La distance parcourue dépend donc des divers facteurs tels que la morphologie locale de la pente, l'emplacement éventuel de protections pré-existantes (et notamment des anciens dépôts), la présence ou l'absence de végétation, la capacité absorbante du sol, la forme et le volume éboulé, entre autres [Glover *et al.*, 2015; Ritchie, 1963]. La déformation plastique est majoritairement subie par le sol impacté, en laissant

des traces bien marquées sur les pentes (scarification) [Leine *et al.*, 2014]. Celles-ci permettent de retracer plus au moins précisément l'historique éventuel des chutes de blocs dans la zone. Les vibrations qui se propagent dans le sol au moment de l'impact peuvent être utilisées, par exemple, dans l'estimation du volume éboulé à partir des énergies de collision associées. [Vilajosana *et al.*, 2008].

Dans le processus de propagation, les phases d'impact avec le substrat, est encore mal comprise [Azzoni & de Freitas, 1995; Bartelt *et al.*, 2018; Bourrier *et al.*, 2009; Bozzolo & Pamini, 1986; Descoeudres, 1997; Dorren *et al.*, 2011; Falcetta, J.L., 1985; Garcia *et al.*, 2017; Guzzetti *et al.*, 2002; Pichler *et al.*, 2005; Volkwein *et al.*, 2011] et la distinction entre les phases de roulement et de glissement sur la pente, ou même de la combinaison de ces deux modes, est encore mal maîtrisée. Ils sont intimement liés à des facteurs géométriques dont la forme des blocs et celle de la pente, qui sont parfois très irrégulières. Bien qu'ils correspondent à des événements fréquents dans la propagation, ces aspects géométriques liés à la fragmentation des blocs sont souvent pris en compte de manière approximative ou à travers des approches probabilistes.

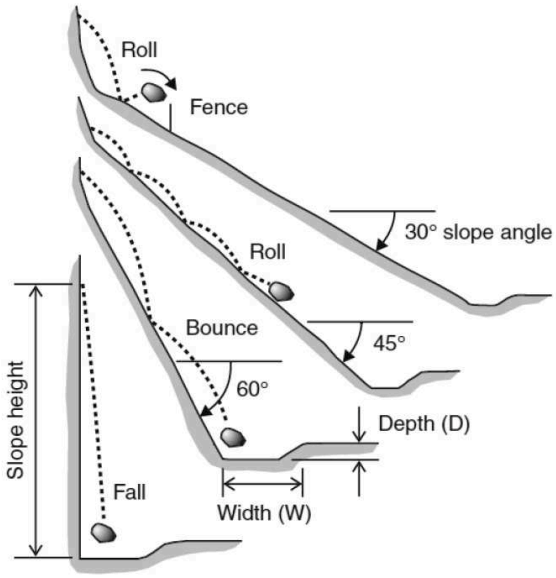


FIGURE 1.11 – Prévalence des mécanismes de roulement, rebond ou de chute libre en fonction de l'inclinaison de la pente de propagation. Adapté de [Bar *et al.*, 2016] *apud* [Ritchie, 1963]. Source : `http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_rockfall_diag.htm`.

Les mécanismes prédominants pour chaque type de pente de propagation dépendent de l'angle d'inclinaison (Figure 1.11). Ces observations ont été validées par plusieurs auteurs dans la littérature, à partir des essais expérimentaux *in situ* ou de laboratoire. Les rebonds, par exemple, sont plus marqués dans les pentes où l'inclinaison est de plus de 45°. La prévalence de la chute libre est plus visible pour celles où l'inclinaison est de 60° ou plus. L'effet de glissement est plus visible dans les premiers instants de la chute et est limité à des petites portions de trajectoire de l'ordre du centimètre à quelques mètres. Ceci est caractérisé par des faibles vitesses et des pertes importantes d'énergie par frottement [Guzzetti *et al.*, 2002]. En effet, ces déplacements ont un seuil défini par la plus grande dimension du bloc [Dorren *et al.*, 2006]. L'effet de roulement apparaît

dans les pentes d'inclinaison comprises entre 30 et 45°, et est souvent associé à des successions de petits rebonds où la distance entre deux impacts est très faible [Dorren, 2016]. Ces mécanismes influent directement sur la distance de propagation finale du bloc et sur la distribution des énergies dissipées tout au long de son parcours.

Bien que ne détaillant aucun des processus physiques mis en oeuvre dans la propagation du blocs, des approches empiriques sont utilisées pour estimer les "run-out", en permettant de tenir compte de la géométrie des pentes . Plusieurs auteurs dans la littérature, ainsi que des praticiens, en font usage avant d'effectuer des simulations numériques plus complexes. De cette manière, les simulations numériques d'impact viennent en complément de ces approches empiriques. L'objectif ultime est que le croisement de ces informations soient utilisées dans le cadre de l'élaboration des cartes de risques [Berger, 2009; Mazet-Brachet, 2018]. En France, des considérations sur l'applicabilité de ces méthodes dans l'élaboration des plans de protection (PPRn) sont faites à travers l'axe de travail MEZAP (groupe de travail réuni sous l'autorité du MEDDE [12] pour la détermination d'une Méthodologie de Zonage de l'Aléa chutes de Pierres, qui est actuellement piloté par l'IRSTEA). La qualification du risque pour l'élaboration de ces cartes est un sujet assez controversé dans le domaine et chaque pays établit sa propre grille de référence, en fonction de la fréquence et de l'intensité de l'évènement.

1.2.2 Approches empiriques

Les méthodes empiriques ont comme objectif de définir la distance maximale de propagation qu'un bloc peut atteindre, suite à son détachement, en fonction de relations géométriques du terrain et de l'historique des événements déjà produits. De telles relations ont initialement été proposées par Heim [1932] sous le nom de *energy line angle*. Cette méthode consiste, tout simplement, à relier la position de la "masse source" dans une falaise au point d'arrêt du bloc le plus éloigné par une droite caractérisée par son angle avec l'horizontale. Elle s'applique aux versants ayant des événements historiques répertoriés de chute de bloc, qui permettent de calibrer les résultats et d'appliquer la méthode aux versants ayant des configurations géométriques et morphologiques similaires. Cette méthode est reconnue, en France, sous le nom de "méthode de la ligne d'énergie", et l'angle résultant de ce tracé est appelé l'"angle de la ligne d'énergie". Elle peut être mise en oeuvre facilement via une lecture cartographique.

Dans la littérature, cet angle varie entre 27° et 38°. À la différence des modèles trajectographiques traditionnels, ces formules n'impliquent aucun processus physique d'interaction bloc-sol [Dorren, 2003]. Cependant, quelques études pointent l'importance de tenir compte de la taille des blocs et de la rugosité du sol [Berger, 2009; Ferrari *et al.*, 2015], ou associent la dynamique des avalanches à l'angle de frottement apparent (comparable à l'angle de *Fahrböschung*) [Jaboyedoff & Labiouse, 2011]. Nous présentons ici quatre approches empiriques pour estimer ces angles "ultimes" de propagation (Figure 1.12).

- Méthode de *Fahrböschung* (se traduit littéralement de l'allemand : *angle de voyage*). C'est l'angle de la pente qui représente la distance maximale atteinte

12. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

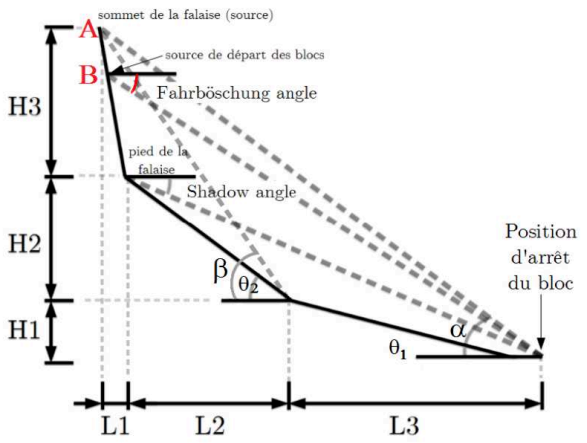


FIGURE 1.12 – Définition des angles α, β, *Fahrböschung* et *Shadow angle* sur un profil type de propagation d'un bloc selon les différentes approches empiriques de la littérature. Adapté de [Massey *et al.*, 2012]

. .

par le bloc par rapport à son point de départ [Heim, 1932]. Sur la Figure 1.12, ce point source peut se placer sur B (centre de masse de la masse instable) ou sur A (point sommital de la falaise contenant la masse instable). Pour ce dernier, l'angle de *Fahrböschung* serait calculé à travers de l'équation 1.1.

$$\arctan\left(\frac{H}{L2+L3+L1}\right) \tag{1.1}$$

où H est l'altitude du point A ($H1+H2+H3$) ou du point B par rapport à la position d'arrêt du bloc. Heim [1932] a découvert dans les années 1930 que, dans le cas de la chute de blocs, l'emplacement de la zone source sur le centre de masse mobilisé était plus correct. La méthode de la ligne d'énergie dérive de cette définition, où la hauteur H est utilisée directement dans l'estimation de la vitesse maximale des blocs à travers de l'équation $\sqrt{2gH}$ [Jaboyedoff & Labiouse, 2011]. Le point source utilisé dans la ligne d'énergie concerne uniquement le centre de gravité de la masse instable (A).

- L'approche *Shadow angle* [Evans & Hungr, 1993]. Il s'agit de l'angle, par rapport au plan horizontal, définit par la droite passant par le pied de la falaise-source reliée au point d'arrêt du bloc le plus éloigné. De cette définition dérive l'extension en trois dimensions, appelée *Shadow Cone* [Jaboyedoff & Labiouse, 2011]. Elle permet d'estimer la propagation en termes de déviation latérale (*pseudo-3D*). Dans le cas d'une analyse 2D, cet angle est calculé selon l'équation 1.2.

$$\arctan\left(\frac{H1+H2}{L2+L3}\right) \tag{1.2}$$

- L'approche run-out ratio (ou *rapport de propagation*) [Lied & Bakkehei, 1980] consiste à calculer le rapport entre la longueur horizontale de la zone de déposition (L_3) et la longueur du talus de propagation (L_2) augmentée de la longueur

horizontale correspondant à la falaise (L_1) [Keylock & Domaas, 1999].(Équation 1.3).

$$\frac{L3}{L1 + L2} = \frac{\tan\beta - \tan\alpha}{\tan\alpha - \tan\theta_1} \tag{1.3}$$

➤ L'approche de Keylock & Domaas [1999] considère que l'énergie moyenne de la source (*e.g.* Chute de blocs) peut être estimée par la tangente de l'angle α où β représente l'angle de la "ligne d'énergie" entre le bloc le plus éloigné se trouvant au pied du talus.

Massey *et al.* [2012] ont effectué des tests statistiques en utilisant les quatre méthodes décrites ci-dessus, qui ont été appliquées aux événements de chute de blocs survenus en 22 Février 2011, en Nouvelle-Zélande. Selon cette étude, les méthodes *Shadow Angle* et *Fahrböschung* sont celles ayant les meilleures capacités prédictives, avec un angle d'énergie minimum estimé à 21° et 24°, respectivement. Les méthodes empiriques run-out ratio et α–β se sont montrées insuffisantes dans la prédiction des zones d'arrêt. Selon les auteurs, cela provient de limitations liées à la topographie locale.

Pour faciliter ces calculs, il y existe certains logiciels dans le marché, tel que l'outil *CONEFALL* [Jaboyedoff & Labiouse, 2011] qui se base sur des cartes de type SIG, ou encore *Rollfree* [Toe & Berger, 2015]. Ces codes intègrent la méthode shadow cone et de la ligne d'énergie pour une zone plus étendue et pour une zone de départ linéaire (*e.g.*, falaises instables). Une analyse des données concernant les événements de chute de blocs, anciennes dans le même massif ou ayant de configuration similaire (géologie, dénivellation...) est faite. On procède ensuite, par analogie, à l'étude de propagation sur la zone à étudier. Cela suppose donc qu'il y a ait analogie, et que le mode de déclenchement n'ait pas d'influence.

Plutôt que s'intéresser aux points d'arrêt, notre intérêt scientifique porte sur la façon dont le bloc perd de l'énergie durant son trajet après avoir effectué une succession de rebonds : soit le détail de la dynamique des blocs en mouvement sur les pentes. Cependant, ces approches peuvent être très utiles pour une première estimation de distances maximales. L'utilisation pourrait éventuellement aider l'ingénieur à délimiter très rapidement et grossièrement une zone à risque. Par contre, certaines configurations ne permettent pas d'appliquer la méthode empirique correctement : la méthode de la ligne d'énergie n'est pas applicable dans le cas où la géométrie de la pente influe directement sur la distance maximale de propagation [Mazet-Brachet, 2018] (Figure 1.13).

Selon un rapport du projet inter-régional européen *RockTheAlps* Kobal & Zabota [2018], les méthodes empiriques représentent seulement 15% des méthodes utilisées pour l'étude des risques gravitaires, contre 59% réalisés utilisant les modèles numériques de trajectographie. La Figure 1.14 montre la répartition de ces différentes méthodes utilisées pour la modélisation des événements de chute de blocs selon les pays localisés dans la zone alpine.

Le logiciel *CONEFALL* est celui le plus utilisé parmi les logiciels d'approche empiriques, représentant 83% des utilisateurs. Cependant, les approches trajectographiques ont augmenté en 61% dans les 8 dernières années, ce qui démontre un fort intérêt de

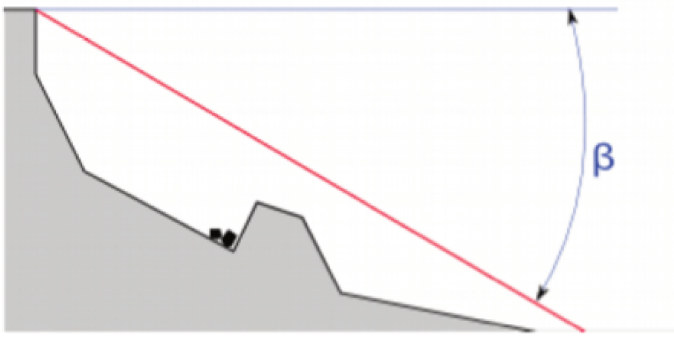


FIGURE 1.13 – Configuration de versant où la méthode géométrique de la ligne d'énergie n'est plus applicable. [Mazet-Brachet, 2018]

.

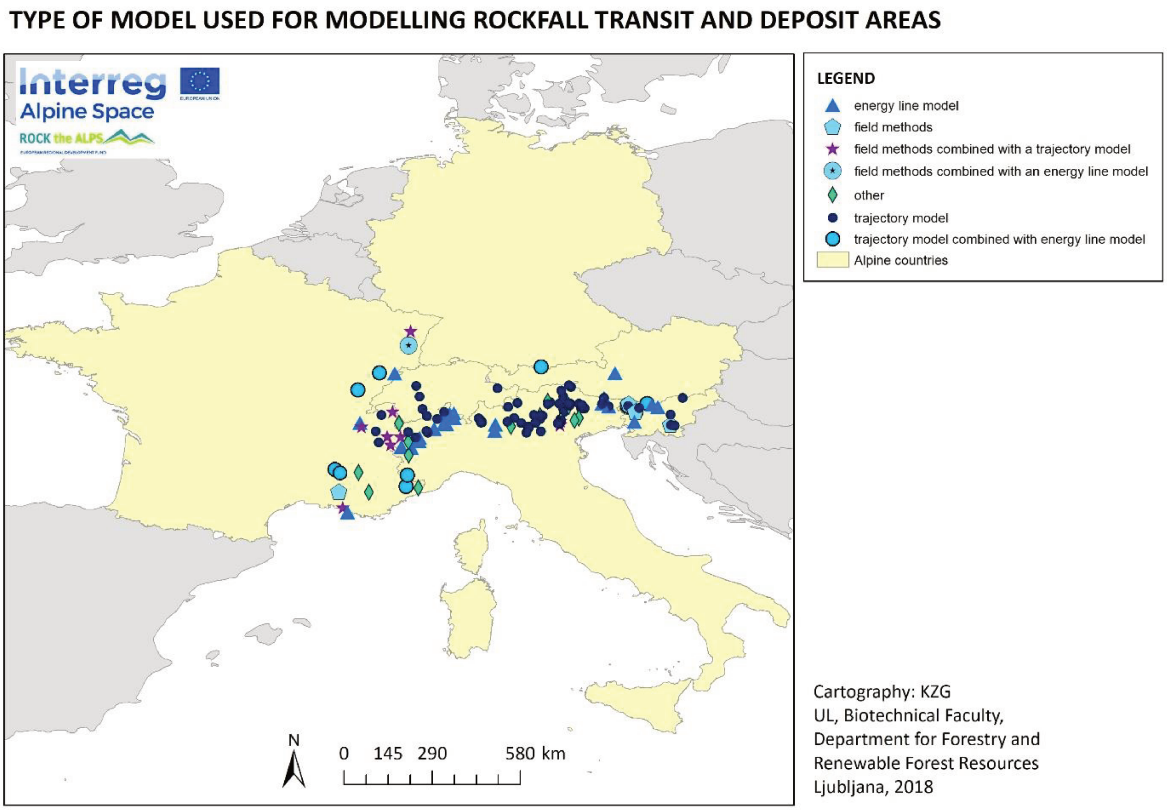


FIGURE 1.14 – Types de modèles utilisés pour la modélisation de la chute de blocs selon Kobal & Zabota [2018]

.

la communauté à continuer à développer ces outils [Kobal & Zabota, 2018].

1.2.3 Approches numériques

Les approches numériques du calcul trajectographique sont répertoriées de manière détaillée dans les travaux relativement récents de [Dorren *et al.*, 2006; Leine *et al.*,

2014; Volkwein *et al.*, 2011]. Basée sur les équations de mouvement, (principe de la dynamique des corps solides), elles sont moins globales que les approches empiriques. La descriptions plus détaillée de chaque phase de la trajectoire implique et une mise en oeuvre numérique (logicielle) et des connaissances de base en mécanique. Les codes trajectographiques peuvent être classés de plusieurs manières, et ce classement est de plus en plus difficile, puisque les approches deviennent elles mêmes de plus en plus raffinées. Dans un premier moment, nous montrerons les codes classés en fonction de leur spatialité ; c'est à dire, la façon dont le code représente le mouvement des projectiles dans l'espace. Les codes peuvent donc être classés en : 2D (propagation dans un plan vertical), 2.5D (ou pseudo-3D) et 3D. D'une manière globale, les codes simulent la trajectoire d'un bloc, dont la phase de vol libre fait appel aux équations classiques du mouvement accéléré. Les méthodes historiques, considérant la cinématique au centre de masse du bloc, ont décrit de la manière suivante :

Soit $\vec{v}(t)$ et $\vec{x}(t)$ les vecteurs vitesses et position d'un point matériel (le centre de masse du bloc) de position initiale égale au vecteur $\vec{x}_0$ et vitesse initiale égale à $\vec{v}_0$, nous avons :

$$\vec{v}(t) = g\vec{z}t + \vec{v}_0 \qquad \text{et} \qquad \vec{x}(t) = \frac{g\vec{z}}{2}t^2 + \vec{v}_0 t + \vec{x}_0 \tag{1.4}$$

où $g = -9.81$ m s^{-2} est l'accélération de la gravité et $\vec{z}$ un vecteur unitaire d'espace dans le sens vertical positif. L'effet de l'air est négligeable. De cette manière, n'importe qui peut développer son propre code trajectographique ; au moins pour reproduire la phase de vol du centre de masse du corps. Le vecteur position peut être exprimé en deux ou trois dimensions.

Dans le cas d'un modèle 2.5D, le terrain est une vue en plan et nous ajoutons une troisième variable : l'altitude. À partir de cette troisième information, le modèle spatial du terrain est représenté par un grillage de cellules carrées, de dimensions fixes (comme, par exemple, une carte de type *raster*). Après chaque rebond, le code calcule dans un premier instant si le bloc a quitté une de ces cellules. Si cela s'est produit, la nouvelle direction du plan de propagation est calculée par rapport à la ligne de plus grande pente. Sinon, il garde la direction d'avant impact. Suivant cette nouvelle direction le bloc continuera sa trajectoire, après collision (Figure 1.19), calculée dans le nouveau plan. Reste à déterminer les conditions initiales en vitesse du nouveau départ (vitesses réfléchies), liées à une dissipation de l'énergie initiale à estimer, dans les directions normales et tangentielles (et, dans certains codes, les nouvelles vitesses réfléchies de rotation) avant de passer à la prochaine phase de vol. Ces calculs sont généralement faits à chaque *pas de temps*, et jusqu'à l'arrêt complet du projectile. En d'autres mots, jusqu'à la dissipation complète de son énergie initiale. L'enjeu est donc la encore d'établir les conditions de dissipation d'énergie au rebond.

Pour les simulations 3D, plus récentes, ces équations de mouvement sont étendues en trois dimensions, historiquement appliquées au centre de masse. La vraie forme des blocs peut aussi être utilisée à travers de l'inclusion des *corps rigides* délimité par un nuage de points maillés (enveloppe convexe ou non-convexe) ou à travers d'un assemblage de sphères (*e.g. clumps*). Ainsi, la prise en compte de n'importe quelle géométrie est possible (de la sphère aux polyèdres non-convexes) et les modèles de rebond sont développés de manière à reproduire les comportements les plus complexes

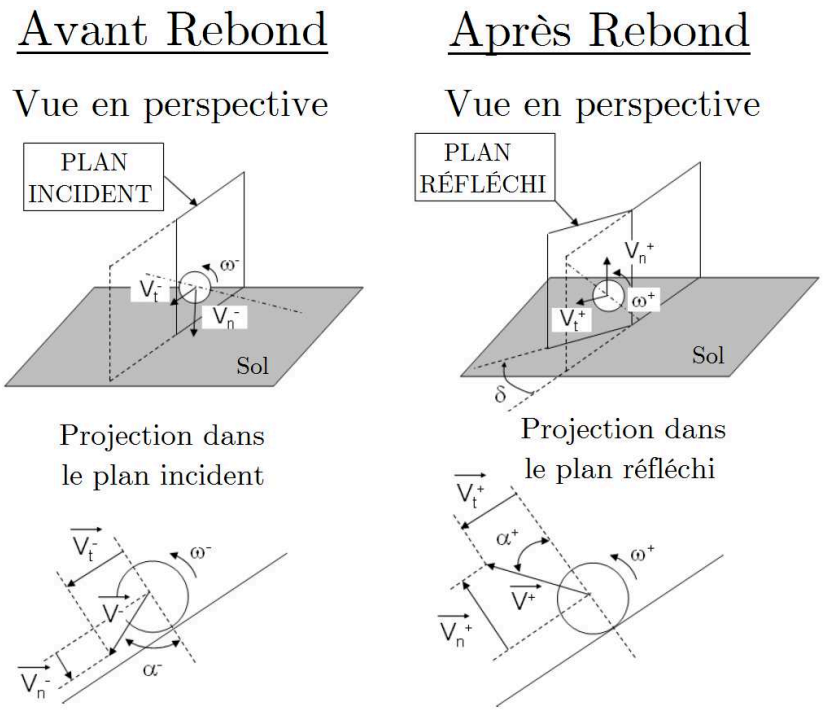


FIGURE 1.15 – Représentation schématique de la projection d'une trajectoire 2.5D (pseudo-3D) : le vecteur des vitesses avant impact sont liées au plan incident $\boldsymbol{V}_- = \{V_{n-}, V_{n-}, \omega_-\}$ (vitesses incidentes) ; et le vecteur des vitesses après impact sont liées au plan réfléchi $\boldsymbol{V}_+ = \{V_{n+}, V_{t+}, \omega_+\}$ (vitesses réfléchies), qui sont fonction de l'angle d'impact avant α_- et après α_+ rebond. Adapté de Volkwein *et al.* [2011].

au niveau du contact – tels que le roulement et le glissement. On parle, ainsi, d'un modèle de rebond focalisé sur l'impact (ou collision). Il n'y existe pas de consensus dans le classement des codes 3D, puisque chaque auteur considère le facteur "3D" de manière différente [Dorren & Berger, 2013].

On peut donc distinguer les codes par la méthode employée pour décrire la physique du mouvement du bloc : *(*i) soit elle est simplifiée (mécanique du point matériel) et la trajectoire décrite est celle du centre de masse du bloc et ne prend pas en compte la rotation, *(*ii) soit elle intègre le phénomène de glissement et de roulement et la forme est prise en compte implicitement par les valeurs d'inertie du bloc *(*iii) soit la résolution de l'impact avec le sol se fait à la surface du bloc. Par ailleurs, les schémas d'intégration numérique des équations de mouvement peuvent être implicites ou explicites selon les codes.

Dans la méthode utilisée dans ROCKYFOR3D [Dorren, 2016; Pichler *et al.*, 2005] (probabiliste), l'opérateur de fournir les trois dimensions principales du bloc (d1,d2 et d3), ou le rayon d'une sphère si c'est le cas. Ainsi, l'effet de forme est intégré, à chaque impact, à partir des relations cinétiques pré-établies *via* l'inertie dans les 3 directions d'espace [Pichler *et al.*, 2005]. Ces relations sont souvent validées à partir d'essais expérimentaux, d'hypothèses probabilistes ou de cas réels issus de la littérature. Les approches explicites de la forme sont souvent associées aux codes en éléments discrets en trois dimensions, tels que PFC (ITASCA), YADE [Kozicki & Donze, 2008], ROCPRO3D

(J.D. Barnichon), *etc.* mais l'addition des formes polygonales est tout à fait possible en deux dimensions, ce qui est le cas pour ROCFALL (Rocscience), KAYASS++ (IMSRN), PROPAG (CETE Lyon), entre autres. Les approches dites hybrides alternent les phases de vols en point matériel (*i.e.*, Lumped Mass) et les phases d'impact avec prise en compte de la forme (*i.e.*, Corps rigides). La Figure 1.16 montre de façon synthétique les différentes approches décrites dans cette section, en fonction de la forme.

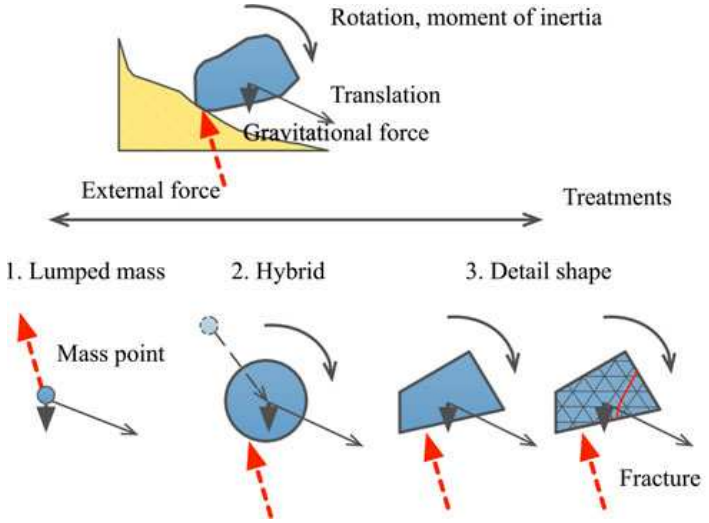


FIGURE 1.16 – La figure en haut montre les forces résultantes sur un bloc rocheux lors de sa propagation par un profil type, en deux dimensions. Nous pouvons par la suite distinguer : (1) Approche "point matériel" (*Lumped Mass*), sans prise en compte de la forme, ni de la rotation ; (2) Approche Hybride : ici on distingue la trajectoire avant impact du bloc, considéré comme un point matériel, puis lors de la collision le bloc a sa vraie géométrie ; (3) Approche de corps rigide avec détail de la forme, contenant ou pas le réseau de fracturation. Adapté de [Masuya *et al.*, 2009] *apud* [Chen *et al.*, 2013].

La prise en compte de la forme est donc très importante. Certains auteurs soulignent l'importance de cette variable sur la distance de propagation ainsi que sur l'étalement des dépôts [Crosta & Agliardi, 2004; Glover *et al.*, 2015]. Dans la méthode DDA (Analyse de la déformation discrète – *Discontinuous Deformation Analysis* en anglais), Chen *et al.* [2013] a testé d'abord la distance d'arrêt des blocs, géométries variables, sur une pente en deux dimensions (Figure 1.17). Il conclut que plus la géométrie est symétrique et homogène, plus de grandes distances sont parcourues. Les blocs ayant des géométries plus réalistes s'arrêtent plus tôt dans la pente.

Ribeiro [2013] a également mené une étude sur l'influence de la forme des blocs sur les distances de propagation en utilisant les codes PFC-3D (ITASCA) et ROCFALL. Dans cette étude, les blocs sphériques sont ceux qui réalisent les plus grandes distances, alors que ceux ayant des géométries irrégulières s'arrêtent bien avant. Cela se produirait par une augmentation de l'effet de glissement pour les blocs plus allongés, qui perdent d'avantage l'énergie par frottement. Un dernier test fait par [Chen *et al.*, 2013], utilisant la méthode DDA, a permis de constater que la spatialité des codes numériques jouent un rôle important sur la dispersion latérale (Figure 1.18). L'étalement et la distance maximale de propagation sont obtenues à partir des simulations 2.5D ou 3D, ce qui est impossible dans les simulations 2D.

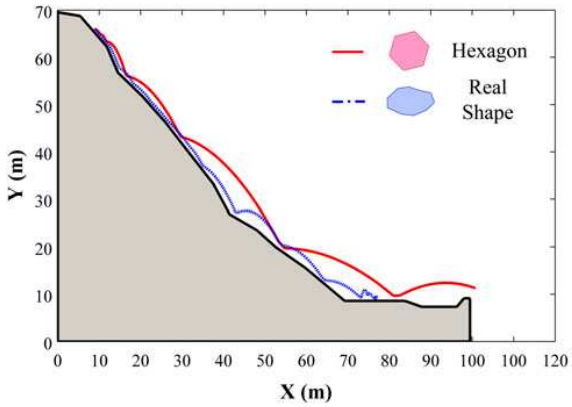


FIGURE 1.17 – Effet de la forme des blocs sur une pente de propagation type. [Chen *et al.*, 2013]

.

Des rapports sur la distance maximale d'attente et l'étalement sont établis par Chen *et al.* [2013] et par d'autres auteurs et seront montrés plus loin dans la section 1.2.5.

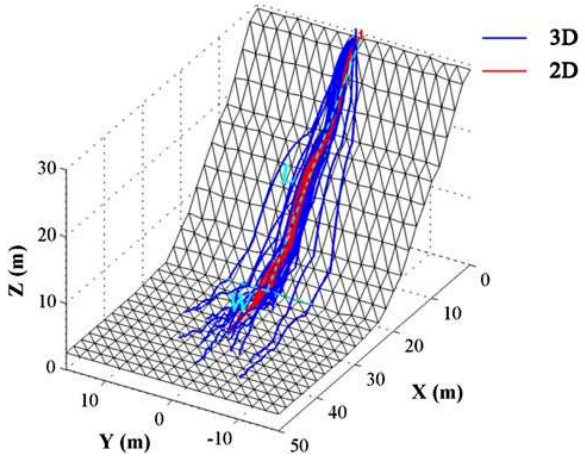


FIGURE 1.18 – Effet de forme de l'approche DDA en deux et trois dimensions [Chen *et al.*, 2013].

.

Le tableau 1.19 montre les différents codes existants, en soulignant leurs approches en fonction du modèle de collision et de leurs spatialités. Certains éléments dans la liste ne sont pas mis à jour et apparaissent comme étant de type 2D–Lumped Mass. Par exemple, le code *RocFall* permet l'utilisation d'une nouvelle approche de corps rigide en deux dimensions.

Pour les modèles 2D et 3D où la prise en compte de la forme permet l'adjonction d'un modèle de transfert d'énergie lors de l'impact, les énergies de translation et de rotation sont calculées à travers des équations classiques de la deuxième loi de la dynamique, qui sont parfois résolues soit par les approches mécaniques non-régulières [Moreau, 2011, 2012] (utilisée dans RAMMS, par exemple [Leine *et al.*, 2014] ; soit par l'approche régularisée de Cundall & Strack [1979], qui est utilisée dans cette thèse

Model/programme name	Reference/Year	Spatial Dimensions	Approach	Probabilistic	Forest*
N.N.	(Ritchie, 1963)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
Discrete Element Method	(Cundall, 1971)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
Computer Rockfall Model	(Piteau and Clayton, 1976)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Partly	No
N.N.	(Azimi et al., 1982)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
N.N.	(Falcetta, 1985)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
ROCKSIM	(Wu, 1985)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
SASS	(Bozzolo and Pamini, 1986)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
EBOUL-LMR	(Descoeudres and Zimmermann, 1987) (Labiouse et al., 2001)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	No
PROPAG/CETE Lyon	(Rochet, 1987a)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
N.N.	(Hungr and Evans, 1988)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
CRSP (4.0)	(Pfeiffer and Bowen, 1989) (Jones et al., 2000)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
N.N.	(Van Dijke and van Westen, 1990)	2-D (x,y)	Lumped-mass	No	No
N.N.	(Kobayashi et al., 1990)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
Rotomap	(Scioldo, 1991)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	No
CADMA	(Azzoni et al., 1995)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
Rockfall (Dr. Spang)	(Spang and Sönser, 1995)	2-D (slope profile)	Rigid body	Yes	Yes
ROFMOD 4.1	(Zinggeler et al., 1990) (Krummenacher and Keusen, 1996)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
3-D-GEOTEST-Zinggeler	(Krummenacher et al., 2008)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
RocFall	(Stevens, 1998)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
Sturzgeschwindigkeit	(Meissl, 1998)	2-D (x,y)	Lumped-mass	No	No
STONE	(Guzzetti et al., 2002)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	No
STAR3-D	(Dimnet, 2002) (Le Hir et al., 2006)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	Yes
Rocky3	(Dorren and Seijmonsbergen, 2003)	2.5-D (x.y coupled with slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
HY-STONE	(Crosta et al., 2004) (Frattini et al., 2008) (Agliardi et al., 2009)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
RockyFor	(Dorren et al., 2004) (Dorren et al., 2006) (Bourrier et al., 2009a)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
DDA	(Yang et al., 2004)				
RAMMS::Rockfall	(Christen et al., 2007)	3-D (x,y,z)	Rigid body	Yes	Yes
RockFall Analyst	(Lan et al., 2007)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Partly	No
PICUS-ROCKnROLL	(Woltjer et al., 2008) (Rammer et al., 2007)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	Yes

FIGURE 1.19 – Différents logiciels trajectographiques existants – Adapté de [Guzzetti *et al.*, 2002]*apud* [Volkwein *et al.*, 2011].

(ROCKABLE [Richefeu, 2005]). Dans les modèles anciens, simplifiés, utilisant la mécanique du point matériel, la dissipation d'énergie a l'impact est faite à travers un coefficient, généralement appelé "coefficient de rebond ou de restitution", et qui n'a pas toujours de sens physique réel. En effet, lorsqu'il est estimé à partir d'essais expérimentaux, il peut atteindre des valeurs supérieures à 1, car ni la forme, ni surtout l'effet d'une rotation du bloc au cours de sa trajectoire ne sont prises en compte ; hors comme on le détaillera dans la partie suivante, dans de nombreux cas, on remarque un transfert d'énergie de rotation en énergie de translation.

1.2.4 Coefficients de restitution (CoR)

Les premières approches numériques utilisées en trajectographie propose de considérer la dissipation d'énergie d'impact par un ratio entre la vitesse d'arrivée du bloc au point d'impact (vitesse incidente) et la vitesse après rebond (vitesse réfléchie). Ce ratio est généralement connu sous le nom de *coefficients de restitution*. D'autres auteurs établissent ces ratios en fonction de l'énergie cinétique du bloc avant et après impact,

ratios pouvant être raffinés en intégrant l'énergie en rotation, et/ou en détaillant selon la direction des trajectoires. Ces coefficients de restitution (CoR) sont alors définis suivant deux directions distinctes : une dans la direction normale et l'autre dans la direction tangentielle au contact, notamment :

$$e_n = -\frac{V_{n+}}{V_{n-}} \qquad \text{et} \qquad e_t = \frac{V_{t+}}{V_{t-}} \tag{1.5}$$

Les coefficients de restitution en fonction du rapport d'énergie sont, quant à eux, calculés comme suit :

$$e_n^2 = \frac{V_{n+}^2}{V_{n-}^2} \qquad \text{et} \qquad e_t^2 = \frac{V_{t+}^2}{V_{t-}^2} \tag{1.6}$$

où e_n est le coefficient de restitution dans la direction normale à la surface de sol impacté, et e_t le coefficient de restitution dans la direction tangentielle [Azzoni & de Freitas, 1995; Banton *et al.*, 2009; Chau *et al.*, 2002; Evans & Hungr, 1993; Guzzetti *et al.*, 2002; Pfeiffer & Bowen, 1989; Wu, 1985]. Après estimation des valeurs des coefficients de restitution (expérimentalement, arbitrairement....), les codes de simulations imposent apres impact les vitesses réfléchies (V_n+ et V_t+) à travers des relations suivantes :

$$V_{n+} = -e_n V_{n-} \qquad \text{and} \qquad V_{t+} = e_t V_{t-} \tag{1.7}$$

Quelle que soit la méthode pour définir ces coefficients de restitution, il est possible d'intégrer, pour raffiner l'approche, des effets énergétiques, stochastiques et de forme. De cette manière, les trajectoires d'avant et après rebond peuvent être calculées par les moyens les plus divers, qui dépendent du niveau de sophistication de l'approche numérique [Richefeu & Villard, 2016]. L'identification des valeurs des CoR reste le problème majeur de l'ingénieur "risques naturels". Écrites sous forme matricielle, ces relations se résument alors de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{n+} \\ V_{t+} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e_{nn} & e_{tn} \\ e_{nt} & e_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{n-} \\ V_{t-} \end{pmatrix} \tag{1.8}$$

Des essais expérimentaux d'impacts, en nombre suffisant, avec mesures ou estimation, des vitesses permettent d'identifier les termes.

Généralement, les coefficients de restitution ne tiennent pas compte de l'énergie de rotation de manière directe, puisqu'ils considèrent le roulement comme une séquence de petits rebonds. Certaines lois stochastiques, comme par exemple celle élaborée par Bourrier *et al.* [2009], le font sous forme matricielle. Dans son approche, chacun de ces paramètres d'entrée (a_1 à a_9) sont tirés des analyses statistiques. L'identification des paramètres est faite à partir d'une série de simulations discrètes en deux dimensions, et qui intègrent le changement aléatoire des conditions initiales (notamment de la vitesse de rotation) du bloc et du sol impacté :

$$\begin{pmatrix} V_{t+} \\ V_{n+} \\ \omega_+ \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{t-} \\ V_{n-} \\ \omega_- \end{pmatrix} \tag{1.9}$$

L'établissement des lois mettent en évidence le comportement aléatoire du phénomène de chute de blocs, qui est directement lié à la nature du sol et du volume impactant. L'incertitude sur la variabilité des paramètres de restitution amène à la détermination des fourchettes de valeurs qui sont fonction de la variabilité des conditions initiales. Elles sont tirées au sort sur des distributions statistiques pré-identifiées, en utilisant la Méthode de Monte Carlo [Metropolis & Ulam, 1949] qui est appliquée sur n'importe quel type d'information, telles que la cinématique, l'angle d'impact, rugosité, inclinaison de la pente, etc.

En bref, la méthode de Monte Carlo appliquée à la chute de blocs se résume à choisir de manière aléatoire des échantillons d'entrée, *en nombre suffisamment important pour obtenir des distributions significatives des caractéristiques statistiques des paramètres de sortie [sic]*, [Hatem, 2009]. Dans notre cas, ces paramètres de sortie sont justement les valeurs des vitesses réfléchies, représentées par le vecteur V_+. Nous utiliserons cette méthode de caractérisation afin de déterminer les distributions qui caractérisent nos trois paramètres principaux dans le chapitre 3, où nous aborderons cette identification avec plus de détails.

Ainsi, plusieurs types d'essais expérimentaux ont été faits pour corréler les valeurs des coefficient de restitution classiques, e_n et e_t, aux différents types de matériaux des pentes impactées, rencontrées dans la nature. La plupart de ces tests consistent à retranscrire la trajectoire des blocs (souvent des sphères) avec l'aide d'une caméra rapide et établir les vitesses incidentes et réfléchies à travers des traitements vidéo. Utilisant ces techniques, Wu [1985] a effectué des lancements de projectiles sphériques sur plan incliné, où il a établi une relation linéaire entre l'angle d'inclinaison du support et l'angle d'incidence lors de l'impact. Comme Wu [1985], les auteurs Asteriou & Tsiambaos [2018]; Bourrier *et al.* [2009]; Buzzi *et al.* [2011]; Caviezel *et al.* [2017]; Chau *et al.* [2002]; Chen *et al.* [2013] essaient de calibrer leurs codes à partir des enregistrements vidéo. Pour aller au delà des analyses d'images, Richards *et al.* [2001] a réalisé des mesures faites par un scléromètre, qui ont permis d'établir une possible relation entre le coefficient S (indice de *Schmidt*) et le coefficient de rebond dans la direction normale. Plus connue sous le nom de Marteau de *Schmidt*, cet appareil est conçu pour estimer la dureté du béton à partir des mesures ponctuelles ou surfaciques. Pour les surfaces rugueuses, le coefficient de restitution dans la direction normale a présenté une bonne corrélation avec les mesures faites par le marteau, d'où la relation suivante été établie :

$$e_n = \frac{-145 + 4S_{\text{surface}} + 2S_{\text{sphère}} + 2\alpha}{1000} \tag{1.10}$$

où S est l'indice de dureté de *Schmidt*, e_n le coefficient de restitution dans la direction normale et α est l'angle d'inclinaison de la pente impactée. Cependant, aucune corrélation entre l'indice de Schmidt S et le coefficient de restitution tangentielle n'a pas pu être trouvée.

Asteriou *et al.* [2013] définit, en plus du coefficient de restitution dans les directions normale et tangentielle, le coefficient de restitution en fonction de la cinématique du corps, à travers de l'équation suivante :

$$v_{COR} = v_r/v_i \tag{1.11}$$

où la norme de la vitesse incidente est donnée par v_i et la norme de la vitesse réfléchie est donnée par v_r, respectivement.

À partir de mesures faites utilisant le marteau de *Schmidt*, la corrélation suivante a ainsi pu être établie :

$$v_{COR} = \big(0.0075 + (p - 75) \times 0.0002\big) \times R + 0.17 \tag{1.12}$$

où p (en pourcent) est la probabilité, en pourcentage, que la valeur v_{COR} soit au dessous de la valeur calculée. Cette corrélation a été estimée pour les matériaux présentant une valeur de S plus élevée que 15. Au total, 11 types de substrat ont été testés.

Quelques valeurs pour les coefficients de restitution de la littérature selon la nature du substrat impacté sont rassemblées dans la Figure 1.20.

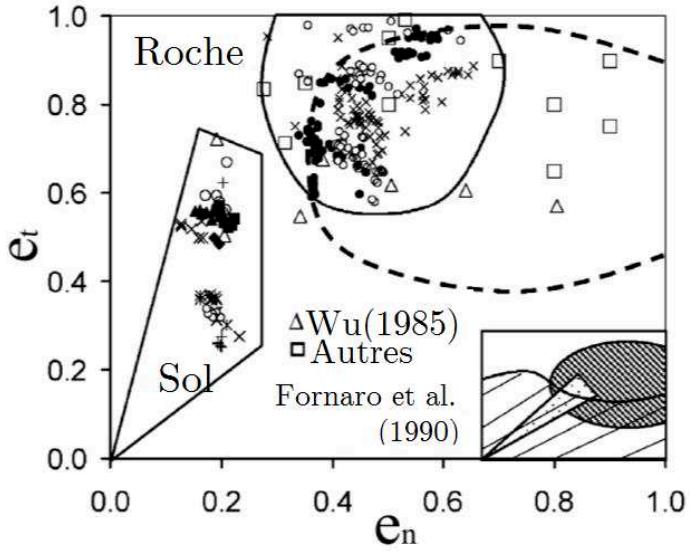


FIGURE 1.20 – Valeurs caractéristiques des coefficients de restitution dans les directions normales (e_n) et tangentielles (e_t). Adapté de [Chau *et al.*, 2002].

.

Excepté pour les codes de type stochastiques, le comportement "aléatoire" de la chute de blocs est plus difficilement reproduit. Cependant, pour les codes de type déterministes, le calcul parallèle peut venir aider à lancer un lot de simulations où chacun de ces lancements présente une variabilité dans les conditions de départ. Par contre, ces conditions sont déterminées avant le lancement des simulations. Compte tenu du temps de calcul qui peut s'avérer très long, les hypothèses initiales doivent donc rester cohérentes avec la réalité. Au contraire de ce qui se passe dans l'utilisation des codes stochastiques, un plus faible nombre de simulations peut suffire pour atteindre une convergence des résultats [Dorren & Berger, 2013]. L'avantage des modèles déterministes est que la forme y est intégrée, ce qui permet d'évaluer au mieux le taux de dissipation dans les directions normale, tangentielle et en rotation. Le plus gros désavantage est que la calibration des paramètres impliqués n'est pas une tâche facile, ce qui demande des essais expérimentaux exhaustifs d'adéquation. En pratique, un nombre suffisant d'échantillons expérimentaux consistants, dans les mêmes conditions initiales est toujours nécessaire, et l'on utilise alors une méthode d'optimisation pour obtenir la

meilleure identification, ainsi que des indicateurs statistiques. Ces études sont parfois longues et récurrentes et pour économiser du temps de réponse, l'ingénieur a eu souvent recours à des formulations et estimations simplistes pour parvenir à estimer le transfert de l'énergie totale en énergie de rotation. Une partie significative de l'énergie cinétique tangentielle est transformée ensuite en énergie de rotation. Certains auteurs estiment qu'elle représente de 20% [Jaboyedoff & Labiouse, 2011] à 30% [Volkwein *et al.*, 2011] de l'énergie totale incidente, et a une forte influence sur la dispersion latérale que ces blocs peuvent produire.

1.2.5 Dispersion latérale

La déviation latérale d'une trajectoire est extrêmement sensible aux variations topographiques, dont l'inclinaison de la pente, la rugosité, l'aspérité, et la géométrie des blocs rocheux. À grande échelle, cet effet est encore plus remarqué. Selon Azzoni & de Freitas [1995]; Bozzolo & Pamini [1986]; Crosta & Agliardi [2004], la déviation latérale est déterminée par le ratio entre la distance latérale qui sépare les deux trajectoires les plus éloignées et la longueur de la propagation de plus forte pente. Selon Azzoni & de Freitas [1995] *apud* Crosta & Agliardi [2004], cette dispersion représente 10 jusqu'à 20% de la distance parcourue par les blocs diminue pour les pentes raides ou dans les cas où la propagation s'effectue dans des torrents canalisants [Evans & Hungr, 1993]. Enfin, des simulations réalisées par Crosta & Agliardi [2004] ont montré que pour les pentes rugueuses et complexes, ce montant s'élève à 34%.

Ainsi, les ouvrages protecteurs doivent être dimensionnés en fonction de l'évaluation spatiale des trajectoires, ainsi que de la distribution des énergies associées à l'impact de ces blocs dans la zone pré-déterminée d'implantation. Dans cette perspective, très peu de solutions sont fournies comme complément à l'étude de trajectographie en deux dimensions. Nous montrerons ici quelques méthodes empiriques retrouvées dans la littérature, qui sont réellement utilisées en bureau d'études ou qui sont intégrées directement dans les codes numériques.

Plusieurs auteurs essaient d'étendre la méthode de la ligne d'énergie, qui est calculée en deux dimensions, à la troisième dimension. Cela veut dire que, selon la pente de propagation, on fait bousculer cette ligne virtuelle à gauche ou à droite, depuis la hauteur sommitale de la zone source, d'un angle α arbitraire, choisi par l'ingénieur. Dans le logiciel *Rollfree* (Figure 1.21) cet angle se situe entre 5° et 30°. Les développeurs du code recommandent d'utiliser un angle d'analyse entre 20° et 30°.

La Figure 1.22 montre une méthode utilisée dans le cas d'une certaine longueur de falaise instable. Elle consiste à calculer l'étendue du dépôt en fonction de la longueur de la zone source. Dans la Figure 1.22, cette longueur est la distance entre les deux points extrêmes délimitant la zone source (falaise). À partir de ces deux points, un cône est défini (traits noirs), à droite et à gauche, avec un angle arbitraire de 30°.

La dispersion latérale est donc prise en compte à partir des relations géométriques empiriques reliées à la zone source, mais des corrélations sur le dépôt sont également possibles. D'autres approches relient la distance maximale de propagation à l'étalement du dépôt. Elle consiste à prendre l'extension en trois dimensions de la méthode de la

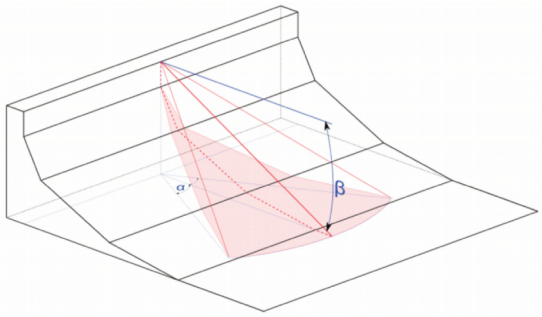


FIGURE 1.21 – Méthode de calcul de la dispersion latérale à partir de l'extension de la méthode de la ligne d'énergie – Logiciel Rollfree [Toe & Berger, 2015] Adapté de [Mazet-Brachet, 2018].

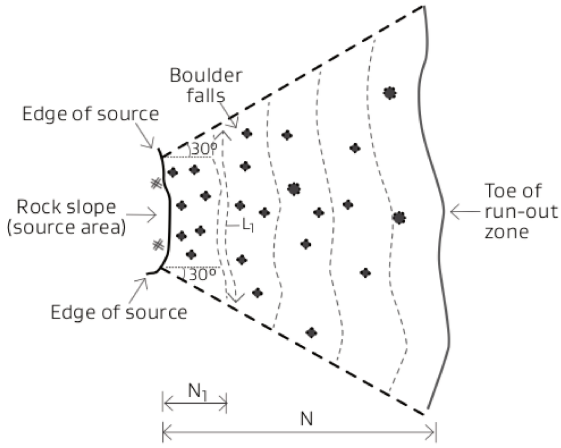


FIGURE 1.22 – Méthode empirique proposée dans Massey *et al.* [2012].

ligne d'énergie (qui est appelée *"Shadow Cone"*) et établir des relations avec la dispersion latérale des dépôts qui en dérivent. La Figure 1.23 montre une de ces relations, faites en fonction de cette approche et validée à partir d'observation sur le terrain.

Dans cette méthode, le calcul de la dispersion latérale (δ_θ) est fait à travers de l'équation :

$$\delta_\theta = \arcsin \frac{w}{2l} \tag{1.13}$$

où $2 \times \delta$ représente l'éventail d'ouverture du cône, w est la longueur de la cible (*e.g.* longueur de la barrière de protection ou de l'enjeu), ajoutée du diamètre du bloc ; et l la distance maximale qu'un bloc peut atteindre lors d'un éboulement, obtenu à travers de la méthode de la ligne d'énergie.

D'autres relations similaires sont obtenues dans le travail Nishimura *et al.* [2008]. Proche de la relation établie par Masuya *et al.* [2009], montrée par la Figure 1.24, elle est fonction de la dispersion latérale du dépôt L et de la distance parcourue par le bloc le plus éloigné S dans le profil de propagation.

D'autres relations, intégrant le niveau d'aspérité et de rugosité du profil sont explorées dans les travaux de [Crosta & Agliardi, 2004; Ferrari *et al.*, 2015; Nishimura *et al.*,

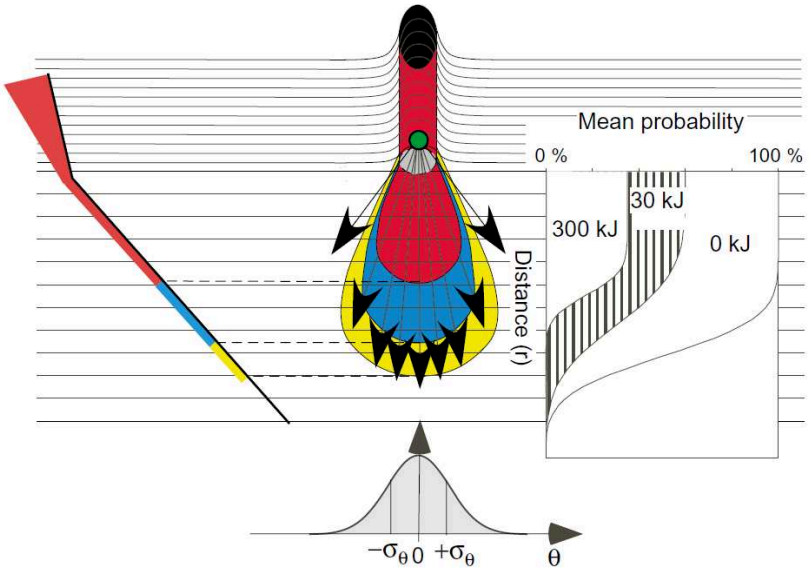


FIGURE 1.23 – Méthode d'estimation de la dispersion latérale "pseudo-3D" en utilisant la méthode du *Shadow Cone* [Jaboyedoff *et al.*, 2005]. Les zones en rouge, bleu et jaune affichent la probabilité d'occurrence en termes d'énergie de propagation, qui fait appel au *zonage de danger* suisse. Ces données probabilistes sont utilisées dans les codes de calcul de type stochastique.

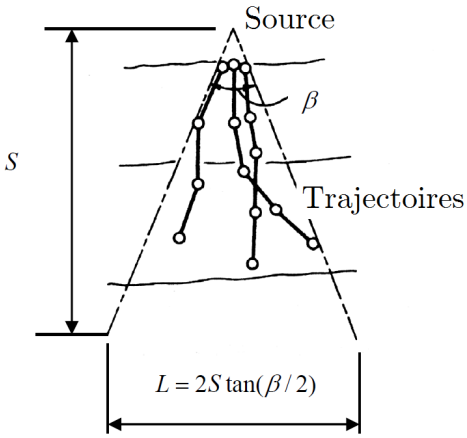


FIGURE 1.24 – Méthode d'estimation de la dispersion latérale en fonction de l'étalement (L) et de la longueur maximale d'atteinte (S) d'un bloc. L'angle β est l'éventail de l'ouverture du cône [Masuya *et al.*, 2009].

2008]. Elles permettent de tracer des probabilités d'atteinte des blocs qui varient en fonction de l'extension de la zone source et des points les plus écartés de ces "cônes de propagation". Cet effet est moins prononcé dans les vallées contenant des pentes très raides. Cependant, pour n'importe quelle valeur des rapports entre dispersion latérale et longueur parcourue (W/L ou L/S pour Masuya *et al.* [2009]), les travaux cités dans cette section ont permis également de conclure que les dispersions latérales mesurés expérimentalement sur des évènements existants, ou à partir de simulations numériques, sont généralement de l'ordre de 10 à 20% de la valeur de la distance maximale par-

courue. Pour Crosta & Agliardi [2004]; Jaboyedoff & Labiouse [2011], en général, cette valeur varie autour des ±20°, ce qui est environ le double des valeurs trouvées par Azzoni & de Freitas [1995].

Des valeurs probabilistes de déviation sont obtenues à travers d'essais expérimentaux et peuvent être exprimées en fonction des vitesses incidentes [Dorren *et al.*, 2006]. La Figure 1.25 montre le calcul de la probabilité de déviation latérale d'un bloc sur la ligne de plus forte pente (en anglais, appelée *Slope Aspect*) en fonction de sa vitesse. Le Tableau 1.1 montre les tranches de vitesses incidentes suivantes : I : $V < 10m.s^{-1}$, II : $10 < 15m.s^{-1}$ et tranche III : $V > 15m.s^{-1}$. Notons que, pour un bloc ayant une vitesse d'incidente de Classe I (soit, $V < 10m.s^{-1}$), 49% des blocs dévient entre 0 et 5 degrés ; 15% dévient entre 5 et 10 degrés ; puis 9% du total dévient d'un angle α situé entre 15 et 20 degrés.

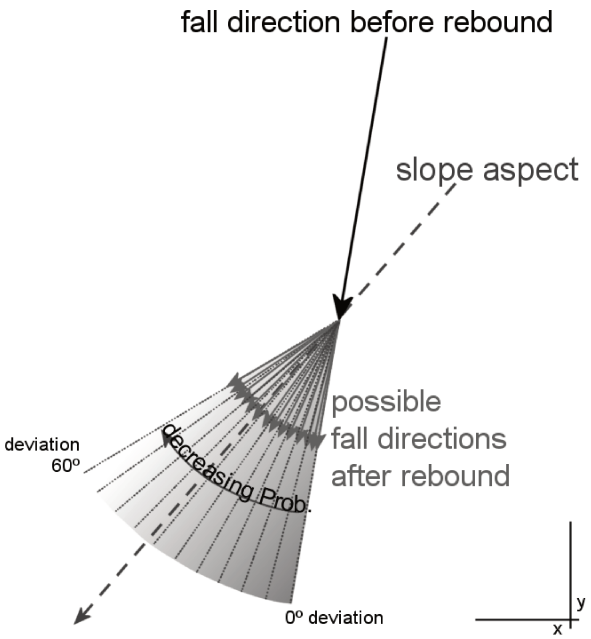


FIGURE 1.25 – Probabilité de propagation d'un bloc dans la ligne de plus grande pente (*Slope Aspect*) [Dorren *et al.*, 2006].

TABLEAU 1.1 – Classes I, II et III des vitesses d'impact et les tranches de probabilités de déviation latérale associées (α).

$\alpha(°)$	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
I	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
II	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
III	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

L'étude de Dorren permet également d'établir des lois probabilistes en fonction de la vitesse de l'impact avec les arbres. Par simplicité, l'effet de la végétation sur la propagation des blocs est un aspect que nous n'étudierons pas dans cette thèse.

1.3 Dimensionnement

Dans l'ingénierie des risques, le dimensionnement d'un ouvrage de protection est basé dans la comparaison entre la description de l'énergie cinétique du bloc et de la capacité de référence de la barrière [Lambert & Bourrier, 2013]. La bonne conception de ces structures dépend directement de la bonne connaissance de la magnitude de l'énergie d'impact produite par la chute des blocs, de la caractéristique de la parade [Volkwein *et al.*, 2011], ainsi que des possibles volumes impliqués et enfin du repérage des sources de déclenchement les plus probables.

La fiabilité d'un ouvrage, au sens de la norme française NF X 60-500 de 1988 (Actuellement en révision), *est la probabilité que l'ouvrage accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné* [Baroth, 2016]. Cette fonction doit répondre à deux critères qui sont : i) assurer le bon fonctionnement de la structure vis à vis des états limites de service (ELS) et ii) résister aux sollicitations liées à la stabilité globale de l'ouvrage, en tenant en compte des charges accidentelles, notamment. Cette dernière est relative aux vérifications des états limites ultimes (ELU). À titre d'exemple, pour les ouvrages actifs tels que les filets et les grillages, le calcul à l' ELS est le critère dimensionnant. Ce n'est pas la résistance à la rupture mais la déformation des filets qui doit être examinée plus finement : la rigidité est donc un paramètre important dans le dimensionnement, au même titre que la résistance au poinçonnement, qui définit la capacité du système à résister à la pression d'un bloc en appui [Maccaferri, 2019].

Dans le cas où le massif rocheux instable ne peut pas être retenu par une structure, les écrans pare-blocs retiennent les blocs détachés (ouvrages passifs). Ces écrans sont alors sollicités en dynamique, et les dissipateurs d'énergie de ces barrières doivent être certifiés conformément au *Guide d'Agrément Technique Européen* (ETAG 027). En termes de dimensionnement, les ingénieurs se basent donc sur la performance des écrans par rapport aux tests d'impact à grande échelle effectués selon les critères définis par l'ETAG 027.

De manière générale, les vérifications à l'ELU des ouvrages passifs consistent à *vérifier que le bloc incident est contrôlé correctement, même si le dispositif est alors ruiné (et perd donc, totalement ou presque, son niveau de service)* [Durville *et al.*, 2010] ; alors que les vérifications à l'ELS tiennent compte de la capacité de la structure à garder un potentiel de protection résiduelle suffisant, dans le temps et/ou après plusieurs impacts.

Pour les ouvrages actifs, cette vérification concerne, à la fois, à évaluer l'état-limite de ruine du dispositif (ELU), ainsi que à l'état limite de service, comme mentionné précédemment, et qui sont intimement liés aux déformations et déplacements du rocher [Durville *et al.*, 2010]. Quel que soit le type d'ouvrage, le géotechnicien en charge d'un tel projet doit effectuer les vérifications selon les différents scénarios normalisés possibles (actions sismiques, permanentes, accidentelles et variables) en suivant les eurocodes.

La Figure 1.26 montre les différentes solutions en fonction des types d'ouvrages existants et de la zone atteinte par la chute de blocs rocheux. Ces zones sont les mêmes que celles montrées sur la Figure 1.10.

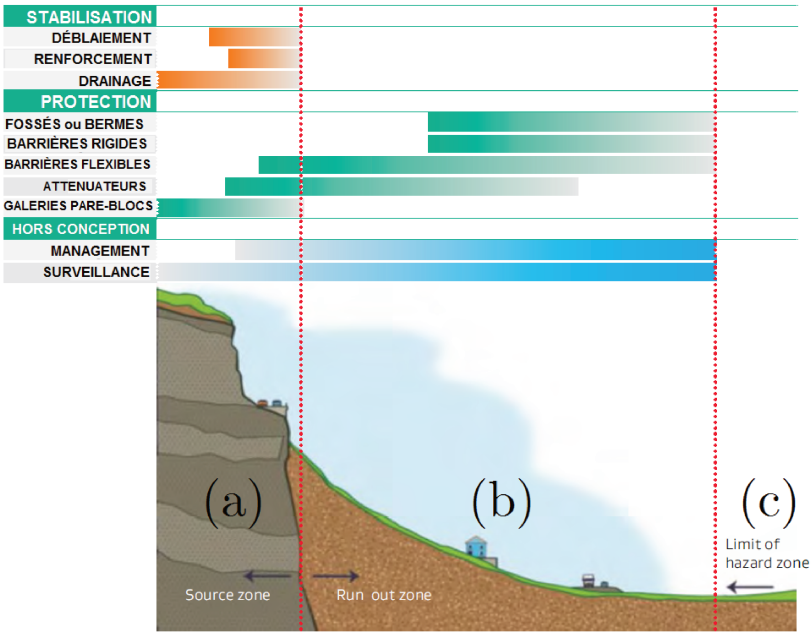


FIGURE 1.26 – Solutions de dimensionnement en fonction des zones (a) Zone de détachement, (b) Zone de transit et d'impact et (c) limite de la zone à risque. Adapté de [Green, 2016].

La zone (a) de la Figure 1.26 montre les solutions liées à la stabilité d'un massif rocheux (solutions dites actives), et se focalisent donc sur l'aléa de rupture. Les propositions envisageables peuvent être le déblaiement d'une parcelle instable (par purge ou minage), le renforcement (qui est fait avec le positionnement d'ancrages tels que les tirants, les clous, par boulonnage, mise en place de grillages ou de filets plaqués) ou encore le drainage (dans le cas où la roche se présente déjà très fracturée, susceptible à l'infiltration de l'eau dans la masse agravée par les cycles de gel et dégel éventuels). Une procédure de déblaiement a été faite en 2011 sur une portion instable du Néron, à Saint-Martin-Le-Vinoux (Isère) [13]. Bien évidemment, ces solutions ne sont pas toujours adaptées, notamment lorsque les zones instables s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres, voire des kilomètres. C'est le cas du Massif de la Chartreuse, dont nous avons parlé dans l'introduction.

L'objectif devient alors prendre la problématique autrement : elle ne consiste plus à empêcher l'évènement, mais de le rendre contrôlable. Les solutions possibles (solutions dites passives) sont alors : (i) prévoir les trajectoires possibles et de dévier les blocs impactant les enjeux vers des ouvrages de réception (tels que les merlons et les ouvrages déviateurs) ou des zones sans enjeux ; (ii) retenir les blocs à travers des écrans ou des filets déformables, afin de dissiper toute l'énergie. Ces derniers demandent un coût supplémentaire de maintenance, et nécessitent des travaux de purge des grillages et des écrans, de remplacement dus à la détérioration suite aux chocs, à la corrosion, entre autres. En France, la gestion et réparation de ces ouvrages de protection des falaises (OPF) au long des routes départementales est à la charge de chaque Conseil Général.

13. Le Néron enfin dynamité (Pavard, M. – 20 Minutes) :https://www.20minutes.fr/grenoble/842106-20111214-neron-enfin-dynamite

Ces éléments constituent les parades affichées pour la zone (b) jusqu'à la zone (c), cette dernière représentant la distance maximale de propagation. La Figure 1.27 affiche deux exemples des ouvrages actifs et passifs que l'on peut retrouver.

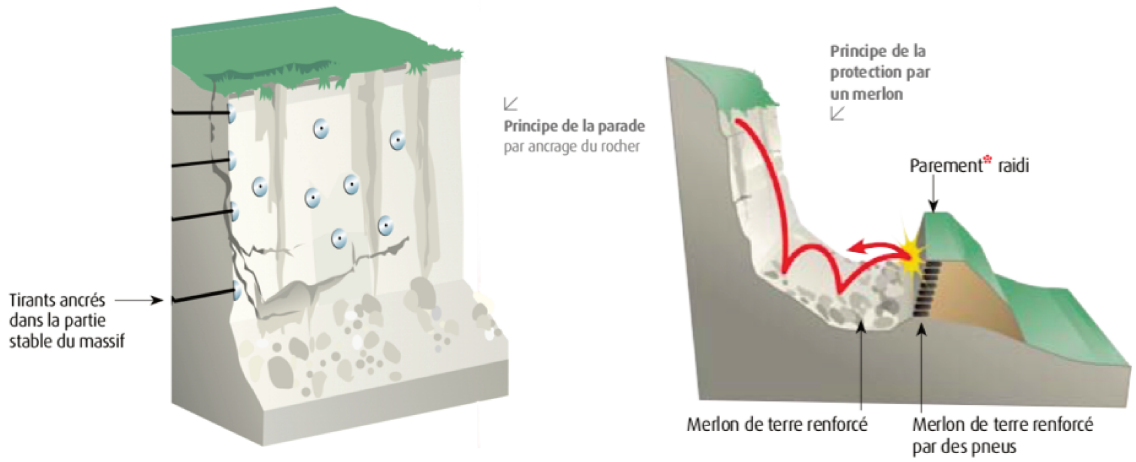


FIGURE 1.27 – À gauche, un exemple de protection active appliquée à un massif instable (ancrages) ; à droite, un schéma représentatif d'un ouvrage passif (merlon) qui piège les blocs avant l'enjeu [Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), 2012].

La Figure 1.28 montre une de ces protections passives (filet métallique) localisée en Suisse, et mobilisée récemment, après une chute de blocs de grandes proportions [14] [15]. À l'heure actuelle ces éléments sont de plus en plus avancés, permettant l'intégration des applications logicielles de surveillance et d'alertes. Dans le cas de cet ouvrage suisse, un système de vigilance permet d'envoyer une alerte *via SMS* à la population locale, et de sécuriser les habitants en bloquant la route touchée par la chute de blocs.

La Figure 1.29 montre le classement des parades passives possibles en fonction des énergies d'impact supposées de l'évènement probable.

Concernant les merlons pare-blocs, les considérations à prendre pour dimensionnement reposent sur la capacité absorbante des matériaux constitutifs. Il existe peu d'essais expérimentaux à grande échelle et peu de retour d'expérience basés sur les différents paramètres impliqués lors de l'impact. Le site expérimental de Montagnole en Savoie (IFFSTAR-CEREMA) ouvert en 2010 a rendu possible la réalisation de ces essais d'impact en condition contrôlées et notamment la vérification de résistance pour la certification des produits de parade conçus par les industriels. Le principe consiste en une flèche implantée au sommet d'une falaise verticale haute de 70 m permettant de lâcher des charges jusqu'à 20 tonnes. Le crochet de largage permet de libérer un bloc atteignant une vitesse d'impact maximale de 133 km/h et une énergie maximale de 13 500 kJ [16]. Au vu du manque de réglementation en France pour le dimensionnement de

14. Source :https://www.rts.ch/
15. https://www.srf.ch/play/tv/schweiz-aktuell/video/felssturz-im-wallis?id=c73d713d-e870-43a1-b70c-9cbeec2eb647
16. Source : https://www.rro.ifsttar.fr/fileadmin/redaction/1_institut/1.20_sites_integres/GERS/RRO/Presentations/plaquette-Montagnole_3_01.pdf

FIGURE 1.28 – Filet de protection flexible après éboulement rocheux dans le Val d'Hérens, près d'Evolène (Suisse). La zone est suivie depuis très longtemps, et présentait récemment des mouvements excessifs. Grâce à un système d'alerte, la population a reçu l'alerte suite à l'évènement en détectant la rétention par l'ouvrage d'un bloc d'environ 20 mètres cubes.

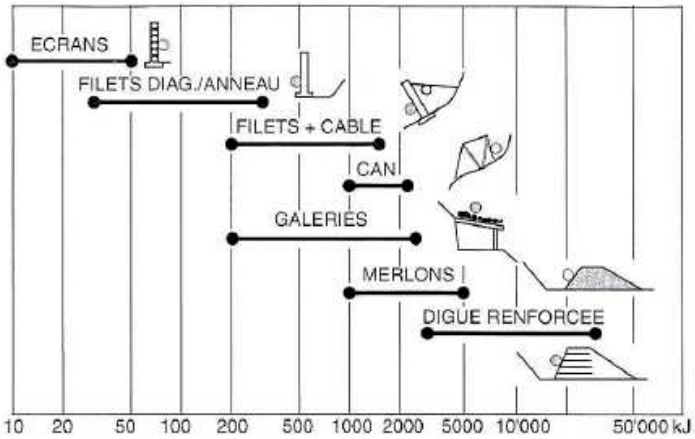


FIGURE 1.29 – Capactité des structures de protection passives en fonction de l'énergie de l'impact selon Descoeudres [1997].

ces ouvrages, les avancements réalisés dans la station de Montagnole font objet d'étude de plusieurs chercheurs inscrits actuellement dans le cadre du Projet National C2ROP (succédant le projet ANR Rempare). Ces travaux scientifiques permettront dans l'avenir de définir des guides méthodologiques plus précis à l'échelle nationale et façonneront certainement la pratique en bureau d'études.

La méthode simplifiée de dimensionnement des merlons, la plus répandue à l'heure actuelle est basée sur une approche pseudo-statique. Elle est faite à partir de l'analyse limite de rupture de la structure simplifiée, en deux dimensions, obéissant au critère de résistance de Coulomb pour les matériaux cohésifs-frottants. Les hypothèses initiales de l'effort lié à l'impact (F dans la Figure 1.30) et d'angle d'impact sont tirées directement des simulations trajectographiques et transformées ensuite en effort statique (Figure 1.30), et l'énergie en rotation est négligée.

L'étude menée par Plassiard & Donze [2009] consistait à simuler une série d'impacts sur un merlon avec le logiciel en élements discrets SDEC ([Donzé, 2008]), en utilisant des blocs (dits "impacteurs") sphériques. Cette étude a permis de conclure que les

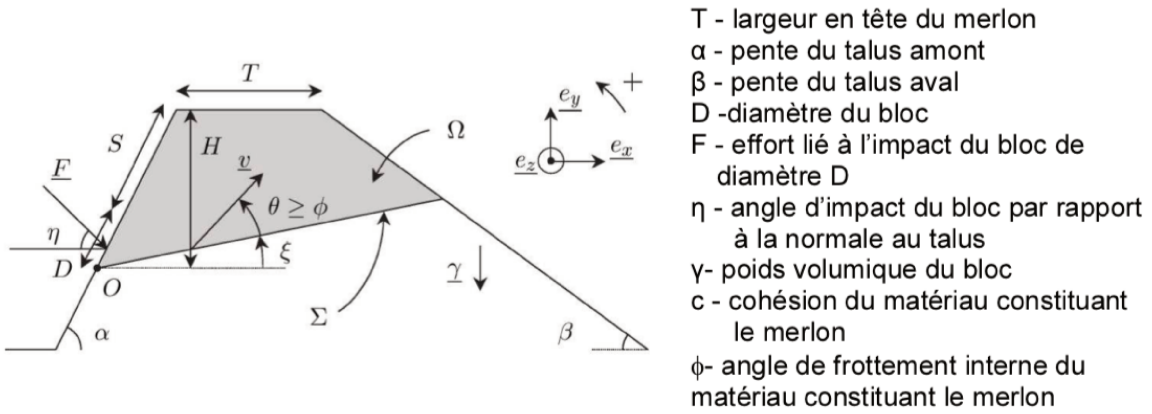


FIGURE 1.30 – Mécanisme de rupture plane 2D d'un ouvrage type Merlon par Durville *et al.* [2010].

merlons impactés présentant une inclinaison (α) inférieure à environ 60 degrés sont plus facilement franchis par les blocs rocheux. Ce phénomène de "saltation" est aussi plus remarquable lorsque le rapport entre l'énergie de rotation d'un bloc sur énergie cinétique de translation s'avère supérieur à 10%. Aussi, la taille des blocs semble avoir une influence sur la capacité de saltation des blocs : ceux qui sont plus petits avaient plus de tendance à atteindre la crête de l'ouvrage. Actuellement, la plupart des merlons sont construits présentant une inclinaison de plus de 80°, justement pour éviter cet effet. Cependant, certains ouvrages déjà existants n'ont pas encore subit les modifications nécessaires qui tiennent en compte de ce phénomène.

La méthode pour le dimensionnement tri-dimensionnelle de ces ouvrages (surtout avec l'approche basée sur les éléments discrets) est de plus en plus utilisée, car l'approche continue (éléments finis) est peu adaptée aux problèmes impliquant les grandes déformations et les ruptures par cisaillement de matériaux granulaires. Aussi, l'avantage de la méthode des éléments discrets est qu'elle permet l'application d'un nombre réduit de paramètres rhéologiques et de tenir en compte de l'énergie de rotation des "impacteurs". Cette méthode peut être largement utilisée pour la trajectographie, en prenant en compte la forme des blocs comme pour le calcul des ouvrages. L'intérêt serait donc d'avoir une certaine continuité concernant les principes mécaniques des outils numériques pour les études complexes dépassant le cadre des méthodes simplifiées de base.

1.4 Trajectographie : une discipline complexe ?

Les outils numériques décisionnels de trajectographie, comme tout autre logiciel utilisé dans l'ingénierie, passent par l' étape fondamentale de leur représentativité et de leur fiabilité, et ce, quelque soit l'approche numérique ou physique utilisée.

D'un point de vue pragmatique, l'utilisation de ces codes trajectographiques apporte à l'étude experte une compréhension des phénomènes potentiels à micro-échelle.

Ils permettent de faire des considérations et hypothèses variables au niveau du contact blocs-substrat, et donc de comprendre les mécanismes de transfert d'énergie entre les corps, ainsi que les influences respectives. Ceci serait difficilement réalisable par des essais expérimentaux "grandeur nature" en grand nombre pour chaque étude afin d'obtenir une enveloppe de trajectoires possibles. Ces mécanismes de transferts régissent également le comportement à grande échelle des éboulements en masse ou isolés. In fine, c'est à travers des simulations numériques dont il est possible d'enrichir les processus physiques pour plus de réalisme : estimer les vitesses et les hauteurs de passage des blocs avec la précision pertinente, discerner les couloirs de propagation les plus probables et calculer l'étendue du dépôt, qui sont les données pertinentes en ingénierie, en la cartographie de risques, au dimensionnement et au zonage. Rochet [1987] définit ces simulations numériques comme *"un outil essentiel d'évaluation des conditions probables de propagation des matériaux sur les pentes [sic]"*. Il s'agit, pour le code trajectographique d'apprécier la nature physique du versant rocheux, et d'être capables de répondre aux questions suivantes [Flouest *et al.*, 2014] :

- Quels sont les volumes susceptibles de se propager ?
- Quelles sont les formes des éléments rocheux concernés ?
- Quelles sont les conditions de départ (hauteur de chute, vitesse...) ?
- Quelles sont les solutions de défense à préconiser ?

Les études paramétriques avec des codes déterministes peuvent nous aider à mieux maîtriser les sources d'incertitudes puis les implémenter dans les résultats des codes d'ingénierie. Ainsi, lorsque les incertitudes générées par les résultats trajectographiques augmentent, on fait appel à l'expert professionnel. C'est à dernier que l'on accorde la tâche de décideur, en estimant l'aléa de propagation à partir des différents scénarios produits. La définition du niveau de risque est elle même un sujet controversé dans le domaine des risques naturels, car elle dépend d'une part : d'algorithmes qui puissent être capables d'introduire les aspects aléatoires de l'évènement "chute de blocs", et d'autre part, de l'établissement des hypothèses initiales pertinentes, mais subjective. Dans le cas d'une étude en trajectographie, le problème augmente en complexité lorsque le nombre de paramètres qui affecte le rebond devient important. De plus, on peut encore ajouter de la variabilité aux résultats des simulations, en évaluant l'influence de l'opérateur/utilisateur du code, qui a un rôle crucial dans le processus d'évaluation du risque [Delonca *et al.*, 2016]. À l'heure actuelle, plusieurs logiciels, "maison" ou commerciaux sont utilisés et développés de manière confidentielles au sein des entreprises. La réalisation de Benchmark est intéressante pour évaluer une variabilité des résultats inter-entreprises (donc inter-outils de simulation), inter-opérateurs, utilisés dans la quantification du risque dans un cas donné, soumis aux participants. Ainsi, en France il y a une dizaine d'année, une campagne de lâcher de blocs a été effectuée dans le site expérimental de Vaujany, par IRSTEA . Les simulations faites par les entreprises (anonymées) ont permis d'établir les conclusions suivantes [Dorren & Berger, 2013].

Parmi les 12 participants au total, comprenant des acteurs du secteur privé et public :

- Plus de 58% des participants (7/12) ont bien estimé les valeurs de distance de propagation par rapport aux résultats expérimentaux ; contre seulement 3 candidats sur 12 ayant bien estimé la cinématique.
- La hauteur, la vitesse et l'énergie totale des blocs ont été globalement sous-estimées : Seulement 4 participants du Benchmark ont trouvé 5 des 9 des valeurs qui se trouvent dans un intervalle d'écart type d'environ 20%. Ils ont été ainsi considérés comme en étant en concordance avec les observations expérimentales.
- En termes de distance de propagation, les réponses étaient relativement bonnes.

Par ailleurs, la communauté scientifique universitaire est de plus en plus impliquée dans les processus de modélisation appliquée à l'ingénierie. Dans le cadre de cette thèse, le partenariat se fait à travers du dispositif CIFRE créé par l'Agence Nationale de la Recherche et Technologie (ANRT), qui permet aux acteurs des secteurs public et privé à collaborer dans des projets de recherche innovants, entre l'entreprise IMSRN (Ingénierie des mouvement de sols et risques naturels) à Montbonnot (38) et le laboratoire 3SR.

L'IMSRN, bureau d'études specialisé dans l'ingénierie des risques naturels, créé par Pierre Plotto dans les années 90 a participé au projet européen Alcotra *MASSA* (Medium And Small Size rockfall hazard Assessment [17]), en collaboration avec le laboratoire 3SR pour les premières modélisations de mouvement en masse de petits volumes. IMSRN s'est impliqué dans la valorisation des travaux scientifiques à travers le financement de stages, puis thèses CIFRE dans le domaine des risques naturels gravitaires et leur modélisation numérique. Ainsi, au cours de ces dernières années dans la recherche et développement, le partenariat a rendu possible l'étude des efforts transmis aux ouvrages de protection passives telles que les merlons [Lorentz, 2007], afin de déterminer les différentes configurations à respecter face aux différentes énergies d'impact et formes des impacteurs [Plassiard, 2007]. L'étude de la propagation des masses rocheuses [Cuervo, 2015] et celle des blocs isolés [Garcia *et al.*, 2017], toutes deux en utilisant la méthode des éléments discrets (DEM), en parallèle avec la thèse de Gracia Danies [2018], basée sur la méthode MPM (Material Points Method), pour intégrer au mieux les paramètres classiques de la mécanique des sols. Ces méthodes, et les codes associés, sont incorporés à la palette des outils de l'entreprise pour répondre aux appels d'offres, afin d'élaborer l'expertise interne, en parallèle avec les outils classiques que l'entreprise utilise depuis sa création, sur des cas d'application qu'elle a également à traiter.

Le développement des projets scientifiques nationaux et européens, rassemblant les communautés scientifiques et des praticients des bureau d'étude d'ingénierie, tels que *C2ROP* (Chute de Blocs, Risque Rocheux et Ouvrages de Protection [18]), *RockTheAlps* [19], *MASSA*, mettent en valeur le savoir-faire français face aux problèmes liés aux mouvements gravitaires. L'objectif central est de rassembler les acteurs publics et privés du domaine afin d'améliorer ces outils et de les rendre plus opérationnels ; c'est à dire, d'optimiser leur résultats de manière à ne pas occasionner un sur-dimensionnement

17. Page officielle du Projet MASSA : `http://massa.geoazur.eu`
18. Page officielle du Projet C2ROP : `https://www.c2rop.fr`
19. Page officielle du Projet RockTheAlps : `https://www.alpine-space.eu/projects/rockThealps`

de précaution (sur-coût parfois notable pour les collectivités).

C'est dans le cadre du projet national C2ROP que nous avons pu effectuer plusieurs exercices de Benchmark, caler nos résultats numériques sur des résultats expérimentaux en grande échelle lors d'un lâcher contrôlé d'une centaine de blocs, en carrière. Les analyses qui en dérivent sont montrées dans le Chapitre 5. Également, c'est grâce à une campagne d'essais menée par la SNCF au mois de Mai 2017 que nous avons pu effectuer l'étude montrée dans le Chapitre 4.

Dans le chapitre suivant (Chapitre 2) nous allons décrire le code numérique tridimensionnel basée sur la méthode des éléments discrets (DEM) qui a été utilisé dans le cadre de cette thèse.

Chapitre 2

Modélisation par éléments discrets

Code de calcul Rockable

La méthode des éléments discrets est aujourd'hui une méthode largement utilisée dans le domaine de la géotechnique. Elle a été proposée à la fin des années 70 par Cundall & Strack [1979] en incorporant des lois de contact frottant dans une approche de dynamique moléculaire. Les premières utilisations étaient bidimensionnelles, mais il est aujourd'hui de plus en plus commun de considérer le cas tridimensionnel. Que ce soit pour modéliser des matériaux formés d'entités distinctes (*e.g.*, grains de sable) ou bien d'autres matériaux "fracturables" (*e.g.*, bétons, croûte terrestre à grande échelle) l'approche en éléments discrets a souvent été utilisée avec succès pour contribuer à la compréhension des mécanismes dynamiques ou statiques complexes. Ainsi, l'introduction de modèles d'interaction (lois de contact ou modèles homogénéisés quelconques) sont souvent au coeur des analyses pour restituer certaines observations macroscopiques qui sont considérées (à tord) comme directement (et uniquement) dépendantes des interactions microscopiques. Même si ceci est en grande partie vrai, la communauté scientifique spécialisée dans le domaine se focalise de plus en plus sur des caractéristiques à l'échelle mésoscopique et sur les propriétés de forme des éléments distincts. Dans ce travail de thèse, l'outil de calcul (code Rockable) n'a pas été développé mais enrichi sur essentiellement deux aspects – l'efficacité de la détection des contacts et la pondération des forces d'interaction en cas de contact multiples entre deux éléments – qui seront développés dans ce chapitre. Les principaux fondements de l'outil numérique y seront également rappelés.

2.1 Synthèse des aptitudes de Rockable

2.1.1 Formes explicites des blocs

Dans Rockable, la forme des corps rigides est décrite par des *sphéro-polyèdres* (SP). Cette approche permet de restituer des formes de blocs réalistes et aussi complexes que nécessaire. Elles peuvent être concaves et même comporter des parties évidées, ce qui n'est pas permis avec la plupart des autres approches pour modéliser des formes polyédriques, qui se limite en général aux géométries convexes. Il est possible notamment que la définition d'une forme soit issue d'un relevé photogrammétrique ou bien d'un lidar. La Figure 2.1 montre le modèle SP d'une pierre obtenue par photogrammétrie.

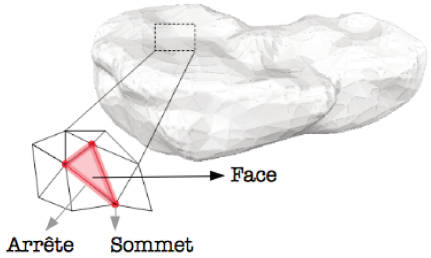


Figure 2.1 – Modèle géométrique sphéro-polyédrique d'une pierre scannée par la technique de photogrammétrie. Concrètement, un sphéro-polyèdre est un assemblage rigide de 3 formes : des sphères pour les sommets, des tubes pour les arrêtes, et des polygones pour les faces. Le processus de reconstruction de cet objet, à partir de photographies, est décrit dans l'Annexe B).

D'un point de vue strictement mathématique, un sphéro-polyèdre peut être considéré comme la *somme de Minkowski* d'un polyèdre et d'une sphère [Richefeu & Villard, 2016]. Une autre façon de concevoir un SP est de le considérer comme un polyèdre dont les angles ont été arrondis.

L'ensemble des configurations de contact possibles entre deux sphéro-polyèdres peut être obtenu à partir de quatre configurations élémentaires en fonction des éléments constitutifs du SP : sommet-sommet, sommet-arrête, somme-face et arrête-arrête. La Figure 2.2 montre ces configurations. On remarquera que la configuration face-face ne fait pas partie des configurations élémentaires.

2.1.2 Propriétés massiques des sphéro-polyèdres (SP)

Afin d'intégrer la dynamique de mouvement des corps, les propriétés massiques sont calculées avant chaque simulation, et éventuellement enregistrées. Il s'agit de la masse et de la matrice d'inertie des blocs, mais également de la position du centre de masse et de leurs directions principales. Le calcul de ces différentes données se fait dans Rockable au moyen de l'approximation Monte Carlo de l'intégrale d'une fonction f

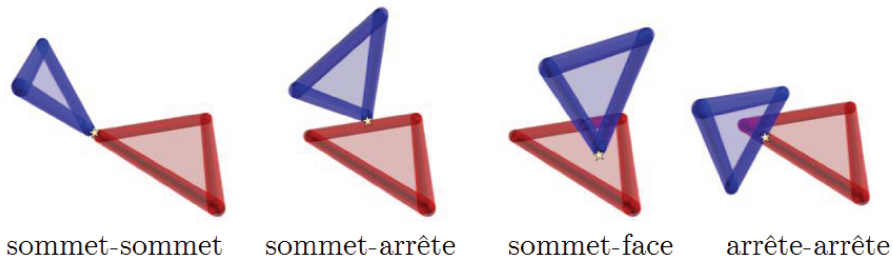


FIGURE 2.2 – Configurations élémentaires pour gérer tout contact multiple entre deux sphéro-polyèdres quelconques (convexe, concave ou même évidé) dans ROCKABLE.

dans un volume V, suivant la formule suivante :

$$\int_V f \mathrm{d}V \simeq V\langle f\rangle \pm \sqrt{\frac{\langle f^2\rangle - \langle f\rangle^2}{N}} \tag{2.1}$$

où le symbole $\langle \ldots \rangle$ correspond à une moyenne arithmétique d'un échantillon contenant N points.

Cette intégration numérique est faite autour d'une boîte, alignée sur les axes du repère global, entourant chaque bloc (AABB pour Axis Aligned Bounding Box). Pour le calcul du volume, un tirage semi-aléatoire (séquence de Sobol) de points à l'intérieur de l'AABB associé à la méthode d'intégration de Monte Carlo (Equation (2.1)) permet le calcul rapide et précis des propriétés liées à la répartition des masses. Une fonction $\varphi(\vec{x})$ permet d'évaluer si un point $\vec{x}$ de l'AABB se situe ou non à l'intérieur du SP. Si le point appartient au volume V du SP, la fonction φ retourne 1, sinon elle retourne 0. Cette fonction peut être décomposée comme étant l'union de fonctions s'appliquant sur les sous-éléments qui composent un SP :

$$\begin{aligned}\varphi(\mathbf{x}) &= \left(\sum_{\text{vertexes}} \varphi_{\text{sphere}}(\vec{x})\right) \cup \left(\sum_{\text{edges}} \varphi_{\text{cylinder}}(\vec{x})\right) \\ &\cup \left(\sum_{\text{faces}} \varphi_{\text{polygon}}(\vec{x})\right) \cup \varphi_{\text{polyhedron}}(\mathbf{x})\end{aligned} \tag{2.2}$$

Avec cette fonction, une intégration peut être effectuée sur n'importe quelle forme de SP. En premier lieu, la masse m d'un bloc, en considérant une densité ρ uniformément répartie, est obtenue ainsi :

$$m = \rho V = \rho \int_{V^{\text{AABB}}} \varphi(\vec{x}) \mathrm{d}V \simeq \rho \langle \varphi(\vec{x})\rangle V^{\text{AABB}} \tag{2.3}$$

De façon similaire, le centre d'inertie $\boldsymbol{x}_G$ est obtenu par l'intégration de Monte Carlo suivante :

$$\boldsymbol{x}_G = \frac{1}{V} \int_{V^{\text{AABB}}} \boldsymbol{x}\, \varphi(\boldsymbol{x}) \mathrm{d}V \simeq \frac{\langle \boldsymbol{x}\, \varphi(\boldsymbol{x})\rangle V^{\text{AABB}}}{V} \tag{2.4}$$

La matrice d'inertie relative au point $\boldsymbol{x}_G$ est également calculée suivant la même technique dans le repère global :

$$\begin{array}{rcl} I_{xx}(\boldsymbol{x}_G) & = & \gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \left(\delta y^2 + \delta z^2\right) \right\rangle \\ I_{yy}(\boldsymbol{x}_G) & = & \gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \left(\delta x^2 + \delta z^2\right) \right\rangle \\ I_{zz}(\boldsymbol{x}_G) & = & \gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \left(\delta x^2 + \delta y^2\right) \right\rangle \\ I_{xy}(\boldsymbol{x}_G) & = & -\gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \, \delta x \delta y \right\rangle \\ I_{xz}(\boldsymbol{x}_G) & = & -\gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \, \delta x \delta z \right\rangle \\ I_{yz}(\boldsymbol{x}_G) & = & -\gamma \left\langle \varphi(\boldsymbol{x}) \, \delta y \delta z \right\rangle \end{array} \tag{2.5}$$

où $(\delta x,\ \delta y,\ \delta z)^t = (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_G)$ et $\gamma = V^{\mathrm{AABB}}/V$. Il est alors possible de définir le repère propre du bloc associé à trois valeurs d'inertie à partir de la diagonalisation de la matrice d'inertie globale.

2.1.3 Mouvement des blocs

Un sphéro-polyèdre peut être vu comme un corps rigide, lui-même constitué de diverses formes dont la position relative reste fixe. Cette technique de description pour les formes complexes indéformables est connue sous le nom de *clumps*. Elle permet de ne calculer que la position et l'orientation d'un SP au cours du temps, le mouvement des éléments constitutifs peut alors être déduit.

Pour les mouvements en translation, le schéma d'intégration velocity-Verlet [Verlet, 1967] est utilisé de façon explicite à chaque pas de temps δt afin de déterminer la position $\boldsymbol{x}_i$ et la vitesse $\boldsymbol{v}_i$ d'un SP i :

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \boldsymbol{x}_i(t+\delta t) & = & \boldsymbol{x}_i(t) + \boldsymbol{v}_i(t)\delta t + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}_i(t)\delta t^2 \\ \boldsymbol{v}_i(t+\delta t) & = & \boldsymbol{v}_i(t) + \frac{1}{2}\left[\boldsymbol{a}_i(t) + \boldsymbol{a}_i(t+\delta t)\right]\delta t \end{array} \right. \tag{2.6}$$

avec :

$$\boldsymbol{a}_i = \frac{\boldsymbol{F_i}}{m_i} - g\boldsymbol{z}, \tag{2.7}$$

où $\boldsymbol{F_i}$ est la résultante des forces sur i (elle résulte des actions de contact), m_i est la masse du SP i et $g\boldsymbol{z}$ représente l'accélération de la gravité.

Pour le calcul du mouvement en rotation d'un SP i, le même schéma est utilisé pour déterminer sa position angulaire (représentée par un quaternion $\boldsymbol{\mathcal{Q}}_i$) et sa vitesse de rotation $\boldsymbol{\Omega}_i$:

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \boldsymbol{\mathcal{Q}}_i(t+\delta t) & = & \boldsymbol{\mathcal{Q}}_i(t) + \dot{\boldsymbol{\mathcal{Q}}}_i(t)\delta t + \frac{1}{2}\ddot{\boldsymbol{\mathcal{Q}}}_i(t)\delta t^2 \\ \boldsymbol{\Omega}_i(t+\delta t) & = & \boldsymbol{\Omega}_i(t) + \frac{1}{2}\left[\dot{\boldsymbol{\Omega}}_i(t) + \dot{\boldsymbol{\Omega}}_i(t+\delta t)\right]\delta t \end{array} \right. \tag{2.8}$$

L'utilisation d'un quaternion pour définir la position angulaire fournit une meilleure stabilité numérique et permet de limiter un peu les besoins de stockage en mémoire. La petite contrepartie vient du fait qu'il s'agit d'un outil mathématique un peu plus compliqué à manier que les matrices par exemple. Les dérivées première et seconde du quaternion $\boldsymbol{\mathcal{Q}}_i$ s'expriment en fonction du vecteur vitesse angulaire de la manière

suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\mathcal{Q}}}_i(t) = \frac{1}{2}\boldsymbol{\mathcal{Ω}}_i(t) \star \boldsymbol{\mathcal{Q}}_i(t) \tag{2.9}$$

et

$$\ddot{\boldsymbol{\mathcal{Q}}}_i(t) = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\mathcal{Ω}}}_i(t) \star \boldsymbol{\mathcal{Q}}_i(t) + \frac{1}{4}\boldsymbol{\mathcal{Ω}}_i(t) \star \boldsymbol{\mathcal{Ω}}_i(t) \star \boldsymbol{\mathcal{Q}}_i(t) \tag{2.10}$$

où $\boldsymbol{\mathcal{Ω}}$ désigne le quaternion $[0,\ \boldsymbol{\Omega}]$ et l'opérateur $\star$ est le produit Hamiltonien défini par :

$$[s_1,\ \boldsymbol{i}_1] \star [s_2,\ \boldsymbol{i}_2] = [s_1 s_2 - \boldsymbol{i}_1\boldsymbol{i}_2,\ s_1\boldsymbol{i}_2 + s_2\boldsymbol{i}_1 + \boldsymbol{i}_1 \times \boldsymbol{i}_2] \tag{2.11}$$

En introduisant les relations des Equations 2.9 à 2.11 dans l'Equation 2.8, une solution pratique pour calculer le quatertion $\boldsymbol{\mathcal{Q}}(t+\delta t) \equiv [s_Q(t+\delta t),\ \boldsymbol{Q}(t+\delta t)]$ (les indices i ont été supprimés à partir d'ici pour faciliter la lecture des relations qui suivent) est alors d'utiliser les expressions suivantes :

$$s_Q(t+\delta t) = s_Q(t) - \left(\frac{3}{4}\boldsymbol{\Omega}(t)\cdot\boldsymbol{Q}(t) + \frac{\boldsymbol{\Omega}^2(t)}{8}\right)\delta t \tag{2.12}$$

et

$$\boldsymbol{Q}(t+\delta t) = \boldsymbol{Q}(t) + \frac{3}{4}\Big(s_Q(t)\boldsymbol{\Omega}(t) + \boldsymbol{\Omega}(t)\times\boldsymbol{Q}(t)\Big)\delta t - \frac{\boldsymbol{\Omega}^2(t)}{4}\boldsymbol{Q}(t) \tag{2.13}$$

Dans l'Equation 2.8, la dérivée de la vitesse angulaire de chaque SP i est obtenue à partir des équations d'Euler comme suit :

$$\left\{\begin{array}{lcl} \dot{\Omega}_1^* & = & \Big(M_1^* - (I_3^* - I_2^*)\Omega_2^*\Omega_3^*\Big)/I_1^* \\ \dot{\Omega}_2^* & = & \Big(M_2^* - (I_1^* - I_3^*)\Omega_3^*\Omega_1^*\Big)/I_2^* \\ \dot{\Omega}_3^* & = & \Big(M_3^* - (I_2^* - I_1^*)\Omega_1^*\Omega_2^*\Big)/I_3^* \end{array}\right. \tag{2.14}$$

où les composantes 1, 2 et 3 sont exprimées dans le repère propre du corps (les indices $*$ sont ajoutés pour le rappeler).

Afin d'exprimer le moment résultant $\boldsymbol{M}$ et la vitesse angulaire $\boldsymbol{\Omega}$ d'un SP, on doit y appliquer la transformation inverse de sa position angulaire $\boldsymbol{\mathcal{Q}}$. Avec un quaternion, cette transformation est obtenue à partir du conjugué de $\boldsymbol{\mathcal{Q}}$ (*i.e.*, en prenant l'opposé de sa partie imaginaire) :

$$\boldsymbol{M}_G \xrightarrow{\text{conj}(\boldsymbol{\mathcal{Q}})} \boldsymbol{M}_G^* \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\Omega} \xrightarrow{\text{conj}(\boldsymbol{\mathcal{Q}})} \boldsymbol{\Omega}^* \tag{2.15}$$

Les composantes du vecteur d'accélération angulaire dans le repère global sont obtenues en lui appliquant la rotation $\boldsymbol{\mathcal{Q}}$:

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}^* \xrightarrow{\boldsymbol{\mathcal{Q}}} \dot{\boldsymbol{\Omega}} \tag{2.16}$$

Il convient de noter que dans les Equations 2.7 et 2.14, les forces et moments résultant dépendent à la fois de la positions $\boldsymbol{x}$ et de l'orientation $\boldsymbol{\mathcal{Q}}$ d'un SP au temps t, mais ils dépendent également des vitesses (linéaire et angulaire) moyennes obtenues

entre les instants t et $t + \delta t$.

2.1.4 Modèle dissipatif de contact/collision

Dans le cadre de la thèse, nous utilisons de simples lois élastiques linéaires autorisant une dissipation de l'énergie cinématique dans les directions normale, tangentielle et en rotation [Richefeu & Villard, 2016]. Les raideurs élastiques associées sont, respectivement, k_n, k_t and k_r.

La force normale est actualisée à chaque pas de temps explicite avec un modèle qui se résume ainsi :

$$f_n(t+\delta t) = \begin{cases} f_n(t) - k_n\, \dot{h}_n(t)\, \delta t & \text{si} \quad \dot{h}_n \geq 0 \quad \text{(chargement)} \\ -k_n e_n^2\, \dot{h}_n(t)\, \delta t & \text{si} \quad \dot{h}_n < 0 \quad \text{(déchargement)} \end{cases} \tag{2.17}$$

où e_n^2 est le coefficient de restitution d'énergie dans la direction normale au contact, et $\dot{h}_n$ est la vitesse relative normale entre les corps en interaction. Il est important de noter que la force est calculée de façon incrémentale en charge (lorsque les corps se rapprochent), et direct en décharge. Ceci implique un saut de force qui n'aura pas de répercussion sur le calcul global dans une problématique de chute ou d'avalanche de blocs. La Figure 2.3(a) illustre l'évolution de la force normale f_n lors d'une collision en fonction de l'interpénétration h_n des corps en un point de contact. La zone grisée représente l'énergie perdue dans ce cas, et il est aisé de montrer que l'énergie perdue vaut $1 - e_n^2$.

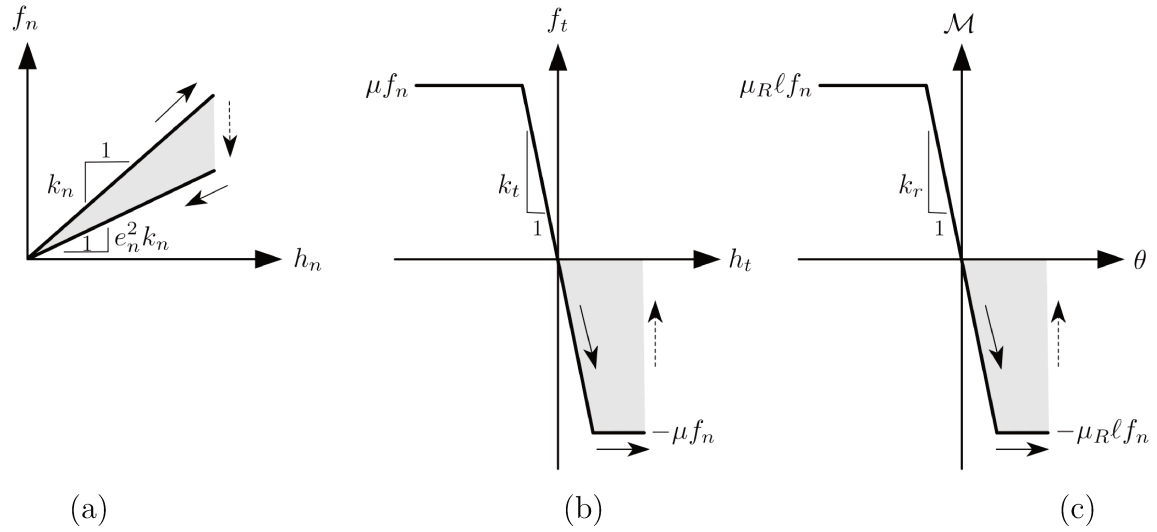


FIGURE 2.3 – Illustration des lois de contact pour : (a) la force normale f_n, (b) la force résistance tangente à f_n constant, et (c) le moment résistant à f_n constant. Les raideurs respectives k_n, k_t, k_r, ainsi que les paramètres de dissipation e_n^2, μ et μ_R y sont représentés. Les zones grisées représentent le travail des différentes forces jusqu'au moment où le contact est subitement perdu.

Ainsi, le coefficient e_n^2 de restitution d'énergie peut être appréhendé à partir du rebond d'un bloc de masse m tombant verticalement sur une surface, sans engendrer

de dissipation ni de gain d'énergie cinétique dans la direction horizontale et en rotation. Dans cette situation, l'énergie après la collision rapportée à l'énergie avant la collision s'écrit :

$$\frac{\frac{1}{2}mv_{y+}^2}{\frac{1}{2}mv_{y-}^2} = \left(\frac{-v_{y+}}{v_{y-}}\right)^2 = (e_n)^2 \tag{2.18}$$

Cette expérience de pensée, illustre bien pourquoi le coefficient de restitution est noté comme le carré de la restitution cinématique e_n qui est un rapport de vitesse (et pas d'énergie). Une autre lecture du paramètre e_n^2 peut être de se dire qu'il s'agirait du rapport entre la hauteur maximale h_+ obtenue après la collision, divisée par la hauteur h_- de lâcher du corps.

La force tangente f_t est mise à jour, de façon incrémentale, à chaque pas de temps de la façon suivante :

$$f_t(t+\delta t) = \min\left[\quad f_t(t) - k_t\,\dot{h}_t(t)\,\delta_t \quad ; \quad \mu f_n \quad\right] \tag{2.19}$$

où $\dot{h}_t$ est la vitesse relative de glissement, et le paramètre de dissipation μ intègre le frottement et les mécanismes de butée. Chaque incrément de force tangente $k_t\dot{h}_t\delta_t$ agit dans le sens opposé au glissement. Le paramètre μ peut traduire tous les mécanismes impliqués lors d'une collision du moment que la perte d'énergie cinétique résultante se fait dans la direction du glissement [Richefeu, 2005; Richefeu & Villard, 2016]. La Figure 2.3(b) donne une illustration de la loi pour la force tangente dans la situation particulière où la force normale est constante. Cette situation est hautement improbable pour une collision, mais le but ici est simplement d'exposer le fonctionnement du modèle. La zone grise correspond à l'énergie qui serait perdue si le contact venait à s'ouvrir subitement. On voit, dans ce cas habituel pour un impact, que l'énergie élastique n'est pas restituée. Cet effet indésirable peut être rendu imperceptible en utilisant une raideur k_t suffisamment importante.

Le moment résistant $\mathcal{M}$ est calculé à l'aide d'une loi très similaire dans sa forme à la loi de frottement. On la qualifie de frottement de roulement. Le moment résistant ainsi introduit a pour objectif de rendre compte de l'action d'un sol mou (bosselé ou indenté) qui pourrait contrarier la rotation d'un bloc. Il s'ajuste incrémentalement comme suit :

$$\mathcal{M}(t+\delta t) = \min\left[\quad \mathcal{M}(t) - k_r\dot{\theta}(t)\delta t \quad ; \quad \mu_R \ell f_n \quad\right] \tag{2.20}$$

où $\dot{\theta}$ est la vitesse relative de rotation, et μ_R est le coefficient de dissipation par roulement. Puisque μ_R est sans dimension, une longueur ℓ est introduite comme bras de levier. On définit cette longueur comme la plus petite distance entre le point de contact et l'axe, passant par le centre de masse du bloc, et orienté comme sa vitesse de rotation $\mathbf{\Omega}$. Chaque incrément de moment $k_r\dot{\theta}\delta_t$ agit dans le sens de rotation contraire à celui du bloc. La Figure 2.3(c) donne une illustration de la loi de moment résistant en faisant l'hypothèse d'une force normale f_n constante et également d'un bras de levier ℓ constant.

2.2 Nouvelles fonctionnalités de Rockable

Au cours de cette thèse, de nouvelles fonctionnalités ont été développées dans l'outil de calcul Rockable. La première, concerne l'algorithme de détection des blocs voisins, et la seconde est liée à la dépendance au maillage des modèles d'interaction qui nous a amené à proposer des solutions de pondération pour les forces-multiples d'un même contact.

2.2.1 Algorithme de détection des blocs voisins

Le but des procédures décrites dans cette section est d'établir une liste de contacts potentiels – c'est-à-dire une liste de voisins – de la manière la plus efficace. Dans des nombreuses situations, la mise à jour de cette liste a un coût significatif sur le temps de calcul global (bien que son rôle soit précisément d'optimiser les calculs). Il a été, lors de cette thèse, impératif d'optimiser cette étape du calcul car nous avons identifié qu'elle était particulièrement consommatrice de temps de calcul pour la chute de blocs de formes complexes sur un terrain de topographie défini finement.

La méthode la plus simple pour construire une liste de voisins consiste à tester la proximité de toutes les paires de blocs possibles, ce qui conduit à un nombre d'opérations égal au carré du nombre d'éléments. En termes de notation *Big-O*, il s'agit d'un algorithme avec une complexité $\mathcal{O}(N^2)$; cependant, dans la mesure où la mise à jour de la liste peut se faire avec un intervalle de temps supérieur au pas de temps, un gain modeste peut être obtenu, mais il n'est clairement pas suffisant pour nos applications.

Une mise à jour efficace de la liste des voisins est donc un aspect critique pour la problématique traitée dans ce travail. C'est pourquoi un effort particulier a été consacré à l'adaptation de stratégies plus sophistiquées, souvent empruntées à l'univers des jeux vidéo 3D, dans le code de calcul Rockable. Ces stratégies se concentrent, d'une part, sur les volumes entourant les blocs, et d'autre part, sur l'algorithme lui-même en visant une complexité $\mathcal{O}(N)$.

Les sphéro-polyèdres sont, comme déjà expliqué au début du chapitre, composés de sous-éléments convexes (sphères, cylindres et polygones 3D épais). Pour déterminer si deux SP sont proches, il faudrait effectuer un test pour chaque paire de sous-éléments dont ils sont constitués, ce qui impliquerait un grand nombre d'opérations. La stratégie logique avec ce type d'objet est de tester - avec une certaine fréquence - la proximité des volumes qui entourent chaque SP (formes limites), puis de tester la proximité entre les sous-éléments du SP identifiés comme étant proches avec une fréquence qui peut varier. Dans Rockable, deux distances D_v et d_v sont définies. Sous la distance D_v, deux SP sont assez proches pour que la proximité des sous-éléments soit testée à son tour, et ajoutée à une liste de voisins lorsque la distance est inférieure ou égale à d_v. Chacune de ces distances est associée à une période de mise à jour N_D et N_d exprimée en nombre de pas de temps. Par souci de cohérence, il est nécessaire que N_d soit un multiple de N_D. Il est tout à fait possible de définir une stratégie pour l'affectation dynamique des valeurs de distance et des périodes de mise à jour, mais dans un souci de simplicité et d'efficacité, cette solution a été choisie pour ne pas être mise en œuvre.

Une solution plus globale, basée sur une vitesse maximale supposée, a été utilisée pour les définir.

Le choix d'une forme englobante a une influence significative sur l'efficacité de la reconstruction, surtout si les objets ont une forme allongée. Les deux boîtes de bornes alignées (AABB) et les boîtes de bornes orientées (OBB) ont été testées. Pour ces dernières, un algorithme géométrique a été développé et utilisé pour déterminer la boîte qui a le plus petit volume. Cet algorithme n'est pas décrit ici, mais notons que les axes de l'OBB optimal ne correspondent pas nécessairement aux axes d'inertie du SP. Tester la proximité de deux OBB est légèrement plus coûteux que tester la proximité de deux AABB, cependant, pour des raisons purement géométriques, l'utilisation des OBB est en fait plus efficace car elle limite la portée des objets dans toutes les directions comme le montre la Figure 2.4. Ainsi, avec les simulations d'écoulement dense, des durées 7 fois plus courtes ont été obtenues lorsque les OBB étaient utilisés. La performance de l'algorithme dépend évidemment de la taille des cellules par rapport à la taille typique du bloc. Il y a donc une valeur optimale de ce rapport qui doit avoir, selon notre propre expérience, une valeur de l'ordre de 2, valeur qui peut varier avec la dispersion granulométrique et l'allongement des blocs.

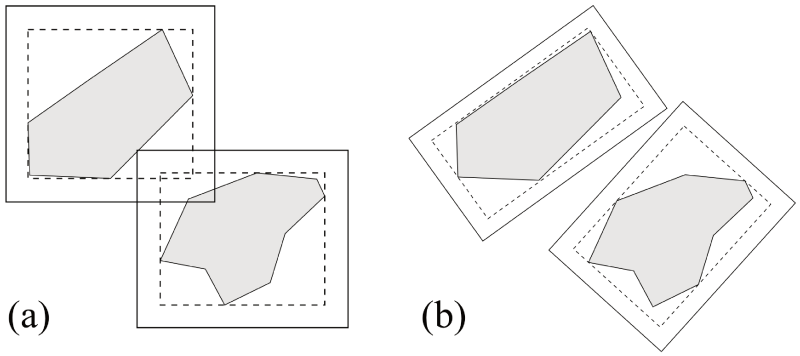


FIGURE 2.4 – Illustration bidimensionnelle de l'emploi des boîtes englobantes de type (a) AABB ou (b) OBB. Les limites en pointillés correspondent aux boîtes les plus resserrées sur la forme, et les limites en traits pleins correspondent à leurs dilatations à une distance D_v (ou d_v pour les sous-éléments). Lorsque deux boîtes de lignes pleines se chevauchent, les sphéro-polyèdres sont désignés comme étant "proches". Cette image montre que, même si les positions relatives des objets et les distances de dilatation sont les mêmes, ils sont déclarés à tort comme étant proches avec des AABB, alors qu'ils ne le sont pas avec les OBB.

Toutes les stratégies décrites jusqu'à présent permettent une réduction significative du temps nécessaire pour mettre à jour la liste des voisins, mais la complexité de l'algorithme reste $\mathcal{O}(N^2)$. Pour surmonter ce problème, la stratégie des "cellules liées" (linked-cells, voir [Ohno *et al.*, 2017] par exemple) a été mise en œuvre. Elle consiste à diviser l'ensemble du système (*i.e.*, la boîte AABB qui entoure tous les éléments de la simulation) en cellules structurées (une grille) associées à une liste d'éléments qu'il contient, et une cellule fictive associée aux éléments qui sont trop grands pour être contenus dans la cellule structurée, comme les plans infinis. Pour un objet donné, le test de proximité n'est réalisé qu'avec les autres objets de sa propre cellule, ainsi qu'avec ceux situés dans les cellules voisines. Le nombre de cellules impliquées pour

la recherche de voisins d'un objet en 3D, est *constant* et égal à 27. La Figure 2.5 donne une représentation 2D des cellules impliquées dans la recherche de voisins d'un élément ; dans ce cas, les cellules testées sont au nombre de 9. Considérant que le nombre d'éléments par cellule est limité, le nombre d'opérations par élément est presque constant et la complexité de l'algorithme est dans le pire des cas limitée à $\mathcal{O}(N)$.

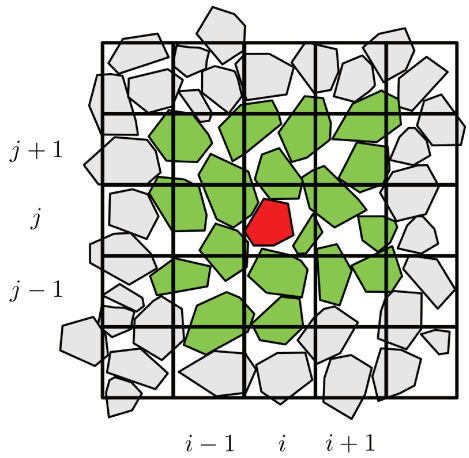


FIGURE 2.5 – Stratégie de détection des éléments voisins selon la stratégie *linked-cells*. Le test de proximité de l'élément rouge dans la cellule (i, j) n'est réalisé qu'avec les éléments verts appartenant aux 9 cellules allant de $(i-1, j-1)$ à $(i+1, j+1)$.

Une amélioration supplémentaire consiste à limiter les linked-cells aux blocs mobiles plutôt qu'à l'ensemble du système qui inclut le terrain. Celui-ci est, d'un point de vue informatique, un sphéro-polyèdre fixe qui a la particularité d'être très grand et de comporter un très grand nombre de sous-éléments. L'ensemble du terrain sera vu par tous les blocs mobiles en définissant une cellule spéciale dans la grille linked-cells.

Lorsque la proximité d'un bloc est testée avec le terrain, le nombre de tests est gigantesque et contribue excessivement à augmenter la durée des calculs. Une solution a donc été mise en œuvre pour pallier à ce problème : l'utilisation d'arbres binaires d'OBB. Le principe est de subdiviser la boîte englobante OBB du terrain (ou d'un SP quelconque) en sous-boîtes OBB de façon hiérarchique : la boîte du niveau 0 contient deux boîtes au niveau 1 qui englobent deux parties du terrain, puis les boîtes du niveau 1 contiennent elles même deux boîtes chacunes, et ainsi de suite jusqu'au niveau désiré. La Figure 2.6 montre les sous-OBB obtenus aux niveaux 0, 3, 6 et 12. On voit clairement que les boîtes deviennent de plus en plus petites et contiennent donc de moins en moins de sous-éléments du SP. Lors de la recherche des contacts, l'identification des OBB de plus profond niveau dans l'arbre binaire permet de limiter les tests aux éléments qui y sont contenus.

Pour se faire une idée des gains qu'il est possible de réaliser avec cette nouvelle fonctionnalité, imaginons la situation où une recherche de contacts est effectuée entre un bloc cubique constitué de 20 éléments (6 faces, 6 arrêtes et 8 sommets) et le terrain constitué de $200 \times 200 = 40\,000$ polygones (cette configuration correspond à la définition plutôt grossière d'une topographie). Le nombre de tests à effectuer sans arbre binaire d'OBB est de $20 \times 40\,000 = 800\,000$ tests. En utilisant un arbre de profondeur 6, les plus petites boîtes contiendraient environ $40\,000/(2^6) = 625$ éléments, et en supposant

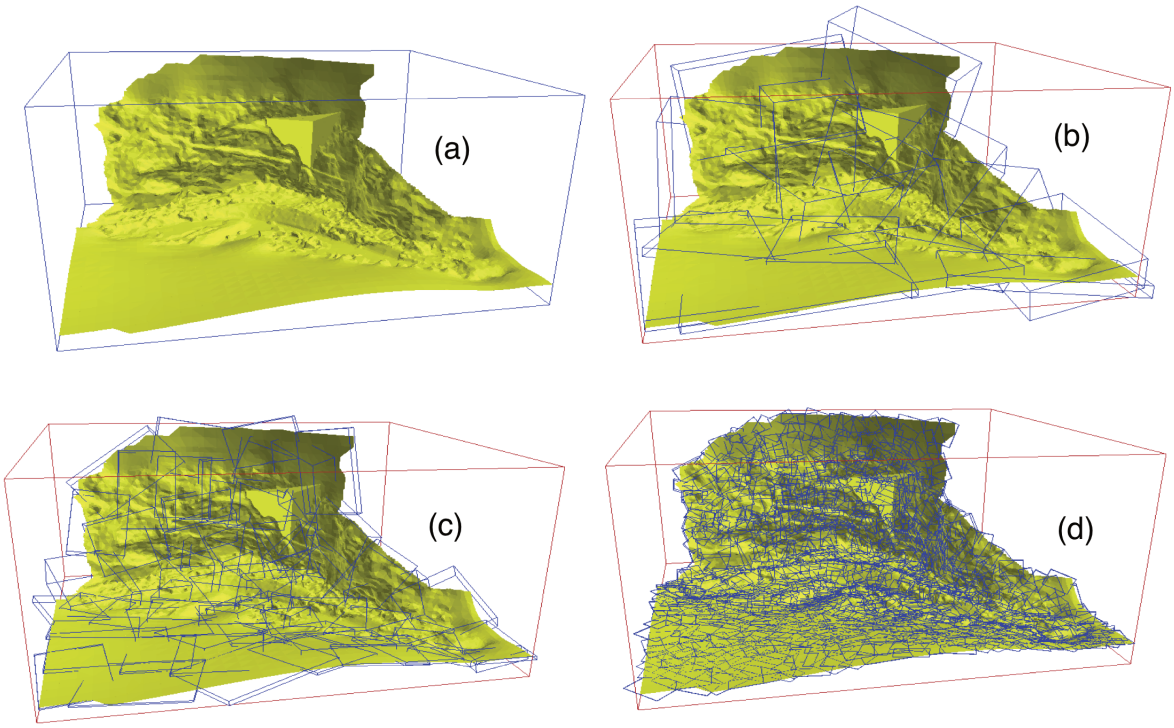


FIGURE 2.6 – Exemple d'arbre binaire *OBB* de profondeurs (a) 0, (b) 3, (c) 6 et (d) 12.

un seul chevauchement d'OBB entre le bloc et une boîte de profondeur 6 du terrain, le nombre d'opérations serait réduit à $20 \times 625 = 12\,500$ tests, soit 64 fois moins de tests [1]. Cette amélioration permet donc un gain de temps de simulation substantiel. Ce gain est vital pour l'applicabilité de l'approche DEM sur des terrain réalistes car il conditionne l'espoir d'atteindre la fin d'une simulation dans un temps raisonnable.

2.2.2 Pondérations des forces-multiples d'un même contact

L'emploi de formes (sphéro-)polyédriques, quelle que soit la solution technique choisie, présente certaines complications qui ne sont en général pas traitées dans la littérature (il semble en fait que ce sujet ne soit jamais traité). La complication vient du fait que les contacts entre 2 corps polyédriques, éventuellement concaves, peuvent être multiples. Il en résulte que la raideur apparente est proportionnelle au nombre de points de contacts qui dépendent eux-mêmes de la position des corps et de l'algorithme géométrique de recherche des contacts. Par conséquent, les raideurs mises en jeu ne peuvent pas être maîtrisées puisque le nombre de points de contact évolue de façon incontrôlable.

La problématique est encore plus compliquée qu'elle n'y paraît. Voici quelques arguments pour s'en convaincre :

– On pourrait se dire que la raideur est liée à la surface en contact, mais le nombre

1. Il existe quelques biais dans le raisonnement qui aboutissent à cette valeur, mais les ordres de grandeur sont les bons.

de points de contact ne l'est pas obligatoirement ;

- Dans le cas de corps concaves, il est possible d'avoir des points de contact qui soient réellement plusieurs points de contact, alors que pour un contact entre deux faces planes ces points sont identifiés géométriquement (et artificiellement) et n'ont en fait rien à voir avec les petites zones de contact qui résulteraient d'états de surface non réguliers ;
- La finesse de maillage des corps est un paramètre qui affecte leur raideur apparente.

C'est essentiellement ce dernier point qui nous a poussé à proposer une solution numérique pour surmonter cet artefact. Pour contrôler la raideur apparente k_n entre deux SP i et j (raisonnement valable pour k_t ou k_r), il faut, à chaque instant t, pondérer la raideur des $N^{ij}(t)$ points de contact sous-jacents par un poids $w_\bullet^{ij}$ tel que :

$$\sum_{N^{ij}(t)} w_\bullet^{ij}(t) = 1 \tag{2.21}$$

où l'indice $\bullet = n$, t ou r correspond à la direction de sollicitation (respectivement normale, tangente ou en rotation).

Les solutions et les arguments physiques pour définir les valeurs des poids sont multiples. Les choix proposés et implémentés dans Rockable résolvent certains désagréments, mais pas tous. En particulier, la transmission fine des forces élastiques peut être biaisée, mais par chance la réponse élastique est d'importance secondaire dans les situations traitées dans cette thèse.

La première solution (`NumberWeight`) consiste à répartir les poids de façon égale :

$$w_\bullet^{ij}(t) = \frac{1}{N^{ij}(t)} \tag{2.22}$$

La seconde solution (`OverlapWeight`) consiste à affecter une raideur plus importante aux contacts les moins déformés dans la direction normale :

$$w_\bullet^{ij}(t) = \frac{h_n^{ij}(t)}{\sum_{N^{ij}(t)} h_n^{ij}(t)} \tag{2.23}$$

où $h_n^{ij}(t)$ est l'interpénétration au niveau d'un point de contact entre les corps i et j.

Dans les deux solutions implémentées, les poids sont les mêmes quelle que soit la direction ($w_n^{ij} = w_t^{ij} = w_r^{ij}$), mais rien n'empêche d'imaginer d'autres stratégies. Nous verrons dans les chapitres suivants si les solutions proposées sont suffisantes ou mériteraient des améliorations.

Chapitre 3

Essais à petite échelle

Cinématique de collision sur sol meuble en laboratoire

Introduction

Afin de contribuer à une meilleure modélisation des mouvements de masse, divers auteurs, *e.g.* Hungr & Evans [1988]; Piteau & R. [1977]; Wu [1985], ont réalisé des essais expérimentaux qui visent à identifier les paramètres nécessaires pour reproduire les cinématiques de rebond. Il s'agit de caractériser plutôt ce qui se passe sur des substrats dits "mous", très dissipatifs, beaucoup plus fréquents en situations réelles que les substrats durs tels que les talus de route, pierrier etc. Les trajectoires simulées des blocs rocheux tiennent compte d'une succession d'impacts et de vols libres régis par les équations classiques du mouvement.

Comme vu dans le chapitre 1, des nombreux auteurs ont étudié cette problématique *via* des expérimentations sur sites ou sur modèles réduits. En particulier, Chau *et al.* [2002] qui a mené une étude expérimentale de lâchers de blocs en utilisant des blocs sphériques impactant une surface plane. Les blocs ont été lâchés verticalement, alors que la surface d'impact était inclinée de manière aléatoire afin d'évaluer l'effet de l'inclinaison de la pente sur les rebonds. Dorren *et al.* [2006] a réalisé une campagne d'essais à grande échelle pour étudier les effets de la forêt sur les changements de trajectoire des blocs. La déviation horizontale des blocs suite aux chocs avec les arbres a été évaluée à partir de plusieurs points d'impacts successifs en se basant sur les empreintes visibles trouvées au sol ou les cicatrices repérées sur les troncs d'arbres. C'est une technique relativement simple et précise pour mesurer la déviation des blocs ; cependant, elle ne peut pas facilement être mise en œuvre sur les pentes rocheuses, car les impacts avec le substratum rocheux laissent des traces moins évidentes.

Des tests de laboratoire sur des matériaux modèles ou naturels ont été effectués pour mieux appréhender les mécanismes d'interaction et de propagation des masses granu-

laires [Asteriou & Tsiambaos, 2016; Bourrier *et al.*, 2008, 2012; Labiouse & Heidenreich, 2009; Manzella & Labiouse, 2008; Okura *et al.*, 2000]. Les données obtenues ont permis de valider différents modèles numériques [Manzella *et al.*, 2011; Mollon *et al.*, 2012] qui se sont avérés capables de décrire de façon satisfaisante le comportement collectif (écoulement en masse) d'un ensemble de particules en interaction. Toutefois, l'expérience montre que le comportement sur le terrain reste plus complexe qu'en laboratoire et que des moyens d'investigation bien plus importants sont nécessaires.

La modélisation numérique peut être utilisée également pour réaliser des expériences numériques systématiques permettant d'examiner l'influence d'un seul paramètre à la fois, les autres étant fixés. Entre autre, la méthode des éléments discrets (DEM), comme initiée par Cundall & Strack [1979], est un outil bien adapté pour traiter des cas d'éboulement en ayant un certain contrôle sur les possibilités de dissipation au niveau des contacts ou des collisions. Il s'agit de simuler les mécanismes de dissipation d'énergie par frottement et par collision lors de la propagation d'une masse de matériau granulaire ou d'un bloc isolé sur une pente [Mollon *et al.*, 2012]. Dans ce travail de thèse, il est plutôt question de blocs isolés qui se propagent sur un versant ; les blocs et le versant sont dotés de géométries complexes. Le modèle DEM utilisé dans le cadre de la thèse tient compte explicitement de la forme des blocs ainsi que des moyens de dissipation d'énergie par chocs, par frottement et par résistance au roulement. De plus, le nombre de paramètres mécaniques du modèle est volontairement limité afin de permettre leurs estimations *via* des mesures *in situ*. Il est intéressant de noter que les paramètres géométriques de notre modèle, tels que la forme des blocs et la topographie, jouent un rôle primordial ; voir, *e.g.*, Daudon *et al.* [2015]. Contrairement aux expérimentations, beaucoup de données sont accessibles sans difficulté avec des simulations DEM. Il peut s'agir de forces ou de moments d'interaction entre les particules (ou avec le substratum), de la cinématique complète du ou des blocs, et de bilans énergétiques aussi détaillés que souhaités.

Pour le type de modélisation tel que celui présenté au chapitre 2, les lois d'interaction entre les blocs et la pente sont complètement déterministes. Ceci peut sembler insuffisant lorsque l'on sait que le chemin de propagation et de la distance d'arrêt d'un bloc rocheux sont soumis à des grandes incertitudes (discrétisation numérique du versant, hétérogénéité du sol, simplicité du modèle de collision, *etc.*). Ainsi, la prise en compte d'un caractère stochastique dans les lois de collision est tout-à-fait envisageable, et permettrait d'incorporer des incertitudes dans la prédiction des rebonds, avec un certain contrôle de leurs variabilités. Il s'agit là du credo adopté par certains auteurs [Bourrier & Hungr, 2011; Dorren & Seijmonsbergen, 2003] pour qui la cinématique de rebond s'appuie intrinsèquement sur une meilleure compréhension de la variabilité des paramètres et de l'incertitude inhérente aux mesures prises sur le terrain. Dans ces modèles, les vitesses après rebond (réfléchies) $\boldsymbol{V}_+ = (V_{x+}, V_{y+}, \omega_+)^T$ sont liées aux vitesses avant rebond (incidentes) $\boldsymbol{V}_- = (V_{x-}, V_{y-}, \omega_-)^T$ par la relation linéaire suivante :

$$\boldsymbol{V}_+ = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{V}_- \tag{3.1}$$

où $\mathbf{A}$ est une matrice 3×3 dont les composantes sont qualifiées de *coefficients de restitution cinématique*. Il est toutefois important de noter que ces coefficients sont définis à l'échelle des singularités dans la trajectoire d'un bloc, et pas à l'échelle d'une

zone de contact entre le bloc et le sol comme c'est le cas dans la modélisation proposée dans ce document. Mise à part la composante $A_{nn} = e_n$ associant les vitesses normales au sol, la correspondance des paramètres DEM avec les autres composantes n'est pas du tout triviale. Sur la base du modèle de collision de l'Équation 3.1 (cinématique non-régulière), Bourrier *et al.* [2009] ont proposé dans leur modélisation (RockyFor3D, [Dorren, 2016]) que les composantes de la matrice **A** varient suivant des distributions Gaussiennes, afin de rendre compte des aléas de collision. Le modèle développé et utilisé dans ce manuscrit est différent des modèles trajectographiques stochastiques sur plusieurs aspects, mais les données expérimentales qui y sont présentées peuvent aussi aider à vérifier dans quelle mesure ce type d'approche est justifié.

Dans le cadre de la thèse, des expérimentations de laboratoire associées à des modélisations DEM ont été menées dans le but d'identifier les paramètres numériques d'interaction et de tester la pertinence du modèle numérique. Dans ce travail, trois étapes originales sont présentées :

1. D'abord, les vitesses incidente et réfléchie, V_- et V_+ qu'on peut qualifier de *vitesses de collision*, sont obtenues à partir d'une campagne expérimentale réalisée en laboratoire ; elle sera détaillée dans la Section 3.1. Deux séries d'une trentaine [1] de lâchers de blocs en béton haute performance ont été effectuées. Le bloc roule sans glisser (dans la mesure du possible) sur une "rampe-rail", et impacte un bac rempli de sable sec. Une certaine répétabilité et maîtrise des paramètres physiques de l'essai est ainsi assurée. Une caméra rapide est utilisée pour suivre la trajectoire du bloc et estimer les vitesses de collision en translation et en rotation. Les distributions cumulées des vitesses avant et après rebond ont pu être caractérisées et un modèle de collision trajectographique a pu être proposé. Les incertitudes de mesure liées aux dispositifs de mesures et à l'opérateur ont également été évaluées.

2. Dans la section 3.3, les vitesses expérimentales réfléchies V_+ sont comparées à des vitesses calculées dans les mêmes conditions d'impact en utilisant un modèle numérique DEM. Ce modèle prend en considération la forme du bloc et les mécanismes de dissipation tel que décrit dans le Chapitre 2, mais en deux dimensions.

3. La troisième et dernière étape (sections 3.4 et 3.5) porte sur la caractérisation statistique des vitesses réfléchies estimée à partir du modèle numérique. Cette analyse probabiliste prend en compte la variabilité des paramètres – identifiés expérimentalement – qui affectent le rebond. L'étude est basée sur un couplage mécano-probabiliste entre des simulations de type Monte-Carlo et un modèle bidimensionnel en éléments discrets. Enfin une analyse de sensibilité des caractéristiques après rebond (vitesses de translation et de rotation) en fonction des principaux paramètres d'interaction est enfin proposée pour une meilleure appréhension du rôle des paramètres du modèle DEM.

1. Plus exactement, 28 lâchers de blocs cylindriques et 31 lâchés de blocs triangulaires.

3.1 Essais expérimentaux

Cette section présente en détail : (1) la réalisation des essais expérimentaux et l'analyse de la trajectoire d'un bloc impactant un substrat sableux ; (2) le traitement d'images employé dans le processus, pour déterminer les vitesses incidentes et réfléchies dans chaque enregistrement ; et (3) la quantification et l'examen des différentes sources d'erreurs.

3.1.1 Rampe métallique

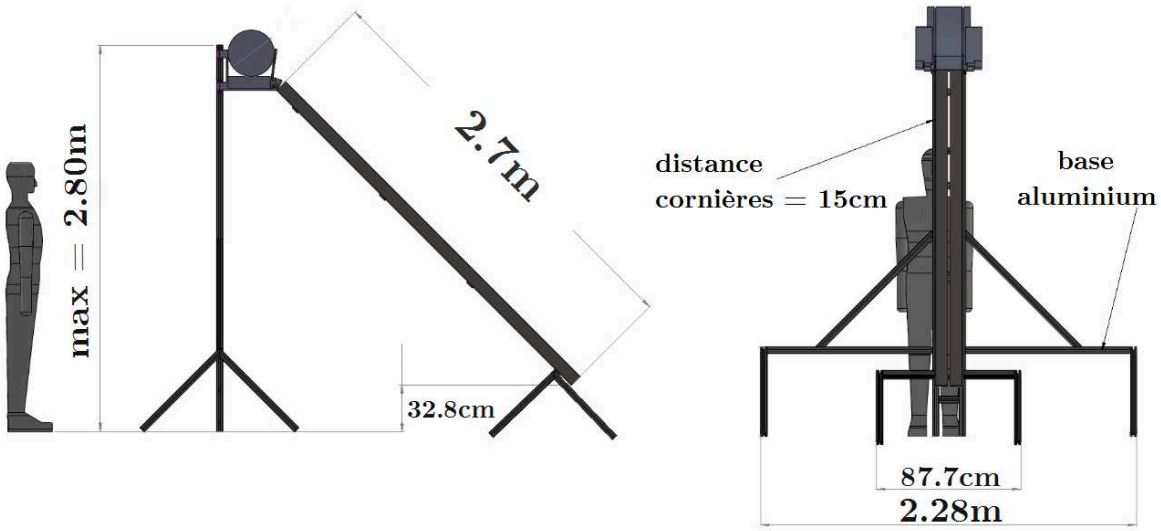


FIGURE 3.1 – Schéma de la rampe métallique avec les dimensions caractéristiques (dispositif conçu et réalisé par G. Vian au Laboratoire 3SR).

Le dispositif, présenté sur la Figure 3.1, est constitué d'un rail métallique incliné, sur lequel un bloc muni d'une rainure appropriée peut rouler et/ou glisser. Les parties du rail en contact avec le bloc peuvent être recouvertes d'un revêtement antidérapant pour favoriser le roulement sans glissement. À la sortie de la rampe, le bloc effectue un vol libre court, puis entre en collision avec un sol positionné dans un conteneur au pied de la rampe ; il rebondit alors. Le rail, d'une longueur de 2.7 m, a une inclinaison réglable entre 30 et 60 degrés. En position haute, l'élévation maximale de la rampe est d'environ 2.8 m. Pour cette campagne expérimentale, l'inclinaison de la rampe a été fixée à 45 dégrées [Garcia *et al.*, 2017]. Le conteneur dans lequel la collision se produit peut être rempli avec n'importe quel type de substratum. Dans cette étude, il a été rempli de sable fin. À la fin de chaque essai, en vue de préparer le lâcher suivant, la surface impactée du sable est de nouveau nivelée à l'aide d'un tasseau.

La caméra est réglée pour faire l'acquisition de 400 images par seconde (fps). Elle est positionnée sur un trépied et orientée dans la direction perpendiculaire au plan de la trajectoire du bloc, afin d'enregistrer son mouvement en deux dimensions (2D) au cours de la collision. Les photos sont centrées sur la zone où le tout premier impact est supposé avoir lieu ; Figure 3.2. Ceci a comme objectif d'améliorer la résolution des

images, en termes de pixels par unité de longueur, et ainsi d'accroître la précision des positions suivies. Un panneau LED, positionné en face de la rampe, est orienté vers le point d'impact pour limiter les zones d'exposition à faible luminosité. Un éclairage important est requis compte tenu des temps d'expositions courts lorsque la fréquence d'acquisition est élevée.

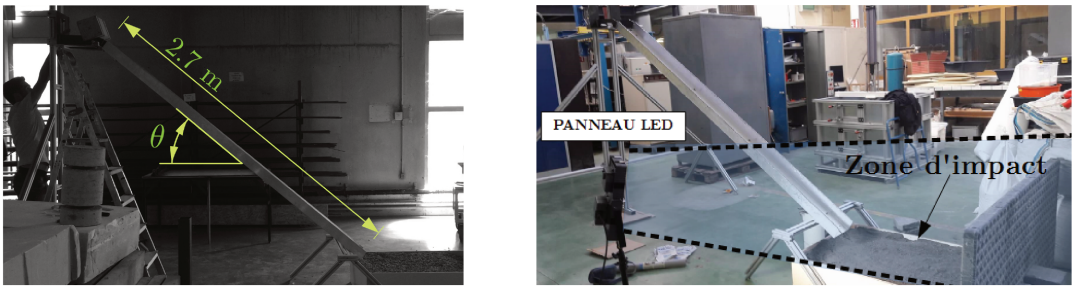


FIGURE 3.2 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental lors d'un essai. L'inclinaison θ de la rampe peut varier entre 30 et 60 degrés. Un appareil photo numérique de type reflex (DLSR) est positionné au pied de la rampe pour obtenir des photographies du bloc lors de l'impact avec le sol d'une qualité suffisante pour permettre leurs traitements. L'appareil photo est positionné suffisamment loin du point d'impact pour limiter (1) la distorsion "grand angle" de l'objectif, et (2) les effets de vibration qui peuvent affecter la qualité des images.

3.1.2 Blocs projectiles

Les blocs utilisés lors des essais d'impact sont en béton fibré haute performance. La géométrie et les dimensions des blocs sont présentées sur la Figure 3.3. Les formes des blocs pourraient être qualifiées de cylindres à base circulaire ou triangulaire (avec les sommets tronqués), mais pour ne pas alourdir le propos, nous parlerons dans ce chapitre respectivement de blocs *cylindriques* ou *triangulaires*, sans qu'il y ait de confusion possible. Les blocs sont munis de deux rainures parallèles, orientées dans la direction perpendiculaire à l'axe du bloc, qui leurs permettent de rouler ou glisser sur la rampe. Ces rainures sont espacées de 14 cm l'une de l'autre et ont une largeur de 2 cm ; voir Figure 3.3. Elles sont conçues de telle sorte que les blocs puissent, quelle que soit leur forme, se déplacer sur la cornière de la rampe (d'une largeur de 15 cm) avec un peu de jeu et un minimum de frottement sur les parties latérales. Les blocs sont ainsi guidés dans un mouvement rectiligne, en évitant au maximum les déviations latérales. En d'autres termes, le bloc peut rouler et glisser sur la rampe sans dévier de sa trajectoire, et percuter le sol au point d'impact initialement prévu. Ce guidage en translation du bloc nous permet d'approcher au mieux un mouvement bidimensionnel. Toutes nos analyses s'appuient sur l'hypothèse de trajectoires balistiques qui restent bidimensionnelles et surtout dans un même plan.

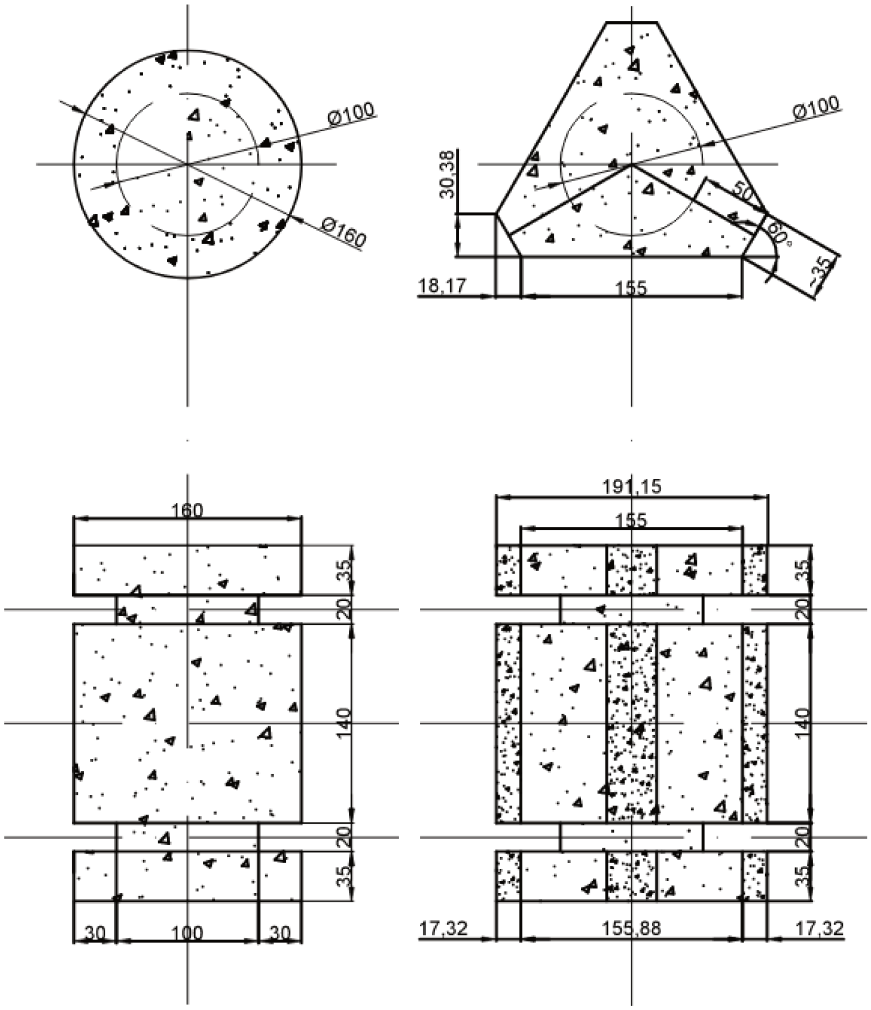


FIGURE 3.3 – Géométries des blocs utilisés lors des essais expérimentaux - Blocs cylindrique et triangulaire, de masses respectives 13.9 kg et 10.89 kg. Les inerties des blocs par rapport à leur axe de rotation valent respectivement 44.5 g m^2 et 38.3 g m^2. Les côtes présentées sur la figure sont données en millimètres.

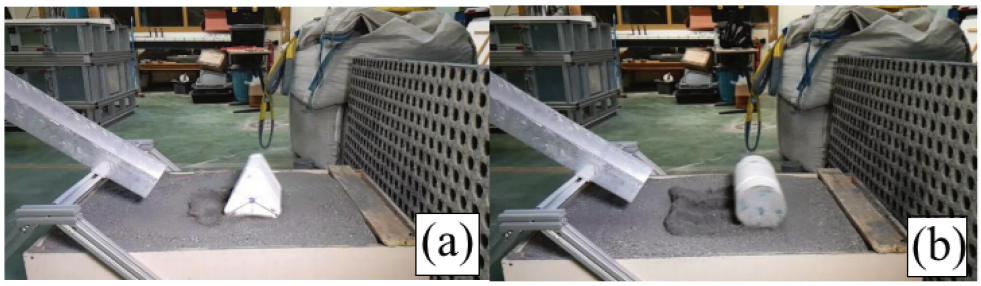


FIGURE 3.4 – Capture écran des expérimentations : (a) bloc triangulaire et (b) bloc cylindrique.

3.1.3 Reconstruction des trajectoires expérimentales

Chaque essai réalisé donne lieu à une série d'images où une face du bloc est toujours visible comme on peut le voir sur la Figure 3.4. Les données brutes issues de l'analyse d'image sont les positions de différents points de la face avant du bloc (un au centre, l'autre au bord) à intervalle de temps régulier ; Figure 3.5.

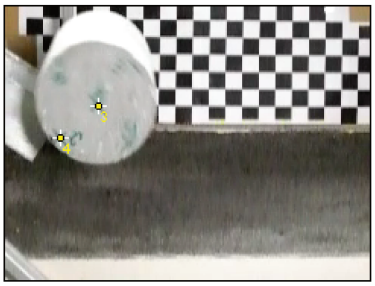


FIGURE 3.5 – Repères tracés sur un bloc cylindrique – procédure de pointage d'un point excentrique et du centre de masse du projectile (capture d'enregistrement vidéo d'un essai expérimental).

Ces données définissent la trajectoire de chaque bloc selon les 2 directions X et Y et en rotation autour de l'axe Z. Les vitesses de translation V_{x+}, V_{y+} et de rotation ω_+ après rebond, ainsi que les vitesses avant l'impact V_{x-}, V_{y-}, ω_- sont obtenues à partir d'ajustement par les équations du mouvement balistique du second degré pour les directions X et Y, et en rotation en fonction du temps. La Figure 3.6 donne une illustration de la procédure permettant d'estimer toutes les vitesses de collision. On notera que la durée de contact est relativement longue et que le début et la fin du contact doivent être choisis (non-objectivement) par l'opérateur qui traite les images.

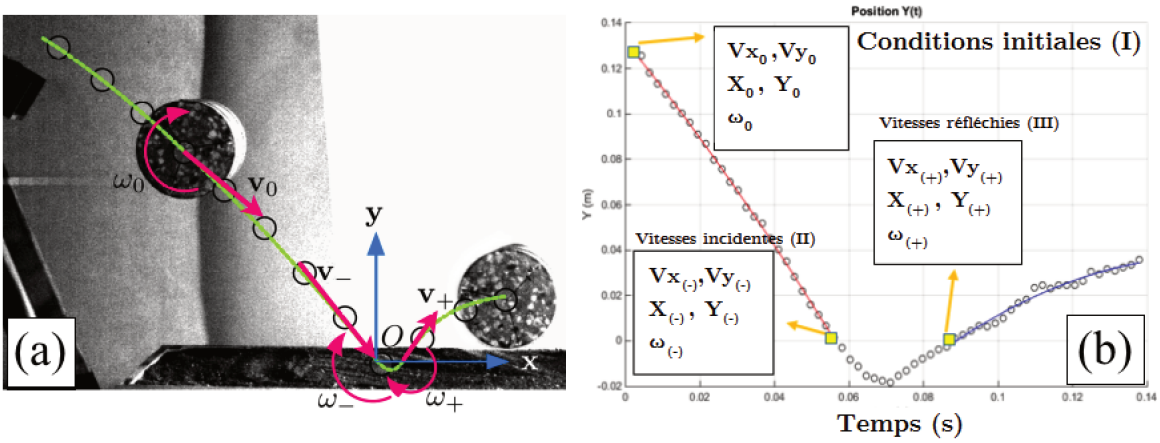


FIGURE 3.6 – Reconstruction de la trajectoire d'un bloc. (A) Localisation des vitesses d'intérêt. (B) Identification des trajectoires avant et après collision (respectivement rouges et bleues) illustrées ici sur une courbe d'évolution temporelle de l'altitude du centre d'un bloc.

Dans le détail, les évolutions temporelles des positions linéaires x et y et angulaire θ, avant et après la période de contact, sont approchées au moyen de régressions poly-

nomiales (linéaires pour $x(t)$ et $\theta(t)$, et de second ordre pour $y(t)$) donnant accès aux vitesses à tout moment ; Figure 3.7.

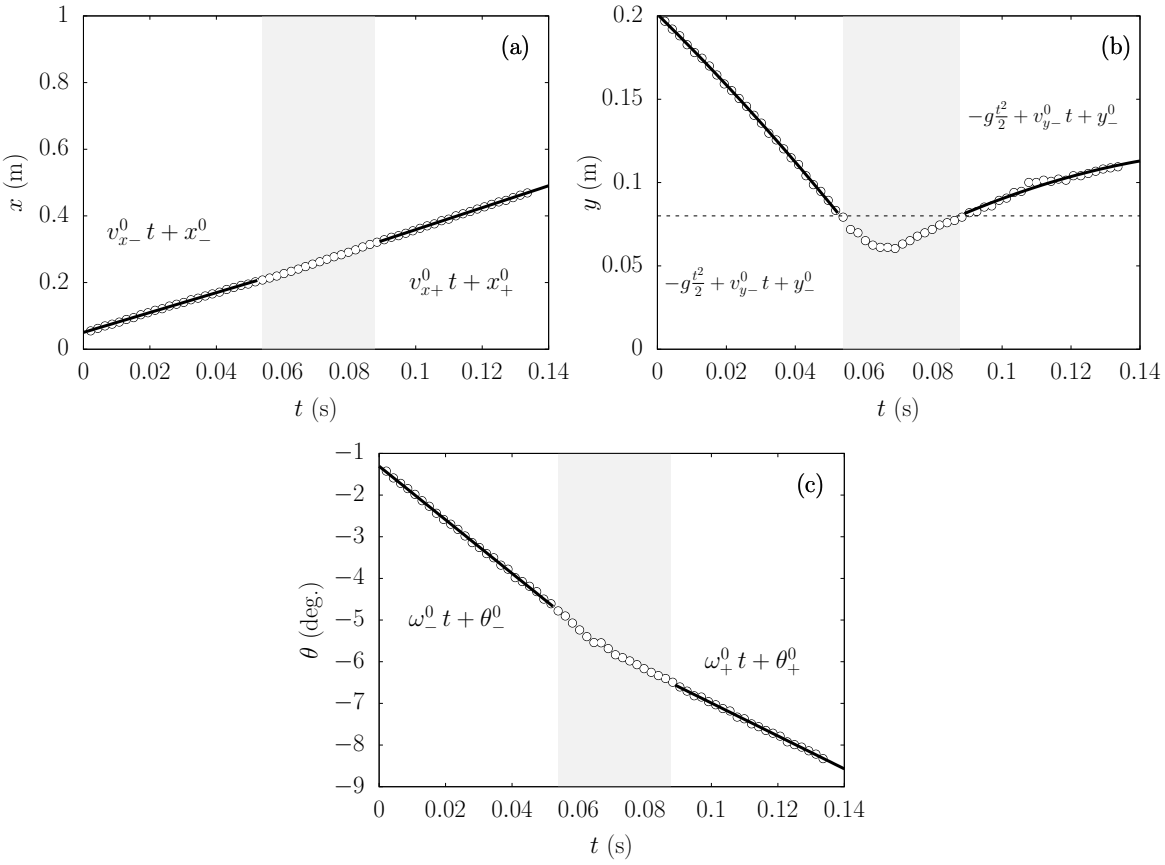


FIGURE 3.7 – Trajectoire du centre de masse : la zone grisée correspond au moment où le bloc entre en contact avec le sol ; (a) Évolution de la position avant (-) et après l'impact (+) d'un bloc sur l'axe horizontal X (sens positif depuis l'origine au moment de l'impact) ; (b) Évolution pour la position verticale (sens de l'axe Y positif) et (c) Évolution de la position angulaire dans le temps par rapport à l'axe de rotation (Axe Z, positif dans le sens anti-horaire). On notera que dans (b), la ligne pointillée délimite un référentiel horizontal égal à 0.08 m ce qui correspond au rayon du bloc dans le cas d'un bloc cylindrique. La notion de contact est établie à partir de considérations géométriques basées sur la distance entre le centre de gravité du bloc et l'horizontalité du sol.

Chaque film de collision a été soumis au traitement précédent, et les données obtenues ont permis une analyse statistique pour déterminer les tendances générales comme nous le verrons par la suite.

3.1.4 Résultats expérimentaux

Les valeurs moyennes et écarts-types des vitesses sont résumées dans les Tableaux 3.1 pour les blocs cylindriques et triangulaires. Les données statistiques pour les blocs cylindriques et triangulaires excluent certains lâchers à cause d'au moins un des critères

suivants :

- Les conditions d'exposition étaient médiocres lors de la prises de vue : les réglages de l'éclairage et de la vitesse d'obturation n'étaient pas adaptés ;
- Le bloc a dévié latéralement de sa trajectoire après impact (ou durant l'impact), empêchant la reconstruction de la trajectographie 2D. Dans ce cas, les vitesses sont faussées et les enregistrements inexploitables ;
- L'opérateur a arrêté la caméra prématurément avant la fin de la période de contact du rebond.

Pour déterminer les paramètres de rebond avec le moins d'incertitude possible, nous avons jugé en premier lieu préférable de privilégier la qualité du traitement d'image et l'hypothèse de trajectoire en plan bidimensionnel. Dans un second temps, afin d'accroître les données statistiques, les lâchers exclus ont été réintégrés en pensant que les valeurs aberrantes seraient de toute façon discernables.

Tableau 3.1 – Vitesses incidentes et réfléchies (a) des 28 blocs cylindriques et (b) des 19 blocs triangulaires retenus.

(**a**) Blocs cylindriques

	V_{x-} m/s	V_{x+} m/s	V_{y-} m/s	V_{y+} m/s	ω_- rad/s	ω_+ rad/s
Moyenne	2.87	3.05	-2.34	0.86	-65.03	-42.30
Écart type	0.21	0.28	0.19	0.17	5.85	10.68
Coeff. de Variation	7.38%	9.19%	-8.08%	20.13%	-9.00%	-25.26%
Minimum	2.18	2.42	-2.69	0.46	-71.57	-77.82
Maximum	3.18	3.87	-1.91	1.14	-44.06	-32.21

(**b**) Blocs triangulaires

	V_{x-} m/s	V_{x+} m/s	V_{y-} m/s	V_{y+} m/s	ω_- rad/s	ω_+ rad/s
Moyenne	3.76	2.64	-2.73	0.51	-39.70	-17.32
Écart type	0.95	1.19	0.84	0.26	17.08	6.70
Coeff. de Variation	25.40%	45.06%	-30.60%	51.61%	-43.03%	38.67%
Minimum	2.30	0.24	-4.34	0.18	-68.49	-27.65
Maximum	5.69	5.87	-1.45	1.19	-13.34	2.41

Les résultats complets pour chacun des lâchers (blocs cylindriques et triangulaires) peuvent être consultés dans l'annexe A.

Afin d'obtenir les caractéristiques probabilistes des vitesses incidentes et réfléchies des essais expérimentaux, nous avons tracé les graphiques de la Figure 3.8. Ils représentent, sur la totalité des lâchers, les densités de probabilité cumulées (CDF) de l'ensemble des vitesses pour les cylindres (figures du haut) et les triangles (figures du bas). Un CDF, contrairement à une distribution de densités de probabilité (PDF), est

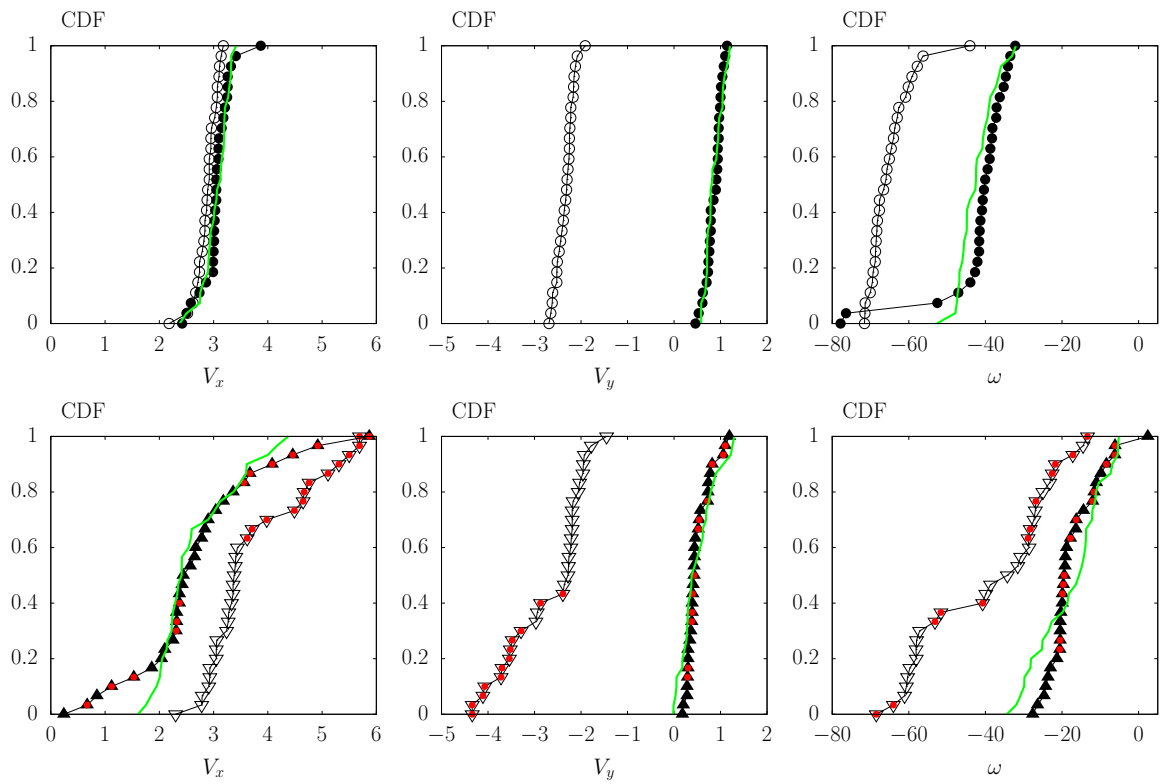


FIGURE 3.8 – Distributions cumulées des vitesses de rebond pour les 28 et 31 lâchers de blocs respectivement cylindriques et triangulaires. Les symboles évidés correspondent aux vitesses incidentes (V_{x-}, V_{y-} et ω_-) et les symboles pleins aux vitesses réfléchies (V_{x+}, V_{y+} et ω_+). Les graphiques du haut correspondent aux résultats obtenus pour les cylindres. Ceux du bas correspondent aux triangles. Les points rouges signalent les lâchers pour lesquels $V_{x-} > 3.5$. Les courbes vertes correspondent aux vitesses réfléchies prédites par le modèle cinématique de rebond (Équation (3.2)) avec les paramètres du Tableau 3.2. Les vitesses de translation sont données en mètres par seconde (m/s) et les vitesses de rotation en radians par seconde (rad/s).

construit en ordonnant l'intégralité des données. Ainsi, les courbes sont beaucoup plus détaillées qu'un PDF qui serait construit en faisant un comptage pour quelques intervalles. Il faut cependant faire attention à l'interprétation de ce type de représentation : il n'y a pas de correspondance entre les points ayant une même densité de probabilité cumulée. Pour être plus clair, ceci signifie qu'une vitesse incidente et une vitesse réfléchie avec la même densité de probabilité cumulée ne correspondent vraisemblablement pas au même lâcher. Un second point pouvant aider à l'interprétation des CDF, est de garder à l'esprit que le CDF se rapporte à l'intégrale du PDF (une autre façon de dire que les densités sont cumulées). Par conséquent, l'inclinaison de la pente en un point de la courbe de CDF (*i.e.*, la dérivée par rapport à la variable traitée) est directement corrélée à la valeur de PDF au même point. Autrement dit, une tangente horizontale traduit une probabilité nulle, alors qu'une asymptote verticale signifierait que la probabilité a tendance à devenir de plus en plus certaine.

Revenons à la Figure 3.8 avec ces éléments d'interprétation en tête. Nous voyons que sur les graphiques du haut, correspondant aux collisions de blocs cylindriques, les

valeurs de vitesses incidentes et réfléchies sont extrêmement condensées. À l'exception de quelques vitesses de rotation très élevées, les distributions cumulées de vitesses réfléchies apparaissent comme un simple décalage des vitesses incidentes. Ceci rend compte d'une bonne reproductibilité des vitesses mesurées, ce qui témoigne à la fois de la qualité du dispositif expérimental et des mesures par analyse d'images. Malgré une variation des vitesses autour d'une vitesse moyenne, il serait tout-à-fait acceptable de définir la cinématique de collision en reliant les vitesses réfléchies aux vitesses incidentes par des coefficients de restitution des vitesses construits comme des rapports des vitesses moyennes : $A_{xx} = \langle V_{x+}\rangle/\langle V_{x-}\rangle$, $A_{yy} = \langle V_{y+}\rangle/\langle V_{y-}\rangle$ et $A_{\theta\theta} = \langle \omega_+\rangle/\langle \omega_-\rangle$.

D'un point de vue plus quantitatif, un taux moyen de dissipation énergétique suivant Y de l'ordre de $(0.8/2.3)^2 \simeq 0.13$ peut être défini pour les cylindres. Le taux de dissipation d'énergie en rotation est de l'ordre de $(42/65)^2 \simeq 0.42$. Un modèle de collision trajectographique sous la forme $\boldsymbol{V}_+ = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{V}_-$ [Dorren *et al.*, 2006] prend donc, dans le cas des cylindres, tout son sens lorsque les composantes de $\mathbf{A}$ sont elles mêmes des distributions Gaussiennes ou, pourquoi pas uniformes :

$$\begin{pmatrix} V_{x+} \\ V_{y+} \\ \omega_+ \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} \pm \Delta A_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & A_{yy} \pm \Delta A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{\theta\theta} \pm \Delta A_{\theta\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{x-} \\ V_{y-} \\ \omega_- \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

où les variations ont été estimées comme suit en convenant de la notation $V_\theta \equiv \omega$:

$$\Delta A_{\bullet\bullet} = \frac{1}{4}\left|\frac{\max(V_{\bullet+})}{\max(V_{\bullet-})} - \frac{\min(V_{\bullet+})}{\min(V_{\bullet-})}\right| \tag{3.3}$$

La bonne concordance des courbes vertes avec les données mesurées sur la Figure 3.8 montre que ce simple modèle cinématique fonctionne plutôt bien lorsqu'il s'agit de blocs cylindriques. Les valeurs identifiées des composantes diagonales de la matrice $\mathbf{A}$ sont données dans le Tableau 3.2. Il est important de noter que les paramètres du modèle de l'Equation (3.2) n'ont pas été ajustés mais déterminés directement à partir des données des analyses d'image. Un ajustement de ces paramètres aurait permis une bien meilleure superposition des courbes, surtout pour ω_+.

Tableau 3.2 – Paramètres de rebond (modèle de l'Equation (3.2)) pour les données expérimentales : $A_{\bullet\bullet} = \langle V_{\bullet+}/V_{\bullet-}\rangle \pm \Delta A_{\bullet\bullet}$. Pour un rebond, les valeurs sont tirées dans des distributions uniformes entre $A_{\bullet\bullet} - \Delta A_{\bullet\bullet}$ et $A_{\bullet\bullet} + \Delta A_{\bullet\bullet}$.

	A_{xx}	A_{yy}	$A_{\theta\theta}$
Cylindres	1.06 ± 0.007	-0.37 ± 0.11	0.65 ± 0.09
Triangles	0.70 ± 0.23	-0.19 ± 0.19	0.44 ± 0.15
Triangles ($V_{x-} < 3.5$ m/s)	0.75 ± 0.22	-0.21 ± 0.19	0.43 ± 0.15
Triangles ($V_{x-} > 3.5$ m/s)	0.64 ± 0.21	-0.16 ± 0.10	0.41 ± 0.04

Pour un rebond, on s'attend à ce que l'amplitude des vitesses réfléchies soient plus faibles que celle des vitesses incidentes. C'est le cas pour V_y et ω, mais les vitesses horizontales réfléchies sont légèrement supérieures aux vitesses horizontales incidentes : $V_{x+} > V_{x-}$. Ceci peut s'expliquer par une transformation des vitesses de rotation inci-

dentes vers les vitesses horizontales. Il y a donc une petite perte d'énergie en rotation qui est récupérée pour se transformer en un gain d'énergie de translation horizontale grâce au frottement entre le bloc et le substrat sableux. Le reste des pertes d'énergie se produit par l'intermédiaire du substrat par des mécanismes plus ou moins complexes de bitée et d'indentation [Gracia Danies, 2018].

Les observations deviennent beaucoup moins évidentes lorsqu'on s'intéresse aux impacts des blocs triangulaires (graphiques du haut sur la Figure 3.8). Analysons, pour commencer, l'allure du CDF de V_{x-} (symboles triangulaires évidés). Jusqu'à $V_{x-} \simeq 3.5$, la courbe est assez similaire à ce que l'on observait pour les blocs cylindriques ; mais une inflexion apparaît alors, montrant de plus grandes vitesses horizontales ($V_{x-} > 3.5$) avec une densité de probabilité (*i.e.*,pente) plus faible. Ces lâchers correspondent aux symboles repérés par des points rouges dans les graphiques de CDF. Il est difficile de comprendre pourquoi il existe 2 vitesses caractéristiques (qui correspondraient à 2 modes ou pics dans les courbes de PDF) avec les blocs triangulaires. Normalement, la position angulaire initiale du bloc lorsqu'il est posé en haut de la rampe ne devrait pas altérer sa vitesse en bas de la rampe, et la vitesse horizontale dans la partie de vol libre ne devrait pas non plus être affectée. L'anomalie prend donc son origine au niveau de la rampe de lancement. Une explication possible est que des frottements latéraux parasites, au niveau des rainures, induisent un moment non constant dans le sens de rotation du bloc du fait d'une surface exposée fluctuante pour la forme triangulaire, alors que cette surface est constante dans le cas d'une forme circulaire. Une autre explication serait qu'un léger décalage du centre de rotation par rapport au centre de masse serait plus grand pour la géométrie triangulaire et aurait des conséquences plus marquées.

Nous avons vérifié qu'il n'existait pas de corrélation entre la configuration d'arrivée d'un bloc triangulaire et sa vitesse horizontale. Ceci est absolument en accord avec le fait que la vitesse horizontale est censée rester constante dans la phase de vol libre. Quoiqu'il en soit, il existe bien pour les blocs triangulaires deux configurations typiques d'incidence avec des caractères nettement différents. Il serait donc souhaitable de séparer les données selon leurs vitesses horizontales d'incidence comme le montre la Figure 3.9.

Avant de commenter ces nouvelles courbes, il est satisfaisant de constater qu'un modèle cinématique de rebond fonctionne plutôt bien sur l'ensemble des données pour les blocs triangulaires (courbes vertes de la seconde ligne de la Figure 3.8). Il n'empêche que ce modèle se comporte encore mieux sur chacun des sets de données (deux types de configuration d'incidence) comme on peut le voir sur la Figure 3.9. On s'aperçoit qu'avec cette distinction, malgré l'appauvrissement des données statistiques, les distributions de vitesses réfléchies sont plus régulières (uniformes ou Gaussiennes) ; ce qui semble plus conforme à ce qui est attendu. Il s'avère donc que les courbes CDF de la Figure 3.8 pour les blocs triangulaires résultent en réalité d'une combinaison des distributions des deux configurations cinématiques d'incidence. Il est alors cocasse de s'apercevoir, en revenant à la Figure 3.8, que les blocs triangulaires qui arrivent avec les vitesses horizontales les plus élevées, arrivent avec les vitesses verticales également les plus élevées ; par contre, les vitesses en rotation sont quelconques.

Une autre observation riche en enseignement est que la restitution cinématique A_{xx}

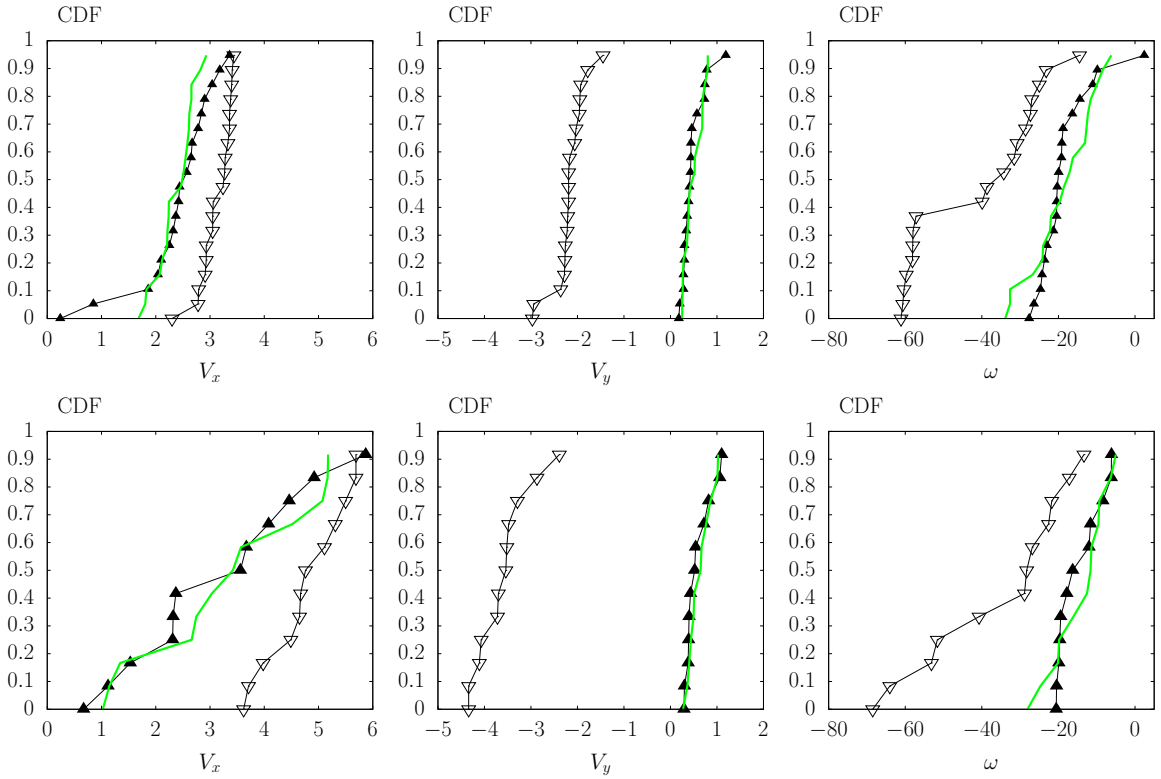


FIGURE 3.9 – Distributions cumulées des vitesses de rebond en faisant la distinction entre les deux configurations d'incidence des blocs triangulaires : incidences les plus lentes (figures du haut) et les plus rapides (figures du bas). Les symboles évidés correspondent aux vitesses incidentes (V_{x-}, V_{y-} et ω_-) et les symboles pleins aux vitesses réfléchies (V_{x+}, V_{y+} et ω_+). Les courbes vertes correspondent aux vitesses réfléchies prédites par le modèle cinématique de rebond (Equation (3.2)) avec les paramètres du Tableau 3.2. Les vitesses de translation sont données en mètres par seconde (m/s) et les vitesses de rotation en radians par seconde (rad/s).

est inférieure à 1 pour les blocs triangulaires, alors qu'elle était légèrement supérieure à 1 pour les blocs cylindriques. Ceci peut s'expliquer par une indentation plus localisée ou "perforante" pour les blocs triangulaires, qui accroît la capacité du sol à freiner la propagation horizontale du bloc.

3.2 Sources d'erreurs et d'incertitudes dans le processus de traitement d'images

Il est question ici de déterminer des sources potentielles d'erreurs et d'incertitudes dues à la procédure de traitement des images. Plus particulièrement, nous allons analyser (*i*) les résultats obtenus à partir du traitement des images effectué par deux opérateurs distincts, afin de quantifier l'influence de leur subjectivité, et (*ii*) les conséquences des distorsions induites par l'objectif de la caméra.

Bien entendu, il existe d'autres sources d'erreur et d'incertitudes comme par exemple

le fait de pousser légèrement (et non intentionnellement) le bloc en haut de la rampe, ou encore d'effectuer les essais sur une dalle plus ou moins épaisse ou en extérieur sur un sol plus ou moins rigide (les mécanismes de dissipation peuvent impliquer des transferts d'ondes élastiques au-delà du bac destiné à accueillir le sol). Nous avons néanmoins choisi ici de considérer uniquement les incertitudes liées au processus de traitement des images.

3.2.1 Subjectivité des opérateurs

Cette étude, visant à déterminer l'influence de l'opérateur sur les résultats lors du traitement des images, est basée sur les résultats obtenus par deux opérateurs distincts qui suivent néanmoins la même procédure de traitement d'images. Les erreurs commises influent sur l'estimation des vitesses, de la trajectoire et des distances d'arrêt. Les deux opérateurs (#1 et #2) ont analysé le même jeu de données pour les blocs de forme cylindrique et triangulaire, puis ont reconstruit toutes les trajectoires. Chaque opérateur a dû procéder à des reconstructions selon sa propre subjectivité. Les étapes consistaient à :

- Pointer à la souris sur chaque image, les positions (au pixel près) du centre de rotation du bloc et d'un point excentré, tous deux repérés sur la face visible du bloc ;
- Déterminer le début et la fin de la période de contact ;
- Déterminer la taille effective des pixels (carrés) et estimer la position de la surface du substratum afin de convertir les coordonnées en pixels sur les images en coordonnées réelles en mètres.

3.2.2 Distorsion induite par le système optique

La distorsion d'images peut être produite par le système optique de la caméra. C'est un effet qui affecte la précision des mesures faites à partir du pointage des pixels avec une souris et également l'estimation de la taille effective des pixels qui dépend de leurs positions sur une image distordue. De nombreux auteurs décrivent cet effet "lentilles" dans les travaux de Ahmed & Farag [2005]; Zhao *et al.* [2014] et de Brown [1971]. Une méthode établie pour corriger les images distordues produites lors d'une prise de vue a été développée par Zhang [2000]. Elle repose sur l'analyse comparative d'une série de photographies d'une même mire plane prise depuis une multitude de points de vue. Cette mire est le plus souvent une image de damier comme celui d'un jeu d'échecs. L'objectif de cette calibration est d'obtenir les paramètres d'une relation géométrique qui distord l'image. Il peut s'agir de distorsion de type barillet, coussinet ou même une combinaison des deux (Figure 3.10) provoquée par la configuration des lentilles dans l'objectif de l'appareil photo. Après cette identification, les paramètres de distorsion radiale et tangentielle sont utilisés pour corriger la distorsion du lot d'images associé à chaque prise de vue (film d'un essai de collision).

Les équations de correction de la distorsion radiale et tangentielle des images sont

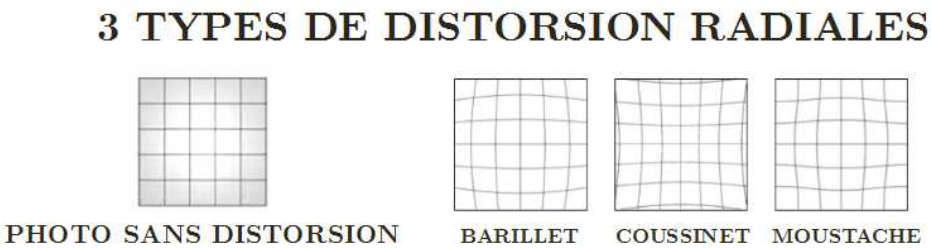


FIGURE 3.10 – Illustration des distorsions typiquement rencontrées.

les suivantes [Heikkila *et al.*, 1997] :

$$\left[\begin{array}{lcl} X & \simeq & x(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6) \;+\; [2p_1xy+p_2(r^2+2x^2)] \\ Y & \simeq & \underbrace{y(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6)}_{\text{radiale}} \;+\; \underbrace{[p_1(r^2+2y^2)+2p_2xy]}_{\text{tangentielle}} \end{array}\right. \tag{3.4}$$

où (X, Y) correspondent aux coordonnées des pixels des images avant correction, et (x, y) les nouvelles coordonnées des images corrigées en distorsion. Les coefficients k_1, k_2 et k_3 sont les paramètres de distorsion radiale ; p_1 et p_2 sont les paramètres de distorsion tangentielle ; et $r^2 = x^2+y^2$. Bien qu'il soit possible de considérer un plus grand nombre de paramètres de distorsion, les cinq paramètres utilisées sont généralement largement suffisants.

Un facteur qui peut affecter la qualité des mesures prises est la position de la caméra par rapport au plan des trajectoires. Les expériences n'étant pas réalisées en même temps et par le même opérateur, le changement de la position de l'appareil peut provoquer l'altération des paramètres de calibration, due à des nouvelles conditions d'exposition et de parallaxe (perpendicularité à l'axe de vue par rapport au plan de la trajectoire). Les valeurs du Tableau 3.3 se rapportent donc aux ordres de grandeur des paramètres de distorsion qui vont être utilisés ou non, pour évaluer les incertitudes liées à la procédure de traitement des images par différents opérateurs.

TABLEAU 3.3 – Ordres de grandeur des paramètres de calibration de l'appareil photo.

k_1 (mm^{-2})	k_2 (mm^{-4})	k_3 (mm^{-6})	p_1 (mm^{-1})	p_2 (mm^{-1})
0.0761	-8.024×10^{-4}	4.73×10^{-6}	0.0556	-0.1006

3.2.3 Analyse des erreurs relatives au traitement des images

Au total, les films de collision relatifs aux éprouvettes cylindriques ont été traités trois fois de façon indépendante par :

1. l'**opérateur #1**, avec la distorsion des images **non corrigée** ;
2. l'**opérateur #2**, avec la distorsion des images **non corrigée** ;
3. et l'**opérateur #2**, avec la distorsion des images **corrigée**.

Les valeurs moyennes et les écarts types des vitesses de collisions sont données dans le Tableau 3.4. Il est intéressant de noter que, pour les vitesses de translation, les écarts types sont similaires. Les valeurs moyennes diffèrent cependant de quelques dixièmes de mètres par seconde. Pour les vitesses de rotation, les différences sont de l'ordre de quelques radians par seconde ; ce qui nous semble être une variation plutôt faible.

Tableau 3.4 – Vitesses moyennes et écart type des vitesses obtenues par les deux opérateurs (#1 and #2) effectuant le traitement pour le bloc cylindrique. L'opérateur #2 a également effectué une analyse en utilisant des images dont la distorsion a été corrigée.

	V_{x-} m/s	V_{x+} m/s	V_{y-} m/s	V_{y+} m/s	ω_- rad/s	ω_+ rad/s
Opérateur #1	3.0±0.2	3.1±0.4	-2.4±0.2	0.8±0.2	-63.6±5.8	-38.9±6.7
Opérateur #2	2.9±0.2	3.0±0.3	-2.3±0.2	0.9±0.2	-65.0±5.8	-42.3±10.7
Images corrigées (Op. #2)	2.7±0.2	2.8±0.4	-2.2±0.2	0.6±0.2	-64.7±7.3	-42.1±10.5

L'influence de l'opérateur et de la distorsion de l'image se vérifient à travers des courbes de des distributions cumulées des vitesses de collision présentées sur la Figure 3.11. On peut remarquer de légères différences entre les distributions obtenues par les deux opérateurs mais globalement elles sont d'allures assez similaires. Les courbes CDF des vitesses de translation sont invariablement décalées dans le même sens (*i.e.*, augmentation ou diminution en valeur absolue) en fonction de l'opérateur ou de la correction des images. Ceci indique qu'une erreur systématique est introduite dans la procédure de traitement des images. Il s'agit certainement de la détermination de la taille des pixels. Le fait que les vitesses de rotation ne soient pas affectées par cette erreur systématique, appui l'idée que c'est effectivement des tailles de pixel différentes qui entraînent les décalages observés. On constate, toujours sur cette même figure, que les incertitudes se distribuent autour de la moyenne de façon similaire quel que soit l'opérateur, la variable cinématique mesurée, et que l'image soit corrigée ou non.

Un moyen de tester si les résultats obtenus par chaque opérateur peuvent être considérés comme faisant partie de la même distribution a été réalisé en appliquant le test de Kolmogorov-Smirnov [Massey, 1951] à des paires d'échantillons. Ce test statistique est largement utilisé en pharmacologie mais peut également être utilisé dans le domaine de la trajectographie, comme l'a montré Bourrier *et al.* [2009] pour tester la capacité prédictive de deux stratégies de simulation. Il sert à vérifier si deux distributions obéissent à la même loi statistique, ou pour vérifier qu'une distribution obéit à une loi bien spécifique ; par exemple, une distribution normale [Lehmann & D'Abrera, 1976]. La réponse de ce test statistique est un rejet ou non de l'*hypothèse nulle*, qui peut se traduire en langage commun par "les deux distributions testées obéissent à la même loi : *oui* ou *non*". Cette réponse binaire est cependant parfois controversée, en raison de difficultés d'interprétation liées notamment au seuil de rejet (valeur-p de 0.05 ou bien 0.01), même parmi les statisticiens les plus expérimentés [Wasserstein *et al.*, 2019]. Nous l'utilisons malgré tout sur les données recueillies en laissant au lecteur le

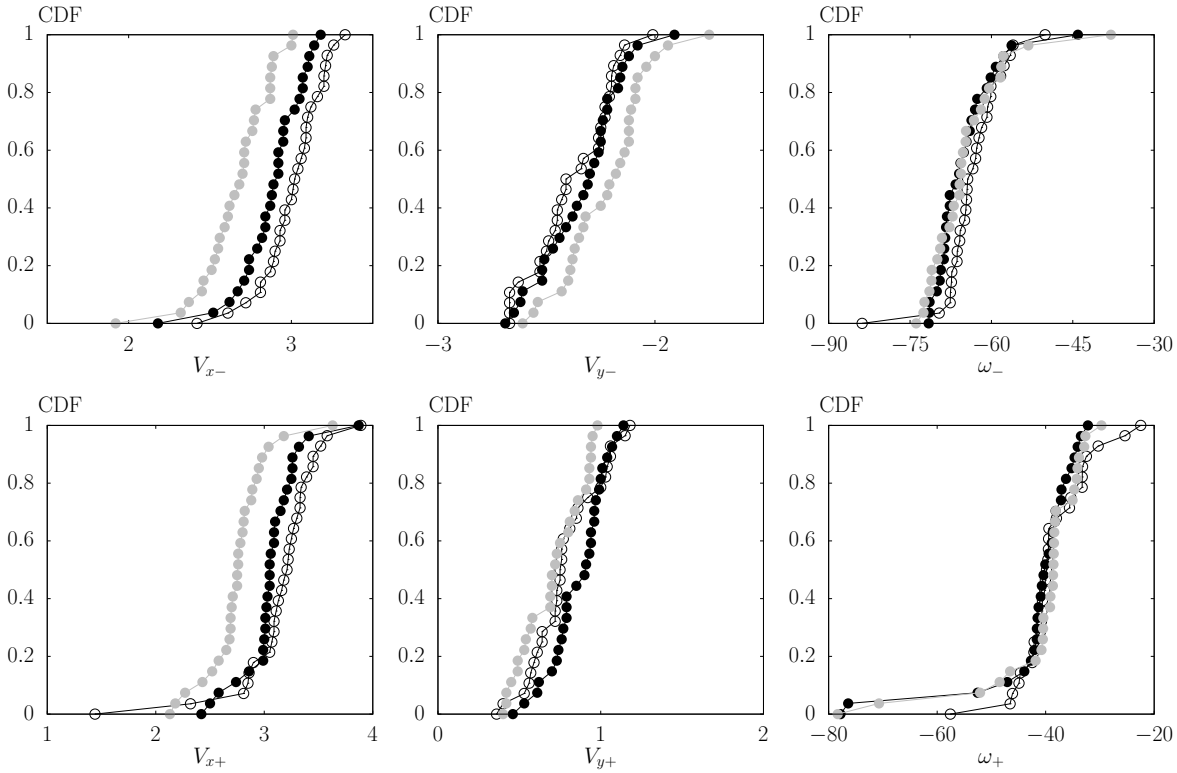


FIGURE 3.11 – Distributions cumulées des vitesses incidentes (graphiques du haut) et des vitesses réfléchies (graphiques du bas) pour les éprouvettes cylindriques en fonction de l'opérateur et de la correction des images. Cercles évidés (opérateur #1, images non corrigées), cercles noirs pleins (opérateur #2, images non corrigées), et cercles gris pleins (opérateur #2, images corrigées). Les vitesses de translation sont données en m/s et les vitesses de rotation en rad/s.

soin de juger de son crédit.

La Figure 3.12 présente les mesures de vitesses moyennes incidentes et réfléchies obtenues avec les éprouvettes cylindriques, ainsi que leurs valeurs maximales et minimales. Selon les différents tests de Kolmogorov-Smirnov, la seule vitesse où la correction des images change la distribution statistique est la vitesse horizontale d'incidence V_{x-}. Ceci ne démontre néanmoins pas clairement une forte influence de la distorsion de l'image numérique, mais tend néanmoins à amoindrir la confiance faite à la mesure des vitesses horizontales.

3.2.4 Remarques sur les mesures de trajectoires

Lors du traitement des images, les opérateurs se sont rendus compte que les points caractéristiques marqués au feutre sur la face visible du bloc, c'est-à-dire le point central et un point très excentré, étaient quelque fois difficiles à repérer sur les images numériques. Ceci était encore plus fâcheux dans le cas des blocs triangulaires. Il est clair que la qualité des images numériques extraites des vidéos influe énormément dans la procédure de pointage. Il est effectivement nécessaire à l'opérateur de définir la position

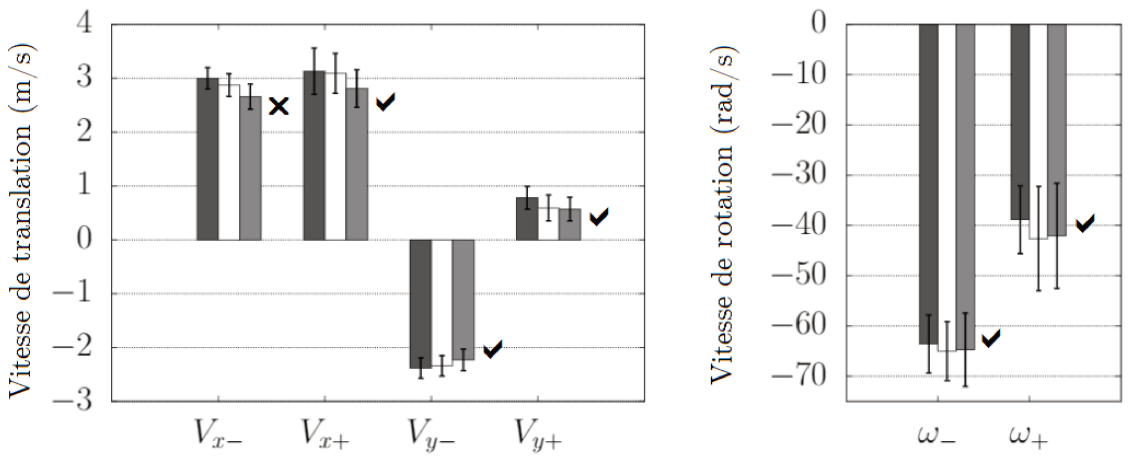


FIGURE 3.12 – Vitesses moyennes incidentes (-) et réfléchies (+) mesurées par les opérateurs à partir d'images corrigées ou non pour les éprouvettes cylindriques. Barres gris clair (opérateur #1, images non corrigées), barres blanches (opérateur #2, images non corrigées), et barres gris foncé (opérateur #2, images corrigées). Les symboles ✓ ou ✗ indiquent si les distributions des données obéissent à la même loi statistique selon le test de Kolmogorov-Smirnov, lorsque l'une des distributions concerne les images corrigées.

d'un point sur une image comme celle de la Figure 3.13 avec une certaine "conviction", et on comprend bien qu'un relâchement finisse par naître.

FIGURE 3.13 – Capture d'écran d'un enregistrement vidéo pour un essai réalisé avec un bloc triangulaire. Les repères sont difficilement visibles, ce qui pousse l'opérateur à réaliser la procédure de pointage à la souris de manière approximative.

Il est malgré tout satisfaisant d'obtenir de si faibles écarts – souvent inférieurs à 5% – dans de telles conditions. C'est pourquoi aucun processus automatisé n'a été utilisé dans cette étape. De toute façon, la qualité des images ne permettait pas d'envisager la mise en œuvre des techniques de suivi automatisé, comme celle utilisée par Asteriou & Tsiambaos [2018] (*Tracking Motion*). Nous avons pu vérifier que les mesures présentant les coefficients de variation les plus importants étaient celles où les images étaient les moins nettes. C'est en particulier, le jeu subtil entre la rapidité d'obturation et l'éclairage qu'il faut savoir accorder lorsque la fréquence d'acquisition est élevée. Dans nos

mesures, ce réglage était convenable pour les blocs cylindriques, mais malheureusement beaucoup moins adapté pour les blocs triangulaires qui arrivaient un peu plus vite (jusqu'à deux fois plus vite) ; voir Tableaux 3.1(a) et 3.1(b). Il en résultait des images plus floues.

Pour conclure, la qualité des images numériques extraites des vidéos influe dans la procédure de pointage par les différents opérateurs. Néanmoins, la variabilité les distributions des vitesses incidentes et réfléchies mesurées en laboratoire est relativement négligeable vis à vis des différents opérateurs et de la distorsion occasionnée par le système optique employé.

3.3 Détermination des paramètres numériques de collision

Le modèle DEM utilisé dans cette section est un calcul bidimensionnel de collision entre un impactant de section circulaire ou de forme triangulaire et un substratum horizontal. Les géométries et conditions initiales de lancer (vitesse de translation $V_{(-)}$ et de rotation $\omega_{(-)}$) sont identiques, y compris la géométrie d'impact pour les formes triangulaires (angle d'inclinaison entre une face plane et le plan horizontal, $\alpha_{(-)}$), à celles des expérimentations (Figure 3.14 (a) pour le bloc cylindrique et Figure 3.14 (b) pour le bloc triangulaire). Les paramètres de contact sont les raideurs élastiques k_n, k_t et k_r, et d'autre part, les paramètres qui contrôlent les dissipations e_n^2, μ et μ_R. Pour ces simulations, les trajectoires DEM sont calculées (traits rouges de la Figure 3.14) à partir des configurations initiales (traits noirs de la Figure 3.14). Pour un jeu de paramètres donné, les vitesses de translation et de rotation après impact (V_{x+}^{simu}, V_{y+}^{simu} et θ_+^{simu}) sont comparées aux valeurs expérimentales (V_{x+}, V_{y+} et θ_+) avec pour objectif de déterminer le jeux de paramètres les plus apte à prédire les résultats expérimentaux. Les conditions d'impact entre les cylindres et les éprouvettes de section triangulaire étant différentes (indentation des parties anguleuses du bloc triangulaire dans le sol qui implique de la butée et des grandes déformations du sol lors de l'impact) deux jeux de paramètres ont été déterminés pour les formes de section circulaire et triangulaire.

Une fois que les données cinématiques ont été récoltées sur une série d'expériences de collision en laboratoire, pour les blocs cylindriques et triangulaires, il est possible de procéder à l'identification des paramètres nécessaires à la modélisation DEM. Une première procédure a été menée en testant successivement chaque paramètre ; les autres étant fixés à une valeur supposée pertinente en termes d'ordre de grandeur. Le problème avec cette approche, vient du fait que les valeurs des paramètres doivent être pressenties alors que la procédure vise justement à les déterminer. Si l'opérateur ne présuppose pas les bonnes gammes de variation de chaque paramètre, il peut manquer le jeu de valeurs le plus adéquat. Pour cette raison, cette pré-étude n'est pas développée dans ce manuscrit, mais le lecteur intéressé pourra se référer à [Garcia *et al.*, 2017]. Cette procédure, que l'on pourrait qualifier de "force brute", nécessite la mise en œuvre d'un très grand nombre de simulations. Elle présente néanmoins certains avantages : (1) les paramètres qui influent peu sur la cinématique de rebond peuvent facilement être identifiés, (2) l'action de chaque paramètre peut être testée très simplement et de façon

intuitive, et (3) les éventuelles actions couplées des paramètres peuvent être repérées. Cette pré-étude a montré par exemple que les valeurs des raideurs élastiques avaient peu d'influence sur les cinématiques de rebond et que ces valeurs pouvaient être choisies de sorte à minimiser les temps de calcul. L'étude nous a également permis de mettre en évidence l'action conjointe des paramètres de frottement μ et de frottement de roulement μ_R, alors que le coefficient de restitution normale agissait principalement sur les vitesses normales (verticales) réfléchies.

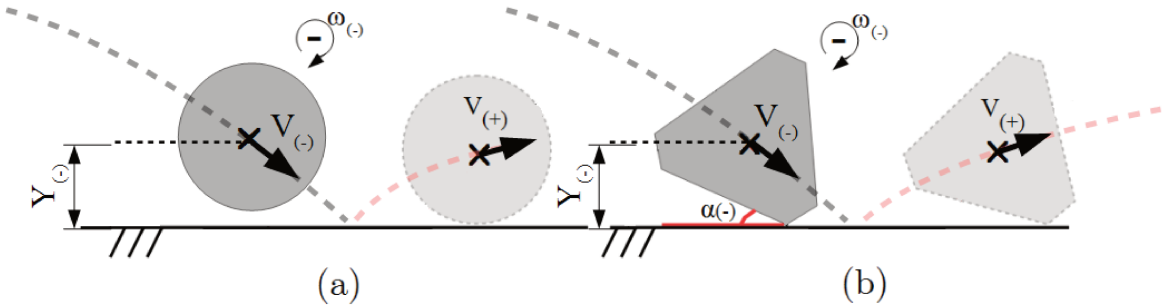


FIGURE 3.14 – Configurations initiales, au début de chaque simulation DEM, identifiées sur les vidéos expérimentales pour les blocs : (a) cylindrique et (b) triangulaire. Les vitesses initiales sont les vitesses incidentes ($V_0 = V_{(-)}$, $\omega_0 = \omega_{(-)}$). L'angle incident $\alpha_{(-)}$ correspond à l'inclinaison du bloc triangulaire par rapport au plan horizontal mesuré sur les images. La hauteur initiale $Y_{(-)}$ est choisie pour avoir un écart bloc-sol positif et quasiment nul.

Dans un second temps, une procédure systématique a été mise en place pour optimiser les paramètres qui contrôlent la dissipation d'énergie cinétique (e_n^2, μ et μ_R). Cette procédure s'appuie sur une minimisation d'une fonction erreur construite en comparant les vitesses réfléchies qui avaient été mesurées et celles qui sont simulées :

$$Err(e_n^2, \mu, \mu_R) = \sum \left(\frac{V_{x+}^{\text{simu}} - V_{x+}}{V_{x+}} \right)^2 + \sum \left(\frac{V_{y+}^{\text{simu}} - V_{y+}}{V_{y+}} \right)^2 + \sum \left(\frac{\omega_+^{\text{simu}} - \omega_+}{\omega_+} \right)^2 \tag{3.5}$$

où les vitesses réfléchies obtenues par simulation dépendent de e_n^2, μ et μ_R, et éventuellement de k_n, k_t et k_r. La méthode numérique pour faire cette minimisation est la méthode de Powell qui est capable de définir les gradients de descente par différences finies [Press *et al.*, 2007]. Pour le dire simplement, l'optimisation commence avec des valeurs supposées des paramètres et les modifie toutes en même temps – de façon multivariée – afin de minimiser l'erreur Err. Le jeu de paramètres optimal est ainsi trouvé.

Cette procédure d'optimisation a été appliquée à tous les essais expérimentaux que ce soit pour les formes cylindriques ou triangulaires. Nous avons pu vérifier pour chacun des lâchers, que :

1. une solution est obtenue très rapidement même si 6 paramètres sont optimisés en même temps ;

2. la sensibilité aux valeurs initiales est insignifiante (*i.e.*, les minimums locaux, s'ils existent dans la fonction multivariée Err n'attirent pas vers de "faux" jeux de solutions) ;
3. les raideurs n'influencent pas le résultat des lors qu'elles sont suffisamment élevées. Les optimisations finales ont donc été menées en fixant les raideurs ($k_n = k_t = 10^7$ N/m et $k_r = 10^8$ Nm/rad).

Les Tableaux 3.5(a) et 3.5(b) présentent, respectivement pour les blocs cylindriques et triangulaires, les valeurs optimisées des paramètres (Moyenne ± écart type sur l'ensemble des lâchers, et pour chaque paramètre) et ce pour chaque jeu de données (en fonction des opérateurs et des corrections proposées pour prendre en considération la distorsion des images). Nous remarquons une influence assez marquée des valeurs moyennes en fonction de l'opérateur et de la correction de distorsion des images, mais les gammes de variation (écarts types) en sont relativement peu sensibles. Ceci est en accord avec les remarques faites dans les sections précédentes.

Tableau 3.5 – Paramètres de dissipation obtenus par optimisation pour les opérateurs #1 et #2, et pour les images corrigées (Moyenne ± écart type).

(**a**) Blocs cylindriques

	e_n^2	μ	μ_R
Opérateur #1	0.09±0.06	0.22±0.11	0.24±0.11
Opérateur #2	0.15±0.06	0.23±0.11	0.16±0.04
Images corrigées (Op. #2)	0.12±0.06	0.33±0.20	0.20±0.16

(**b**) Blocs triangulaires

	e_n^2	μ	μ_R
Opérateur #1	0.05±0.08	0.38±0.18	0.32±0.18
Opérateur #2	0.03±0.03	0.48±0.21	0.39±0.22

Si l'on compare les deux jeux de paramètres, nous remarquons que les valeurs moyennes obtenues pour e_n^2 sont plus faibles pour les blocs triangulaires que pour les blocs cylindriques ; alors que les paramètres μ et μ_R sont plus élevées. Ces différences sont liées aux conditions d'impact différentes entre les deux formes et notamment par une indentation plus importante du sol par les formes triangulaires qui entraîne une augmentation des surfaces de contact et des mécanismes de butée et de labourage du sol qui s'opposent aux déplacements du bloc.

3.4 La méthode de Monte-Carlo appliquée à un modèle 2D déterministe

L'objectif de cette section est de montrer que le modèle DEM décrit précédemment permet, lorsqu'il est couplé avec une méthode de Monte-Carlo, de reproduire

correctement les résultats expérimentaux (vitesses de translation et de rotation à partir d'une distribution statistique connues des valeurs d'entrée). Les simulations de type Monte-Carlo sont basées sur un échantillonnage sélectionné à partir d'une génération des valeurs contenues dans des distributions statistiques connues [Raychaudhuri, 2008]. Cet échantillonnage représente les variables d'entrée d'une fonction qui sont choisies aléatoirement dans une gamme de valeurs connues. La Figure 3.15 donne une représentation schématique de la méthode de Monte-Carlo. Les vitesses incidentes sont prisent comme les valeurs moyennes obtenues par l'opérateur #2 pour des cylindres de telle sorte que l'altitude initiale par rapport au sol soit égale au rayon du cylindre, et que les vitesses initiales soient $V_x^0 = \langle V_{x-} \rangle = 2.9$ m/s, $V_y^0 = \langle V_{y-} \rangle = -2.3$ m/s et $\omega^0 = \langle \omega_- \rangle = -65$ rad/s. Les données obtenues en sortie sont un set de valeurs vectorielles $\boldsymbol{V}_+$, qui peuvent être caractérisées par leur courbe de distribution statistique (CDF). Il devient alors possible de comparer les distributions générées par simulation numérique DEM couplée avec la méthode de Monte-Carlo à celles obtenues expérimentalement.

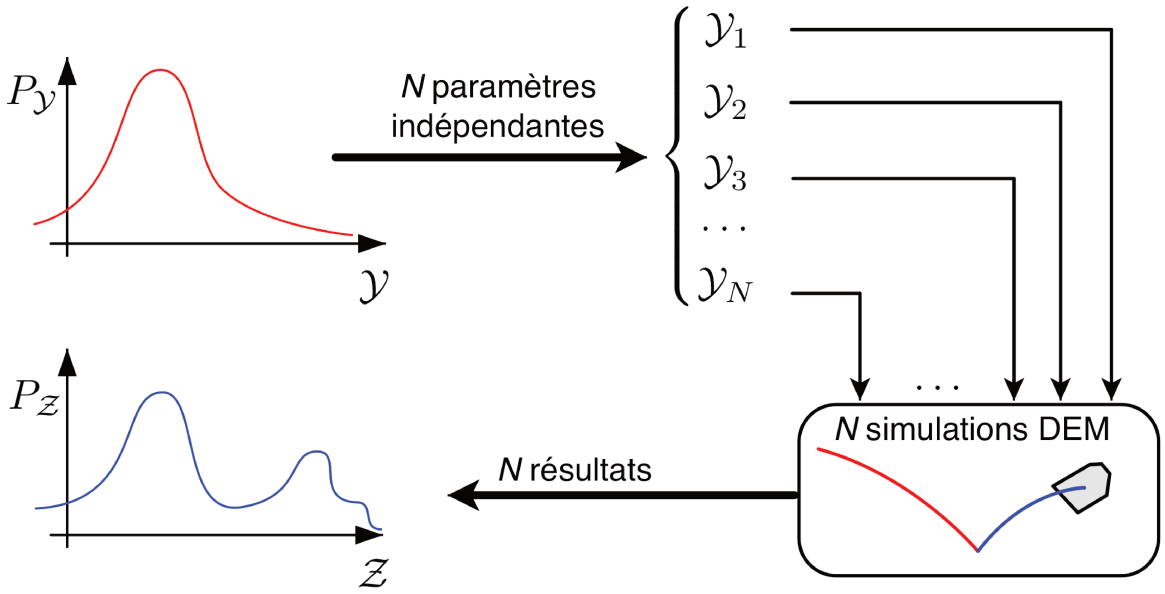


FIGURE 3.15 – Schéma de l'application de la méthode de Monte-Carlo. Chaque variable d'entrée $\boldsymbol{\mathcal{Y}} = \{e_n^2,\ \mu,\ \mu_R\}$ est tirée d'une distribution probabiliste $P_{\mathcal{Y}}$ connue. Elles servent de paramètre mécanique de dissipation au modèle DEM de collision (déterministe). Il en résulte des variables de sortie, ici $\boldsymbol{\mathcal{Z}} = \{V_{x+},\ V_{y+}, \omega_+\}$, distribuées selon des distributions probabilistes $P_{\mathcal{Z}}$ sans *a priori*. Le nombre N de simulations est de 50 000.

Dans un premier temps, l'hypothèse de distribution des variables d'entrée la plus simple a été faite afin de minorer l'exactitude des données mesurées par analyse d'image et d'éviter tout préjugé. Des distributions uniformes des valeurs d'entrée ont donc été utilisées :

$$\mathrm{cdf}(x \mid a, b) = \int_a^x \frac{1}{b-a} \mathrm{d}x = \frac{x-a}{b-a} \quad \text{où} \quad a \leq x < b \tag{3.6}$$

où a est la valeur minimale et b la valeur maximale que le paramètre réel x peut présenter. Il faut bien entendu veiller à ce que la gamme de variation d'un paramètre

soit compatible avec son sens physique ($e_n^2 \in]0,\ 1]$, $\mu > 0$ et $\mu_R > 0$).

L'analyse qui suit a été menée à partir des paramètres mécaniques (e_n^2, μ et μ_R) identifiées par l'opérateur #2 uniquement pour des blocs cylindriques. La distribution de ces paramètres est comparée aux distributions uniformes retenues sur la Figure 3.16 : $e_n^2 \in [0.05,\ 0.25]$, $\mu \in [0,\ 0.6]$ et $\mu_R \in [0,\ 0.3]$.

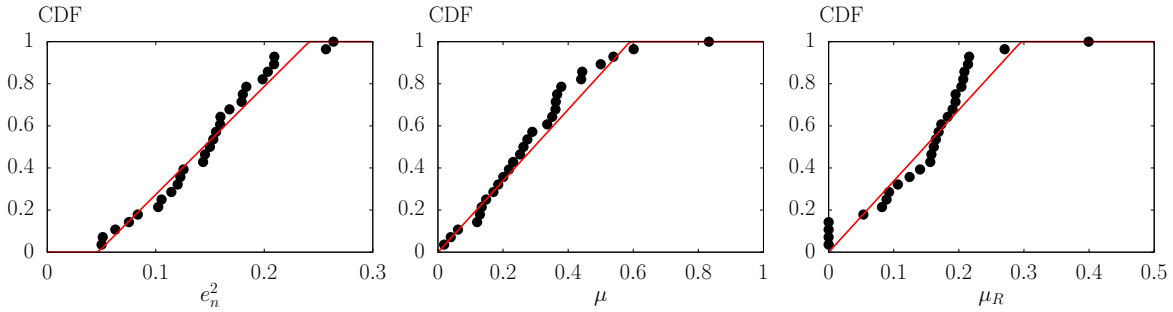


FIGURE 3.16 – Distributions de fréquence cumulées des paramètres identifiées par l'opérateur #2 (optimisation) comparées aux distributions uniformes retenues.

Une fois les distributions des paramètres d'entrée définies, la méthode de Monte-Carlo peut être appliquée. Au total, 50 000 simulations ont été effectuées. La Figure 3.17 nous montre les distributions des vitesses réfléchies (V_{x+}, V_{y+} et ω_+) résultantes de cette méthode, comparées aux valeurs effectivement obtenues par traitement d'images. On peut constater une très bonne adéquation des distributions. Il est notamment intéressant de constater l'extrême similitude des courbes pour les vitesses de rotation.

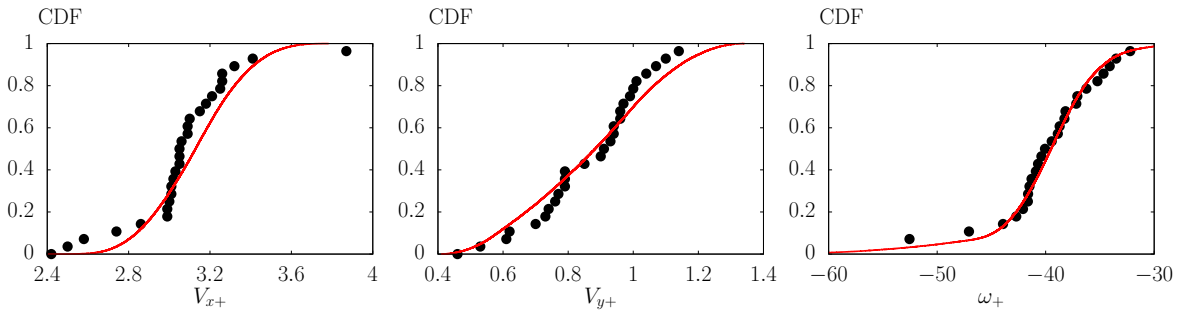


FIGURE 3.17 – Distributions de fréquences cumulées (CDF) des vitesses réfléchies pour les blocs cylindriques.

On pourrait se demander si un meilleur ajustement des distributions d'entrée serait susceptible de produire plus de subtilité dans des distributions des vitesses réfléchies. Une analyse préliminaire a permis de définir des distributions des paramètres mécaniques qui sembles plus judicieuses. Il s'agit d'un distribution de type Valeur Extrême Généralisée (GEV) pour le paramètre de dissipation par frottement μ :

$$\mathrm{cdf}(x \mid \hat{x}, s, \xi) = e^{-t(x)}, \quad \text{avec} \quad t(x) = -\left(1 + \xi\left(\frac{x - \hat{x}}{s}\right)\right)^{-1/\xi} \quad \text{si} \quad \xi \neq 0 \tag{3.7}$$

où $\xi = 0.69$ (paramètre de forme non nul), $s = 0.35$ (paramètre d'échelle), et $\hat{x} = 0.19$

(paramètre de position). Pour les autres paramètres de dissipation e_n^2 et μ_R, de simples distributions uniformes restent tout-à-fait pertinentes.

La Figure 3.18 montre les distributions de vitesses réfléchies obtenues par simulation couplée DEM–Monte-Carlo en prenant une distribution soit uniforme, soit de type GEV, pour μ (les gammes de variation sont différentes de celles utilisées dans la Figure 3.17). Il est parfaitement clair que la forme de distribution ne joue ici aucun rôle primordial car les distributions de sortie sont quasiment superposées. C'est donc bien à la modélisation DEM et à la pertinence des lois de contact utilisées que revient les bonnes aptitudes des simulations de Monte-Carlo.

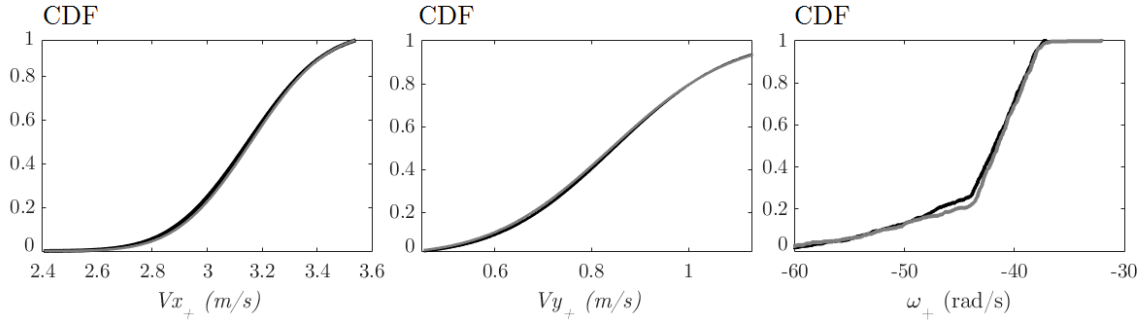


FIGURE 3.18 – Distributions cumulées des vitesses réfléchies obtenues par simulations DEM– Monte-Carlo à partir de deux fonctions de distribution différentes du paramètre d'entrée μ : la distribution GEV (courbe grise) sensée mieux représenter la distribution de μ, une distribution uniforme (courbe noire).

3.5 Analyse de sensibilité – tests de Sobol

L'objectif de cette section est de déterminer quels sont les paramètres du modèle de contact qui influent le plus sur les résultats du modèle numérique DEM (vitesses de translation et de rotation après rebond) dans le cas des éprouvettes cylindriques. Dans ce but, une analyse de sensibilité est développée pour estimer le premier et le deuxième indices de sensibilité de Sobol [Sobol, 2001; Zhan *et al.*, 2013]. Cette méthode est souvent utilisée pour repérer les paramètres les plus importants qui affectent la réponse des simulations numériques. Dans cette étude, la méthode de Monte-Carlo est appliquée dans une stratégie dite "un facteur à la fois" (OFAT pour One Factor At Time) [Iooss & Lemaître, 2015; Zhan *et al.*, 2013] qui consiste à faire varier une seule variable d'entrée à la fois afin de parvenir à déterminer des mesures de variance en réponse ; les autres paramètres d'entrée étant fixés à leurs valeurs moyennes. Ainsi, seul le poids de la variation de la variable analysée est extrait des réponses de sortie (dans ce cas, les vitesses réfléchies dans les trois directions). Au total, plus de 50 000 simulations d'impact impliquant des blocs cylindriques ont été effectuées pour les trois variables d'entrée qui sont les paramètres DEM de dissipation : e_n^2, μ and μ_R. Compte tenu que ces paramètres ont été identifiés dans une section précédente, les valeurs sont tirés aléatoirement au sein de leurs distributions (voir Figure 3.16).

De cette façon, la variance totale des vitesses réfléchies peut être calculée à travers

l'expression suivante :

$$\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_+) = \sum_{i=1}^{n} V_i + \sum_{i \leq j \leq n}^{n} V_{ij} + \cdots + \sum_{i \leq n}^{n} V_{1\ldots n} \tag{3.8}$$

où $\boldsymbol{V}_+ = \{V_{x+},\ V_{y+},\ \omega_+\}$ est le vecteur de sortie et V_i exprime l'effet de premier ordre de chaque paramètre d'entrée Y_i où $\boldsymbol{Y} = \{e_n^2,\ \mu,\ \mu_R\}$ sur la vitesse de sortie résultante $\boldsymbol{V}_+$.

L'**indice de sensibilité de première ordre** S_i, où i est l'une des variables d'entrée, est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = \frac{V_i}{\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_+)} \quad \text{où} \quad V_i = \mathrm{Var}[\mathbb{E}(\boldsymbol{V}_+|Y_i)] \tag{3.9}$$

On peut interpréter cet indice comme la part de variance d'une variable de sortie (une vitesse réfléchie) expliquée par la variation de la variable d'entrée i (paramètre DEM de dissipation) indépendamment de la valeur des autres facteurs.

L'**indice de sensibilité de deuxième ordre** S_{ij} est défini par :

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_+)} \quad \text{où} \quad V_{ij} = \mathrm{Var}[\mathbb{E}(\boldsymbol{V}_+|Y_i, Y_j)] - V_i - V_j \tag{3.10}$$

Il s'agit ici de la part de variance d'une variable de sortie due aux variations de deux variables d'entrée i et j non expliquée par la somme de leurs effets propres.

L'**indice de sensibilité total** ST_i est calculé ainsi :

$$ST_i = 1 - \frac{\mathrm{Var}(\mathbb{E}(\boldsymbol{V}_+|Y_{\sim i}))}{\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_+)} \tag{3.11}$$

où $\sim i$ correspond à la contribution de tous les paramètres à l'exception de celle du paramètre i.

La Figure 3.19(a) montre les indices de sensibilité au premier ordre S_i, $i = e_n^2, \mu$ ou μ_R, pour les variables de sortie V_{x+}, V_{y+} et ω_+. De la même manière, les indices de sensibilité au second ordre (S_{ij}) sont présentés sur la Figure 3.19(b) pour les paires de variables d'entrée : $(e_n^2 - \mu)$, $(\mu - \mu_R)$ et $(\mu_R - e_n^2)$.

Le rôle joué, au premier ordre, par e_n^2 sur la vitesse verticale réfléchie est évident et absolument catégorique : il est exclusif. Au second ordre, les quelques cas qui ne sont pas explicables par e_n^2 pourraient trouver leur raison dans l'action commune de e_n^2 et μ_R ; mais ces cas sont si rares qu'on pourrait se demander s'il ne s'agit pas là d'un biais de l'algorithme de détermination des indices de Sobol.

Les variables μ et μ_R influent de façon couplée les vitesses V_{x+} et ω_+. Il est important de noter que la variable μ a un effet plus marqué que celui de μ_R sur les vitesses de rotation réfléchies ω_+. Étonnamment, cette propension est inversée pour les vitesses horizontales réfléchies V_{x+} qui semblent plus gouvernées par μ_R. Cela dit, cette répartition des poids d'influence entre μ et μ_R est peut être liée à la configuration cinématique

d'entrée, et ce qu'il est important de mentionner c'est l'action commune de ces deux paramètres de dissipation sur les vitesses réfléchies horizontales et en rotation.

Les indices de Sobol de second ordre sont plus délicats à interpréter. Rappelons simplement que ces indices, en plus de transcrire un rôle simultané de deux variables d'entrée, se focalisent sur la variance non expliquée au premier ordre. On voit bien que e_n^2 n'a toujours pas de répercussion sur V_{x+}, mais qu'il en a de façon non négligeable sur ω_+. Ceci traduit des mécanismes complexes, c'est-à-dire difficilement prévisibles, des vitesses de rotation réfléchies.

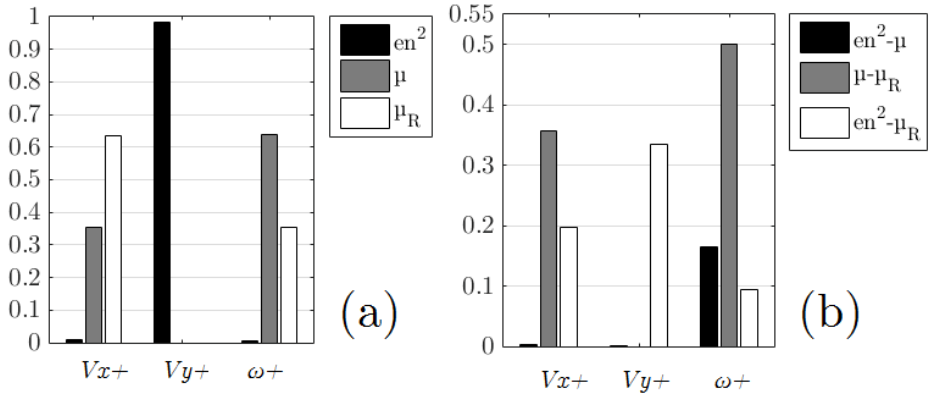


FIGURE 3.19 – (a) Indice de Sobol de premier ordre et (b) Indice de Sobol de deuxième ordre pour le bloc cylindrique.

La Figure 3.20 montre les valeurs calculées des indices totaux de sensibilité de Sobol (ST), qui mesurent la contribution de la variable i aux différentes variances de sortie, y compris toute variance causée par ses interactions avec d'autres variables d'entrée, et de n'importe quel ordre. Cela signifie que nous pouvons trier les effets isolés des contributions couplées et obtenir les contributions pertinentes de chaque paramètre sur les vitesses réfléchies.

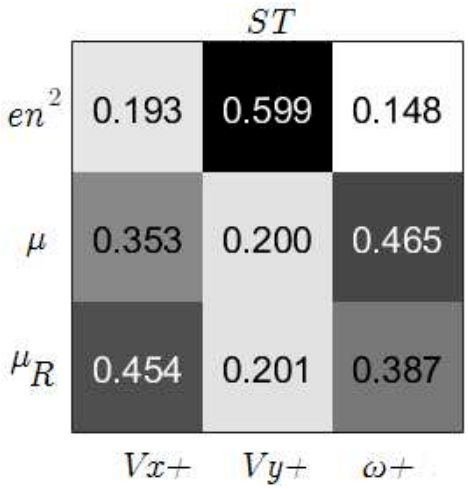


FIGURE 3.20 – Indice total de sensibilité de Sobol (ST). Matrice 3×3 affichant les valeurs de la contribution de chaque paramètre de dissipation sur chaque donnée de sortie.

Les données de la Figure 3.20 ne font que confirmer ce qui avait été observé à partir des indices de premier et second ordre. Pour être très synthétique, disons que e_n^2 contrôle à lui seul la vitesse verticale réfléchie, alors que les autres vitesses réfléchies peuvent être ajustées par un équilibre assez subtil entre les paramètres μ et μ_R de façon quasiment indépendante de e_n^2. Le côté pratique de cette observation porte sur la détermination *a priori* des paramètres de dissipation pour des cas réels tels que ceux traités dans les chapitres 4 et 5.

3.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons voulu analyser l'effet de la forme des blocs sur la variabilité des paramètres de rebond à partir d'essais expérimentaux. Cette campagne a consisté aux lâchers de blocs de formes cylindriques et triangulaires dans des conditions bien maîtrisées en laboratoire, et d'identifier plus finement, à partir d'une analyse cinématique et d'un couplage mécano-probabiliste, les coefficients de restitution (CoR) et paramètres de rebond DEM (e_n^2, μ et μ_R) qui reproduisent au mieux les observations expérimentales.

Dans cette étude, l'incertitude sur les erreurs de pointage a été déterminée. Nous savons maintenant que la qualité des images numériques extraites des vidéos influe sur la procédure de pointage par les différents opérateurs. Les distributions des vitesses incidentes et réfléchies mesurées dans les expériences ont montré que la variabilité de ces mesures faites en laboratoire est négligeable vis à vis des différents opérateurs qui effectuent le traitement des images et de la distorsion occasionnée par le système optique employé.

Des expérimentations, il a été conclu que le comportement des blocs triangulaires varie beaucoup plus que celui des blocs cylindriques. En raison de la régularité de la forme des cylindres, ceux-ci heurtent le substrat suivant la même configuration. En revanche, les blocs triangulaires peuvent toucher le sol avec un côté ou un coin. La forme du bloc joue donc un rôle crucial dans l'indentation du bloc avec le sol, ce qui souligne l'importante de la forme dans les mécanismes de dissipation d'énergie.

L'analyse des données expérimentales a montré qu'il était possible d'établir un modèle cinématique de rebond simple qui puisse être appliqué aux résultats expérimentaux. Ce modèle permet de corréler les vitesses incidentes et réfléchies. Dans le cas où les composantes de la matrice correspondent à des distributions uniformes, le modèle revêt la forme suivante : $A_{\bullet\bullet} = \langle V_{\bullet+}/V_{\bullet-}\rangle \pm \Delta A_{\bullet\bullet}$. Les résultats de cette analyse montrent que le modèle proposé est en bonne correspondance avec les résultats expérimentaux, tant pour les blocs cylindriques que pour les blocs triangulaires.

Une procédure d'optimisation a été testée pour déterminer les paramètres de rebond en DEM les plus aptes à reproduire les résultats expérimentaux et ce pour les blocs de section circulaire ou triangulaire. Compte tenu des conditions d'impact différentes entre les deux formes (indentation plus importante du sol par les formes triangulaires qui entraîne des mécanismes de butée qui s'opposent aux déplacements du bloc) deux jeux de paramètres distincts ont été établis. En ce qui concerne la caractérisation de

ces paramètres, les coefficients de restitution e_n^2 dans la direction normale sont plus faibles pour les triangles, alors que les paramètres μ et μ_R sont plus élevées.

Après détermination des paramètres, des comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques ont été faites pour démontrer la capacité prédictive du modèle numérique (simulations de Monte-Carlo pour la forme cylindrique). Même si quelques disparités ont été observées dans cette analyse, qui témoignent des incertitudes liées principalement au traitement des données expérimentales, les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Enfin, une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer l'incidence de différentes valeurs d'une variable d'entrée sur les variables de sortie à partir d'un ensemble d'hypothèses donné. L'analyse de sensibilité Sobol a été utilisée, la principale conclusion étant que les paramètres dissipatifs μ et μ_R affectent conjointement les vitesses tangentes V_{x+} et en rotation ω_+, respectivement ; alors que e_n^2 est le seul paramètre qui régule, tout seul, la vitesse normale réfléchie V_{y+}.

Chapitre 4

Essais à moyenne échelle

Chutes de blocs sur voies ferroviaires

4.1 Introduction

Ce chapitre s'appuie sur des résultats expérimentaux qui ont été obtenus lors d'une campagne expérimentale de lâchers de blocs (blocs de béton manufacturés de différentes tailles) menée sur un tronçon de voie ferrée de la ligne ferroviaire Clermont-Ferrand/Saint-Étienne entre Thiers et Noirétable près de la commune de Saint-Thurin. Actuellement la voie ferrée est coupée à la circulation. Sur ce site, deux profils en travers ont été retenus pour les essais, avec comme conditions d'éligibilité :

- qu'ils soient représentatifs des profils à risque de chutes de blocs sur les 9000 km de linéaire ferroviaire en service en France ;
- qu'ils puissent accueillir l'équipement spécifique conçu pour mener à bien les essais de lâchers de blocs.

Des enregistrements vidéo de tous les essais ont permis à posteriori d'obtenir les trajectoires des blocs et les vitesses d'impact avec le ballast. Cette étude a été menée à l'initiative de la société nationale des chemins de fer français (SNCF) en collaboration avec l'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA), qui a été mandaté par la SNCF pour aider à la formation de ses personnels aux risques rocheux. À l'issue de cette étude, l'objectif ultime envisagé par la SNCF est d'obtenir des éléments de décision concernant la problématique du risque gravitaire sur le linéaire en place.

Dans le cadre de la thèse, nous avons souhaité tester la pertinence du modèle numérique Rockable dans un cadre réel mais néanmoins relativement bien contrôlé. L'un des objectifs de ces travaux étant de déterminer in fine, le jeu optimal de paramètres du modèle numérique qui soit le mieux adapté au site étudié. Lors de la campagne d'essais à laquelle nous avons pu assister, nous avons procédé à des lâchers complémentaires

de blocs de petite taille (éprouvettes béton de section triangulaire utilisées lors des expérimentations réalisées au laboratoire) afin d'estimer, au mieux, les paramètres du modèle numérique. Les conditions d'essais n'étant pas optimales (comparativement à l'étude menée au laboratoire) nous avons tenté, grâce à une étude paramétrique complémentaire portant sur l'influence des paramètres d'interaction μ et μ_R, de déterminer quel couple $\mu - \mu_R$ était le plus adapté à ce site. La détermination des paramètres du modèle numérique ROCKABLE s'est faite par comparaison des vitesses d'avant et après impact des blocs avec le plan horizontal (ie. le ballast), obtenues numériquement et expérimentalement grâce aux vidéos enregistrées au moment de l'impact (Figure 4.1).

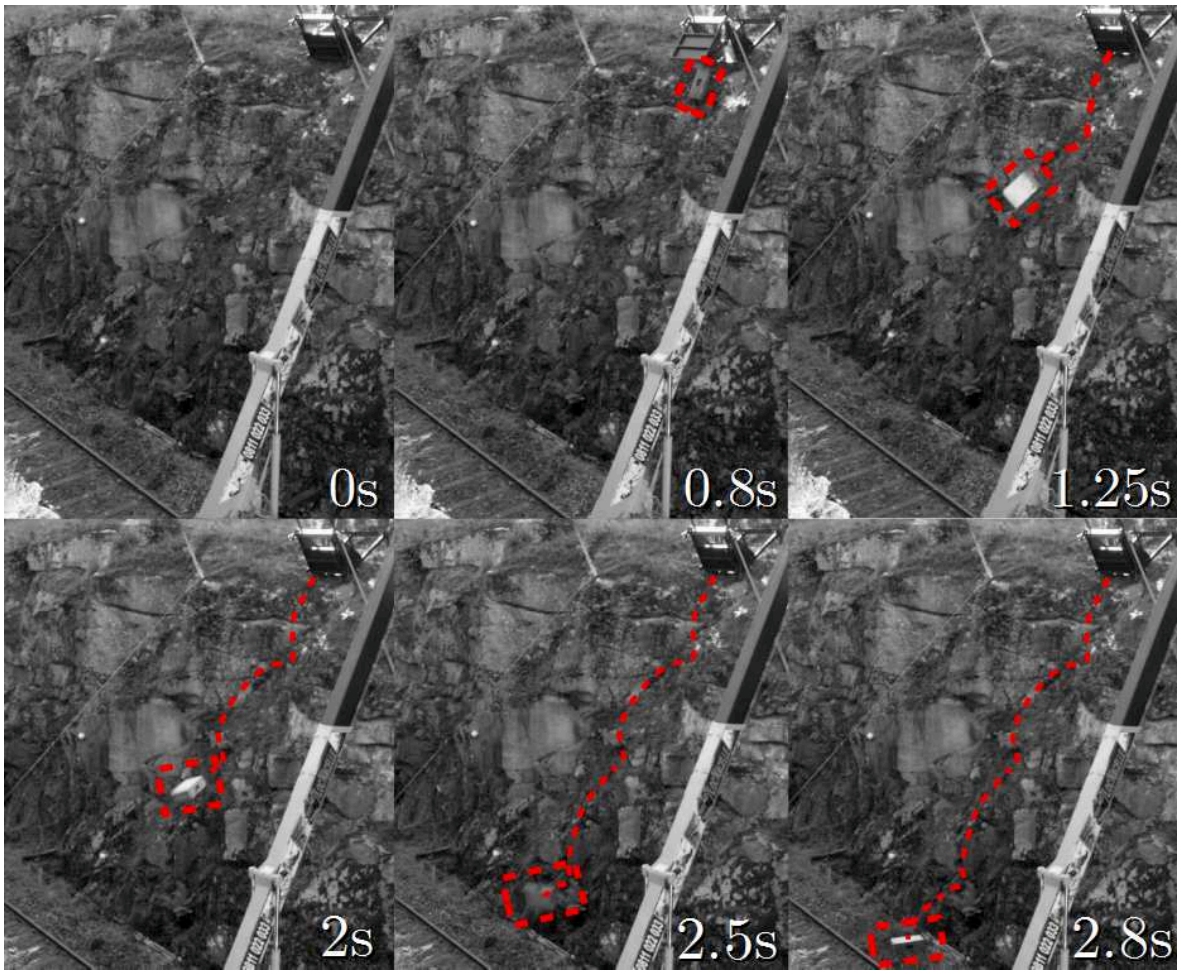


FIGURE 4.1 – Trajectoire d'un bloc après lâcher. Le bloc effectue plusieurs rebonds et s'arrête définitivement après 3.3 s.

Les documents relatifs à la géomorphologie du site [1] nous indiquent la présence de granodiorites porphyroïdes (granodiorite porphyroïde péri-Forez) à biotite, une roche sombre, intrusive et isogranulaire qui peut présenter des fragments de tailles variées.

1. En ce qui concerne la géomorphologie locale, le lecteur pourra y accéder via *Google Maps* (la carte du site où s'est déroulée la campagne d'essais est accessible par le lien suivant : https ://goo.gl/maps/mRL6y7kvVkQ2). La carte géologique locale (NOIRETABLE 1/50000) ainsi que sa notice explicative sont consultables sur le site du BRGM, par le lien : http ://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0695N.pdf (notice). Les coordonnées dans le système de référence Lambert 93 à saisir pour y accéder sont : X : 798517.01 / Y : 6513901.76.

Le profil dit “P2”, le seul qui a été étudié pendant la thèse, est un profil plutôt raide (pente d’environ 85°), présentant des roches en surplomb qui facettent le profil, en lui attribuant un caractère 3D bien marqué. En partie haute, la roche était recouverte à plusieurs endroits d’une couche de sol meuble et d’une couverture végétale, qui potentiellement pouvaient modifier le comportement des rebonds initiaux lors des différents lâchers successifs et donc venir influencer la trajectoire finale des blocs. En conséquence, pour minimiser la variabilité des résultats liée à la végétation, cette dernière a été retirée tout le long du couloir de propagation.

4.2 Méthodologie

Une grue de type *“araignée”* (mini grue de levage) munie d’un crochet permettant de soulever les blocs a été mise à disposition sur le site. Les blocs utilisés, dits *“académiques”*, sont des blocs parallélépipèdiques en béton fibré de haute performance protégés par une enveloppe métallique (Figure 4.2). Cet ensemble (béton haute performance et enveloppe métallique) confère au bloc une densité élevée, proche de la densité d’un bloc de roche naturelle. Les blocs ont été lâchés dans des configurations différentes telles que représentées sur la Figure 4.3. Les caractéristiques géométriques des deux blocs utilisés (B1 et B2) et les moments d’inertie correspondants aux différentes configurations de lâchers sont donnés dans le Tableau 4.1.

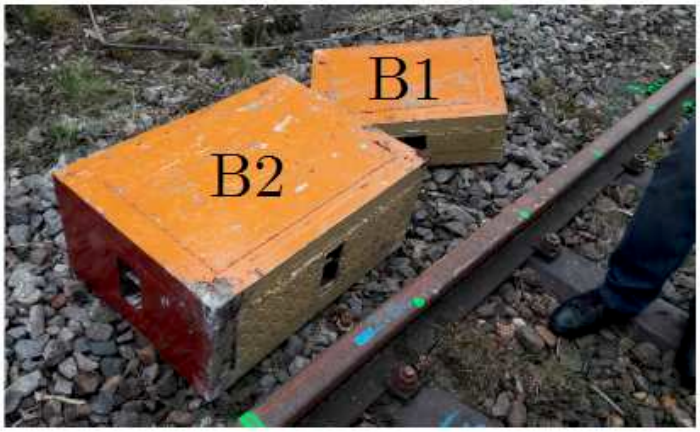


Figure 4.2 – Géométrie des blocs B1 et B2.

Le dispositif mécanique de lancement conçu par IRSTEA (Bourrier et al.) permet de lâcher les blocs à partir d’un point de largage fixe P (Figure 4.4). Ce dispositif est constitué d’un caisson métallique incliné à 60 degrés par rapport à l’horizontale, qui est muni d’une portière mobile laissant sortir le bloc. A sa sortie du caisson, le bloc développe principalement un mouvement de rotation autour de l’axe Z. Au total, 100 lâchers de blocs, ont été effectués sur deux jours, pour deux profils. Seuls 18 lancés du profil référencé P2 ont été exploités pendant la thèse.

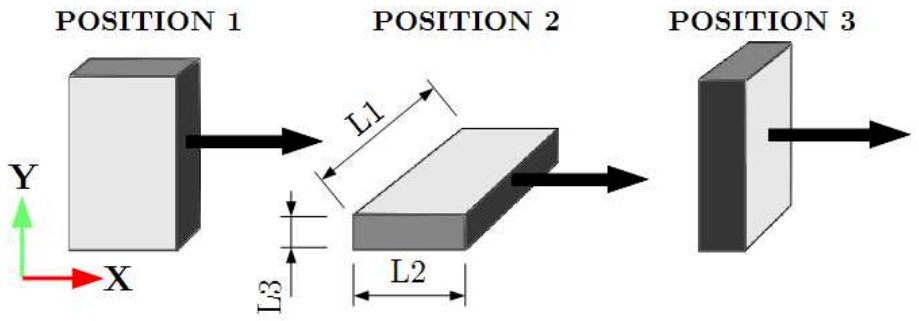


FIGURE 4.3 – Positions initiales des blocs avant lâcher référencées 1, 2 et 3. Les trois dimensions principales sont désignées L_1 (plus grande dimension du bloc), L_2 (dimension intermédiaire) et L_3 (dimension la plus petite) : $L_1 > L_2 > L_3$.

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques des blocs : masse M, dimensions L_1, L_2, L_3, volume V et moments d'inertie (I_1, I_2 et I_3) définis en fonction des directions 1,2 et 3.

	B1	**B2**
M (kg)	130	283
L_1 (m)	0.6	0.7
L_2 (m)	0.4	0.5
L_3 (m)	0.2	0.3
V (m^3)	0.047	0.104
I_1 ($kg.m^2$)	2.13	7.94
I_2 ($kg.m^2$)	4.28	13.57
I_3 ($kg.m^2$)	5.56	17.31

FIGURE 4.4 – Dispositif de lancement utilisé pendant les essais expérimentaux. Les blocs sont en contact avec la porte métallique qui s'ouvre mécaniquement sous le poids des blocs. L'angle d'inclinaison initiale des blocs par rapport au plan horizontal (θ) est de 60 degrés.

4.3 Modèles numériques tridimensionnels de la topographie

La Figure 4.5 présente le modèle numérique de terrain (MNT) qui a été reconstruit à partir d'un nuage de points (environ 2 millions de points) obtenu via un scanner LiDAR (Figure 4.5(a)). Le MNT après triangularisation, est constitué de multiples facettes qui lui confèrent son caractère 3D (Figure 4.5(b)). Pour minimiser la durée des calculs, le modèle numérique de terrain est dégradé à une résolution de 10 cm (Figure 4.5(c)). De plus, un filtre spécifique est appliqué au MNT pour supprimer la végétation [Brodu & Lague, 2012; Girardeau-Montaut, 2019]. Le maillage résultant comporte 24368 cylindres et 46596 faces triangulaires.

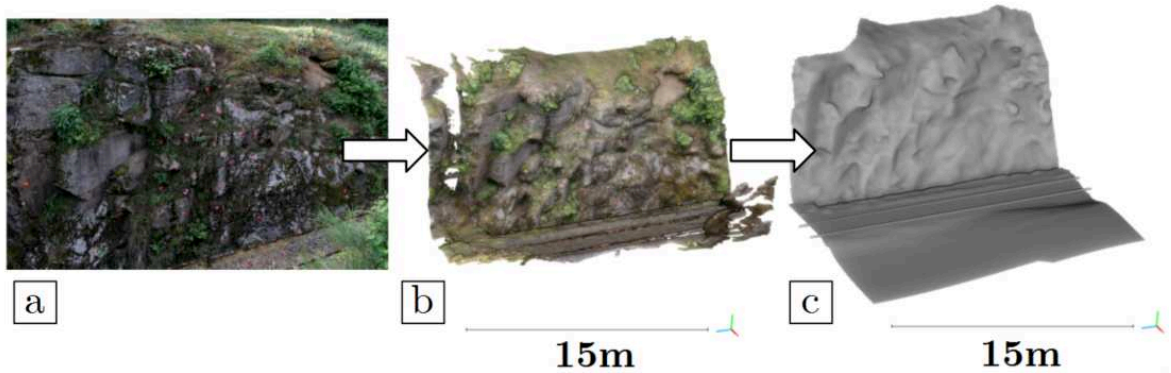


FIGURE 4.5 – Transformation du nuage de points initial en Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le nuage de points de base présente une densité d'environ 2 millions de points (a). Le maillage est reconstruit par la méthode de Poisson (Kazhdan & Hoppe [2013]) (b). Un plan horizontal ajouté au pied du talus rocheux sert d'extension au ballast (c). Les rails sont générés numériquement en fonction de leur géométrie exacte et implantés au bon endroit grâce au nuage de points initial.

4.4 Analyse des résultats expérimentaux

Les résultats des essais expérimentaux qui ont été exploités à ce jour, concernent 18 blocs qui ont été lâchés à partir du profil P2 depuis un même point de largage : 9 blocs de type B1 positionnés suivant la Configuration 1 et 9 blocs de type B2 lancés suivant la Configuration 2. Les résultats expérimentaux des lâchers de blocs relatifs à la Configuration 3 n'ont pas été analysés et ne figurent donc pas dans l'étude comparative des résultats expérimentaux. Cependant, dans la section dédiée aux résultats numériques, la configuration de départ référencée 3 sera intégrée à l'étude.

Les Tableaux 4.2 et 4.3 synthétisent l'ensemble des résultats obtenus suite au traitement des vidéos : valeurs moyennes, maximales et minimales des vitesses d'impact avec le plan horizontal, angles de déviation (angle par rapport au plan perpendiculaire au talus rocheux) et distances de propagation. Sont présentées également, les probabilités d'occurrence du dépôt des blocs à savoir : s'ils tombent directement dans le fossé ;

s'ils s'arrêtent sur le ballast (sans franchir les rails) ou s'ils viennent franchir les rails après avoir heurté le ballast.

Tableau 4.2 – Caractéristiques des vitesses d'impact expérimentales pour un total de 18 lâchers (9 blocs de type B1 orientés suivant la Configuration 1 et 9 blocs de type B2 orientés suivant la Configuration 2).

	Position	Moyenne m/s	Max m/s	Min m/s	Fossé %	Ballast %	Rail %
B1	1	9.64	9.99	9.22	11.11	88.89	0.00
B2	2	8.29	8.81	7.51	11.11	77.78	11.11

Tableau 4.3 – Angles de déviation des blocs (θ) et distances de propagation horizontales (dx) des blocs par rapport au point de départ, pour un total de 18 lâchers (9 blocs de type B1 orientés suivant la Configuration 1 et 9 blocs de type B2 orientés suivant la Configuration 2).

	Position	Moyenne $\theta(°)$	Max $\theta(°)$	Min $\theta(°)$	Moyenne dx(m)	Max dx(m)	Min dx(m)
B1	1	10.36	20.28	5.56	4.92	5.38	3.94
B2	2	17.75	24.55	12.31	5.24	6.38	4.23

La vitesse de translation des blocs avant impact est à 99% verticale[2]. Suivant leur position initiale, les blocs, une fois lâchés par le dispositif de largage, roulent principalement mais peuvent également glisser sur une zone relativement restreinte au voisinage du point de lâché, et ce, en dissipant plus ou moins d'énergie. Une fois la zone initiale franchie, les blocs effectuent un vol libre jusqu'au sol au cours duquel ils peuvent percuter par endroit le talus rocheux. Comme présenté sur la Figure 4.1 plusieurs impacts successifs peuvent survenir avant l'arrêt complet du bloc. Dans ce cas particulier, le bloc rebondit deux fois en partie haute (dont la végétation a été supprimée) avant de percuter le pied de la paroi rocheuse et finir sa course sur le ballast. Dans la majorité des cas, les blocs dévient de leur trajectoire initiale d'un angle maximal (par rapport au point de départ P et au sens de propagation sur l'axe X) à droite de 24.6 degrés et à gauche de 5.6 degrés.

La Figure 4.6 synthétise l'ensemble des résultats obtenus. Le point de largage des blocs est noté (P). Les points bleus caractérisent les positions d'arrêt des blocs B1 (lancés suivant la Configuration 1) et ceux en rouge correspondent aux blocs de type B2 (lancés suivant la Configuration 2). Bien que le point de largage soit identique pour les blocs B1 et B2, ces derniers (blocs B2, les plus volumineux et positionnés à plat lors du lancement – Configuration 2) heurtent le ballast avec une vitesse plus faible (Tableau 4.2) et sont plus déviés de leur trajectoire (la zone de dépôt des blocs B2 est légèrement décalée vers la droite comparativement à la zone de dépôt des blocs de type B1). La quasi-totalité des blocs vient impacter directement le ballast. Seulement

2. Par simplicité elle sera référencée comme étant la vitesse sur l'axe Y. La vitesse V_Y est négative quand le bloc chute (sens contraire à celui de la gravité) et positive lors du rebond.

11.11% des blocs tombent dans le fossé. Aucun bloc de type B1 n'arrive jusqu'au rail alors qu'un seul bloc de type B2 vient le percuter.

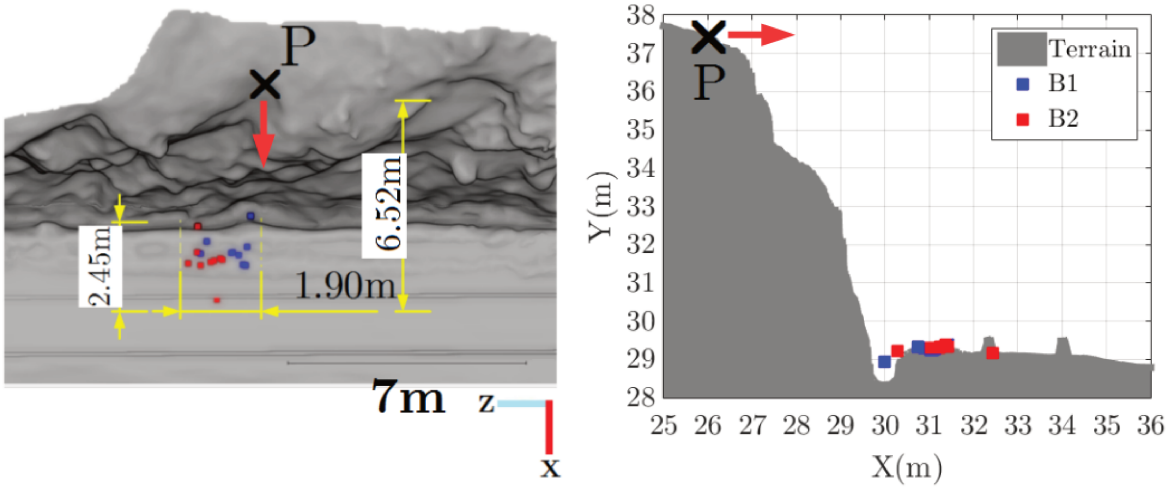


FIGURE 4.6 – Positions d'arrêt des blocs : les points bleus caractérisent les blocs de type B1 (les plus petits et positionnés verticalement lors du lâché – Position 1) et les points rouges correspondent aux blocs de type B2 (les plus volumineux et positionnés à plat lors du lancement – Position 2). La distance maximale entre la position d'arrêt des blocs et la position de départ P est d'environ 6.52 m alors que l'éloignement maximal du bloc avec la paroi rocheuse après arrêt est de 2.45 m. L'étalement maximal du dépôt dans le plan XZ est de 1.90 m. La direction de largage des blocs est donnée par la flèche rouge (direction de l'axe X positif).

A la seule vue de ces résultats, il est actuellement difficile de corréler directement un effet de masse à la trajectoire des blocs et à leur position d'arrêt, puisque les orientations de départ des blocs varient également (Configuration de départ 1 pour le bloc B1 contre Configuration de départ 2 pour le bloc B2). Par la suite, lors de l'étude numérique, nous tenterons de répondre à ce questionnement. La méthode de la ligne d'énergie n'est pas applicable dans ce cas, puisque le profil en question est très raide. Une vérification rapide à travers de la relation $\text{atan}(\alpha) = DY/DX$ nous donne une valeur d'environ 56°, ce qui n'est dans aucun cas cohérente. Dans la littérature, la valeur maximale de l'angle d'énergie est d'environ 38°. Cependant,

4.5 Résultats des simulations numériques

La quantification du risque pour les voies ferrées n'étant pas l'objet de ce travail, nous nous sommes limités à déterminer dans ce chapitre l'effet des paramètres du modèle (notamment l'influence du couple $\mu - \mu_R$) sur la variabilité des résultats numériques dans un cas réel de chute de blocs. Le modèle numérique de terrain et les conditions de lancer sont conformes aux données expérimentales (Figure 4.7). Pour chaque configuration de lancer des blocs (1, 2 ou 3), et quelle que soit la géométrie (B1 ou B2), 300 simulations numériques (nombre minimal pour atteindre une bonne convergence, selon Netti *et al.* [2016]) ont été effectuées.

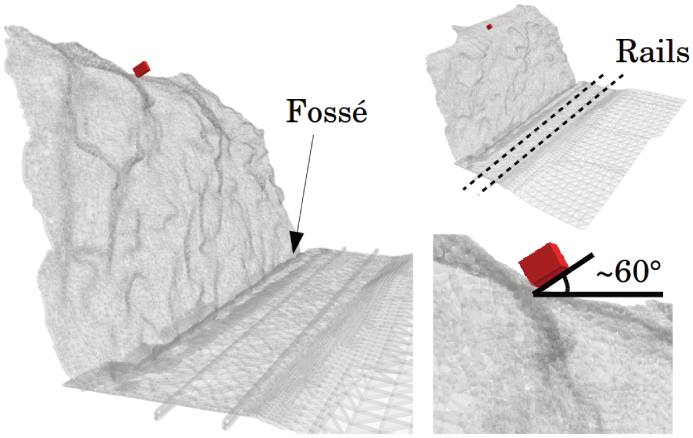


FIGURE 4.7 – Modèle numérique de terrain et conditions initiales de lancer du bloc B1 (Configuration 1) pour le profil P2 sur ROCKABLE.

Lors de la campagne d'essais, nous avons pu procéder sur le site à des lâchers complémentaires de blocs de petite taille (éprouvettes béton de section triangulaire utilisées lors des expérimentations réalisées au laboratoire) pour déterminer les paramètres d'interaction entre les blocs et le ballast (Figure 4.8).

FIGURE 4.8 – Exemple de capture vidéo utilisée lors de l'optimisation des paramètres de contact entre le bloc et le ballast.

Les conditions d'essais n'ont pas été optimales, puisque l'enregistrement de la vidéo a été faite en biais. Les incertitudes sur la détermination de μ et μ_R étant ainsi très importantes, nous nous sommes dans un premier temps limité à définir les valeurs de k_n, k_t, k_r et e_n^2 qui ont été estimées respectivement à 10^7 N.m, 10^8 N.m, 10^8 N.m/rad et 0.001. Ces paramètres qui définissent un contact entre deux éléments rigides ont été conservés pour caractériser l'interaction entre les blocs et la paroi rocheuse, les blocs et le fossé et les blocs et les rails. Compte tenu des incertitudes importantes liées à la détermination de μ et μ_R, nous avons jugé préférable de ne pas fixer les valeurs de ces paramètres à la seule vue des essais de calibration mais d'effectuer une étude paramétrique afin de déterminer les couples de paramètres μ et μ_R les plus adaptés à ce site. Des gammes de variation de μ et μ_R, comprises dans les distributions uniformes décrites dans le chapitre 2 (Équation 3.6), ont dans un premier temps été testées. En ce qui concerne l'interaction entre les blocs et les rails, les valeurs de μ et μ_R

ont été fixées arbitrairement à zéro (les blocs et les rails sont rigides et ne présentent aucune rugosité). L'ensemble des paramètres d'interaction utilisés lors des simulations numériques est présenté dans le Tableau 4.4.

TABLEAU 4.4 – Paramètres de contact pour chaque type d'interaction. k_n et k_t sont donnés en N.m et k_r en N.m/rad.

	k_n	k_t	k_r	e_n^2	μ	μ_R
Bloc-Paroi Rocheuse	10^7	10^8	10^7	0.001	[0.001 ; 0.598]	[0.001 ; 0.229]
Bloc-Fossé	10^7	10^8	10^7	0.001	[0.001 ; 0.598]	[0.001 ; 0.229]
Bloc-Ballast	10^7	10^8	10^7	0.001	[0.001 ; 0.598]	[0.001 ; 0.229]
Bloc-Rail	10^7	10^8	10^7	0.001	0.000	0.000

TABLEAU 4.5 – Caractéristiques de la variabilité des paramètres de contact : μ et μ_R choisis aléatoires dans des distributions uniformes similaires à celles utilisées dans le chapitre 2.

	Max	Min
μ	0.598	0.001
μ_R	0.229	0.001

Pour chaque configuration de lancer (1,2 ou 3), et quelle que soit la géométrie du bloc (B1 ou B2), il est possible de suivre la cinématique du bloc, définir sa trajectoire numérique et sa position d'arrêt (Figure 4.9).

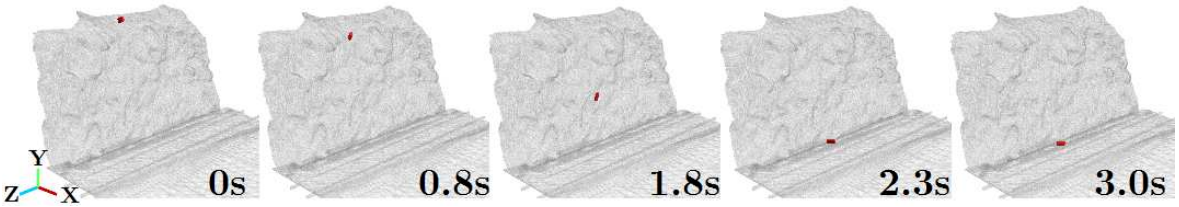


FIGURE 4.9 – Exemple de cinématique et de position d'arrêt du bloc B1 - Configuration de lancer 1.

En prenant en compte la variabilité des paramètres μ et μ_R, les simulations numériques permettent d'établir des statistiques sur les vitesses moyennes, minimales et maximales d'impact sur le ballast, sur les angles de déviation des blocs et sur les distances de propagation (Tableau 4.6). La variabilité de répartition spatiale des blocs (dans le fossé - dépôt A, sur le ballast - dépôt B, ou entre les rails - dépôt C) a également été étudiée. On notera que chaque ligne du Tableau 4.6 représente les résultats correspondant à 300 simulations.

On remarque dans le Tableau 4.6 que, comme observé expérimentalement, les vitesses obtenues par le bloc B1 (130 kg – Configuration 1) sont plus élevées que celles du bloc B2 (283 kg – Configuration 2). On note aussi que les vitesses moyennes du bloc B1 – Configuration 1 sont proches des vitesses expérimentales. Si on compare directement

TABLEAU 4.6 – Vitesses d'impact numériques du bloc avec le ballast et probabilité de dépôt.

	Configuration	Moyenne m/s	Max m/s	Min m/s	Fossé (A) %	Ballast (B) %	Rail (C) %
B1	1	10.97	12.06	8.85	0.00	90.33	1.67
	2	10.51	11.87	8.36	26.00	74.00	0.00
	3	10.64	11.99	8.63	26.67	73.00	0.33
B2	1	10.79	12.07	9.66	7.33	92.00	0.67
	2	10.46	11.86	6.00	27.33	72.67	0.00
	3	10.63	11.95	8.49	15.67	84.33	0.00

ces valeurs, on obtient une différence d'environ 13.8%. Pour le bloc B2 – Configuration 2, cette différence est plus élevée et atteint 26.6%. Malgré tout, l'ordre de grandeur des vitesses d'impact reste raisonnable. Concernant les zones d'impact, on retrouve également pour les deux types de blocs les tendances expérimentales : la majorité des blocs s'arrête sur le ballast, une quantité non négligeable de blocs échoue dans le fossé, et la probabilité de franchissement des rails est très faible. On constate cependant, et ce pour les gammes de valeurs de μ et μ_R retenues actuellement, qu'un grand nombre de trajectoires sont en fait non réalistes du fait d'un mauvais paramétrage. Dans certains cas, et comme on peut le voir sur la Figure 4.10, les blocs peuvent parcourir sans s'arrêter des distances excessives allant au-delà du maillage qui délimite le terrain.

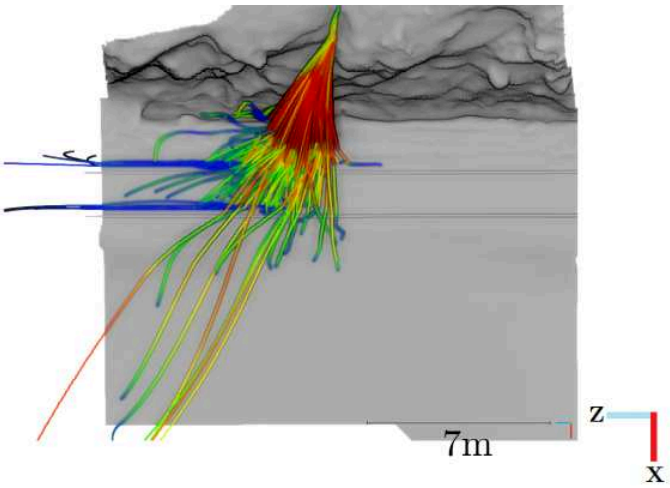


FIGURE 4.10 – Trajectoires du bloc B1 – Position 1 pour différentes valeurs du couple μ et μ_R tel que défini dans le Tableau 4.5. On notera que certaines trajectoires dépassent les limites du maillage qui définit la surface du terrain.

C'est notamment le cas des simulations telles que $\mu = 0.001$ ou les blocs glissent sur le Ballast. Pour de tels cas, on remarquera également que les rails constituent un obstacle infranchissable à certains blocs qui se déplacent de manière excessive le long des rails (également non frottant). Ces cas ne correspondant pas du tout à la réalité vont nous permettre de contraindre le domaine de pertinence et de validité des couples μ et μ_R étudiés. Suivant la géométrie du bloc ou la position initiale du lancer, certains

mécanismes spécifiques peuvent être observés lors de l'impact (Figure 4.11) : le bloc s'enfonce directement dans le sol et ne bouge plus (cas A), rebondit de façon excessive ou glisse sans s'arrêter (cas B).

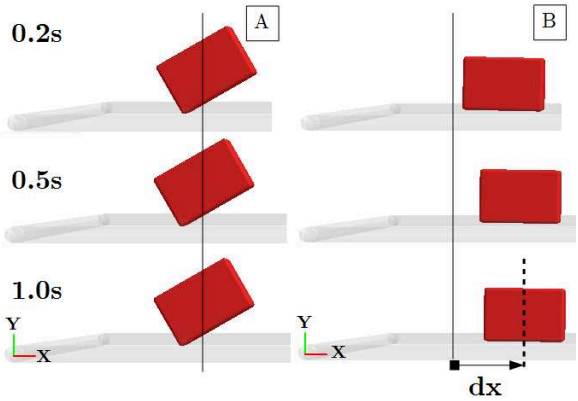


FIGURE 4.11 – Différentes géométries d'impact du bloc B1 lâché suivant la configuration de départ 1. Certains mécanismes spécifiques ont été observés lors de l'impact : A) Le bloc s'enfonce et roule sans glisser. B) Le bloc glisse excessivement avec des distances de propagation supérieure à 30 cm.

Pour définir les jeux de paramètres le plus adaptés pour représenter la réalité physique des expérimentations, nous avons tracé sur la Figure 4.12(a) pour chaque couple μ et μ_R (définis suivant la distribution statistique présentée dans le Tableau 4.5) la distance de propagation dx des blocs. Le critère d'acceptabilité retenu pour discriminer les simulations numériques est une valeur seuil du déplacement dx qui a été fixée à 30 cm (la moitié de la plus grande longueur du bloc le plus petit (B1)). Les valeurs très faibles de dx (inférieures à 2 cm) ont également été exclues du critère d'acceptabilité.

Comme on peut le voir sur la Figure 4.12(a), on remarque que les distributions initiales choisies pour les deux paramètres ne sont pas adaptées à ce site. En effet, selon notre critère, et compte tenu de la génération aléatoire des paramètres retenue, très peu de simulations répondent au critère ($dx < 30$ cm). En fait, seule la zone située au-dessus de la droite inclinée représentée en pointillé sur la Figure 4.12(a) correspond aux couples μ et μ_R qui répondent au critère que l'on s'est fixé. Afin d'élargir la zone d'étude, nous avons procédé à de nouvelles simulations ($N = 1\,000$ simulations), en faisant varier μ et μ_R jusqu'à une valeur égale à l'unité. Les résultats obtenus sont synthétisés sur la Figure 4.12(b). On constate sur cette figure que la zone d'acceptabilité des couples μ et μ_R (comprise entre les deux droites en pointillé présentées sur la Figure 4.12(b)) est telle que :

$$\mu_R > -0.571\mu + 0.40 \qquad \text{et} \qquad \mu_R < 0.50 \tag{4.1}$$

Pour mieux comprendre et analyser les mécanismes physiques à l'origine de ces résultats nous avons déterminé au cours du temps, pour les 6 couples μ et μ_R du Tableau 4.7 (repérés également sur la Figure 4.13), les évolutions : des moments des forces résultantes agissant sur le bloc (Figure 4.14(a)), des forces tangentielles (F_t) au point d'impact (Figure 4.14(b)) et des distances de propagation dx parcourues par le centre de masse (Figure 4.14 (c)).

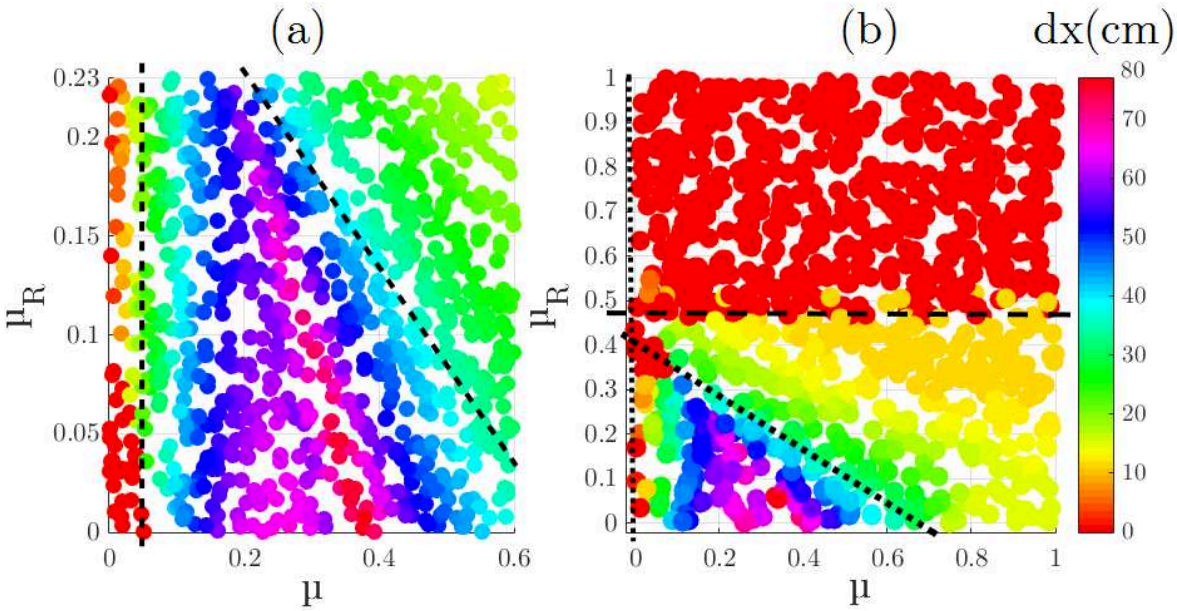


FIGURE 4.12 – Les *HeatMap* représentent l'effet de la variation du couple $\mu - \mu_R$ sur la distance de propagation dx dans la direction de l'axe X (distance horizontale). Sur la Figure (a) μ varie de 0.001 à 0.6 et μ_R de 0.001 à 0.2. Ces valeurs, issues du Tableau 4.5, correspondent aux valeurs proposées pour les distributions uniformes du chapitre 3. Sur la Figure (b), les valeurs des paramètres μ et μ_R varient de 0 à 1. L'échelle de couleur présentée à droite caractérise la distance parcourue par le centre de masse du bloc, exprimée en centimètre, pour des amplitudes comprises entre 0 et 80 cm.

TABLEAU 4.7 – Valeurs des paramètres μ, μ_R et distance de propagation dx, pour les 6 simulations analysées.

	μ	μ_R	dx (m)	Couleur associée
1	0.96	0.86	0.00	
2	0.74	0.45	0.11	
3	0.63	0.19	0.17	
4	0.12	0.008	0.52	
5	0.91	0.004	0.15	
6	0.77	0.07	0.17	

Des résultats présentés sur les figures précédentes on peut tirer les conclusions suivantes :

1. Courbe bleue : la valeur de μ_R est bien supérieure à la valeur limite de 0.50. Quelle que soit la valeur de μ, le bloc est freiné en rotation et reste encastré dans le sol. Le bloc est soumis à un moment des forces résultantes positif qui s'oppose au roulement du bloc (valeurs négatives dans le sens horaire). La force tangentielle résultante est négative mais de faible intensité et s'oppose également à la rotation du bloc.

2. Courbe noire : la valeur de μ_R est égale à 0.45, proche du critère établi par l'Équa-

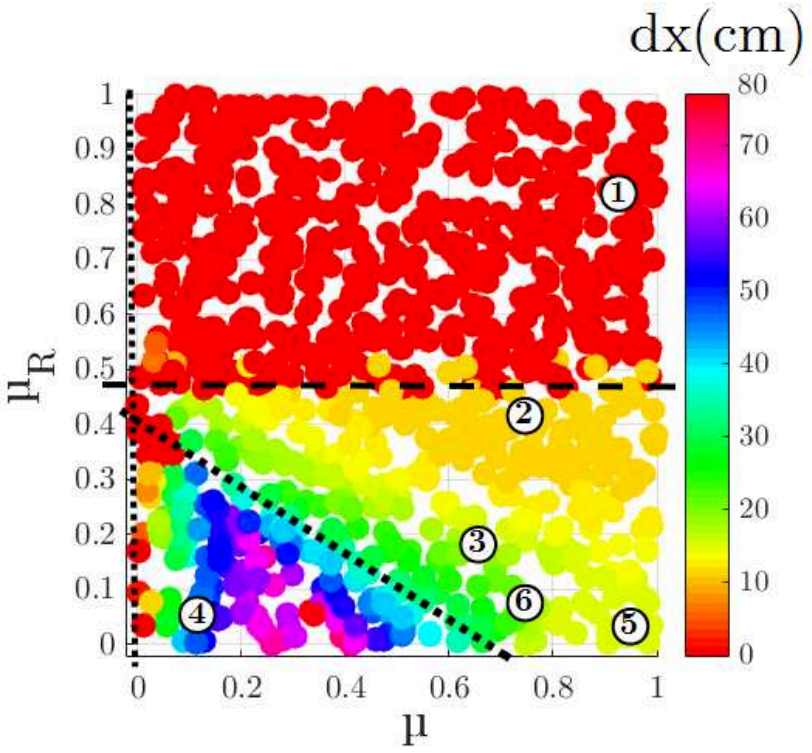


FIGURE 4.13 – Visualisation des couples μ et μ_R des 6 simulations analysées.

tion (4.1). La valeur choisie pour μ satisfait au critère retenu. Nous remarquons dans ce cas que la distance parcourue par le centre de masse est inférieure à 30 cm (dx = 11 cm) et qu'elle augmente progressivement au cours du temps. La force tangentielle résultante du centre de masse du bloc reste faible ce qui traduit un mécanisme de roulement sans glissement du bloc.

3. Courbe violette : la valeur de μ_R est égale à 0.19 et la valeur de μ est fixée à 0.63. Le critère utilisé pour dx est satisfait (dx = 17 cm). La force de frottement tangentielle est contraire au sens de propagation, ce qui favorise la rotation du bloc (moment des forces résultantes négatif).

4. Courbe verte : Voici un cas de glissement excessif. La valeur de μ_R est très faible et égale à 0.008. Le bloc n'est absolument pas freiné en rotation. Le moment des forces résultantes est très fort, d'environ 38 N.m (le bloc roule très vite autour de l'axe Z). La valeur de μ est peu élevée (μ = 0.12) d'où une force tangentielle résultante faible. Le bloc n'est pas freiné en translation. La distance parcourue est de 52 cm.

5. Courbe orange : la valeur de μ_R est également très faible (μ_R = 0.004) mais satisfait au critère défini par l'Équation (4.1). Le coefficient de frottement est élevé (μ = 0.91) d'où des forces de frottement tangentielles importantes qui favorisent la rotation du bloc. L'évolution du moment résultant accompagne celle de la force tangentielle. Aucun glissement excessif n'est observé ; ni de blocage en rotation du bloc. Un léger retour en arrière du centre de gravité du bloc est obtenu suite à une rotation arrière du bloc lors de sa stabilisation.

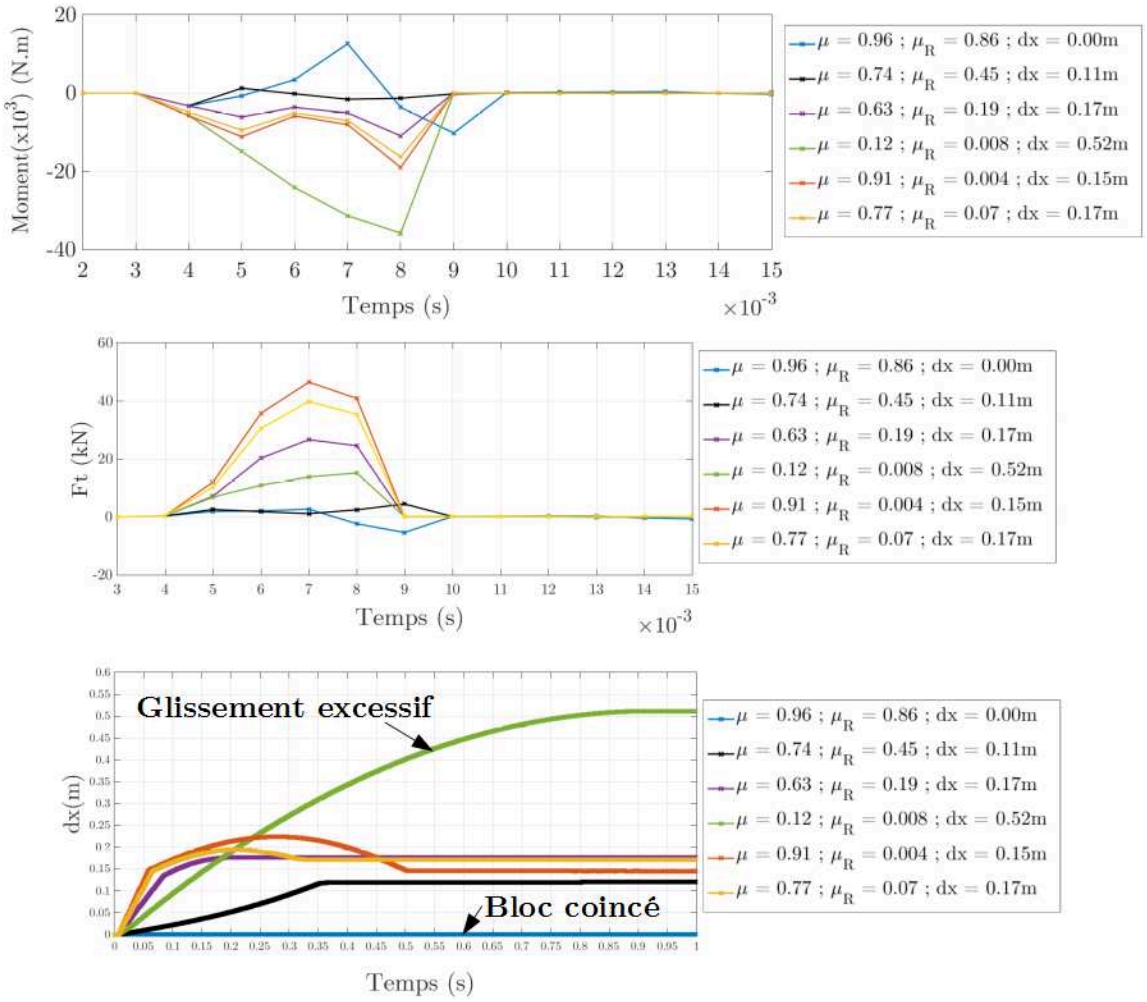


FIGURE 4.14 – (a) Évolution du moment des forces résultantes agissant sur le bloc (kN.m) en fonction du temps (s).(b) Évolution de la force tangentielle Ft (kN) en fonction du temps (s). (c) Évolution de la distance de propagation du centre de masse des blocs dx (m) en fonction du temps (s).

6. Courbe jaune : Ce cas est très similaire au cas précédent (courbe orange) mais avec une valeur de μ_R plus élevée ($\mu_R = 0.07$) et une valeur de μ plus faible ($\mu = 0.77$). Les tendances observées précédemment restent valables bien que moins prononcées.

4.6 Étude paramétrique

L'étude paramétrique a été menée en considérant les couples de μ et μ_R qui satisfont aux critères définis par l'Équation (4.1). Toutes les géométries (Blocs B1 et B2) et position de départ (Configurations 1, 2 et 3) sont analysées à titre comparatif. Les Tableaux 4.8 et 4.9 synthétisent l'ensemble des résultats obtenus sous la forme des valeurs moyennes, maximales et minimales des vitesses d'impact, des angles de déviation et des distances de propagation. Sont présentées également, les probabilités

d'occurrence du dépôt des blocs à savoir : s'ils tombent directement dans le fossé ; s'ils s'arrêtent sur le ballast (sans franchir les rails) ou s'ils viennent franchir les rails de la voie ferrée. Ces résultats sont résumés de manière synthétique sur la Figure 4.15 où l'on présente l'influence de la position de départ des blocs (verticale de coté-position1, couchée-position2, verticale de face-position3) sur les positions d'arrêt des blocs.

Tableau 4.8 – Vitesses numériques obtenues lors de l'impact et probabilités de dépôt des blocs pour les couples de μ et μ_R qui satisfont aux critères définis par l'Équation (4.1).

	Position	Moyenne m/s	Max m/s	Min m/s	Fossé (A) %	Ballast (B) %	Rail (C) %
B1	1	10.22	10.90	8.85	6.0	81.5	12.5
	2	9.30	10.43	8.36	51.5	45.5	3.0
	3	9.49	10.13	8.63	61.0	39.0	0.00
B2	1	9.87	10.46	8.66	7.8	78.2	14.0
	2	9.19	10.35	6.00	34.0	49.0	17.0
	3	9.59	10.29	8.49	26.6	67.2	6.2

Tableau 4.9 – Angle de déviation des blocs (θ) et distance de propagation du centre de masse du bloc (dx) pour les couples de μ et μ_R qui satisfont aux critères définis par l'Équation (4.1).

	Position	Moyenne θ (°)	Max θ (°)	Min θ (°)	Moyenne dx(m)	Max dx(m)	Min dx(m)
B1	1	21.92	37.57	7.85	5.32	7.57	3.97
	2	36.01	48.16	27.77	4.48	7.11	3.95
	3	31.40	55.47	12.45	4.32	5.97	3.91
B2	1	28.9	43.86	12.64	4.78	7.66	3.12
	2	34.05	46.6	14.50	5.04	7.49	4.02
	3	34.26	55.7	22.91	4.81	7.43	3.98

Si l'on compare les résultats numériques aux résultats expérimentaux on constate que certaines tendances obtenues expérimentalement s'observent numériquement. Par exemple les blocs B2 - Positon 2 ont en moyenne une vitesse d'impact plus faible que les blocs B1-position1. De même les blocs B1 – Position 1 ont en moyenne un angle de déviation plus faible que les blocs B2 - Position 2. Néanmoins, les angles de déviation des simulations numériques sont en moyenne plus importants que ceux obtenus expérimentalement. Ceci peut être attribué à des imprécisions liées à la position du point de largage des blocs, consécutives à un mauvais pointage initial (précision de l'ordre de 50 cm) ou à l'erreur produite par l'opérateur qui effectue le lancer (une dizaine de centimètres). Compte tenu du manque d'information et d'imprécisions que l'on peut avoir en bureau d'étude (selon l'approche, le niveau d'expérience de l'opérateur, les outils utilisés et les erreurs d'exécution), ces résultats restent tout à fait raisonnables et cohérents vis-à-vis des résultats expérimentaux. En ce qui concerne la position d'arrêt

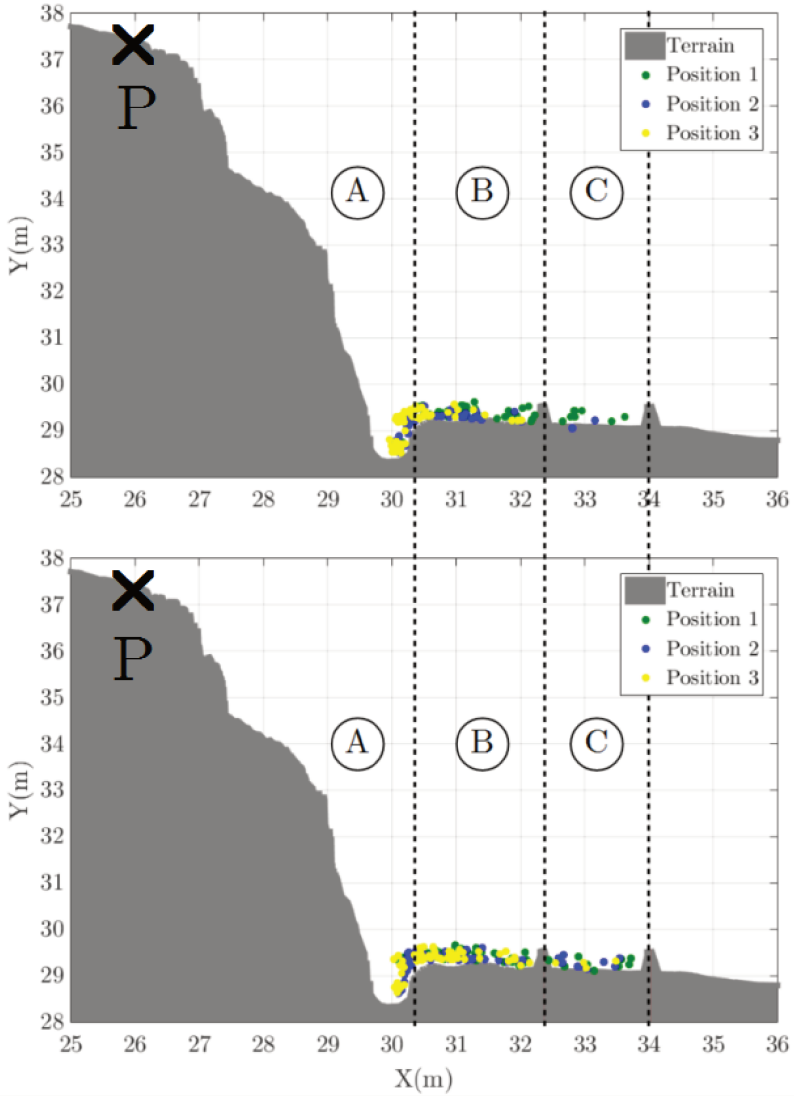


FIGURE 4.15 – Positions d'arrêt des blocs B1 (en haut) et B2 (en bas) en fonction de la configuration initiale du lancer (verticale de coté – Position 1, couchée – Position 2, verticale de face – Position 3). Les dépôts sont classés en : A) avant le fossé ; B) zone de ballast située entre le fossé et les rails et C) entre les rails.

des blocs, la tendance observée expérimentalement est que le bloc B2 est le seul à venir se déposer entre les rails. De plus, la probabilité expérimentale d'atteinte du fossé est similaire entre les deux types de blocs (11.11% et 11.11%) ; alors que le bloc B1 est celui qui se dépose le plus souvent sur le ballast (88.89% contre 77.78%). Compte tenu du nombre réduit d'essais expérimentaux, un seul bloc, de plus ou de moins, qui atteint les zones A, B et C, peut changer les statistiques et donc fausser la perception que l'on peut avoir des résultats. Néanmoins cette tendance (probabilité plus forte que le bloc B2 atteigne les rails) est confirmé numériquement et ce pour toutes les configurations de lâcher des blocs. L'avantage du modèle numérique est qu'il permet de répondre à des questionnements que l'on avait pu avoir lors de la campagne expérimentale. Notamment il apparaît clairement que les vitesses d'impact sont plus sensibles à la configuration

initiale de lancer du bloc qu'à sa masse elle-même. En effet, les blocs ayant des vitesses d'impact les plus faibles sont ceux qui ont été lancés à plat et qui roulent en haut du talus suivant l'axe de leur plus grande dimension. Ces blocs seraient logiquement freinés plus intensément dans cette phase de l'expérimentation.

Pour les blocs de type B1, la tendance globale observée (Tableaux 4.8 et 4.9) est que la plupart des blocs tombent directement dans le fossé, avec une déviation maximale de 48.16 °(Figure 4.15). En comparaison avec les autres configurations de lâcher, les blocs qui sont lancés suivant la Configuration 1 sont ceux qui se déposent en majorité sur le ballast et qui l'impactent avec une vitesse moyenne plus élevée. Cet effet est en lien direct avec la position de départ du bloc qui influe sur sa trajectoire et la manière dont son énergie est dissipée notamment dans la zone de largage.

Pour les blocs B2, les plus volumineux, on obtient des vitesses d'impact moins élevées que celles des blocs B1, notamment pour la Configuration 2, où la vitesse minimale est de 6 m/s. Cependant, la tendance observée est que plus les blocs sont volumineux plus ils vont loin (les blocs B2 représentent la proportion la plus importante des blocs qui atteignent les rails). Pour les blocs B2 lâchés suivant la Configuration 2 (à plat), les blocs semblent plus dévier latéralement que les blocs B1 lâchés également suivant la Configuration 2. Cela peut s'expliquer par un effet de taille (blocs plus grands et plus volumineux) qui prend toute son importance pour des profils de propagation relativement restreint avec une micro rugosité dont les dimensions sont voisines de la taille des blocs.

Les trajectoires et points d'arrêts obtenus en considérant l'ensemble des simulations numériques sont présentés, pour les blocs B1, sur la Figure 4.16, et pour les blocs B2, sur la Figure 4.17. On constate que toutes les trajectoires sont réalistes conformément au critère établi pour sélectionner la gamme des paramètres de μ et de μ_R à utiliser. Comme remarqué précédemment, les blocs B1 présentent une dispersion latérale plus accentuée ; et les blocs B2 ont tendance en moyenne à aller plus loin.

La relative bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux montre que la procédure mise en place pour déterminer les paramètres de contact (calibration sur des essais *in situ*) et pour discriminer les couples $\mu - \mu_R$ non adaptés à ce site est satisfaisante (suppression des trajectoires non réalistes). Les résultats obtenus (Tableaux 4.8 et 4.9) avec le nouveau jeu de paramètres sont plus réalistes et plus proches des résultats expérimentaux (Tableaux 4.2 et 4.3), notamment en termes de moyenne, que ceux obtenus avec le jeu de paramètres initial (Tableau 4.6). On peut espérer de fait, qu'avec le nouveau jeu de paramètres nous soyons en mesure de retrouver les tendances qui pourraient être observées sur d'autres profils du linéaire étudié. Gardons en mémoire que la géométrie du profil étudié, corrélée à la taille des blocs, peut influer de manière considérable sur les résultats obtenus et que d'un point de vue statistique, il serait nécessaire de mener d'autres études avant de statuer sur de quelconques éléments de décision à appliquer quant à la problématique du risque gravitaire sur le linéaire en place.

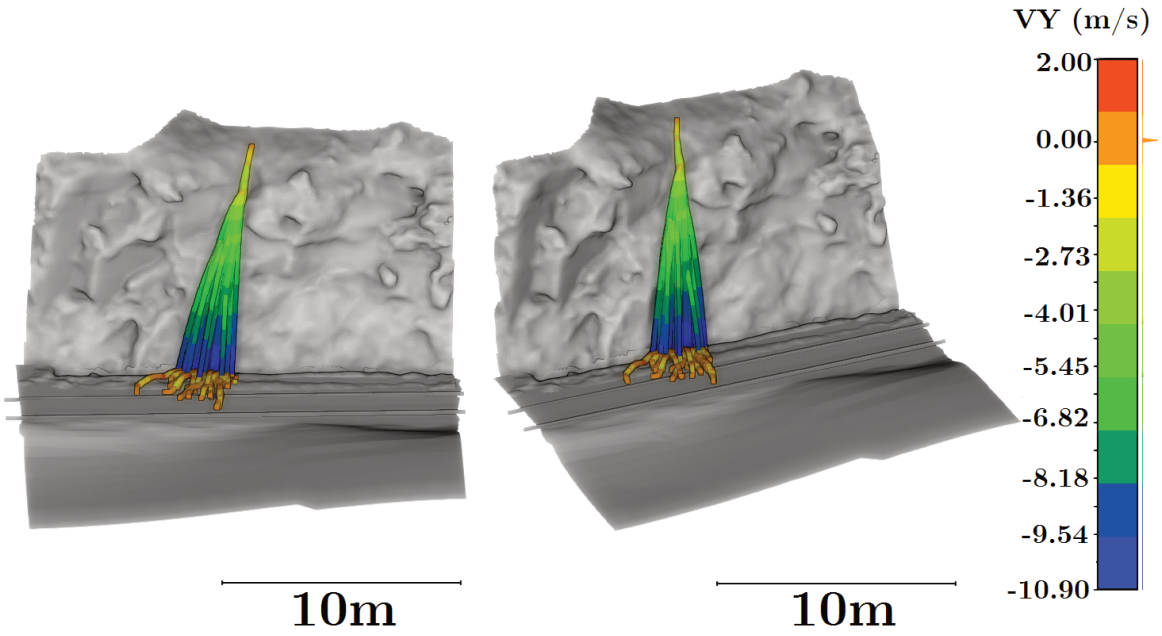


FIGURE 4.16 – Trajectoires des blocs B1 suivant deux angles de vue. L'échelle de couleur présente l'évolution des vitesses verticales (V_Y). La déviation latérale des blocs est au maximum de 48.16°et au minimum de 7.85°. La déviation latérale moyenne est de 30°.

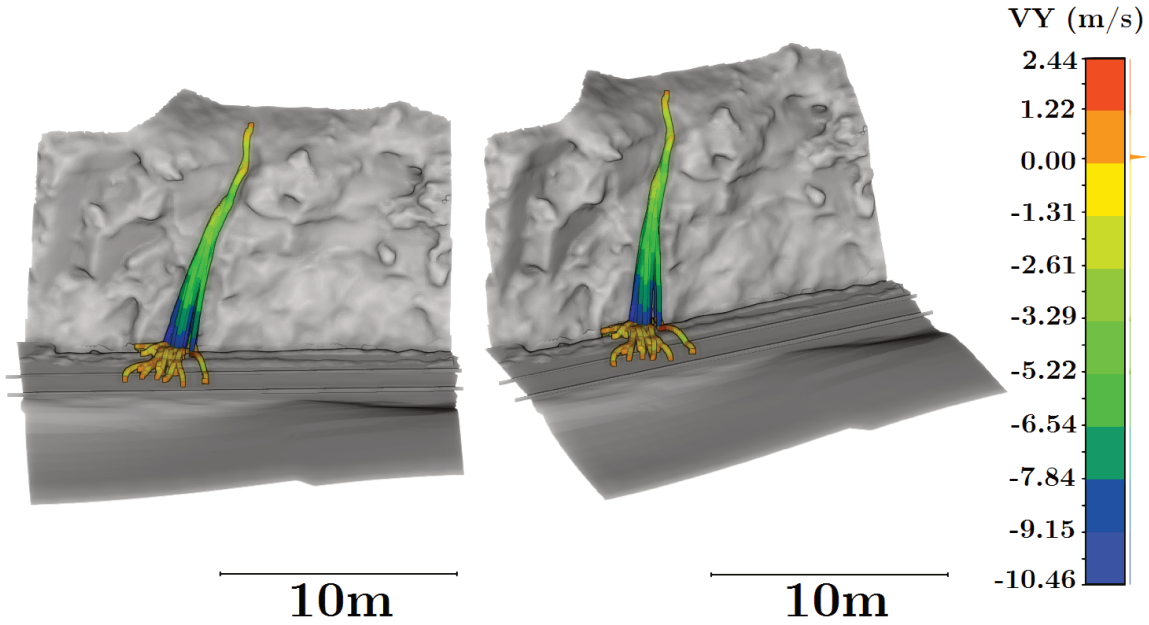


FIGURE 4.17 – Trajectoires des blocs B2 suivant deux angles de vue. L'échelle de couleur présente l'évolution des vitesses verticales (V_Y). La déviation maximale des blocs est au maximum de 43.86°et au minimum de 12.64°. La déviation moyenne est de 32.3°.

4.7 Conclusion

Les travaux menés dans ce chapitre avaient pour but de valider l'utilisation du code de calcul 3D ROCKABLE sur une expérimentation sur site réel dans des conditions

proches de l'ingénierie et de voir s'il était possible de mettre en place une procédure expérimentale et numérique qui permette de déterminer les paramètres les mieux adaptés à ce site. De manière générale on peut affirmer que la prise en compte d'une géométrie adaptée pour les blocs et d'un maillage raffiné pour le modèle numérique de terrain est nécessaire à une bonne prédiction des résultats expérimentaux. Après calibration, le modèle semble pertinent et bien adapté à cette problématique.

Les réflexions et questionnements qui a suscité cette étude peuvent être résumés ainsi :

Les valeurs des paramètres μ et μ_R ont fait l'objet d'un échantillonnage aléatoire de distribution uniforme telle qu'identifiée dans le chapitre 3. Pour une application réelle, le paramètre μ est le plus souvent estimé à $\tan\phi$, où ϕ correspond à l'angle de frottement interne du sol déterminé en statique. Selon Dhouib, A. *et al.* [1998], le coefficient de frottement interne du ballast présente une valeur minimale égale à 38 degrés. Dans d'autres travaux, on trouve des valeurs comprises entre 30° et 51°. En première estimation, le coefficient de frottement associé au ballast devrait être tel que μ soit supérieur à $\tan(38°) = 0.31$, ce qui est raisonnable, mais qui impose finalement certaines conditions pour le choix de μ_R pour que les trajectoires soient réalistes (Équation 4.1). D'après l'étude réalisée sur ce site, le coefficient de résistance au roulement doit être choisi dans l'intervalle $\mu_R \in [-0.571\mu + 0.40\ ;\ 0.5]$.

Certains aspects du modèle numérique peuvent être améliorés pour plus de réalisme. Par exemple, à l'heure actuelle, un seul et même jeu de paramètres a été utilisé pour représenter quatre substrats très différents : la paroi rocheuse, les rails, le ballast et le fossé. Une différenciation de ces zones est tout à fait possible mais nécessite d'autres hypothèses ou d'autres expérimentations complémentaires pour justifier le choix des paramètres à retenir. De même, dans Rockable on utilise un maillage triangulé pour définir la surface du terrain, qui est ensuite transformé en *corps rigides*. Il en résulte que le ballast, composé de cailloux granitiques présentant des géométries très variées, est représenté dans le code par des triangles plats, ce qui élimine l'effet de la rugosité réelle. Des nouveaux simulations numériques en modifiant la taille du maillage seraient envisageables, ce qui permettra d'étudier plus en détail la sensibilité des résultats en fonction de la résolution du modèle numérique du terrain, dont nous n'avons pas pu étudier dans cette thèse. Les conditions d'impact du bloc et du ballast sont également idéalisée et réduite en un point ce qui ne permet pas de prendre en compte certains mécanismes complexes, comme par exemple le fort remaniement du sol lors de l'impact, qui sont globalisés dans les directions tangentielle et rotationnelle par les deux paramètres μ et μ_R. L'avantage de la méthode actuellement est sa simplicité et sa rapidité d'exécution. La prise en compte d'une couche de ballast par une méthode discrète reste possible mais engendrerait des temps de calcul rapidement prohibitifs.

L'étude ci-dessus présente des hypothèses très fortes qui ont fourni une analyse et des conclusions pertinentes pour le site étudié. Dans un autre contexte et dans le cadre d'une étude réelle d'ingénierie, il faut se garder d'appliquer sans analyse critique les valeurs des paramètres proposées ici. Il convient donc de les adapter avec bon sens, voire de les redéfinir sur la base de nouveaux résultats expérimentaux et ce afin de se faire par soi-même sa propre expertise. Pour le cas spécifiquement étudié, nous avons remarqué qu'un choix arbitraire des paramètres contribuait à augmenter la dispersion

sur les résultats et conduisait à des trajectoires parfois non réalistes.

Chapitre 5

Essais à grande échelle

Benchmark C2ROP

Introduction

Le Projet National C2ROP (Chute de blocs, Risque Rocheux et Ouvrages de Protection) est un projet géré par l'IREX (l'Institut pour la Recherche appliquée et l'EXpérimentation en Génie Civil) qui est un organisme impliqué dans le développement de programmes de recherche à caractère applicatif.

La genèse du Projet National C2ROP découle de la nécessité de transférer au monde opérationnel des outils, méthodes et innovations développés par les différents acteurs du domaine des risques gravitaires, notamment par les laboratoires de recherche et le secteur privé. Les objectifs affichés du Projet National C2ROP sont :

- de valoriser le savoir-faire français au niveau national mais également à l'international ;
- de sensibiliser et de former les praticiens, les gestionnaires des réseaux routiers, ferroviaires et les collectivités, à la gestion de la problématique du risque rocheux ;
- d'établir un guide commun de recommandations et de bonnes pratiques.

Le projet est structuré en trois axes principaux, présentés ci-dessous, qui couvrent des domaines aussi variés que l'aléa, les stratégies globales de gestion du risque (définition, moyens et méthodes de mise en œuvre) et le dimensionnement des parades :

A. Connaissance et reconnaissance de l'Aléa, depuis sa genèse jusqu'à la propagation ;

B. Gestion du Risque et aide à la décision pour les enjeux linéaires et ponctuels ;

C. Parades, i.e. Ouvrages de Protection tels que les filets et les merlons.

Le travail de thèse s'inscrit dans le premier volet du Projet National C2ROP (connaissance et reconnaissance de l'aléa) et plus spécifiquement dans l'axe A3 dédié à l'aléa de propagation. Ce volet est divisé en 5 sous-tâches présentées ci-dessous, dont la sous-tâche A.3.1 à laquelle se réfère cette partie de la thèse :

A3.1. Benchmark logiciels trajectographiques ;

A3.2. Prise en compte de la variabilité et de l'incertitude des paramètres de terrain sur l'estimation de l'aléa propagation ;

A3.3. Prise en compte du couvert forestier dans l'aléa de propagation ;

A3.4. Modélisation des éboulements (avalanche rocheuse) ;

A3.5. Quantification de l'aléa résultant sur voie de communication.

La sous-tâche A3.1, "Benchmark logiciels trajectographiques", s'appuie sur des résultats expérimentaux de lâcher de blocs à échelle réelle, qui ont été réalisés pour permettre la création d'une base de données suffisamment bien documentée, la confrontation des différentes approches numériques existantes (dont les plus répandues en bureau d'études comme les codes trajectographiques 2D ou 3D) et la quantification de la variabilité des résultats numériques liée au type de logiciel employé et à l'expertise des utilisateurs.

Dans la littérature, on trouve à l'heure actuelle très peu de campagnes d'essais de lâcher de blocs menées sur sites réels. En effet, ces expérimentations sont complexes de réalisation et nécessitent des moyens spécifiques adaptés pour l'enegistrement des données. On peut néanmoins citer : Les essais de lâcher de blocs à échelle réelle réalisés sur le site expérimental de Vaujany [Bourrier *et al.*, 2012] par l'Irstea ou ceux réalisés en haute montagne par l'institut suisse de recherche WSL (Institute of Snow and Avalanche Research, SLF) et dont les résultats ont été présentés lors du colloque international C2ROP [Bartelt *et al.*, 2018].

Le Benchmark proposé dans le cadre du Projet National C2ROP a pour objectif d'évaluer la pertinence des modèles numériques et des méthodologies de calcul propre à chaque utilisateur sur la base de simulations numériques réalisées "à l'aveugle". Ces dernières s'appuient sur les données expérimentales telles que : les conditions initiales de lâcher, la géométrie et la nature du terrain, la taille et la forme des blocs, la hauteur de chute et la position du point de lâcher, sans autres informations que celles que l'opérateur a pu collecter sur le terrain ou celles liées à son expertise propre. Dans un second temps, des résultats partiels ont été fournies aux participants (vitesse de passage et points d'arrêt pour quelques blocs choisis arbitrairement) pour qu'ils affinent leurs hypothèses et qu'ils définissent de manière plus objective les paramètres de terrain. Enfin, suite au Benchmark, une étude paramétrique a été réalisée pour déterminer l'influence de certains paramètres, comme la forme et la taille des blocs, sur les distances de propagation, les énergies et les vitesses de passage des blocs en différents points du couloir de propagation.

Dans la pratique de la géotechnique, l'utilisation et le test de nouveaux outils numériques est une procédure habituelle quand l'ingénieur souhaite avoir le résultat optimal, le plus fiable possible et le mieux étayé, notamment lors d'un projet de dimensionne-

ment d'un ouvrage de protection. La pratique de l'ingénieur n'est pas restreinte à un seul choix, et pour satisfaire à la demande, il existe sur le marché, des dizaines de codes trajectographiques capables de répondre à différents besoins. Cependant il n'est pas toujours facile d'évaluer la pertinence et la cohérence des résultats obtenus, soit par un manque de compréhension approfondie du rôle des paramètres ou des lois physiques utilisées dans le code, soit par l'inexistence d'un guide de bonnes pratiques.

Dans ce contexte, on peut alors s'interroger sur comment justifier les innombrables hypothèses et choix retenus pour mener à bien les simulations numériques présentées dans ce rapport. Les campagnes d'essais réalisées dans le contexte du Projet National C2ROP doivent permettre de répondre à ce type de questionnement et d'évaluer le degré de maîtrise du logiciel par l'expert en charge d'un projet. Une telle prise de recul sur la pertinence des résultats numériques, n'a que rarement eu lieu auparavant, même au sein d'une même entreprise. Cette capacité (ou incapacité) du logiciel à rendre compte de phénomènes physiques réels est parfois omise par les ingénieurs, le plus souvent par manque de temps et par soucis d'efficacité.

Nous nous efforcerons dans ce chapitre de démontrer que l'expertise de l'opérateur joue un rôle capital dans l'analyse des résultats d'une étude trajectographique et nous tenterons de mener à bien la réflexion suivante : Jusqu'à quel point, la prise de décision lors d'un dimensionnement d'une parade est affectée par l'opérateur et quelles seraient les précautions d'usage à considérer. Nous montrerons également que l'utilisation de la DEM 3D, bien que coûteuse en temps pendant les phases de calcul et lors de la définition des fichiers d'entrée, amène de la physique et de la richesse aux simulations numériques. Notamment, la prise en compte de la forme réelle des blocs confère un meilleur réalisme aux résultats obtenus. On notera que certaines analyses peuvent être rendues complexes par le nombre important de variables à étudier et par la quantité importante de données récoltées. Dans la majorité des cas, nous nous efforcerons de préciser l'influence des paramètres d'entrée par le biais d'études paramétriques.

5.1 Présentation du site expérimental, des protocoles expérimentaux et des procédures numériques

5.1.1 La carrière d'Authume

5.1.1.1 Géométrie du site et description de la procédure de lâcher de blocs

Le site qui a été retenu est celui de la carrière d'Authume, localisé à Dôle, dans le département du Jura (39). La carrière s'étend sur une largeur de 300 m et a une dénivelée maximale comprise entre 60 et 70 m (Figure 5.1). Gérée depuis 1988 par la Société d'Exploitation et de transport SET PERNOT, elle est constituée de calcaire rose du Callovien. Sur place, la société possède une installation de concassage et de criblage, utilisée pour la production de gabions électro-soudés. La topographie de la carrière n'est pas vraiment représentative d'une pente naturelle, néanmoins, ce site

a été choisi parmi d'autres par les partenaires du Projet National C2ROP à l'issue d'un processus conjoint de sélection, notamment en raison de sa facilité d'accès et pour sa topographie faisant apparaître des parois verticales, des pentes caillouteuses ou végétalisées, des replats et des couloirs privilégiés de propagation.

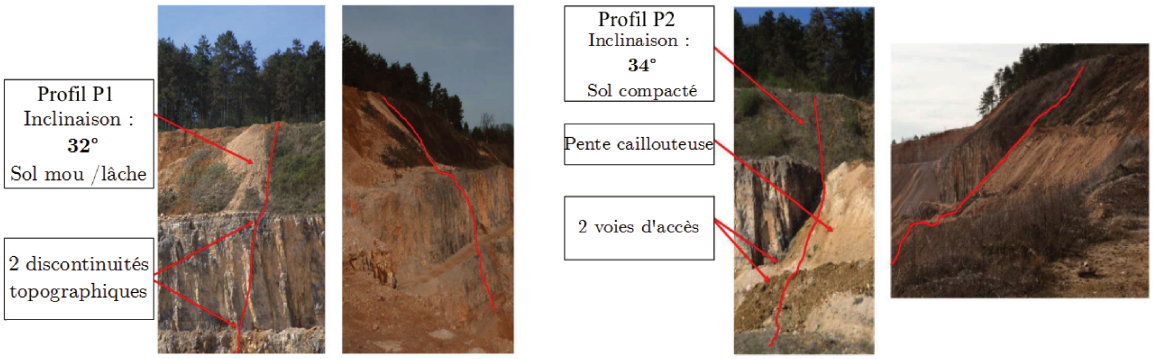
FIGURE 5.1 – Carrière d'Authume - Vue d'ensemble.

Deux profils ont été retenus sur le site (Figure 5.2). Le premier, référencé Profil P1, comporte deux parois verticales et deux replats (Figure 5.3(a)) et le deuxième, référencé Profil P2, qui comporte en partie haute une pente végétalisée, un replat puis une pente caillouteuse inclinée à 29°qui débouche sur une voie d'accès (Figure 5.3(b)).

FIGURE 5.2 – Carrière d'Authume – Position des deux profils de propagation P1 et P2 d'après *Google Maps*.

Une première visite du site par l'ensemble des participants du Benchmark a permis une prise de décision commune quant aux conditions de lâcher. Elle a permis également à chacun de se faire une idée sur la position des couloirs de propagation les plus probables et d'estimer la taille, la géométrie et le volume moyen des blocs, à partir des informations recueillies sur le terrain. Ces données, issues de l'expérience et de l'expertise de chaque participant ont en général été prises en considération pour le Benchmark à différents niveaux de complexité dans les hypothèses de calcul.

Les blocs rocheux sont lâchés, au moyen d'une pelle mécanique positionnée sur une voie de circulation située en haut de la carrière, d'une hauteur (h) par rapport au



(a) (b)

FIGURE 5.3 – Carrière d'Authume - Géométrie des deux profils de propagation retenus. (a) Profil P1 et (b) Profil P2.

terrain naturel d'environ 4 m pour le Profil P1 et de 2 m pour le Profil P2. Les hauteurs de lâcher peuvent varier sensiblement d'un test à l'autre car elles sont fortement conditionnées par la façon dont est utilisée la pelle mécanique (la hauteur relative de départ est alors approximative, car elle n'a pas été contrôlée). Les hauteurs de lâcher pour le Profil P2 sont plus faibles que celles du Profil P1 pour éviter l'encastrement des blocs sur la pente (sol meuble sur la partie initiale du Profil P2).

5.1.1.2 Reconstruction photogrammétrique & maillage numérique

Un modèle MNT de précision égale à 0,2 m, obtenu via un scanner LiDAR, a été fourni à tous les participants dans le cadre du Benchmark. Ce modèle est défini par un nuage de points de coordonnées (x, y et z) qui a servi de base pour la reconstruction surfacique du terrain. Dans le cadre de la thèse, le nuage de points a été transformé en maillage triangulaire (TIN) et dégradé jusqu'à obtenir une résolution de 0.5 m (Figure 5.4). Pour le Benchmark, certains opérateurs utilisent des précisions moins élevées (de l'ordre de 1 à 2 m), avec des fichiers d'entrée de type SIG (*Système d'Information Geographique* - Voir section 5.4). Ce type de données est communément utilisé dans les outils classiques de trajectographie [1]. Tous les participants du Benchmark disposent ainsi du même jeu de données (position des points de lâcher, et données géométriques, géomorphologiques et rhéologiques). Les positions des points de lâcher sont définies en coordonnées GPS, dans le même système de coordonnées que celui du MNT.

Dans le cadre de la thèse, pour laquelle nous avons utilisé le code DEM 3D ROCKABLE, la conversion de la position des points en coordonnées GPS au système de coordonnées locales se fait par l'intermédiaire de la matrice de translation/rotation. L'avantage de cette procédure est qu'elle permet, sans perdre d'information, de passer très facilement d'un système de coordonnées à un autre pour, par exemple, superposer à posteriori le Modèle Numérique de Terrain à une carte *Google Maps*. Cette technique est très répandue dans la pratique car elle permet de donner plus de réalisme aux informations que l'on veut transmettre. Pour éviter les déformations excessives du sol à

1. http ://www.ecorisq.org/ecorisq-tools

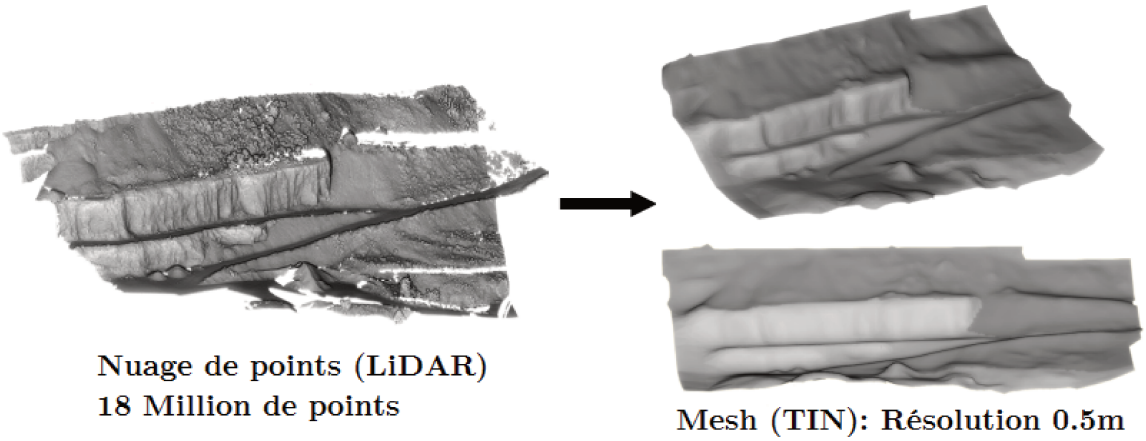


FIGURE 5.4 – Modèle LiDAR transformé en maillage triangulaire (TIN). Les zones en dehors des Profils P1 et P2 sont dégradées, alors que les régions où se trouvent les couloirs de propagation sont discrétisées avec plus de précision.

l'emplacement du premier impact et pour ajouter un peu de variabilité aux trajectoires des blocs, les lâchers de blocs ont été effectués successivement sur une zone de lâcher de 4 m x 4 m. Pour chacun des profils, quatre points de départ ont été retenus comme présenté à la Figure 5.5.

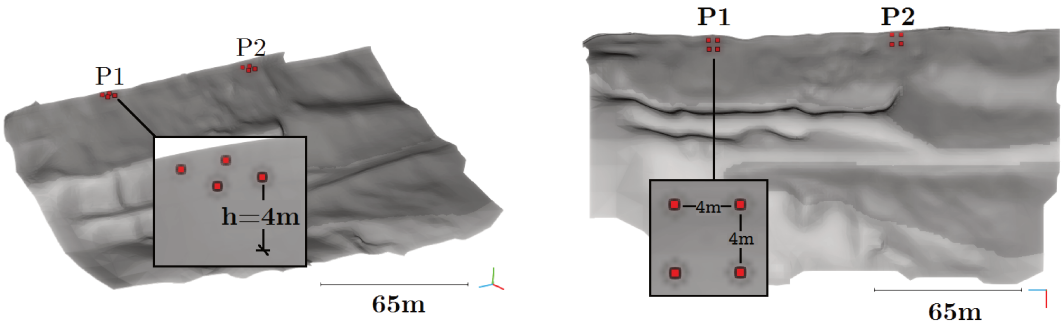


FIGURE 5.5 – Définition des zones de lâcher pour les Profils P1 et P2.

5.1.2 Caractéristiques des blocs utilisés pour la campagne expérimentale

5.1.2.1 Géométrie et forme des blocs

Un total de 89 blocs a été utilisé lors de la campagne expérimentale (41 blocs sur le Profil P1 et 48 sur le Profil P2). Après lâcher, les blocs ont été pesés et photographiés sous différents angles à côté d'une règle graduée, ce qui a permis d'obtenir leur forme, leur taille et leur volume approximatif. Les dimensions caractéristiques des blocs, que nous avons déduites des photographies, correspondent aux trois longueurs principales (L_1, L_2 et L_3) de la boîte englobant le bloc appelée *Oriented Bounding Box* (Figure 5.6) ; il s'agit du parallélépipède de plus faible volume englobant le bloc.

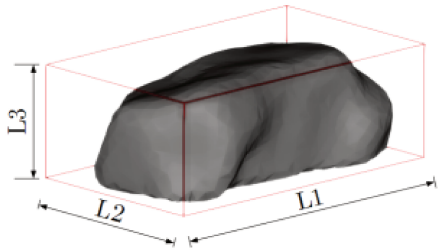


FIGURE 5.6 – Schéma d'un Bloc reconstruit par photogrammétrie englobé par la *Bounding Box*.

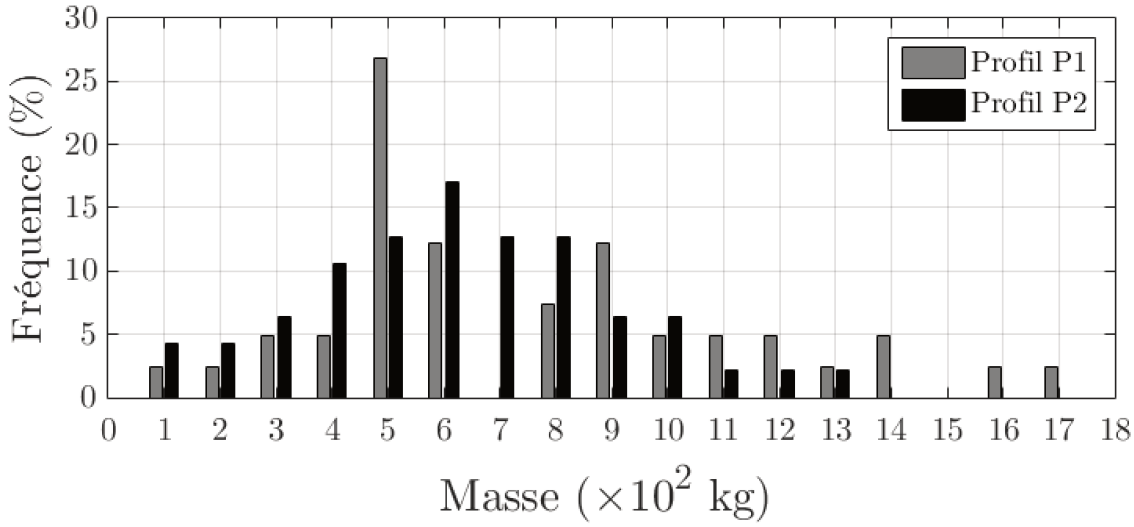


FIGURE 5.7 – Fréquence, en pourcentage, du nombre de blocs par la masse des blocs pour les Profils P1 et P2.

Dans la pratique, les méthodes de classification des matériaux granulaires basées sur la définition des longueurs principales (L_1, L_2 et L_3) sont très répandues, notamment : pour le classement des alluvions [Sneed & Folk, 1958; Zingg, 1935], pour caractériser la forme des agrégats employés dans le Génie Civil ou pour définir la morphologie du ballast utilisé pour les voies ferrées par la SNCF [Guo *et al.*, 2019]. La plupart des méthodes existantes sont basées sur des techniques d'analyse d'images (tomographie à rayons X, laser scanner, photogrammétrie, photos 2D, etc.). Les masses et dimensions caractéristiques des blocs utilisés lors de la campagne d'essais C2ROP n'ont pas été diffusées aux participants du Benchmark avant la fin de la Phase 2. En conséquence, les résultats transmis par les participants au Benchmark, ont été produits sans ces données, pourtant très influentes sur les résultats, sur la base de valeurs choisies arbitrairement. Les distributions statistiques en pourcentage de la masse des blocs pour les Profils P1 et P2 sont présentées sur la Figure 5.7. Les valeurs minimales, maximales et moyennes de la masse des blocs, pour chacun des profils et pour l'ensemble des deux profils, sont synthétisées dans le Tableau 5.1.

Il existe dans la littérature de nombreux critères de classification pour définir la forme des blocs rocheux comme par exemple : l'Indice de Sphéricité [Krumbein, 1941],

TABLEAU 5.1 – Caractéristiques des blocs utilisés lors de la campagne d'essais C2ROP : Masses moyenne, maximale et minimale des blocs, données en kilos.

Profil	Masse moyenne (kg)	Masse maximale (kg)	Masse minimale (kg)
P1	806	1751	178
P2	706	1869	169
P1 + P2	752	1869	169

la Circularité [Janoo, 1998; Lees, 1964], l'Angularité et l'Indice Surfacique [Zhang *et al.*, 2012]. Certains critères, comme celui proposé par Browne & Kim [2003], utilisent une relation (le plus souvent le rapport) entre le volume du bloc et le volume de la sphère minimale englobante. Dans le cadre de la thèse, nous utiliserons pour caractériser la forme des blocs différents critères géométriques plus ou moins complexes qui vont au-delà d'une simple évaluation purement visuelle. Le critère le plus simple que nous proposons permet de distinguer principalement deux types de géométries : les "formes cubiques" et les "formes rectangulaires". Ce critère de forme (c_f) est défini, en considérant les dimensions principales de la *Bounding Box*(L_1, L_2 et L_3, tel que $L_1 > L_2 > L_3$) par :

$$c_f = \frac{L_1}{L_2} - 1 \tag{5.1}$$

Nous avons estimé que, pour qu'un bloc soit considéré de forme cubique, sa plus grande longueur (L_1) ne devait pas dépasser de 30% sa longueur intermédiaire (L_2). Dans le cas contraire ($c_f > 0.3$), le bloc est considéré comme rectangulaire. Selon cette classification 48.3% des blocs expérimentaux sont de forme rectangulaire et 51.7% de forme cubique.

La classification de [Zingg, 1935] est l'une des plus répandues et est encore utilisée en sédimentologie (Figure 5.8). Elle permet, en considérant les rapports (L_2/L_1 et L_3/L_2) caractéristiques du bloc, de faire la distinction entre quatre formes de blocs ("Lame", "Allongé", "Plat" et "Équant"). Selon cette classification (Figure 5.9) 2.2% des blocs expérimentaux sont de type "Lame", 14.6% de type "Allongé", 9% de type "Plat" et 74.2% de type "Équant".

Par définition, selon Zinng, les blocs appartenant aux catégories "Équant" et "Plat" (L_2/L_1 supérieur à 0.66) ont, d'après l'Équation 5.1, un coefficient de forme c_f inférieur à 0.52. Pour garder de la cohérence entre les deux critères (Zinng et Critère de forme) il faudrait que la valeur limite du coefficient de forme c_f permettant de discriminer les blocs cubiques et les blocs rectangulaires soit de 0.52 et non pas 0.3 comme défini actuellement. Cependant, si on effectue une analyse visuelle des photos des blocs pour vérifier la cohérence du critère de Zinng, nous observons que certains blocs classés comme "Équant" ne le sont pas réellement. Si le critère de Zinng fonctionne bien dans le classement des blocs "Allongé" (i.e. Bloc89 – Figure (b)) il n'est pas pertinent dans le cas du Bloc91, qui est un bloc "Rectangulaire" (Figure 5.10(c)) et qui est considéré comme "Équant". De même, le Bloc71 est classifié comme un bloc de type "Lame" alors qu'il s'agit d'un bloc "Rectangulaire" (Figure 5.10(a)). Cela nous montre, qu'avec ce critère, une étape de vérification visuelle est indispensable, puisque les blocs peuvent

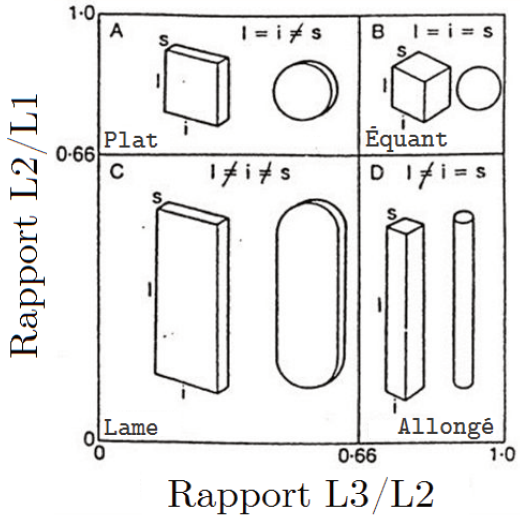


FIGURE 5.8 – Diagramme de Classification de Forme de [Zingg, 1935]) adapté de [Wright *et al.*, 1991].

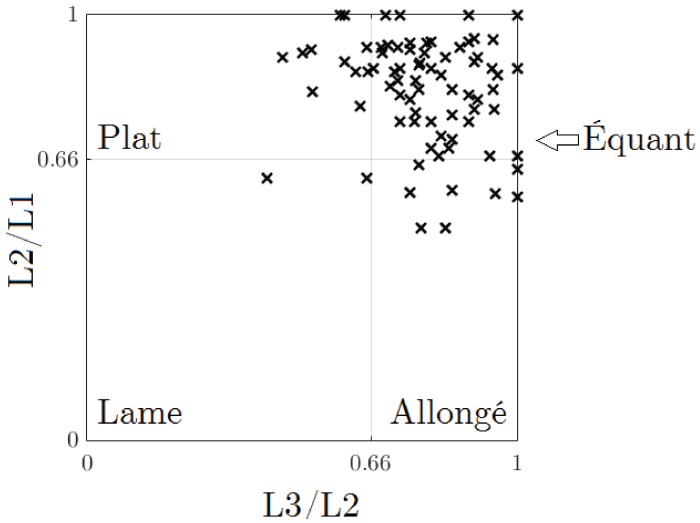


FIGURE 5.9 – Classification de Zingg pour les blocs expérimentaux.

être classés incorrectement. Si l'on applique le critère de Zingg aux blocs expérimentaux en fonction de leur masse et de leur forme (Figure 5.11), on constate que les blocs de forme rectangulaire ("Allongé" et "Lame") sont en général de petites tailles même si quelques blocs de grande taille sont néanmoins allongés.

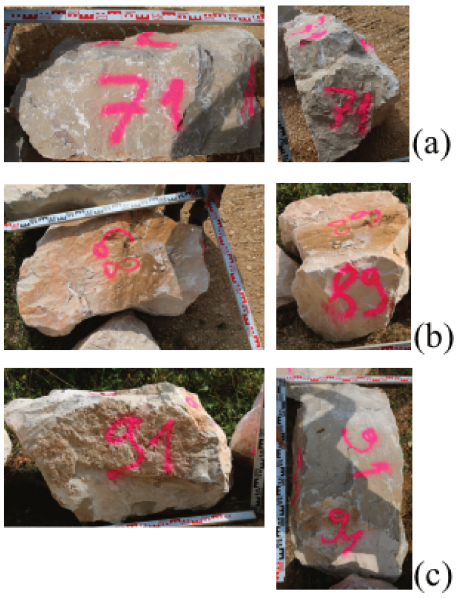


FIGURE 5.10 – Géométries des Blocs 71 (a), 89 (b) et 91 (c).

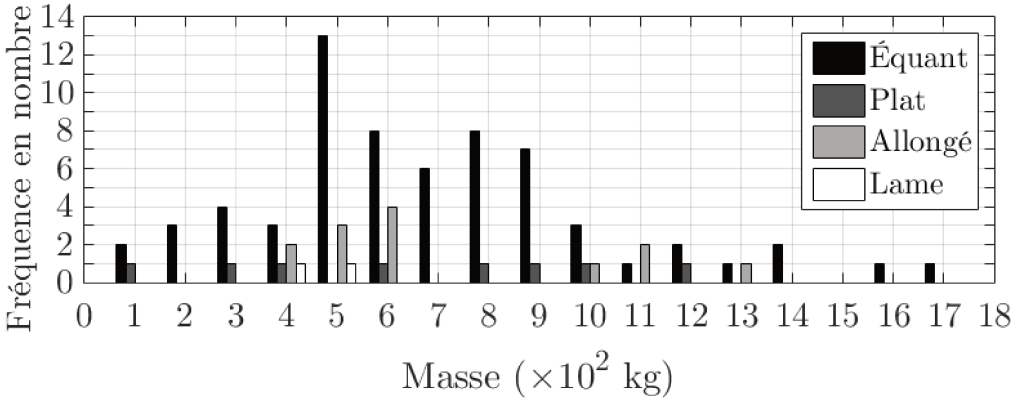


FIGURE 5.11 – Fréquence en nombre de la masse des blocs en fonction de leur forme (chaque couleur est associée à une forme spécifique) selon le critère de Zingg [Zingg, 1935].

[Williams, 1965] a mené une étude pour différencier la forme des grains provenant d'une zone littorale de dépôts alluviaux. Bien que la forme des grains analysés par Williams (grains de forme ellipsoïdale ou sphérique) n'aient aucun rapport avec la forme des blocs rocheux qui nous intéressent, nous utiliserons cette classification pour différencier les blocs de forme "Aplati" de ceux de forme "Allongé" à travers un indice de Forme (Shape Index W). Celui-ci est calculé grâce aux équations suivantes :

$$W = 1 - \frac{L_1 L_3}{(L_2)^2} \quad , \quad si \quad L_2^2 \quad > \quad L_1 L_3 \tag{5.2}$$

$$W = \frac{L_1 L_3}{(L_2)^2} - 1 \quad , \quad si \quad L_2^2 \quad \leq \quad L_1 L_3 \tag{5.3}$$

L'indice de forme W diminue graduellement de 0 à -1 dans la mesure où le bloc s'approche d'une forme "Allongé" et augmente graduellement de 0 à +1, lorsque le bloc s'approche d'une forme "Aplati". A un indice W proche de zéro, correspond un bloc de forme uniforme (sphérique ou cubique). L'indice de Williams nous permet de caractériser la forme des blocs avec une assez bonne précision. La seule exception est le Bloc71 (Figure 5.10(a)), qui est classé comme "Aplati", alors qu'il s'agit d'un bloc plutôt "Allongé". La distribution statistique de l'indice W pour les blocs utilisés lors de la campagne expérimentale est présentée sur la Figure 5.12. On constate sur cette figure que la majorité des blocs sont de forme régulière (W voisin de 0). Si l'on applique le critère de Williams aux blocs expérimentaux en fonction de leur masse et de leur forme (Figure 5.13), on constate que les blocs"Prolate" de forme "Allongé"ont majoritairement une masse de 500 à 600 kg alors que les blocs dits "Oblate" de forme "Aplati"sont en moyenne plus gros (800 à 900 kg).

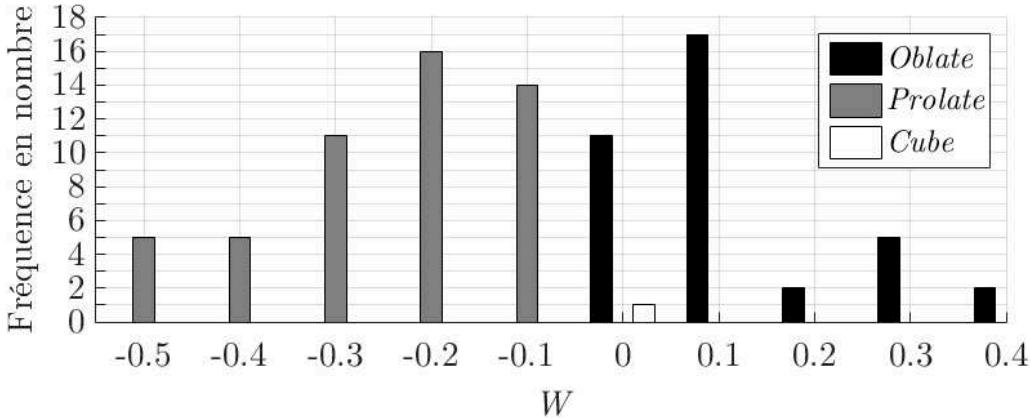


FIGURE 5.12 – Fréquence, en nombre, des blocs expérimentaux en fonction de l'indice de forme de Williams (W).

Un dernier critère géométrique proche du critère de forme c_f défini précédemment est celui proposé par [Erdogan *et al.*, 2006]. Il est défini par les équations 5.4 et 5.5 et permet de discriminer les formes "Aplati" des formes"Allongé". L'inconvénient de ce modèle est qu'il subsiste beaucoup de cas indéterminés notamment ceux pour lesquels le rapport L_1/L_2 est très supérieur à 1 et le rapport L_2/L_3 diffère de 1.

$$si \quad \frac{L_1}{L_2} \quad est \quad proche \quad de \quad 1, \quad et \quad \frac{L_1}{L_3} \quad et \quad \frac{L_2}{L_3} > 1.0 \quad \text{(Aplati)} \tag{5.4}$$

$$si \quad \frac{L_1}{L_2} >>> 1.0 \quad et \quad \frac{L_2}{L_3} \quad proche \quad de \quad 1.0 \quad \text{(Allongé)} \tag{5.5}$$

Le Tableau 5.2 permet de classer de façon synthétique les blocs selon les différents critères de forme proposés par chaque auteur. Par simplification, les blocs caractérisés comme "Aplati", "Equant" ou "Sphérique" sont regroupés sous le terme générique

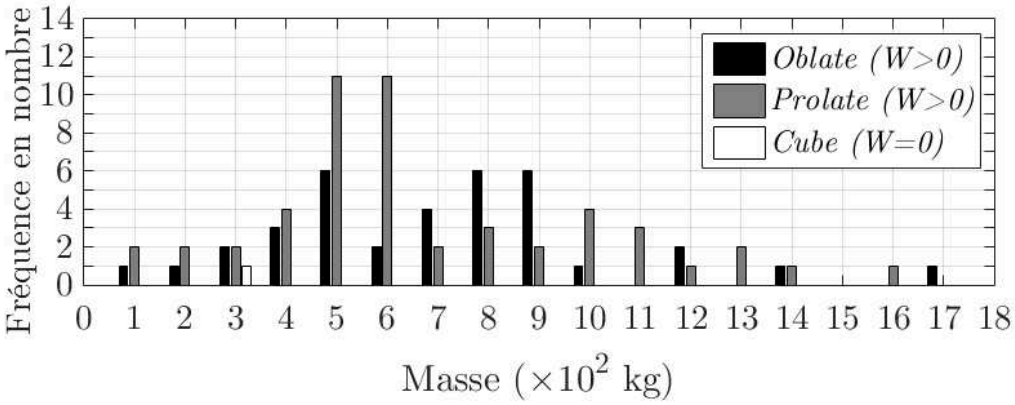


FIGURE 5.13 – Fréquence en nombre de blocs de la masse des blocs en fonction de leur indice de forme (chaque couleur est associée à une forme spécifique) selon le critère de Williams [1965]. Les blocs dits "Oblate" (W>0) sont de forme "Aplati" et les blocs dits "Prolate" (W<0) sont "Allongé". A un indice W proche de zéro, correspond un bloc de forme uniforme référencée "Cube".

"Cubes", et les blocs classés comme "Lame" ou "Allongé" sont regroupés sous le terme générique "Rectangle". Les blocs de forme indéterminée, issus de la classification d'Erdogan, s'affichent dans la dernière ligne du Tableau. Comme on peut le voir (Tableau 5.2), le critère de [Williams, 1965] est celui qui semble le plus proche du critère de forme c_f proposé. En revanche, le critère de [Zingg, 1935], comme mentionné précédemment, est celui qui est le moins en accord avec les observations de terrain.

TABLEAU 5.2 – Classification des blocs expérimentaux suivant leur forme.

	c_f	[Zingg, 1935]	[Williams, 1965]	[Erdogan *et al.*, 2006]
Cubes	51.69%	82.02%	42.70%	7.87%
Rectangles	48.31%	17.98%	57.30%	24.72%
Non classés	-	-	-	67.42%

5.1.2.2 Reconstruction numérique des blocs

Nous avons utilisé, pour générer le découpage numérique des blocs, le protocole de reconstruction d'objets en 3D défini pour un bloc irrégulier. Pour avoir un modèle numérique des blocs de très bonne résolution et suffisamment détaillé, une centaine de clichés doit être prise autour d'un bloc depuis plusieurs positions (voir Annexe B).

L'objectif du Benchmark étant de mettre en situation les participants dans des conditions proches de celles du bureau d'études, les géométries réelles des blocs n'ont pas été transmises aux participants avant la fin de la Phase 2 du Benchmark. Les premières simulations numériques que nous avons effectuées pour le Benchmark ont été réalisée avec des géométries (référencées 1 et 2) générées à partir des séries de photos prises avant la campagne d'essais lors de la première visite du site. Ces blocs utilisés, bien que présents sur la carrière, n'ont néanmoins pas été utilisés lors des différentes

campagnes de lâcher. Leur forme n'est malheureusement pas représentative des formes des blocs qui ont été par la suite utilisées lors de la campagne expérimentale et le volume des blocs numériques ainsi reconstitués a été parfois adapté pour que la masse des blocs numériques correspondent aux masses des blocs réellement employés (seule information transmise aux participants du Benchmark à l'issue de la Phase 1).

Pour permettre une rétro analyse des résultats, certains blocs de la campagne expérimentales ont été photographiés. Les conditions d'exposition étant difficiles, exposition directe à la lumière du soleil, beaucoup de zones sombres, et temps limité, il n'a pas été possible de photographier systématiquement tous les blocs pour effectuer l'analyse photogrammétrique. La forme des blocs référencée 3 a été reconstruite suite aux séries de clichés photographiques du Bloc 89 réalisées lors de la campagne de lâcher de blocs. Cette forme est donc la seule géométrie réelle, d'un bloc lâché, qui a été utilisée exclusivement à l'issue de la Phase 2 du Benchmark.

Lors des prises de vues, deux damiers de dimensions 60 cm x 60 cm sont positionnés au voisinage des blocs à numériser. Ils sont utilisés systématiquement pour les différentes séries de clichés et servent au logiciel SfM (*Structure from Motion*) pour la mise à l'échelle du nuage de points. Cette méthode est très répandue, car peu coûteuse et de relative bonne précision (environ 3 cm). Les trois géométries de blocs reconstitués sont présentées respectivement à la même échelle et suivant différents angles de vue sur les Figures 5.14, 5.16 et 5.18. Les nuages de points utilisés pour les simulations numériques sont présentés sur les Figures 5.15, 5.17 et 5.19.

FIGURE 5.14 – Géométrie des blocs de Forme 1.

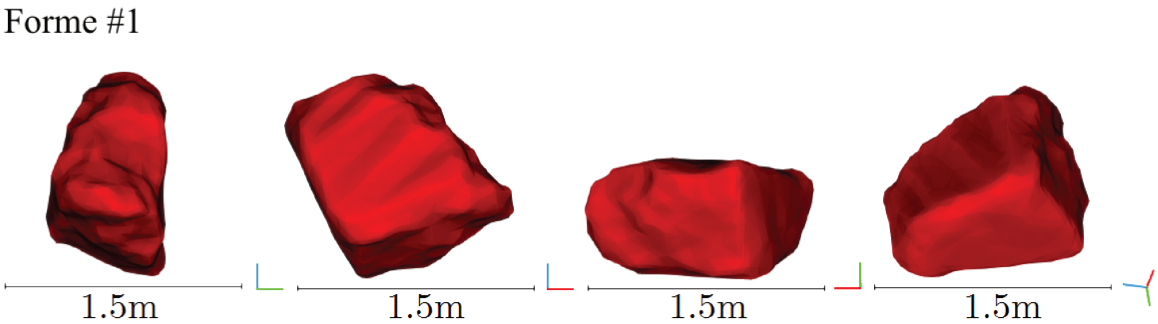


FIGURE 5.15 – Nuage de points associé aux blocs de Forme 1 : 340k points

Le Tableau 5.3 présente pour chaque bloc, les valeurs de c_f déduites des dimensions L_1, L_2 et L_3 de la boîte englobante. On constate dans le Tableau 5.3 que les blocs de Forme 1 et 2 sont considérés comme cubiques, alors que celui de Forme 3 est rectangulaire, ce qui correspond tout à fait à la perception visuelle que l'on a des blocs.

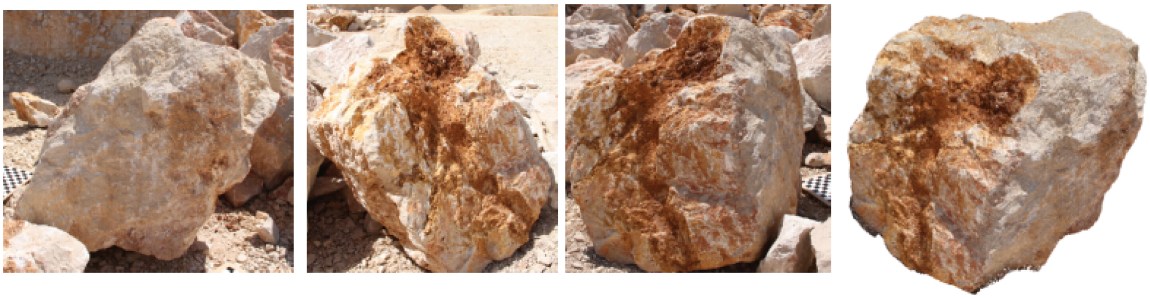


FIGURE 5.16 – Géométrie des blocs de Forme 2.

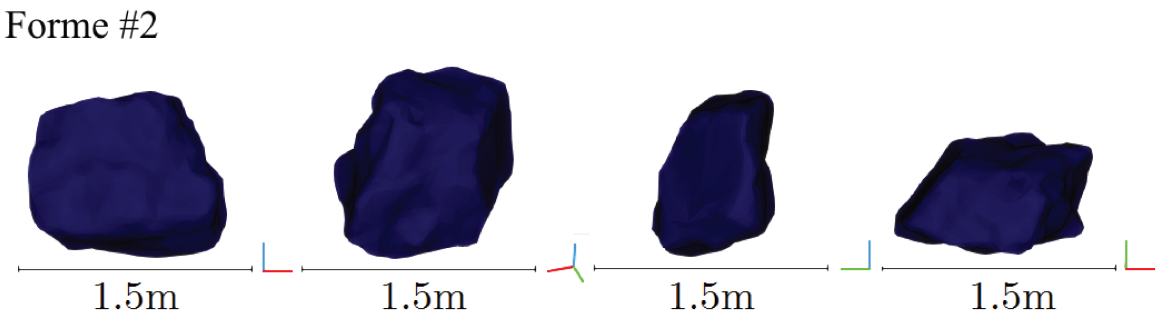


FIGURE 5.17 – Nuage de points associé aux blocs de Forme 2 : 900k points.

FIGURE 5.18 – Géométrie des blocs de Forme 3.

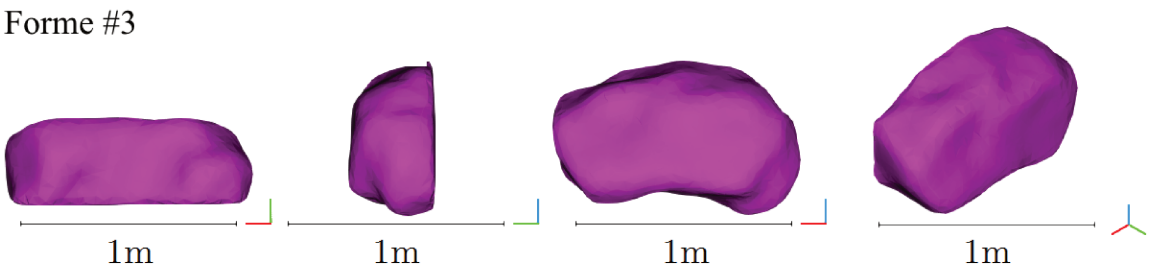


FIGURE 5.19 – Nuage de points associé aux blocs de Forme 3 : 2M de points.

TABLEAU 5.3 – Classification des blocs reconstruits par photogrammétrie, selon le critère de forme c_f appliqué à la *Bounding Box*.

	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	Volume Box (m^3)	c_f	Forme
Forme 1	0.85	0.67	0.43	0.245	0.27	Cube
Forme 2	1.35	1.11	0.75	1.124	0.22	Cube
Forme 3	1.15	0.66	0.4	0.304	0.74	Rectangle

5.1.3 Méthodologie, analyse et traitement des données

Pour l'analyse et l'interprétation des résultats en termes de vitesse ou de hauteurs de passage des blocs, quatre écrans numériques virtuels sont positionnés sur le terrain. Ils sont référencés EC11 (*i.e.*, Profil P1 et écran 1), EC12 (*i.e.*, Profil P1 et écran 2), EC21 (*i.e.*, Profil P2 et écran 1) et EC22 (*i.e.*, Profil P2 et écran 2). Chronologiquement dans le déroulement du Benchmark, deux configurations relatives au positionnement des écrans virtuels ont été utilisées. La première configuration (Figure 5.20 (a)) a été utilisée au début du projet C2ROP pour le Benchmark interne IMSRN (section 5.4). La deuxième configuration (Figure 5.20 (b)) a été fournie ultérieurement à tous les participants du Benchmark. Malgré ces disparités, quelle que soit la configuration retenue, les tendances observées sont très similaires et les valeurs moyennes obtenues sont en général très proches.

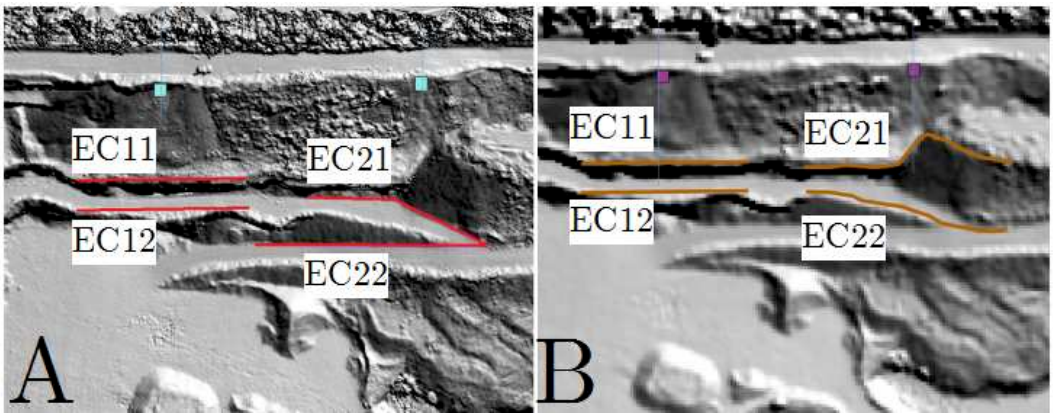


FIGURE 5.20 – Emplacement des écrans : (a) Benchmark interne IMSRN, (b) Benchmark C2ROP.

Grâce à la définition de ces écrans fictifs, chaque participant au Benchmark peut fournir des données statistiques comparatives telles que la moyenne et la distribution des vitesses, les hauteurs de passage et les énergie des blocs lors du franchissement des écrans EC11, EC12, EC21 et EC22.

5.2 Présentation des résultats expérimentaux

Dans cette section nous présenterons les résultats expérimentaux des essais de lâcher de blocs. Dans un premier temps nous analyserons les résultats partiels (vitesse de passage et distance de propagation pour 10 blocs choisis arbitrairement par les organisateurs du Benchmark) qui ont été fournis aux participants à l'issue de la Phase 1 du Benchmark. Par la suite, nous présenterons en détails l'ensemble des résultats (pour tous les blocs) fournis aux participants à l'issue de la Phase 2. Nous analyserons plus particulièrement les données expérimentales de façon à établir des corrélations entre la forme et la masse des blocs sur les distances d'arrêt, les déviation latérales et les vitesses de passage des blocs lors du franchissement des écrans.

5.2.1 Résultats expérimentaux fournis à l'issue de la Phase 1 du Benchmark

La Phase 2 du Benchmark a pour objectif principal de permettre aux participants de reconsidérer les hypothèses de leurs modèles numériques à partir de données partielles issues de la campagne d'essais de lâcher de blocs. Pour cette nouvelle campagne de simulations, chaque participant est invité à redéfinir les trajectoires des blocs en modifiant les paramètres d'entrée et/ou les conditions de départ pour reproduire au mieux la cinématique d'une dizaine de blocs choisis arbitrairement (5 blocs pour le Profil P1 et 5 autres blocs pour le Profil P2). Ces blocs, dont on ne connaissait la masse qu'à l'issue de la Phase 1, ont par la suite pu être classés en fonction du coefficient de forme c_f défini précédemment (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 – Caractéristiques des blocs retenus pour la Phase 2 du Benchmark.

Nom	Masse(kg)	c_f	Forme
Bloc07	1751.3	0.11	Cube
Bloc20	557.6	0.13	Cube
Bloc22	983.2	0.50	Rectangle
Bloc37	1436.3	0.10	Cube
Bloc80	1031.0	0.44	Rectangle
Bloc57	882.8	0.29	Cube
Bloc61	677.9	0.25	Cube
Bloc71	436.8	0.54	Rectangle
Bloc72	1869.0	0.11	Cube
Bloc78	1108.6	0.60	Rectangle

Les données fournies aux participants à l'issue de la Phase 1 du Benchmark sont : la distance de propagation horizontale des blocs (dX), les vitesses de passage (en translation) des blocs pour chaque écran (V-EC11 et V-EC12 pour les écrans EC11 et EC12 du Profil P1 et V-EC21 et V-EC22 pour les écrans EC21 et EC22 du Profil P2) et les occurrences de passage (Tableaux 5.5 et 5.6).

Tableau 5.5 – Résultats fournis pour la Phase 2 du Benchmark - Profil P1.

Nom	Masse (kg)	dX (m)	V-EC11 (m/s)	V-EC12 (m/s)	Pass.EC11	Pass.EC12
Bloc07	1751.3	55.7	1.9	2.2	oui	oui
Bloc20	557.6	46.2	3.2	0.2	oui	oui
Bloc22	983.2	40.5	2.8		oui	non
Bloc37	1436.3	47.9	0.2	18.5	oui	oui
Bloc80	1031.0	38.8	2.8		oui	non

Par comparaison avec les résultats numériques obtenus à l'aveugle lors de la phase 1 du Benchmark, ces résultats, bien que sommaires, ont permis de reconsidérer, pour

Tableau 5.6 – Résultats fournis pour la Phase 2 du Benchmark - Profil P2.

Nom	Masse (kg)	dX (m)	V-EC21 (m/s)	V-EC22 (m/s)	Pass.EC21	Pass.EC22
Bloc57	882.8	55.4	2.1	3.4	oui	oui
Bloc61	677.9	56.4	10.5	2.4	oui	oui
Bloc71	436.8	50.4	6.1	2.6	oui	oui
Bloc72	1869.0	79.2	11.6	6.7	oui	oui
Bloc78	1108.6	45.7	6.5		oui	non

la Phase 2 du Benchmark, le zonage et certaines hypothèses relatives à la nature des terrains sur chacun des profils.

5.2.2 Analyses des résultats expérimentaux fournis à l'issue de la Phase 2 du Benchmark

Les résultats présentés dans cette section ont été fournis à l'issue de la Phase 2 du Benchmark pour permettre aux participants une rétro analyse des résultats numériques produits pour le Benchmark. Ces résultats concernent principalement les zones de dépôt, les déviations latérales des blocs, et les probabilités et les vitesses de passage des blocs lors du franchissement des écrans.

5.2.2.1 Caractéristiques des zones de dépôt et probabilité de passage par les écrans

Les points d'arrêt de chaque bloc ont été répertoriés avec précision. Ils sont présentés pour les deux profils de propagation P1 et P2 sur la Figure 5.21. Sur cette figure on peut définir différentes zones de dépôt caractéristiques et en déduire les pourcentages de blocs qui ont franchis les écrans fictifs (EC11, EC12, EC21 et EC22).

Pour le Profil P1, nous avons représenté sur la Figure 5.21 les différentes zones de dépôt qui sont caractérisées par :

Dépôt 1A – Un seul bloc qui s'arrête près du point de lâcher ;

Dépôt 2A – Un seul bloc qui s'arrête en haut du premier pan rocheux ;

Dépôt 3A – Les blocs qui s'arrêtent entre les écrans virtuels EC11 et EC12 ;

Dépôt 4A – Les blocs qui s'arrêtent au pied du second pan rocheux.

De même, pour le Profil P2, nous avons représenté sur la Figure 5.21 les différentes zones de dépôt qui sont caractérisées par :

Dépôt 1B – Les blocs qui s'arrêtent près de l'écran EC21. Trois de ces blocs dévient sur la droite, en évitant ainsi la pente, et restent bloqués en haut ;

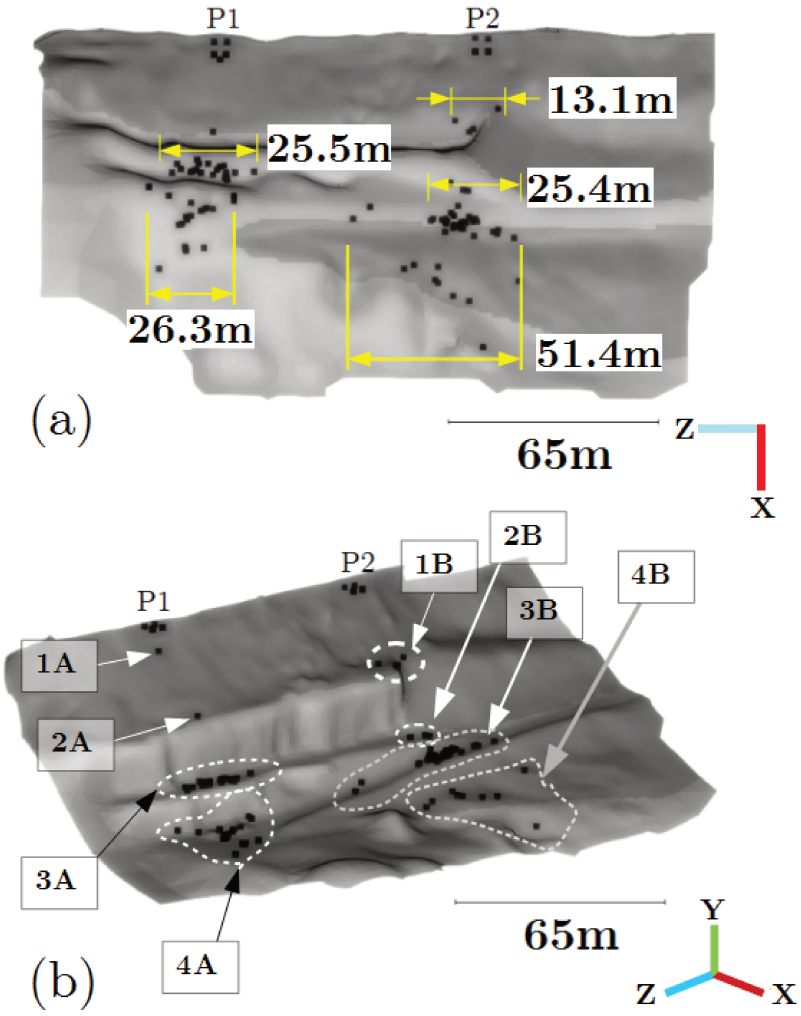


FIGURE 5.21 – Position d'arrêt des blocs : 89 positions repérées et représentées par des points noirs. (a) En jaune, l'étalement des dépôts entre les points les plus éloignés pour chaque profil. (b) Les zones de dépôts sont référencées "A" pour le Profil P1 et "B" pour le Profil P2.

Dépôt 2B – Les blocs qui franchissent l'écran EC21, dévalent la pente, et qui se déposent sur le premier replat intermédiaire (voie de circulation piéton) ;

Dépôt 3B – Les blocs qui franchissent l'écran EC22 et se déposent sur le deuxième replat (deuxième voie de circulation). Certains blocs dévient très fortement en direction du Profil P1 (Figure 5.21) ;

Dépôt 4B – Les blocs qui franchissent l'écran EC22 et qui s'arrêtent au-delà du deuxième ressaut sur le sol de la carrière.

Ces résultats sont résumés dans le Tableau 5.7 où l'on présente pour chaque profil le pourcentage des blocs de chaque dépôts.

Tableau 5.7 – Pourcentage des blocs appartenant aux dépôts A et B pour un total de 89 blocs (41 blocs pour le Profil P1 et 47 pour le Profil P2).

Dépôt	**A**	**B**
1	2.44%	8.51%
2	2.44%	6.38%
3	48.78%	68.09%
4	46.34%	17.02%

Les probabilités de passage des blocs par les écrans virtuels EC11, EC12, EC21 et EC22 sont présentées dans le Tableau 5.8. On constate que pour le Profil P1, une bonne partie des blocs s'est arrêtée avant de franchir le dernier écran (zone de dépôt A3). Pour le Profil P2, la majorité des blocs a franchi les deux écrans (zones de dépôt B3 et B4).

Tableau 5.8 – Probabilité de passage des blocs par les écrans virtuels.

Probabilité de passage	
EC11	95.12%
EC12	46.36%
EC21	100%
EC22	85.11%

La Figure 5.22 résume de manière synthétique l'ensemble des résultats obtenus sous la forme des distributions cumulées des distances de propagation, en mètres, pour chaque zone de dépôt des Profils P1 et P2.

5.2.2.2 Influence de la forme des blocs sur les positions d'arrêt

Il existe peu d'essais expérimentaux à échelle réelle qui établissent des corrélations entre la distance de propagation et le critère de forme des blocs rocheux. Dans cette section, nous utiliserons les critères de forme définis précédemment (Zingg, Williams, Erdogan et Coefficient de forme c_f) pour étudier l'influence de la forme des blocs sur les distances de propagation et la position des points d'arrêt.

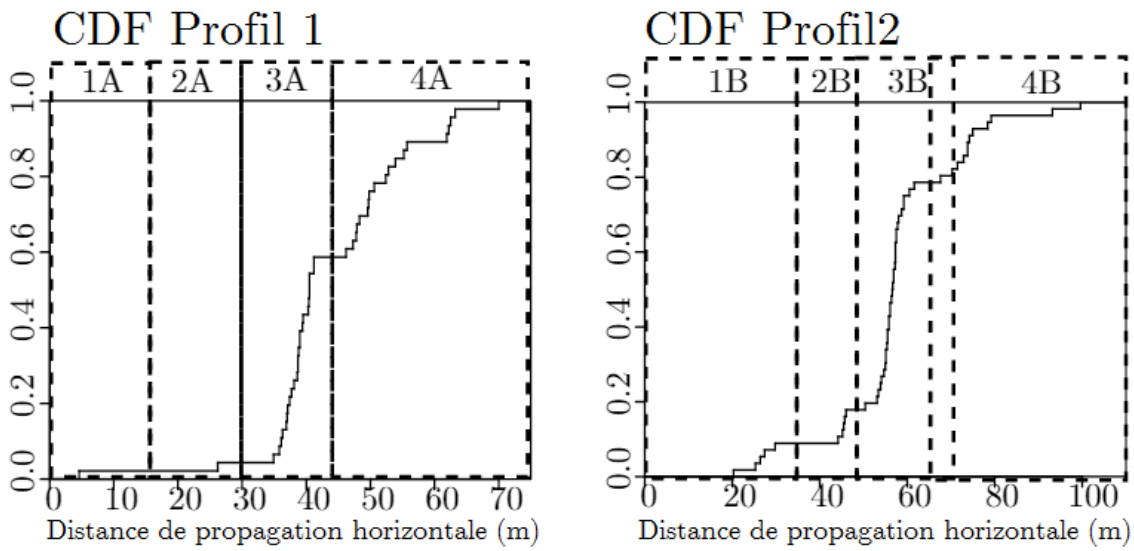


FIGURE 5.22 – Résultats des distributions cumulées (CDF) pour les deux profils en fonction de la distance de propagation (m).

Les résultats obtenus en considérant le coefficient de forme c_f sont présentés sur la Figure 5.23. Le critère de forme c_f permet de distinguer les formes “Cubique” (points rouges) des formes “Rectangulaire” (points bleus). Sur la Figure 5.23(a) on constate que se sont les blocs de forme “Cubique” qui se sont propagés sur des distances importantes alors que les blocs qui se sont arrêtés avant le premier ressaut sont les blocs de forme “Rectangulaire”. Le même constat peut être fait sur la Figure 5.23(b) qui résume les résultats sous la forme des distances de propagation en fonction de la forme des blocs (“Cubique” ou “Rectangulaire”).

Bien que le critère de forme c_f nous permette de définir une tendance où les blocs “Cubique” vont plus loin que les blocs “Rectangulaires”, il reste assez imprécis puisqu’il ne considère pas les blocs ayant des formes complexes (“Aplati” ou fortement “Allongé” par exemple). Pour comparer les résultats entre eux (critères de forme de Zingg, Williams, Erdogan) nous présentons sur les Figures 5.24, 5.25 et 5.26 les résultats sous la forme des distances de propagation en fonction de la géométrie des blocs (points de couleur différente suivant la forme). Bien que l’on puisse toujours s’interroger sur la fiabilité des critères de forme utilisé on constate néanmoins que les blocs de forme régulière (“Cube” ou “Equant”) sont ceux qui vont les plus loin. Les blocs “Allongé” sont ceux qui vont les moins loin et ce pour tous les critères utilisés. Pour les blocs dit “plat” il est difficile de définir une tendance claire compte tenu du nombre restreint de lâcher effectué et de la complexité que l’on a pour caractériser cette forme.

Pour une meilleure compréhension du rôle de la forme des blocs sur les distances de propagation, nous avons étudié comment se répartissaient, dans les dépôts A et B des Profils P1 et P2 (Figure 5.21), les blocs en fonction de leur forme (Tableau 5.9). Dans celui-ci, nous constatons que, pour les dépôts A1, A2, B1 et B2, les blocs sont exclusivement de forme “Rectangulaire”, ce qui confirme les résultats précédents. Pour la zone de dépôt A3, on remarque une répartition entre “Cube” et “Rectangle” plutôt équilibrée (9 cubes et 11 rectangles). Pour le dépôt A4 la répartition n’est plus équi-

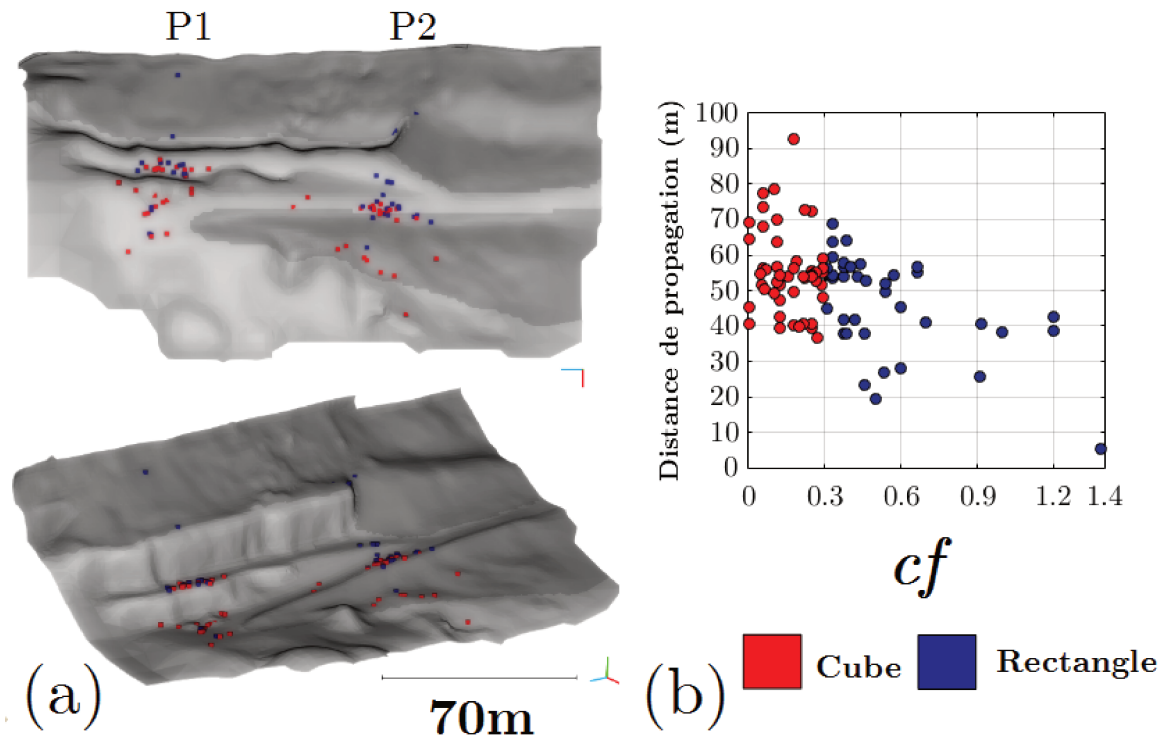


FIGURE 5.23 – Position et distance de propagation des blocs. (a) Vue de dessus et latérale du dépôt : Les blocs “Rectangulaire” sont représentés en bleu et les blocs “Cubique” en rouge. (b) Distribution de la distance de propagation des blocs par rapport au coefficient de forme c_f.

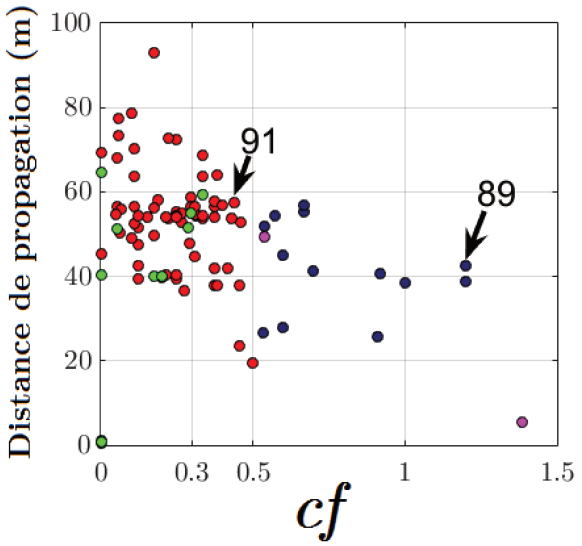


FIGURE 5.24 – Classification de Zingg : Distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les blocs de type “Lame” sont de couleur rose, les “Plat” en vert, les blocs “Allongé” en bleu et les “Equant” en rouge.

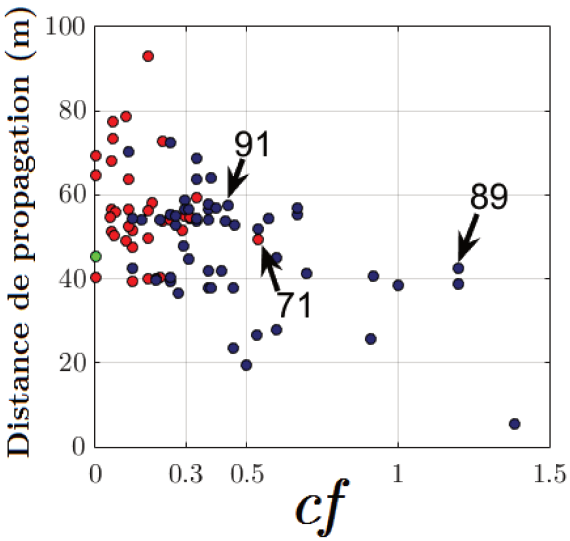


FIGURE 5.25 – Classification de Williams : Distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les points en bleu correspondent aux blocs “Allongé” (51 Blocs) et les points rouges aux blocs “Aplati” (37 Blocs). Les blocs “Sphèrique” (1 bloc) sont représentés en vert.

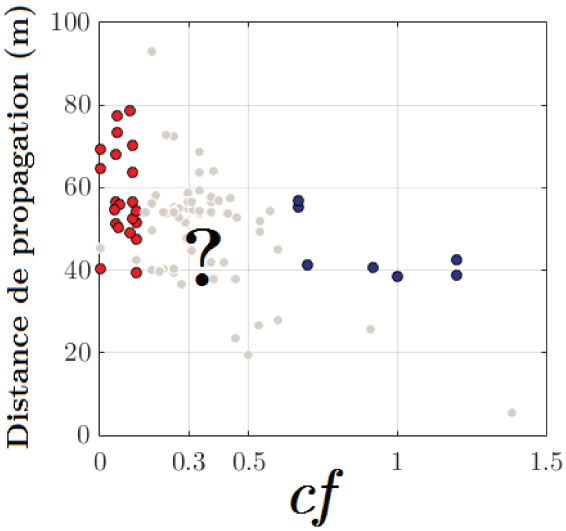


FIGURE 5.26 – Classification de Erdogan : distance de propagation en (m) en fonction de la forme des blocs. Les blocs “Allongé” sont en bleu (7 blocs), les blocs de forme “Aplati” en rouge (22 blocs) et les blocs sans classement en gris (60 blocs).

probable : 34.15% des cubes (14 blocs) se trouvent dans cette zone, contre seulement 12.2% de rectangles (5 blocs). Autrement dit, pour le Profil P1, il y a 75% de probabilité qu'un bloc se trouvant en bas de la carrière soit un "Cube" et 25% de chance qu'il soit "Rectangulaire". Pour le dépôt B3 (Profil P2), nous observons que les "Cube" et les "Rectangle" se répartissent de manière équiprobable : 31.91% contre 34.04%, respectivement. En revanche, dès que les blocs franchissent la deuxième voie de circulation, seulement 11% des blocs qui se déposent dans la zone B4 sont "Rectangulaires", contre 89% de "Cube" ce qui confirme la suprématie des blocs de forme "homogène" à se propager sur les grandes distances.

Tableau 5.9 – Répartition des blocs dans les dépôts A et B des Profils P1 et P2 (Figure 5.21) en fonction de leur forme (Classement selon le critère de forme c_f).

	A		**B**	
	Cubes	Rectangles	Cubes	Rectangles
1	0.00%	2.44%	0.00%	8.51%
2	0.00%	2.44%	0.00%	6.38%
3	21.95%	26.83%	31.91%	34.04%
4	34.15%	12.20%	17.02%	2.13%

5.2.2.3 Influence de la masse des blocs sur les distances de propagation

Pour déterminer l'influence de la masse des blocs sur les distances de propagation, nous avons sur la Figure 5.27, représenté chaque bloc par un point dont la couleur est caractéristique de sa forme (fonction du coefficient de forme c_f). Nous constatons sur cette figure, que la relation entre la masse du bloc et les distances de propagation est bien moins évidente que celle entre le coefficient de forme (points de couleurs différentes) et les distances de propagation. Même si nous constatons que les grandes distances de propagation sont souvent obtenues par les gros blocs (masse > 1000 kg), cette tendance est plutôt liée à la géométrie des gros blocs qui ont une forme plutôt régulière (valeurs de c_f petite). Par conséquent, nous pouvons conclure que la forme d'un bloc joue un rôle beaucoup plus important sur les distances de propagation que la masse du bloc ou sa taille.

5.2.2.4 Influence de la forme des blocs sur la déviation latérale des trajectoires

Précédemment nous avons analysé l'influence de la géométrie des blocs sur les distances de propagation. Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la forme des blocs sur la dispersion latérale des trajectoires. Récemment, [Caviezel *et al.*, 2018] ont effectué une campagne d'essais à grande échelle dans les Alpes suisses afin de corréler la géométrie des blocs testés et leur dépôt. Les blocs utilisés avaient des géométries standardisées selon les recommandations de l'EOTA (European Organization for Technical Assessment) qui figurent dans l'ETAG 027 : *Falling Rock Protection Kits* (European Technical Approval Guideline). Ils ont différencié la forme des blocs selon la

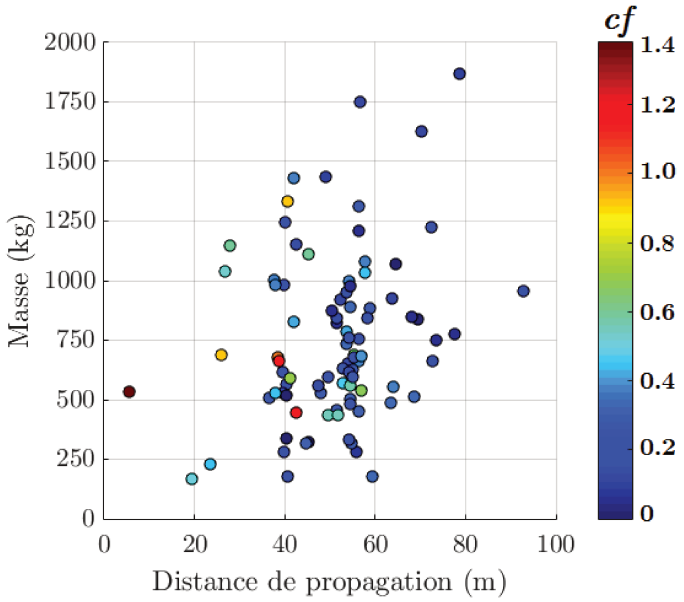


FIGURE 5.27 – Distance de propagation des blocs (m) en fonction de la masse (kg). Chaque point représente un bloc du dépôt dont la couleur est fonction du coefficient de forme c_f.

classification de [Sneed & Folk, 1958], qui prend en considération les trois longueurs caractéristiques L_1, L_2 et L_3, qu'ils ont appelés respectivement *Width* (Largeur), *Length* (Longueur) et *Thickness* (épaisseur). Les résultats principaux qui ont été obtenus sont synthétisés sur la Figure 5.28 qui présente le site expérimental étudié et la position d'arrêt des blocs (points roses pour les blocs "Aplati" et point bleus pour les blocs "Equant"). Les auteurs ont conclu que les blocs "Aplati" allaient aussi loin que les blocs "Equant", mais en ce qui concerne la déviation latérale, que les blocs "Aplati" avaient tendance à se disperser beaucoup plus. D'autres auteurs ont reportés que, pour des conditions de départ différentes et pour d'autres types de terrain, les blocs "Aplati" avaient également tendance à plus se disperser latéralement, alors que les blocs "Equant" se déposaient en plus grande quantité au voisinage de l'axe de propagation moyen.

Les résultats en termes de déviation des blocs, obtenus dans le cadre de la campagne expérimentale C2ROP, sont présentés sur la Figure 5.29 et résumés dans le Tableau 5.10. Sur la Figure 5.29 on constate que l'amplitude de la dispersion latérale est assez importante : 40.8°pour le Profil P1 et 48.5°pour le Profil P2. Le Tableau 5.10 présente les résultats des déviations latérales, en degrés, mesurées à partir des positions des points d'arrêt, en fonction du critère de forme défini par [Zingg, 1935]. Compte tenu du nombre peu important de blocs de forme "Rectangulaire"("Lame" et "Allongé") qui ont été lâchés (7 pour le Profil P1 et 8 pour le Profil P2), nous avons choisi, par simplification, de les regrouper sous la dénomination "Rectangle". On constate dans le Tableau 5.10 que l'amplitude de la dispersion latérale (somme des valeurs maximales et minimales en valeurs absolues) est plus élevée pour les blocs "Equant" (32.34°pour le Profil P1 et 48.49°pour le Profil P2) que pour les blocs "Plat" (26.28°pour le Profil P1 et 14.06°pour le Profil P2). Ceci va à l'encontre des résultats de la littérature, mais le nombre limité de blocs "Aplati" qui ont été lancés (8 max) ne nous permet pas d'établir

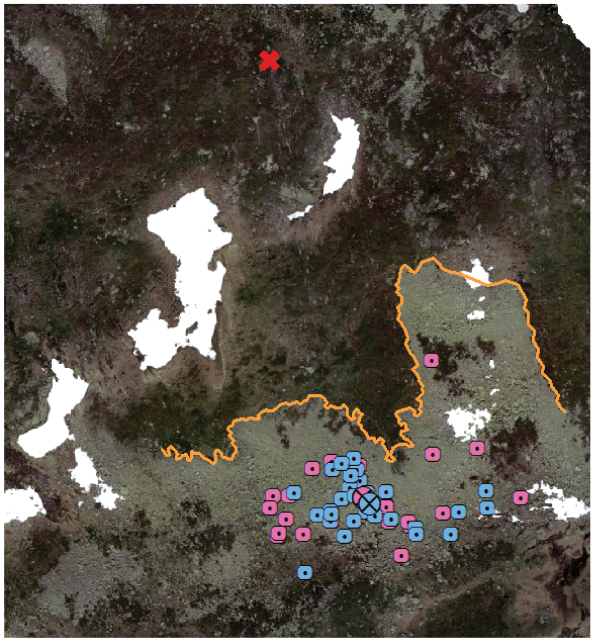


FIGURE 5.28 – Site expérimental situé dans les Alpes Suisses, près du lieu-dit Chant Sura. Position des points d'arrêt des blocs "Aplati" (rose) et des blocs "Equant" (bleu). Le point de départ est matérialisé par une croix rouge. (A. Caviezel et al., non publié, communication personnelle).

des généralités sur la capacité de dispersion globale des blocs.

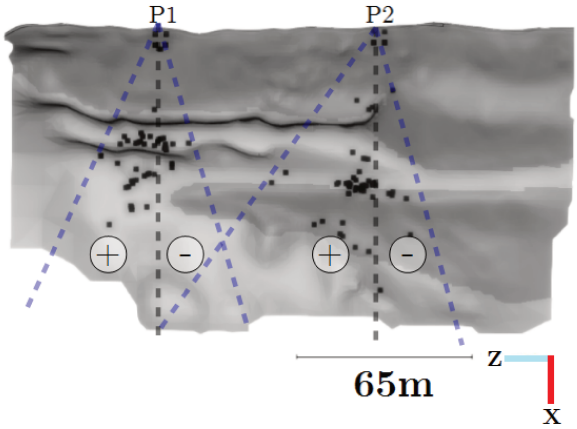


FIGURE 5.29 – Vue de dessus de la zone de dépôt des blocs. L'angle de déviation des blocs est défini par rapport à l'axe X perpendiculaire au pan de la carrière. La convention de signe retenue est : valeurs positives (+) à gauche ; et valeurs négatives (-) à droite.

5.2.2.5 Vitesses de passage des blocs lors du franchissement des écrans

Les vitesses de translation et de rotation des blocs au niveau des écrans fictifs (EC11, EC12, EC21 et EC22) sont présentées sous forme de valeurs moyennes, médianes, écarts types et du quartile à 95% respectivement dans les Tableaux 5.11 et

Tableau 5.10 – Déviation latérale des blocs selon leurs formes - “Cube”, “Equant”, “Plat” et “Rectangle” (classement de Zingg [1935]) en termes de déviation moyenne, maximale et minimale, mesurées à partir des points d’arrêt par rapport à l’axe X.

Profil P1			
	θ Moy (°)	θ Max (°)	θ Min (°)
Cube “Equant”	+7.11	+25.61	-6.73
Cube “Plat”	+3.14	+11.11	-15.17
Rectangle	+5.04	+19.88	-2.29
Profil P2			
	θ Moy (°)	θ Max (°)	θ Min (°)
Cube “Equant”	+7.84	+34.95	-13.54
Cube “Plat”	-2.59	+4.44	-9.62
Rectangle	+5.13	+11.95	-5.36

5.12. On constate que les valeurs moyennes des vitesses de translation varient suivant les écrans de 1.9 m/s à 13.2 m/s avec des écarts types plus importants pour le Profil P1 que pour le Profil P2. Les vitesses de rotation des blocs (en rotation par seconde) sont en revanche assez similaires d’un écran à l’autre et d’un profil à l’autre (valeur moyenne d’environ 1.6 rps). Les écarts types sont également assez faibles.

Tableau 5.11 – Vitesses de translation en m/s - Essais expérimentaux.

	Profil 1 EC11	Profil 1 EC12	Profil 2 EC21	Profil 2 EC22
Probabilité de passage (%)	95.8	39.6	92.9	82.1
Moyenne (m/s)	1.9	13.2	7.9	4.2
Médiane (m/s)	1.1	18.6	8.1	3.1
Quartile à 95% (m/s)	6.8	19.2	11.2	8.8
Écart type (m/s)	8.5	8.5	2.2	3

Tableau 5.12 – Vitesses de rotation en rps - Essais expérimentaux.

	Profil 1 EC11	Profil 1 EC12	Profil 2 EC21	Profil 2 EC22
Probabilité de passage (%)	95.8	39.6	92.9	82.1
Moyenne (rps)	1.43	1.27	1.67	1.79
Médiane (rps)	1.49	1.30	1.67	1.71
Écart type (rps)	0.38	0.39	0.52	0.55

5.3 Résultats des simulations numériques

5.3.1 Déroulement du Benchmark

Le Benchmark C2ROP, organisé par l'IRSTEA, s'est déroulé en deux phases distinctes étalées sur un intervalle de temps de 1 an. La première série de modélisation numérique (Phase 1) a été réalisée *"à l'aveugle"* afin de tester la capacité prédictive des logiciels et l'expertise des opérateurs sur la base de données succinctes recueillies sur le terrain. Après remise des résultats, des données partielles ont été fournies aux participants pour qu'ils affinent leurs hypothèses et ajustent les paramètres des modèles numériques grâce à des données factuelles et moins subjectives que celles récoltées sur le terrain. Suite aux analyses qui ont été faites, de nouvelles simulations numériques ont pu être effectuées puis les résultats transmis aux organisateurs (Phase 2). A ce jour les résultats du Benchmark n'ont pas encore été divulgués ni publiés. Pour résumer, les deux phases du Benchmark ont été menées de la manière suivante :

- Phase 1 (Octobre 2017) : Essais à l'aveugle. Les participants testent les codes numériques selon les données disponibles (Section 5.1). Les participants fournissent les résultats (distances de propagation et trajectoires des blocs (2D ou 3D), probabilités de passage par les écrans, énergies maximales, prise en compte de l'énergie de rotation, hauteurs et vitesses de passage, etc.). Les participants sont invités à assister à la campagne de lâcher de blocs si – et seulement si – ils avaient fourni les résultats au préalable.
- Phase 2 (Octobre 2018) : Redéfinition des hypothèses des modèles numériques par comparaison avec les résultats expérimentaux (positions d'arrêt et vitesses de passage) de 5 blocs choisis arbitrairement pour chacun des deux profils (Profil P1 et Profil P2). Ces blocs, dont on ne connaissait la masse qu'à l'issue de la Phase 1, ne sont pas représentatif en termes de forme ou de masse de l'ensemble des blocs qui ont été lâchés. Des formes numériques quelconques ont donc été utilisées pour la redéfinition des paramètres de calcul et des zonages, seuls les volume et masse des blocs ont été respectés.

Parallèlement à ces deux phases, des études paramétriques ont été réalisées pour mieux comprendre l'influence de certains paramètres (taille des blocs, géométrie des blocs, nature de terrain). Les résultats obtenus à l'issue de la Phase 2 du Benchmark (positions d'arrêt et vitesses de passage des blocs) ont pu être comparés aux résultats expérimentaux, quand ceux-ci ont été rendus disponibles (partiellement ou en totalité).

5.3.2 Paramètres et hypothèses de calcul

5.3.2.1 Paramètres d'interaction

Lors de la Phase 1 (tests dits "*à l'aveugle*"), les paramètres d'interaction (Tableau 5.13) ont été identifiés par F. Asadi, stagiaire au laboratoire 3SR durant l'année 2016. Les paramètres ont été obtenus, via la procédure de reconstruction trajectogra-

phique décrite dans la section 3.1.4 du Chapitre 2, grâce à des vidéos (Figure 5.30) réalisées sur le site avant la campagne d'essais (visite de terrain). A défaut de toute autre information et bien qu'approximative, puisque que la taille des blocs utilisés lors de la procédure de détermination des paramètres (éprouvettes de béton de section triangulaire) est bien inférieure à celles des blocs réels, cette procédure nous a permis d'obtenir des ordres de grandeur des paramètres réalistes.

FIGURE 5.30 – Capture d'écran d'une vidéo utilisée pour l'estimation des paramètres de contact.

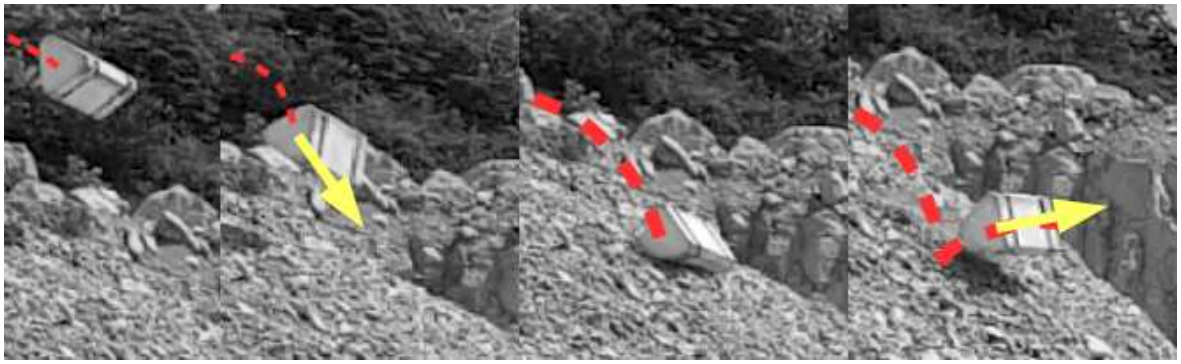


TABLEAU 5.13 – Paramètres de contact obtenus par F. Asadi avec une éprouvette de béton (Valeurs moyennes obtenues à partir de 5 lâchers de blocs).

	en^2	μ	μ_R	k_n (N.m)	k_t (N.m)	k_r (N.m/rad)
Roche	0.01	0.30	0.00	1e+8	3.6e+7	1e+7
Pente Caillouteuse	0.01	0.70	0.18	1e+8	1e+7	1e+7

5.3.2.2 Géométries des blocs numériques

Plusieurs géométries de bloc numérique ont été utilisées à différents stades du Benchmark. Les Blocs Num1A, Num2A, Num2B et Num3A (Tableau 5.14) ont des formes similaires à celles des blocs décrits dans la section 1.1.2.2 (formes 1, 2 et 3). Seul le Bloc Num3A de forme 3 correspond à une géométrie et à un volume de blocs réellement utilisés pendant la campagne d'essai (Bloc89). Les autres formes sont réalistes mais correspondent à des blocs repérés et reconstruits avant la campagne d'essais. La forme 2 utilisée pour le Bloc Num2A a été aussi appliquée au Bloc Num2B, mais dans une version agrandie. La forme 1 a également été utilisée à des échelles différentes lors de la phase 2 du Benchmark.

5.3.2.3 Orientation de départ des blocs

Les blocs ont été lâchés sans vitesse initiale. Ne connaissant pas leurs orientations de départ, les simulations numériques ont été réalisées en faisant pivoter successivement le bloc d'un angle de 45 degrés par rapport à l'un des trois axes principaux (Figure 5.31).

TABLEAU 5.14 – Caractéristiques des blocs numériques utilisés.

Nom	Forme	Volume (m^3)	Masse(kg)	Ix	Iy	Iz
Bloc Num1A	1	0.137	343.5	12.27	20.286	16.397
Bloc Num2A	2	0.589	1472.5	141.87	228.65	176.74
Bloc Num2B	2	0.707	1767.5	191.27	317.42	240.40
Bloc Num3A	3	0.205	514.00	48.75	55.75	18.40

Nous avons donc un total de $4^3 = 64$ orientations de départ et 4 points de lâcher comme défini expérimentalement, soit un nombre total de simulations par blocs de : $N_{simulations} = 4 \times 64 = 256$.

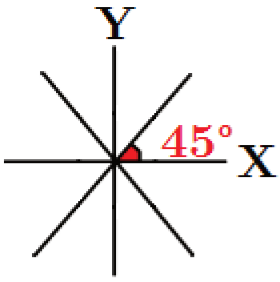


FIGURE 5.31 – Orientation de départ des blocs dans le plan XY.

5.3.2.4 Zonage des propriétés de terrain

Le zonage consiste à différencier les zones de terrain pour lesquelles la nature des rebonds ou les mécanismes de dissipation d'énergie vont être différents. Cette analyse in situ nécessite une grande expérience et de nombreux retours d'expérience pour obtenir un zonage représentatif du site étudié. Dans le cadre du Benchmark plusieurs hypothèses concernant le zonage (Figure 5.32) ont été proposées (Configurations A, B et C).

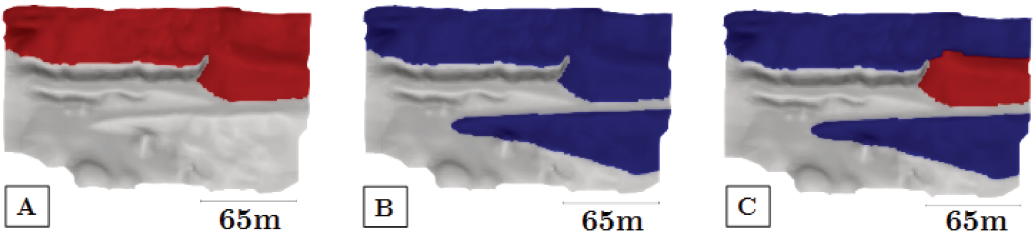


FIGURE 5.32 – Zonages A, B et C utilisés lors des simulations numériques.

Le premier zonage (Configuration A) est celui qui a été utilisé pour la phase 1 du Benchmark. Ce zonage est relativement minimaliste, mais nécessite un nombre raisonnable de paramètres (néanmoins difficiles à déterminer ou à estimer compte tenu du peu d'expérience acquises sur le terrain pendant la thèse). Les paramètres de contact utilisés pour la Configuration A (Tableau 5.15) sont ceux déterminés lors des visites du

site, avant le lâcher des blocs (pente caillouteuse - zone rouge et roche – zone grise). Les raideurs des contacts, ayant peu d'influence sur les résultats, sont celles qui ont été estimées initialement et qui sont présentées dans le Tableau 5.13.

Deux autres configurations (B et C) ont été proposées par la suite sur la base des résultats partiels diffusés lors de la Phase 2 du Benchmark. Pour la configuration B, le zonage ainsi que les paramètres de contact ont été sensiblement modifiés (le sol du fond de carrière étant plus proche d'un sol meuble que de la roche). Pour la configuration C, établie comme celle la plus adéquate, une différenciation entre le sol meuble et le sol de la pente caillouteuse a été considérée.

Tableau 5.15 – Principaux paramètres de contact pour les zonages A, B et C.

	A			**B**			**C**		
	en^2	μ	μ_R	en^2	μ	μ_R	en^2	μ	μ_R
Zone Rouge	0.01	0.70	0.18	-	-	-	0.01	0.70	0.18
Zone Bleue	-	-	-	0.01	0.70	0.35	0.01	0.70	0.35
Zone Grise	0.01	0.30	0.00	0.01	0.30	0.00	0.01	0.30	0.00

5.3.3 Résultats transmis aux organisateurs du Benchmark à l'issue de la Phase 1

Les tableaux synthétiques résumant les résultats de la Phase 1 sont présentés ci-dessous. Il s'agit des simulations effectuées en utilisant les géométries Num1A et Num2A et la configuration de zonage A de la Figure 5.32(a). Rappelons que le choix arbitraire des formes Num1A et Num2A (formes cubiques) n'est en rien représentatif des formes réelles des blocs qui ont été utilisées lors de la phase expérimentale. Si les valeurs moyennes en terme de vitesse de passages sont assez voisines, les valeurs max des vitesses présentent plus de variabilité. Les énergies de passages des blocs sont bien évidemment différentes puisque les blocs Num1A et Num1B ont des masses différentes. Ces résultats, très synthétiques et qui se limitent aux vitesses et énergies de passage des blocs lors du franchissement des écrans, ont été transmis tels quels à l'organisation du Benchmark C2ROP comme résultats de la Phase 1 et ce pour les deux formes de blocs étudiées (Tableaux 5.16, 5.17, 5.18 et 5.19 pour le Bloc Num1A et Tableaux 5.20, 5.21, 5.22 et 5.23 pour le Bloc Num2A). Les pourcentages des blocs franchissant les écrans en fonction de leur forme sont présentés dans le Tableau 5.24. Là encore, des disparités parfois importantes sont à constater.

5.3.4 Analyses et réflexions menées lors de la Phase 2 du Benchmark

Après avoir effectué à l'aveugle les premières modélisations numériques, il a été proposé aux participants du Benchmark de reconsidérer leurs hypothèses de calcul en mettant à leur disposition un certain nombre de résultats expérimentaux (résultats en

Tableau 5.16 – Bloc Num1A - EC11 - Profil P1 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.49	0.39	2.11	1.46	3.40
v (m/s)	7.91	1.80	10.62	8.23	14.05
Énergie translation (kJ)	11.32	4.77	19.38	11.63	33.91
Énergie rotation (kJ)	1.05	0.85	2.58	0.83	4.64
ω (rps)	1.88	0.90	3.27	1.86	4.38
Énergie totale (kJ)	12.37	5.62	21.96	12.47	38.55

Tableau 5.17 – Bloc Num1A - EC12 - Profil P1 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	5.37	2.86	10.64	4.85	12.96
v (m/s)	16.36	5.13	21.23	18.65	23.54
Énergie translation (kJ)	50.49	24.25	77.47	59.77	95.21
Énergie rotation (kJ)	1.90	2.06	6.34	1.36	13.70
ω (rps)	2.49	1.28	5.12	2.37	7.53
Énergie totale (kJ)	52.39	26.31	83.80	61.13	108.92

Tableau 5.18 – Bloc Num1A - EC21 - Profil P2 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.28	0.49	2.15	1.21	3.36
v (m/s)	7.79	2.33	11.69	7.71	15.83
Énergie translation (kJ)	11.37	6.46	23.47	10.21	43.07
Énergie rotation (kJ)	1.15	0.93	2.88	0.98	4.76
ω (rps)	1.96	0.95	3.45	2.02	4.44
Énergie totale (kJ)	12.52	7.39	26.35	11.20	47.83

Tableau 5.19 – Bloc Num1A - EC22 - Profil P2 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	3.28	1.35	5.65	3.10	8.34
v (m/s)	11.91	2.31	15.52	11.96	21.54
Énergie translation (kJ)	25.31	9.97	41.40	24.59	79.73
Énergie rotation (kJ)	2.00	1.42	4.21	1.82	9.09
ω (rps)	2.64	1.14	4.18	2.75	6.13
Énergie totale (kJ)	27.30	11.39	45.62	26.41	88.82

Tableau 5.20 – Bloc Num2A - EC11 - Profil P1 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.84	0.49	2.47	1.82	6.22
v (m/s)	8.68	1.53	10.95	8.73	13.41
Énergie translation (kJ)	57.25	19.48	88.48	56.20	132.61
Énergie rotation (kJ)	7.05	4.25	13.22	6.61	31.57
ω (rps)	1.53	0.51	2.21	1.56	3.42
Énergie totale (kJ)	64.30	23.73	101.70	62.81	164.19

Tableau 5.21 – Bloc Num2A - EC12 - Profil P1 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	3.39	3.41	9.60	3.30	14.24
v (m/s)	17.14	3.97	20.98	18.59	21.77
Énergie translation (kJ)	228.22	84.01	324.47	254.85	349.35
Énergie rotation (kJ)	10.66	8.88	30.19	8.68	63.18
ω (rps)	1.86	0.71	3.34	1.79	4.83
Énergie totale (kJ)	238.88	92.89	354.66	263.53	412.53

Tableau 5.22 – Bloc Num2A - EC21 - Profil P2 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.50	0.55	2.31	1.44	6.06
v (m/s)	8.17	2.29	12.03	8.07	15.24
Énergie translation (kJ)	53.11	28.39	106.65	48.01	171.30
Énergie rotation (kJ)	6.24	4.26	14.74	5.92	26.29
ω (rps)	1.42	0.54	2.33	1.48	3.12
Énergie totale (kJ)	59.35	32.65	121.39	53.93	197.58

Tableau 5.23 – Bloc Num2A - EC22 - Profil P2 - Zonage A.

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	3.83	1.22	6.03	3.62	6.72
v (m/s)	12.42	2.00	15.28	12.54	16.27
Énergie translation (kJ)	116.63	35.84	172.13	115.90	195.20
Énergie rotation (kJ)	11.51	6.03	22.84	10.75	27.23
ω (rps)	1.97	0.61	2.91	1.99	3.17
Énergie totale (kJ)	128.14	41.86	194.97	126.65	222.43

Tableau 5.24 – Pourcentage de blocs franchissant les écrans EC11, EC12, EC21 et EC22 en fonction de leur forme (Num1A ou Num2A).

Profil P1	Num1A	Num2A
EC11	90.63%	98.25%
EC12	82.64%	97.66%
Profil P2	Num1A	Num2A
EC21	92.01%	98.25%
EC22	77.08%	78.95%

termes de vitesse et d'énergie de passage pour 5 blocs du Profil P1 et 5 blocs du Profil P2 - Tableaux 5.5 et 5.6). Pour évaluer la pertinence des simulations effectuée lors de la Phase 1 du Benchmark nous avons tenté de reproduire les résultats expérimentaux en utilisant le Zonage A. La forme des blocs utilisée pour les simulations est la Forme 1 définie précédemment (bloc cubique) et le volume des blocs numériques a été ajusté par homothétie aux volumes des blocs réels (les blocs numériques ainsi définis sont référencés Num1A-XX, XX étant le numéro du bloc utilisé lors de la campagne expérimentale). Certains des blocs expérimentaux ont été classés rétrospectivement comme rectangulaires mais, à l'époque où les simulations ont été faites, les données concernant les géométries réelles des blocs n'avaient pas été diffusées. Les simulations numériques ont été effectuées en considérant deux modes de pondération : OW : overlap weight et NW : numberweight (Chapitre 3). Les résultats concernant le Profil P1 sont présentés dans le Tableau 5.25 ; et ceux relatifs au Profil P2 dans le Tableau 5.26. Chaque ligne du tableau représente les résultats d'une seule simulation, avec une orientation du bloc et un point de départ choisis arbitrairement.

Tableau 5.25 – Résultats des simulations numériques - Profil P1 - Zonage A.

	Masse (kg)	DH (m)	V EC11(m/s)	V EC12(m/s)	Pass EC21	Pass EC22
Bloc Num1A-07 (NW)	1751.3	71.01	5.9	19.0	oui	oui
Bloc Num1A-07 (OW)	1751.3	36.53	4.6	-	oui	non
Bloc Num1A-20 (NW)	557.6	108.64	8.5	17.2	oui	oui
Bloc Num1A-20 (OW)	557.6	26.31	3.1	-	oui	non
Bloc Num1A-22 (NW)	983.2	57.44	3.1	4.1	oui	oui
Bloc Num1A-22 (OW)	983.2	69.01	5.7	15.2	oui	oui
Bloc Num1A-37 (NW)	1436.3	54.80	3.8	3.1	oui	oui
Bloc Num1A-37 (OW)	1436.3	35.26	2.9	0.0	oui	non
Bloc Num1A-80 (NW)	1031.0	61.84	3.9	6.2	oui	oui
Bloc Num1A-80 (OW)	1031.0	69.62	7.1	17.2	oui	oui

Comme on peut le constater, les deux types de pondération testés changent la manière dont le bloc se propage sur le terrain. Pour le Bloc Num1A-07, par exemple, la distance de propagation avec la pondération NW est le double de celle obtenue avec la pondération OW. Ceci n'a rien de surprenant puisqu'un changement de l'orientation de

Tableau 5.26 – Résultats des simulations numériques - Profil P2 - Zonage A.

	Masse (kg)	DH (m)	V EC21(m/s)	V EC22(m/s)	Pass EC21	Pass EC22
Bloc Num1A-57 (NW)	882.8	86.6	8.5	9.36	oui	oui
Bloc Num1A-57 (OW)	882.8	59.4	6.3	8.75	oui	oui
Bloc Num1A-61 (NW)	677.9	80.2	8.0	8.87	oui	oui
Bloc Num1A-61 (OW)	677.9	76.3	7.7	8.88	oui	oui
Bloc Num1A-71 (NW)	436.8	100.4	6.8	9.13	oui	oui
Bloc Num1A-71 (OW)	436.8	108.6	7.8	9.40	oui	oui
Bloc Num1A-72 (NW)	1869.0	88.9	7.2	8.85	oui	oui
Bloc Num1A-72 (OW)	1869.0	58.3	3.7	9.08	oui	oui
Bloc Num1A-78 (NW)	1108.6	20.9	2.7	-	oui	non
Bloc Num1A-78 (OW)	1108.6	81.7	2.6	9.04	oui	oui

départ du bloc, ou sa position de lâcher, engendre des trajectoires parfois différentes. Un changement, même minime des forces d'interaction, à chaque rebond introduits une variabilité importante. La géométrie très accidentée du couloir de propagation accentue également les écarts dans le cas où le bloc s'arrête en haut de la pente ou poursuit son parcours le long de la pente. Ne connaissant pas la géométrie réelle du bloc, il n'a pas été jugé utile à l'époque d'effectuer plusieurs séries de simulations numériques pour un même bloc en faisant varier la position du lâcher et l'orientation de départ du bloc. La tendance globale que l'on peut d'ores et déjà constater est que pour le Profil P1 les blocs ont des vitesses plus importantes que celles obtenues expérimentalement et que leur distance de propagation est beaucoup plus importante. Au vu de ces résultats, il apparaît que le zonage choisi initialement (Zonage A) et les valeurs des paramètres de contact n'ont pas été optimisées. La démarche d'optimisation que nous avons retenue pour améliorer nos résultats est basée sur les réflexions et remarques suivantes :

- Le zonage A pour le Profil P1, n'est pas cohérent avec les résultats obtenus et les données de terrain puisque l'on a attribué à ce profil les mêmes paramètres que ceux retenus pour la pente du Profil P2 (Figure 5.2) pourtant de nature très différente : pente caillouteuse pour le Profil P2 et sol meuble pour la zone de lâcher du Profil P1. En fait, un bloc qui impacte la zone de lâcher du Profil P1 est globalement plus amorti que dans la pente caillouteuse, puisque le sol subit une plastification au moment de l'impact, occasionnant plus de dissipation d'énergie par frottement-roulement. Les vitesses de passage obtenues numériquement avec le zonage A au niveau des deux premiers écrans pour les deux Profils P1 et P2 (EC11 et EC21, respectivement) sont plus importantes (de l'ordre de 5 m/s) que celles des blocs expérimentaux, d'où des vitesses excessives au niveau des écrans EC12 et EC22 (supérieures de 20 m/s aux résultats expérimentaux) et des distances de propagation non réalistes. Nous avons donc procédé à une étude paramétrique pour laquelle nous avons fixé les valeurs de e_n^2 et μ (qui n'ont pas d'influence importante sur la vitesse des blocs) et avons fait varié μ_R.

- La Figure 5.33 présente succinctement les résultats de l'étude paramétrique effectuée pour le calage des paramètres de contact du Profil P1 (Zonage A) pour le Bloc Num1A-07. Nous remarquons que plus μ_R est faible, plus la vitesse de passage par l'écran EC11 est importante. Pour μ_R égal à 0.30, la vitesse de passage est d'environ 4 m/s, ce qui est excessif par rapport à la valeur expérimentale (vitesse moyenne d'environ 2 m/s - Tableau 5.5). En augmentant μ_R à 0.35, les blocs franchissent l'écran EC11, avec une vitesse d'environ 2 m/s qui correspond à la valeur escomptée. Cette procédure a été appliquée et validée pour les 5 blocs de chaque profil (Num1A-07, Num1A-20, Num1A-22, Num1A-37 et Num1A-80 pour le Profil P1 et Num1A-57, Num1A-61, Num1A-72, Num1A-72 et Num1A-78 pour le Profil P2). Nous avons donc retenue cette valeur de μ_R de 0.35 pour le Profil P1.

- Pour mieux comprendre les effets du changement des paramètres de contact sur la trajectoire moyenne des blocs du Profil P2, nous avons appliqué la valeur de μ_R de 0.35 au Profil P2 (Zonage B) pour comprendre si la zone en amont de la pente caillouteuse avait la même *"capacité dissipative"* que celle du Profil P1 et si l'on pouvait attribuer ces mêmes paramètres à la pente caillouteuse qui ralentit très fortement les blocs. En fait, lorsque l'on attribue à toute la zone bleue des paramètres dissipatifs élévés, la décélération des blocs est telle que 99% des blocs s'arrêtent en haut de la pente ce qui n'est pas conforme aux résultats expérimentaux. Les résultats pour le Profil P1 sont satisfaisants mais pas pour le Profil P2.

- Une dernière série de simulations numériques a été réalisée en ajoutant une zone spécifique correspondant à la pente caillouteuse (Zonage C). Avec cette ultime modification (μ_R égal à 0.18 sur la pente caillouteuse comme proposé initialement pour le zonage A suite aux essais de calibration), l'ensemble des blocs franchissent l'écran EC21 en moyenne aux même vitesses que celle des blocs expérimentaux. Ils dissipent de l'énergie lors du passage par la pente - mais pas excessivement au point de les arrêter - et finissent par se déposer sur la voie de circulation ou le carreau de la carrière comme observé expérimentalement.

Au vu des résultats, le zonage C semble le plus approprié. Il a été utilisé par la suite pour les études paramétriques et analyses complémentaires réalisées après la Phase 2 du Benchmark.

5.3.5 Étude paramétrique réalisée après la Phase 2 du Benchmark C2ROP – Zonage C

Les résultats présentés dans cette section concernent l'étude paramétrique réalisée après la Phase 2 du Benchmark C2ROP en utilisant le zonage C qui a été jugé le plus réaliste. Afin de déterminer l'influence de la géométrie des blocs sur les distances de propagation et la déviation latérale des blocs nous présenterons au préalable les résultats obtenus avec les blocs numériques Num1A, Num2A, Num2B et Num3A qui diffèrent entre eux par leur forme (Blocs Num1A, Num2A et Num3A) ou leur volume

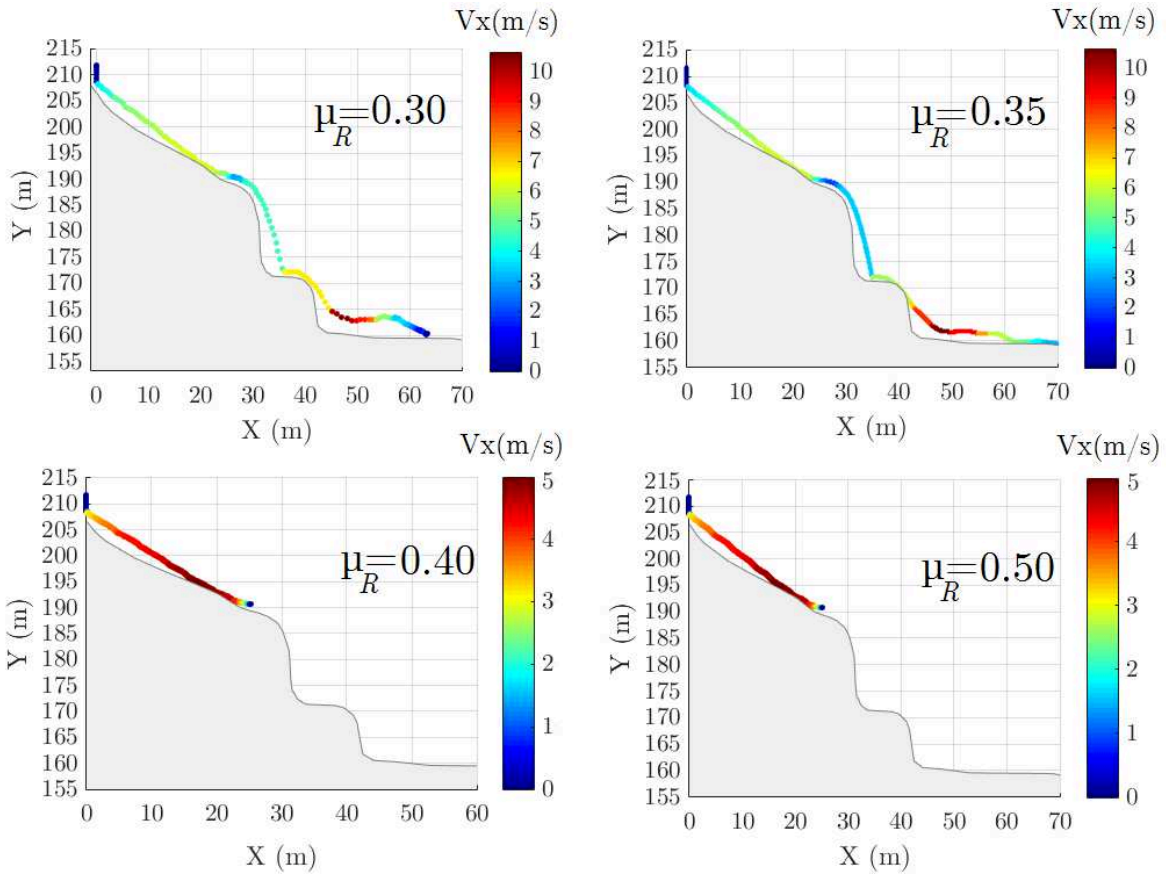


FIGURE 5.33 – Influence de μ_R sur la trajectoire et la vitesse de passage du Bloc Num1A-07 par l'écran EC11 : Les courbes représentent la position et les vitesses sur l'axe X (V_x) du bloc. Pour des valeurs de μ_R supérieures à 0.35, le bloc s'arrête avant de franchir l'écran positionné en X = 25 m).

(Blocs Num2A et Num2B). On présentera pour chaque forme de bloc, les distances de propagation, les dispersions latérales (déviations moyenne et relative par rapport à l'axe moyen), les statistiques des vitesses et des énergies de passage (en translation et en rotation) et les hauteurs de passage lors du franchissement des écrans virtuels EC11, EC12, EC21 et EC22. Certains résultats seront présentés en annexe sous forme de tableaux pour y être comparés plus facilement. Enfin, pour clore cette section nous présenterons l'influence des conditions initiales des lâchers (orientation des blocs et position de la zone de départ) sur la variabilité des résultats.

5.3.5.1 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num2A – Zonage C

Le Bloc Num2A, comme mentionné lors de la présentation des formes géométriques, fait partie des blocs (Forme 2) qui ont une forme reconstruite à partir des blocs rocheux repérés lors de la première visite, avant Phase 1. Pour chaque Profil P1 et P2, les résultats présentés correspondent à un total de 256 simulations (4 points de lâcher, 64 orientations des blocs). Les positions d'arrêt des blocs sont données suivant différents angles de vue sur la Figure 5.34. Les distances de propagation horizontales, définies entre le point moyen de départ (mi-distance entre les deux points extrêmes limitant la zone de départ de 4 m x 4m) et le point d'arrêt, sont présentées en fréquence pour les Profils P1 et P2 respectivement sur les Figures 5.35 et 5.36.

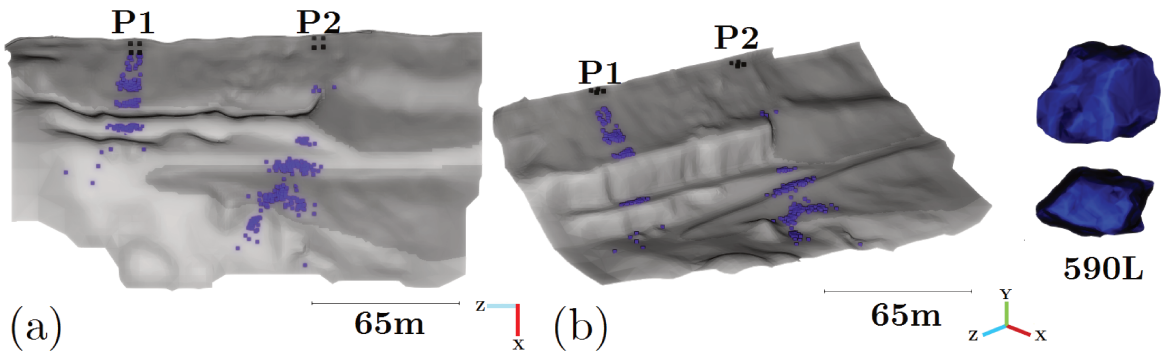


FIGURE 5.34 – Bloc Num2A - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b).

D'une manière générale, les simulations numériques reproduisent assez bien l'effet marqué de la topographie en pente et contre-pente sur les zones de dépôts, tout comme dans les essais expérimentaux. Pour le Profil P1, la distance maximale de propagation horizontale atteinte par le Bloc Num2A est de 58.5 m. Il y a peu de dispersion latérale dans la zone de départ. Par contre, dès que les blocs franchissent l'écran EC11, la dispersion latérale augmente. La géométrie du dépôt final des blocs est relativement conique dans le plan XZ. Pour le Profil P2 cet effet est encore plus marqué, mais la tendance est que les blocs dévient d'avantage en direction du Profil P1 (vers la gauche). Les blocs sont confrontés à des effets 3D plus importants sur ce profil qui est plus hétérogène. Pour le Profil P2 les blocs vont plus loin (96.9 m), et cette tendance correspond, elle aussi, aux observations faites sur le terrain (Figure 5.21). L'analyse des

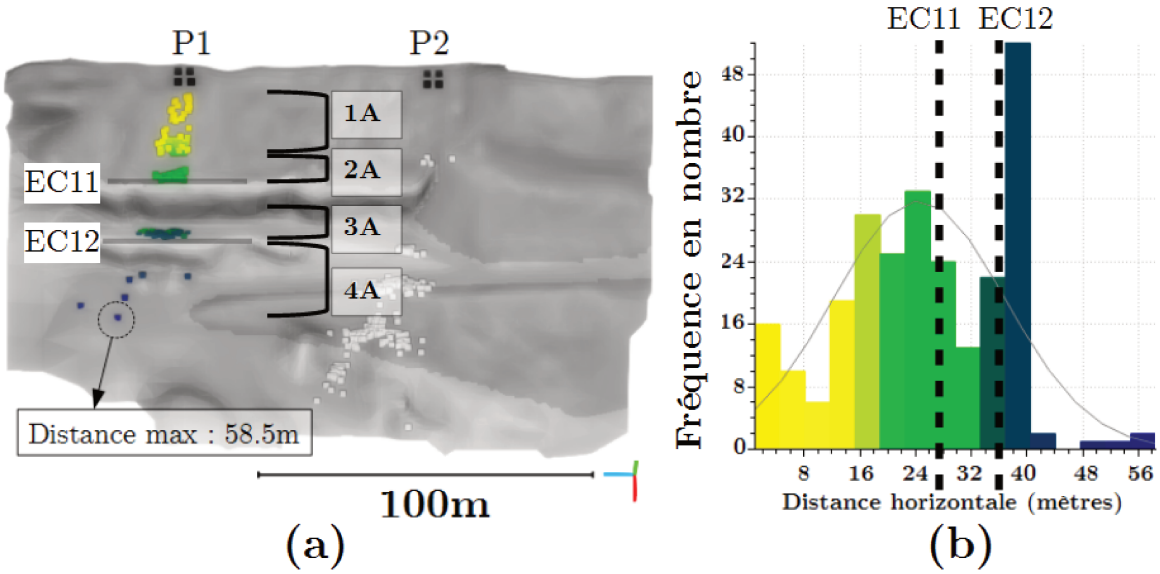


FIGURE 5.35 – Bloc Num2A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

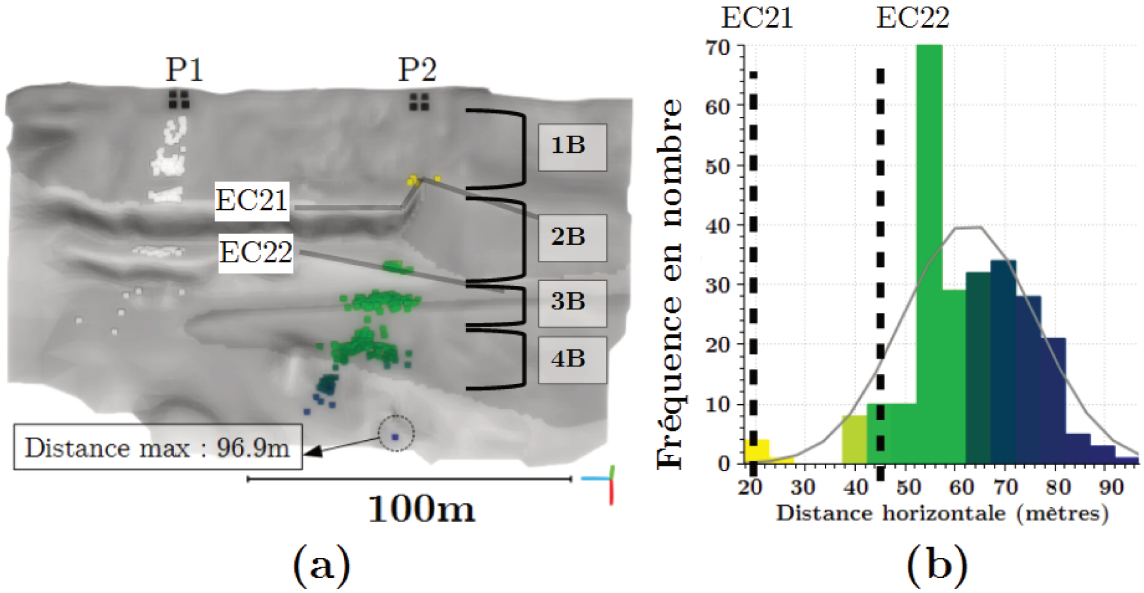


FIGURE 5.36 – Bloc Num2A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

zones de dépôt (Figures 5.35 et 5.36) confirme une zone préférentielle d'arrêt, liée à la topographie, aussi bien pour le Profil P1 (à partir de la côte $X = 40$m) que pour le Profil P2 (à partir de la côte $X = 50$m). On confirme également que les 2 profils sont d'un point de vue topographique assez différents puisque pour le Profil P2, les blocs s'arrêtent beaucoup plus loin.

Les angles de déviation de référence pour les Profils P1 et P2, désignés respectivement par α_{ref-1} et α_{ref-2}, sont définis sur la Figure 5.37. Ils correspondent aux angles mesurés entre la direction de propagation moyenne des blocs et l'axe X, défini dans le plan horizontal, perpendiculairement au pan de la carrière. Ils permettent de définir les angles de déviation relative du bloc (angle de déviation par rapport à l'axe de référence) pour chaque profil. Ceux-ci sont présentés, pour comparaison avec les autres formes de blocs, sur la Figure E.2 de l'Annexe E. On note que pour le Profil P1, plus de 60% des blocs ont un angle de déviation relative compris entre -5 et +5 degrés. En revanche, pour le Profil P2 les blocs ont tendance à se disperser davantage : Angles de déviation relative compris entre de ±10 degrés.

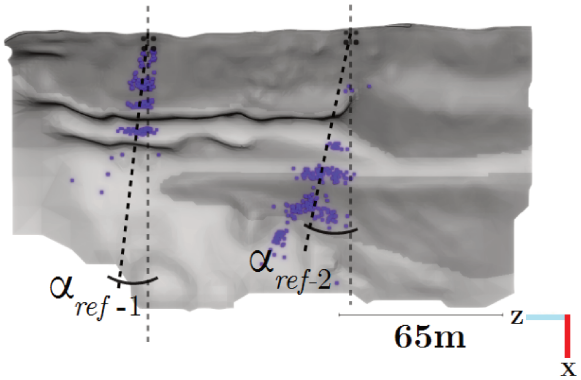


FIGURE 5.37 – Bloc Num2A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +5.21$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +12.25$).

Les statistiques des vitesses et des énergies de passage (en translation et en rotation) et les hauteurs de passage au niveau des écrans virtuels EC11, EC12, EC21 et EC22 sont synthétisées, pour comparaison avec les autres formes de blocs, respectivement dans les Tableaux ,C.1(b)C.2 (b), C.3(b) e C.4(b) ; de l'Annexe C. Pour l'écran EC11, nous avons une valeur de vitesse de translation moyenne expérimentale égale à 1.9 m/s avec un écart type de 8.5 m/s (Tableau 5.11). Pour les simulations numériques, cette moyenne s'élève à 3.62 m/s avec un écart type de 1.35 m/s. La valeur numérique du quartile à 95% (5.57 m/s) semble être assez proche des valeurs expérimentales (6.8 m/s, voir Tableau 5.11). La vitesse de rotation de passage moyenne est expérimentalement de 1.43 rps (Tableau 5.12) contre 0.58 rps pour les simulations numériques. Pour l'écran EC12, la valeur moyenne de la vitesse de translation expérimentale est de 13.2 m/s (contre 12.55 m/s pour les simulations numériques) et la moyenne de la vitesse de rotation expérimentale s'élève à 1.49 rps (contre 2 rps pour les simulations). Excepté pour les résultats des vitesses moyennes expérimentales de la barrière EC11, les résultats numériques semblent en bon accord avec les résultats expérimentaux pour le Profil P1. Sur le terrain on observe que la plupart des blocs qui franchissent l'écran EC11 accélèrent dans la direction de l'axe X. Les blocs s'arrêtent majoritairement sur le

premier replat et ne franchissent pas l'écran EC12. Ceux qui franchissent le replat ont une vitesse moyenne supérieure à celle obtenue lors du franchissement par l'écran EC11. Le rapport entre les vitesses moyennes de passage pour les écrans EC12 et EC11 est d'environ 7 (expérimentalement) et de 4 pour les simulations numériques. L'écart entre les valeurs expérimentales et numériques diminue si l'on considère la valeur du quartile à 95% : on obtient un rapport de 3 pour les résultats expérimentaux contre un rapport de 4 pour les résultats numériques. Les énergies totales de passage pour les simulations numériques passent de 25.68 kJ pour l'écran EC11 à 262.50 kJ pour l'écran EC12. Cela correspond à une augmentation de l'énergie moyenne du bloc d'un facteur de 10 entre les écrans EC11 et EC12 liée à l'énergie potentielle acquise par le bloc qui tombe d'une hauteur d'environ 20 mètres.

Pour le Profil P2, le Tableau C.3(b) de l'Annexe C app présente les valeurs statistiques du Bloc Num2A lors de son passage par la barrière virtuelle EC21. Nous avons une vitesse expérimentale de passage moyenne de 7.9 m/s (contre 6.74 m/s numériquement) et des vitesses de rotation qui s'élèvent à 1.79 rps (contre 0.69 rps numériquement). Les valeurs expérimentales et numériques du quartile à 95% convergent également : 11.2 m/s (expérimentalement) contre 9.08 m/s (numériquement). Lors du passage des blocs par la barrière virtuelle EC22, nous remarquons que les résultats expérimentaux affichent une tendance globale à une perte d'énergie en translation. La moyenne de la vitesse expérimentale de passage par l'écran EC22 est de 4.2 m/s contre 6.27 m/s numériquement. Nous avons cependant des valeurs relativement proches pour le quartile à 95% : 8.8 m/s expérimentalement contre 9.21 m/s numériquement. En termes d'énergie, nous obtenons numériquement, en moyenne et au quartile à 95%, 2 fois plus d'énergie de rotation lors du passage par l'écran EC22 (5.41 kJ) en comparaison avec le passage par l'écran EC21 (2.40 kJ).

5.3.5.2 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num1A – Zonage C

Le Bloc Num1A se distingue du Bloc Num2A par sa forme et sa taille. Il est reconstruit à partir de la forme 1 et est 3 fois plus petit que le Bloc Num2A. Le coefficient de forme du Bloc Num1A ($c_f = 0.22$) est voisin de celui du Bloc Num2A ($c_f = 0.27$). Les deux formes sont assimilées à des formes cubiques, mais le Bloc Num2A est légèrement plus allongé que le Bloc Num1A (voir Tableau 5.3). Comme précédemment, les résultats présentés correspondent à un total de 256 simulations (4 points de lâcher, 64 orientations des blocs). Les positions d'arrêt des blocs sont données suivant différents angles de vue sur la Figure 5.38. Les distances de propagation horizontales pour les Profils P1 et P2 sont présentées en fréquence respectivement sur les Figures 5.39 et 5.40.

Comparativement aux résultats précédents (Bloc Num1B), on remarque que plus le bloc est petit (Bloc Num1A), plus il aura tendance à rester sur la contre-pente. Pour le Profil P1, la plupart des blocs s'arrêtent avant la côte $X = 25m$ (emplacement de la barrière virtuelle EC11). Cependant, la distance de propagation maximale est de 75 m. La zone préférentielle de dépôt pour le Profil P1 se situe entre les côtes 15 et 20 m et celle du Profil P2 s'étend, de la côte 40 m à la côte 56 m, de manière

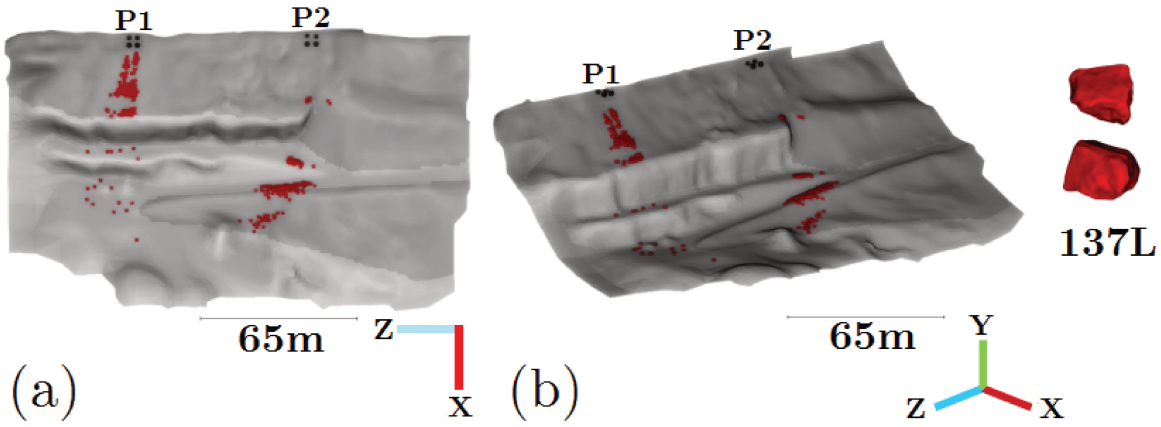


FIGURE 5.38 – Bloc Num1A - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b).

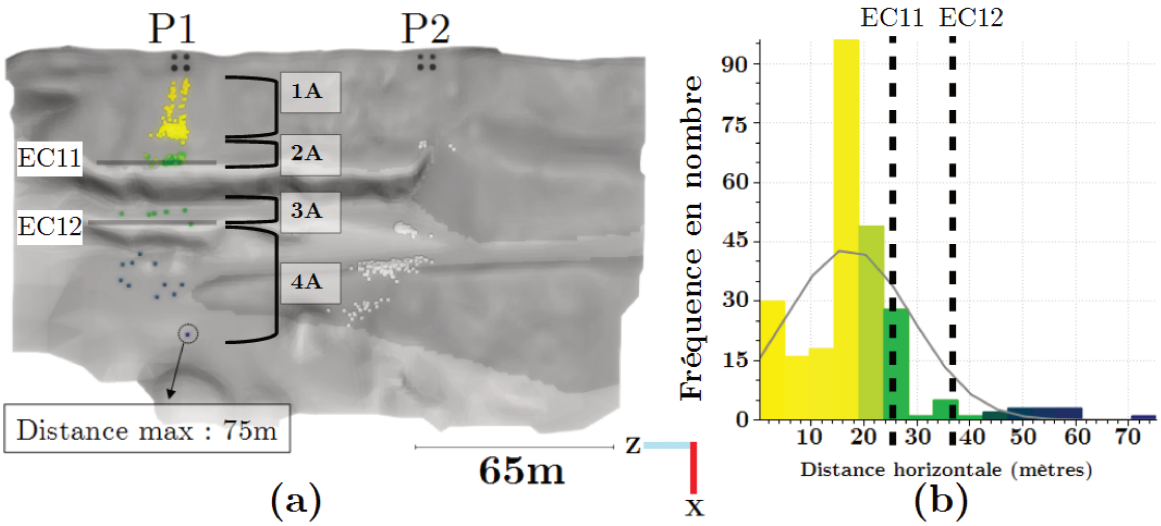


FIGURE 5.39 – Bloc Num1A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

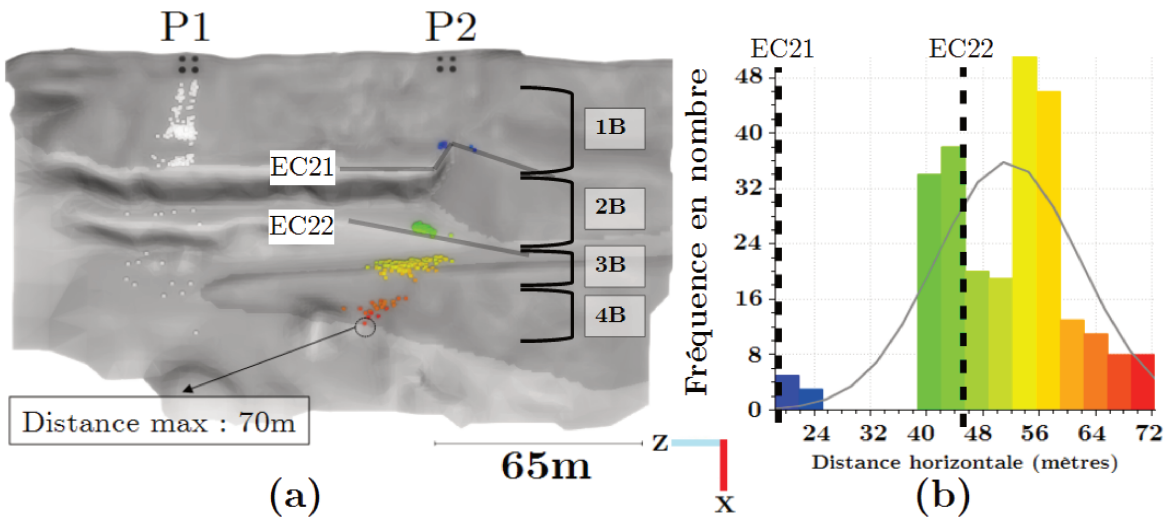


FIGURE 5.40 – Bloc Num1A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

relativement uniforme (comparativement au dépôt du Bloc Num2A). La distance de propagation maximale pour le Profil P2 est de 70 m (20 mètres de moins que pour le bloc Num2A). On constate un léger effet de taille : les blocs plus lourds vont plus loin. Sur la Figure 5.40 on constate que la plupart des blocs qui franchissent l'écran EC22 se déposent sur le replat intermédiaire, ce qui est conforme aux observations de terrain.

Si l'on s'intéresse à l'angle de déviation de blocs, on constate sur la Figure 5.41 que pour le Profil P1, l'angle de déviation de l'axe moyen des Blocs Num1A ($\alpha_{ref-1} = +5.25$) est proche de celui des Blocs Num2A ($\alpha_{ref-1} = +5.21$). L'élément majeur qui conditionne le calcul de la valeur de l'axe moyen est le dépôt en contre-pente pour les deux géométries. La déviation latérale moyenne du Profil P2 pour le Bloc Num1A est également proche de celle du Bloc Num2A (+10.49 pour le Bloc Num1A contre +12.26 pour le Bloc Num2A). La distribution des Blocs Num1A autour de l'axe moyen semble aussi suivre la même tendance que celle des Blocs Num2A (Figure E.1). Cependant, les Blocs Num1A sont plus dispersés que les Blocs Num2A, surtout si l'on compare les blocs déposés sur le ressaut intermédiaire qui se situe entre les écrans EC11 et EC12 du Profil P1. Plus de 60% des blocs se répartissent entre +15 degrés et -10 degrés pour le Profil P1. L'étendue de la base du dépôt de forme *"conique"* est aussi plus large. Pour le Profil P2, les déviations des blocs autour de l'axe moyen de référence sont assez similaires pour les deux géométries de blocs étudiées (Num1A et Num2A). Les blocs se concentrent principalement dans une zone située à ±10 degrés de l'axe moyen de déviation. On notera néanmoins qu'un pourcentage très faible de blocs (environ 10%) se dépose dans une zone éloignée de -30 à -15 degrés de l'axe moyen de propagation, et qu'environ 6% des blocs se situe dans une zone comprise entre +15 et +20 degrés.

Les résultats en valeur moyenne des vitesses de passage lors du franchissement de l'écran EC11 pour le Bloc Num1A s'approchent de celles obtenues expérimentales : 2.64 m/s (Tableau C.1(a)) contre 1.9 m/s numériquement. En rotation, la vitesse moyenne numérique est de 0.42 rps, alors qu'expérimentalement cette valeur et de 1.43 rps. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés pour le Bloc Num2A. Numériquement, la

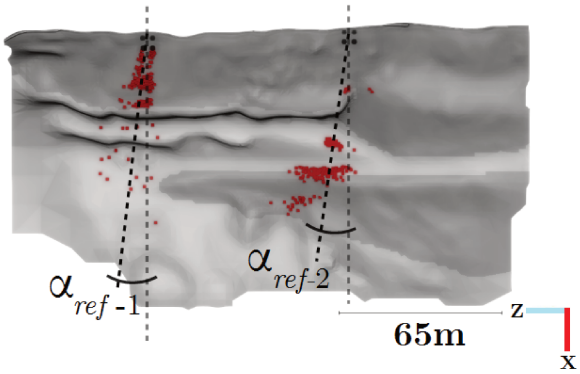


FIGURE 5.41 – Bloc Num1A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +5.25$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +10.49$).

valeur de la vitesse de translation au quartile à 95% est de 4.68 m/s contre 6.8 m/s (expérimentalement), la valeur moyenne de la vitesse de passage en translation par l'écran EC12 est de 5.26 m/s (contre 13.2 m/s expérimentalement) et la vitesse de rotation de 0.84 rps (contre 1.27 rps expérimentalement). La valeur de la vitesse de translation pour le quartile à 95% est de 7.37 m/s (Tableau C.2(a)) alors que pour les résultats expérimentaux, cette valeur est de 19.2 m/s. Cette différence est probablement liée au fait que la plupart des blocs lâchés expérimentalement sont beaucoup plus lourds que le Bloc Num1A. Dans la réalité, seulement 5 blocs ont une masse de moins de 500 kg (Figure 5.27). Toutefois, ces résultats influent aussi les statistiques. Nous remarquons qu'entre les écrans EC11 et EC12, les blocs gagnent en énergie (apport d'énergie d'un facteur d'environ 3 entre l'écran EC12 et l'écran EC11).

Pour le Profil P2, on remarque : Tableau C.3(b) et Tableau C.4(b)) une décélération des petits blocs en translation (vitesses moyennes de passage par EC21 égales à 6.41 m/s et par EC22 égale à 4.83m/s, et vitesses du quartile à 95% de 8.48 m/s pour EC21 et de 7.76 m/s pour EC22). Les vitesses de rotation semblent aussi diminuer entre les deux écrans, tant pour les valeurs moyennes que pour les valeurs du quartile à 95% (11.2m/s pour EC21 contre 8.8m/s pour EC22).

5.3.5.3 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num2B – Zonage C

Le volume du Bloc Num2B correspond au volume du plus gros bloc utilisé lors de la campagne expérimentale de lâcher de blocs. La forme utilisée pour la reconstruction de ce bloc est la Forme 2 - la même qui celle utilisée pour le Bloc Num2A. Nous avons souhaité de cette manière étudier l'effet de l'augmentation du volume sur la propagation des blocs en gardant la même géométrie. Ainsi, nous avons une augmentation de volume du Bloc Num2B par rapport au Bloc Num2A de 19.8%, sans modification des rapports d'inertie dans les directions principales : $I_{x7} \approx 0.35 I_{x5}$, $I_{y7} \approx 0.35 I_{y5}$, $I_{z7} \approx 0.35 I_{z5}$ (Tableau 5.3). D'une manière générale, les résultats du Bloc Num2B sont, bien que différents, assez semblables en termes de comportement général, à ceux obtenus avec le Bloc Num2A. Les principaux résultats relatifs aux distances de propagation, dispersions latérales, statistiques des vitesses et des énergies de passage (en translation et en

rotation) et les hauteurs de passage par les écrans virtuels EC11, EC12, EC21 et EC22 sont présentés dans cette section. L'analyse comparative entre les deux types de blocs sera faite plus en détails dans la section dédiée à l'étude de la géométrie des blocs.

Les positions d'arrêt des blocs sont présentées suivant différents angles de vue sur la Figure 5.42. Les distances de propagation horizontales pour les Profils P1 et P2 sont données en fréquence respectivement sur les Figures 5.43 et 5.44. Pour le Profil P1, on constate sur la Figure 5.42 qu'aucun bloc ne se dépose en bas de pente. On distingue (Figure 5.43) trois zones plus denses en termes de dépôt : la première entre 16 m et 24 m, la seconde entre 26 m et 32 m et la troisième entre 36 m et 40 m (après l'écran EC12 positionné à la côte $\approx 35m$). La distance maximale de propagation pour le Profil P1 est de 40 m. Pour le Profil P2 (Figure 5.44), les blocs parcourent en majorité une distance comprise entre 55 m et 65 m (la distance maximale de propagation est pour le Profil P2 de 87.6 m).

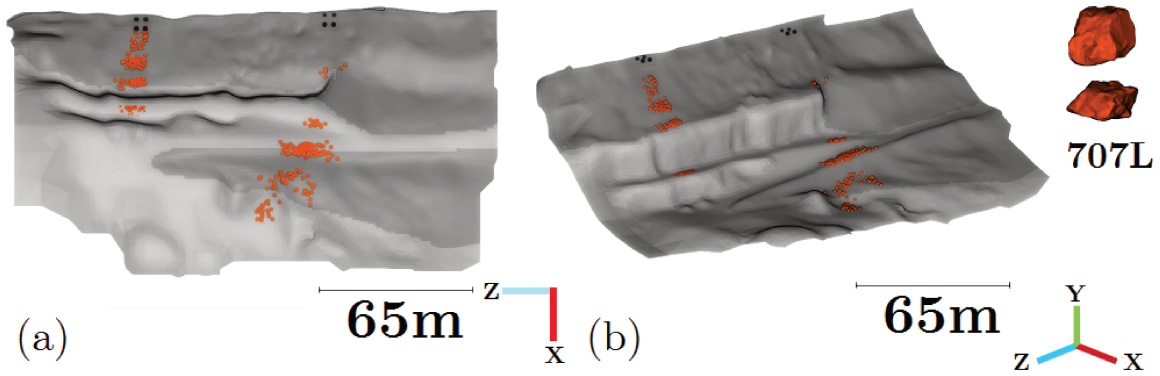


FIGURE 5.42 – Bloc Num2B - Points d'arrêt des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b).

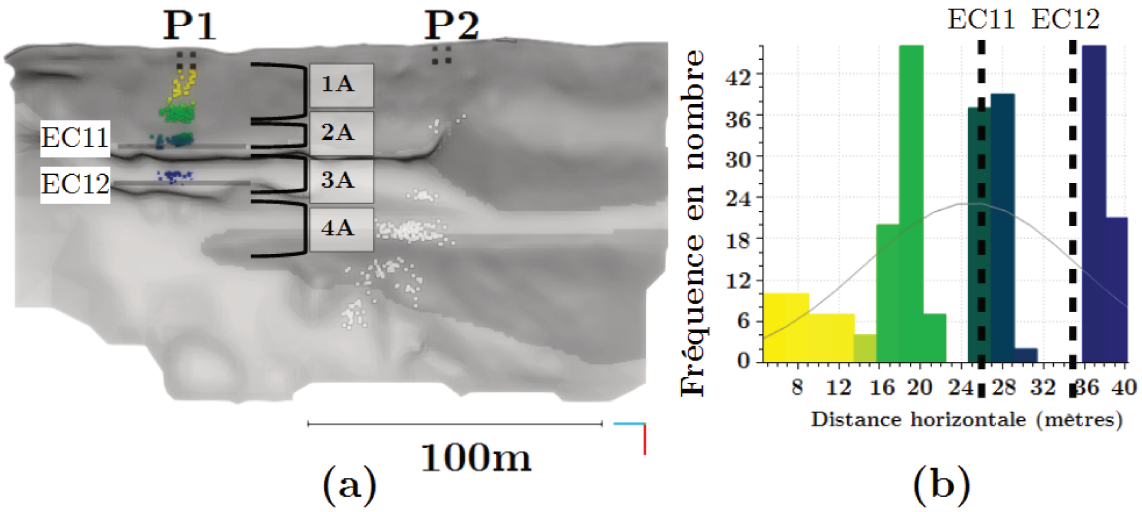


FIGURE 5.43 – Bloc Num2B – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

Si l'on s'intéresse à l'angle de déviation des Blocs Num2B, on constate pour le Profil P1 (Figure 5.45), une augmentation de l'angle de déviation de l'axe de référence (+7.62

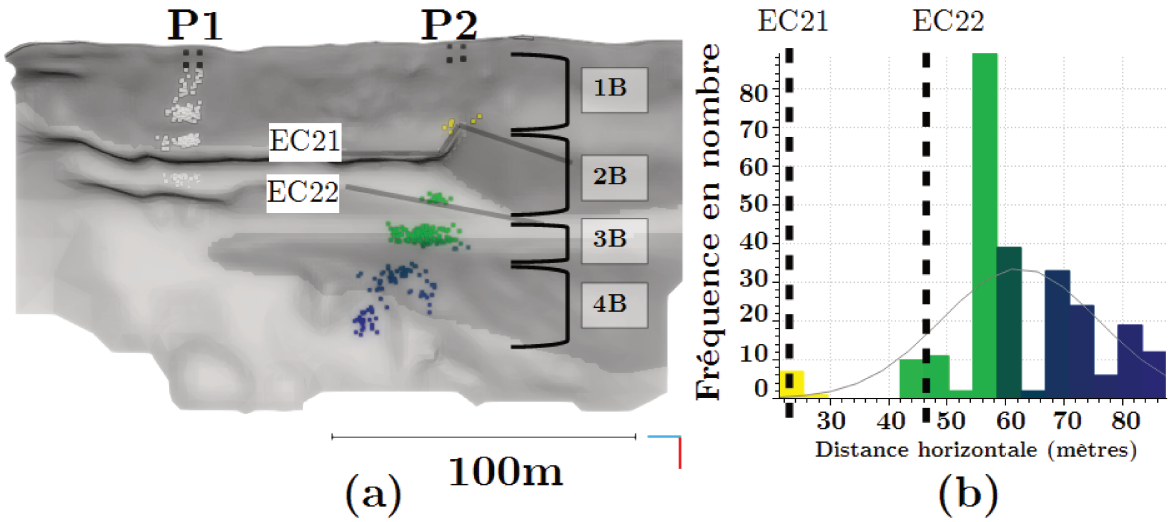


FIGURE 5.44 – Bloc Num2B – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

degrés pour les Blocs Num2B contre +5.21 degrés pour les Blocs Num2A). Cependant, la dispersion des blocs autour de l'axe de référence reste inchangée (dispersion de ± 10°). Pour le Profil P2, on remarque (Figure E.3) une légère diminution de la valeur de l'angle de déviation de l'axe de référence (+11.59 degrés contre +12.25 degrés).

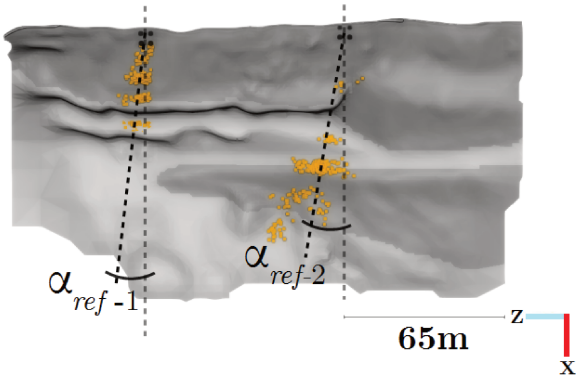


FIGURE 5.45 – Bloc Num2B – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 ($\alpha_{ref-1} = +7.62$) et P2 ($\alpha_{ref-2} = +11.59$).

Les énergies de passage pour les Blocs Num2B sont globalement plus élevées que celles des Blocs Num2A, ce qui est logique compte tenu de l'augmentation de leur masse qui implique une énergie potentielle plus élevée (Tableau C.1(c)). Les vitesses de rotation et de translation des Blocs Num2B sont également plus importantes ce qui laisse supposé que les blocs volumineux sont globalement ceux qui sont les moins ralentis par leurs interactions avec le relief. La vitesse maximale de passage du Bloc Num2B par l'écran EC11 est de 9.92 m/s contre 6.18 m/s pour le Bloc de type Num2A. Nous obtenons les mêmes observations en analysant les vitesses maximales de passage par l'écran EC12 (Tableau C.2(c)) : la valeur maximale de passage des Blocs Num2B s'élève à 19.34 m/s contre 18.93 m/s pour les Blocs Num2A.

Pour le Profil P2, la tendance observée en termes d'augmentation des vitesses et des

énergies de translation et de rotation est inverse à celle obtenue sur le Profil P1. Nous remarquons en effet une légère diminution des vitesses de translation et de rotation des Blocs Num2B comparativement aux Blocs Num2A (Tableaux C.3(b),C.4(b),C.3(c) et C.4(c)). Cet effet est lié au passage des blocs sur la pente caillouteuse qui ont tendance à rouler et qui sont davantage ralentis. La vitesse de rotation moyenne des blocs (0.87 rps) est le double lors du franchissement de l'écran EC22 que celle obtenue (0.59 rps) au passage de l'écran EC21. Au passage des écrans EC21 et EC22 les énergies moyennes totales des blocs sont presque inchangées (42.99 kJ pour l'écran EC21 contre 41.8 kJ pour l'écran EC22) avec une modification du mode de transfert d'énergie : les blocs présentent des énergies de translation de 40.4 kJ et de rotation de 2.59 kJ lors du passage par l'écran EC21 contre respectivement des valeurs de 36.37 kJ en translation et 5.43 kJ en rotation lors du passage par l'écran EC22.

5.3.5.4 Résultats des simulations numériques pour le Bloc Num3A – Zonage C

Le Bloc Num3A est le seul bloc réellement utilisé lors de la campagne de lâcher de blocs (Bloc 89). Il a été repéré et photographié sur le ressaut intermédiaire du Profil P2 après la campagne d'essais puis reconstruit par photogrammétrie. Bien qu'il ait servi exclusivement pour le Profil P2, nous avons souhaité, en raison de sa forme rectangulaire, l'utiliser également pour les simulations du Profil P1. Cela nous a permis notamment d'effectuer une étude complète sur l'effet de forme sur les deux profils. Bien que la position initiale de lâcher du bloc n'ait pu être identifié (orientation et positionnement), ce bloc constitue le seul point de comparaison objectif entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux. Les positions d'arrêt des blocs sont données suivant différents angles de vue sur la Figure 5.46. Les distances de propagation horizontales pour les Profils P1 et P2 sont présentées en fréquence respectivement sur les Figures 5.47 et 5.48.

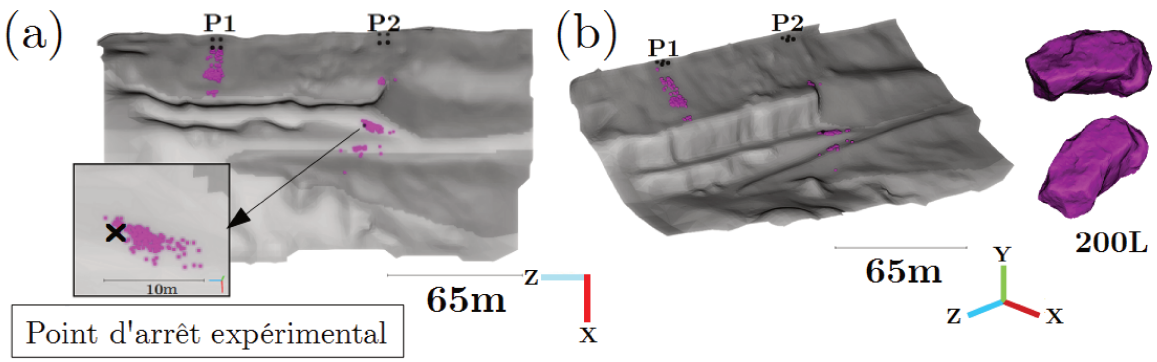


FIGURE 5.46 – Bloc Num3A - Points d'arrêt numérique des blocs pour les 256 simulations effectuées. Vue de dessus (a) et perspective (b). La position expérimentale d'arrêt du Bloc 89 est représentée par une croix.

Pour le Profil P1, aucune trajectoire n'atteint le premier écran EC11 (Figure 5.47(a)) ; seul un bloc vient en contact avec celui-ci sans le franchir. Nous avons pour ce profil, deux zones de dépôt préférentielles et deux types de comportement associés. La pre-

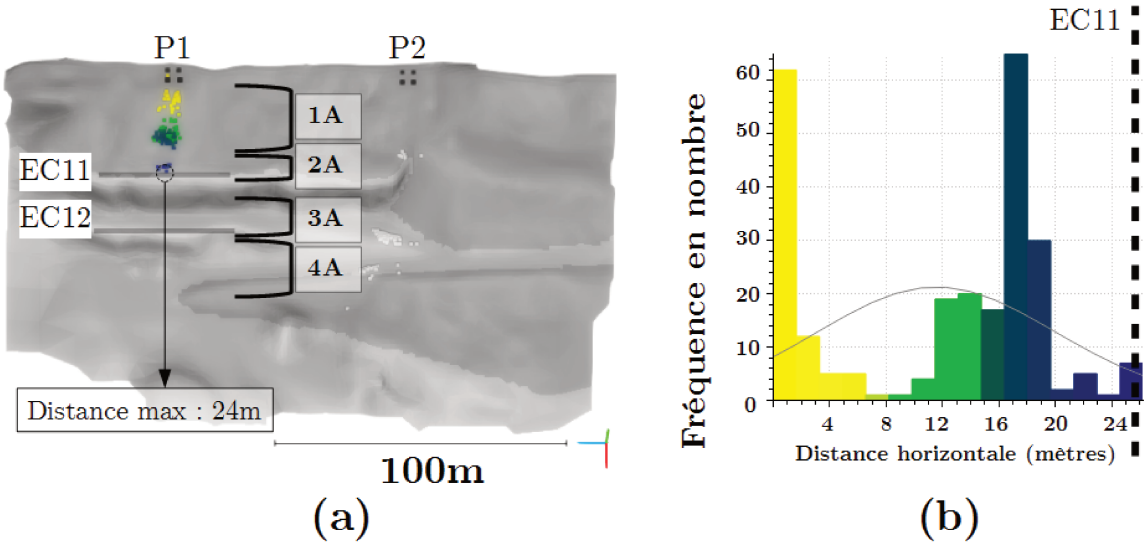


FIGURE 5.47 – Bloc Num3A – Profil P1 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

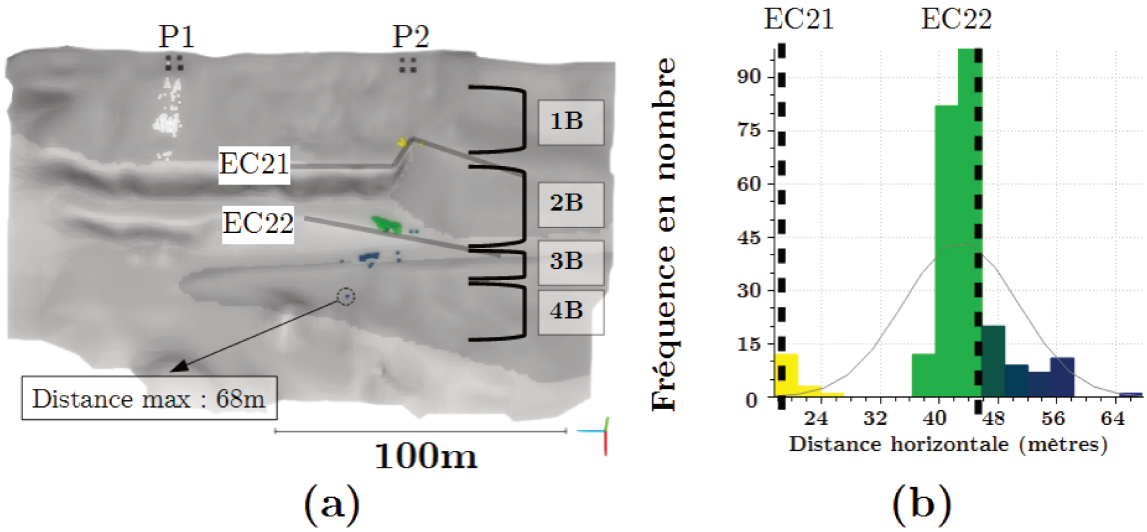


FIGURE 5.48 – Bloc Num3A – Profil P2 – Position des points d'arrêt des blocs (a) et distance de propagation en fréquence (b).

mière zone se situe avant la côte $X = 5m$ (proche de la zone de largage), où le bloc s'encastre immédiatement dans le sol et glisse un peu avant de s'arrêter très tôt en haut de la pente. La deuxième zone se trouve aux alentours de la côte $X = 18$ m, caractérisée par un pic de fréquence (Figure 5.47(b)). La distance maximale atteinte par l'un des blocs est de 24 m ce qui correspond à la position de l'écran EC11.

Pour le Profil P2, on constate (Figure 5.48(a)) qu'une quinzaine de trajectoire s'arrête avant la première pente caillouteuse. Quelques blocs dévient vers le Profil P1 (soit vers la gauche) et restent coincés au sommet de la paroi rocheuse. Ces observations coïncident avec les observations de terrain qui montrent que tous les blocs qui restent en haut de la pente sont classés comme étant des blocs "Rectangulaire". La zone préférentielle de dépôt des Blocs Num3A se trouve entre 40 et 45 m pour le Profil P2 (Figure 5.48(b)). La distance maximale atteinte par l'un de ces blocs est de 68 m. On soulignera également que la position d'arrêt du Bloc 89 lâché pendant la campagne d'essais (Figure 5.46) est incluse dans cette zone préférentielle correspondant à la fréquence de dépôt la plus probable.

Concernant la déviation latérale des dépôts (Figure 5.49 et Figure E.4 de l'Annexe E), on constate pour le Profil P1, compte tenu de la proximité des points d'arrêts des points de lâcher, que les angles de déviation relative calculés deviennent plus importants. Ils varient de -30°à +15°. Pour le Profil P2, 80% des blocs se déposent autour de l'axe de référence, ayant une déviation relative comprise entre 0 et -5°.

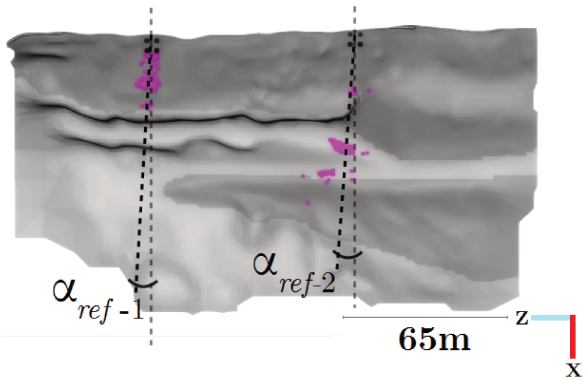


FIGURE 5.49 – Bloc Num3A – Angle de déviation de référence pour les Profils P1 (α_{ref-1}) et P2 (α_{ref-2}).

Concernant le Profil P1, un seul bloc atteint l'écran EC12 sans le franchir complètement. Les valeurs des vitesses de translation et de rotation sont en conséquence très faibles (Tableau C.1(d)). Pour le Profil P2, la vitesse de passage moyenne par l'écran EC21 (Tableau C.3(d)) est de 5.44 m/s (contre 7.9 m/s expérimentalement) et de 7.19 m/s du quartile à 95% (contre 11.2 m/s expérimentalement). Les blocs de forme "Rectangulaire" ont donc des vitesses plus faibles que l'ensemble des autres géométries de bloc. Pour l'écran EC22 (Tableau C.4(d)), on constate une vitesse moyenne de passage de 3.16 m/s (contre 4.2 m/s expérimentalement) et de 5.49 m/s pour le quartile à 95% (contre 8.8 m/s expérimentalement). Pour les simulations numériques, on note une diminution de l'énergie totale de 61% entre les deux écrans EC21 et EC22. Cette diminution est, en moyenne, de 77% pour les valeurs expérimentales.

5.3.5.5 Influence de la forme et de la taille des blocs sur les distances de propagation - Zonage C

La Figure 5.50 et les Tableaux 5.27 et 5.28 présentés ci-dessous résument les résultats principaux relatifs aux effets de forme et de taille des blocs sur les distances de propagation, les probabilités de passage des blocs par les écrans EC11, EC12, EC21 et EC22 et sur la répartition des blocs dans les zones de dépôt. Les tableaux et figures présentés en annexe regroupent tous les résultats sous forme comparative en termes de hauteur, vitesse et énergie de passage des blocs. La Figure 5.50 présente pour chaque type de bloc (en fonction de leur couleur associée) la probabilité d'arrêt des blocs en fonction de leurs distances de propagation. Le Tableau 5.27 apporte un complément à ces informations en donnant la répartition en pourcentage, des blocs dans les dépôts A et B, tel que défini sur la Figure 5.21. Ces résultats sont donnés en fonction du critère de forme c_f défini précédemment. Enfin, nous présentons (Tableau 5.28) la probabilité de passage des blocs par chaque écran en fonction de leur forme pour les deux Profils P1 et P2.

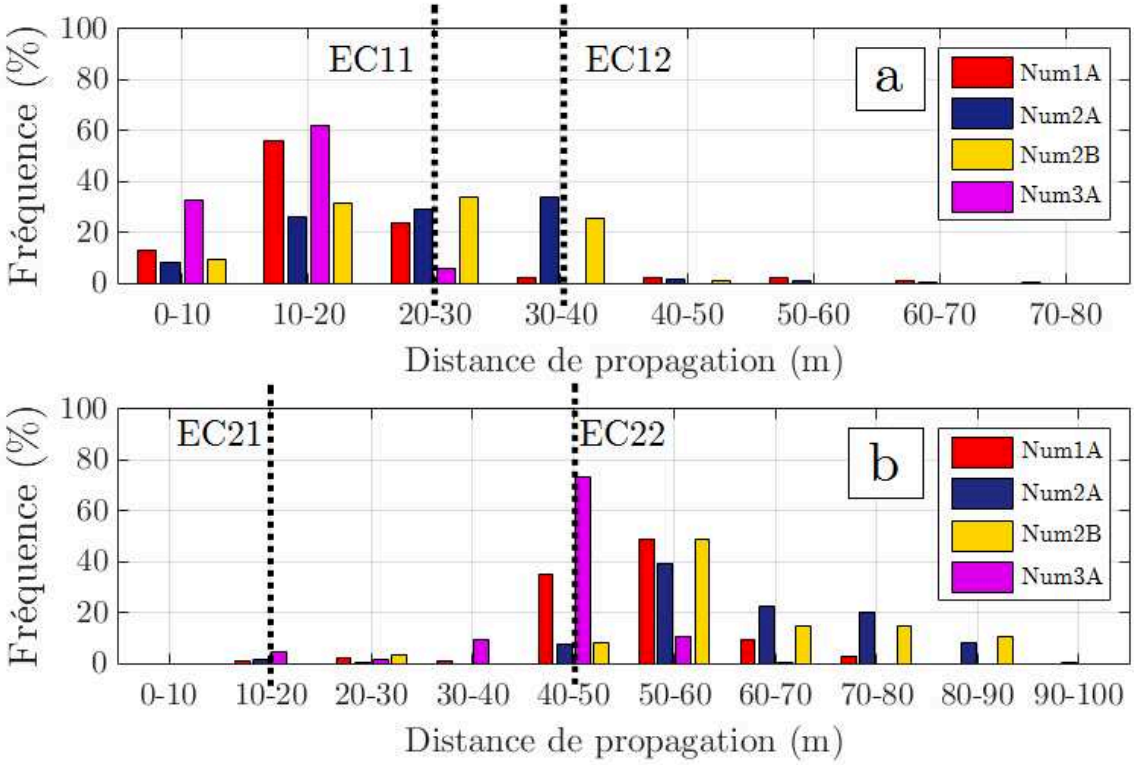


FIGURE 5.50 – Distance de propagation des blocs Num1A, Num2A, Num2B et Num3A : (a) Distribution en pourcentage du nombre de blocs par catégorie pour le Profil P1, (b) Distribution en pourcentage du nombre de blocs par catégorie pour le Profil P2.

Pour le Profil P1, nous constatons sur la Figure 5.50(a) une plus grande densité de blocs dans la zone située avant l'écran EC11. Concernant les blocs Num2A et Num2B (qui ont tous les deux la même forme mais des volumes différents), nous remarquons que les blocs les plus lourds (donc les Blocs Num2B) ont une probabilité plus forte de parcourir de longues distances que les blocs plus légers (Blocs Num2A). Par exemple

Tableau 5.27 – Distribution des blocs numériques en fonction de leur forme (Classement selon le critère c_f) au sein des dépôts A et B.

	A – Profil P1		**B – Profil P2**	
	Cubes	Rectangles	Cubes	Rectangles
1	51.95%	94.92%	2.73%	6.25%
2	24.74%	5.08%	17.06%	82.81%
3	20.96%	0.0%	46.61%	10.55%
4	2.34%	0.0%	33.59%	0.39%

Tableau 5.28 – Probabilité de passage des blocs numériques par les écrans virtuels suivant leur forme.

	Probabilité de Passage	
	Cubes	**Rectangles**
EC11	48.02%	5.08%
EC12	2.34%	0.0%
EC21	98.26%	99.21%
EC22	97.26%	93.75%

(Tableau 5.27), entre les côtes 50 m et 70 m, aucun Bloc de type Num2B n'atteint le bas de pente (dépôt A4) alors que 20% des blocs de type Num1B l'atteignent. Toute chose égale par ailleurs, on aurait donc tendance à dire que, compte tenu de leurs volumes, les blocs qui sont plus lourds sont ceux qui parcourent les plus grandes distances. Concernant la forme des blocs, il apparaît clairement (Tableau 5.27) que les blocs de forme "Cubique" se propagent sur des distances plus grande que les blocs de forme "Rectangulaire". Pour le Bloc Num3A, de forme "Rectangulaire", plus de 95% des blocs restent en haut de la pente dont 5% qui s'approchent de la barrière EC11, d'où un effet de forme très marqué. Les Blocs Num1A (de forme "Cubique" mais de volume inférieur à celui des blocs Num3A : 137 L pour le Bloc Num1A et 205 L pour le Bloc Num3A) se répartissent sur la pente de manière similaire aux Blocs Num3A : 92.5% de ces blocs restent en haut de la pente. Cependant, aucun des blocs Num3A (forme rectangulaire) ne franchit les écrans EC11 et EC12, alors que pour le Bloc Num1A, 4.7% des blocs les franchissent. Il semble exister, pour le Profil P1, un effet lié à la taille du bloc, mais c'est l'effet de forme qui semble être prédominant.

La zone préférentielle de dépôt des blocs pour le Profil P2 se situe au-delà du deuxième écran : moins de 20% des blocs restent sur la pente. Parmi ceux qui y restent, 82.81% des blocs sont classés comme étant des blocs "Rectangulaire", contre seulement 17.06% de blocs de forme "Cubique". La probabilité de retrouver un bloc "Rectangulaire" dans la zone de dépôt B4 est de 2% (0.39% des blocs "Rectangulaire"), contre 98% de chance d'y retrouver un bloc de forme "Cubique". Concernant le volume des blocs, les différences observées (Blocs Num2A et Num2B) sont peu significatives compte tenu du comportement particulier des blocs sur la pente caillouteuse (principalement du roulement avec peu de rebond). L'effet de forme des blocs est dans ce cas l'effet prédominant compte tenu de la géométrie particulière du Profil P2.

5.3.5.6 Influence de la forme des blocs sur la déviation latérale - Zonage C

Concernant les résultats relatifs à la dispersion latérale (Figures 5.51), les valeurs obtenues à partir de l'ensemble des simulations numériques effectuées (pour les quatre géométries de blocs) coïncident assez bien avec celles des résultats expérimentaux. L'étalement maximal en bas de pente est expérimentalement de 26.3 m pour le Profil P1 et de 51.4 m pour le Profil P2. Les valeurs des simulations nous donnent une valeur plus élevée pour le Profil P1 (33.6 m) et plus faible pour le Profil P2 (34 m), soit une différence qui s'élève à 21.7% pour P1 et de 33.8% pour P2, ce qui reste acceptable malgré tout.

Les données diffusées par l'organisation du Benchmark se limitent aux points d'arrêt des blocs, et non à leur trajectoire, d'où l'impossibilité de déterminer la dispersion latérale réelle des blocs aux niveaux des écrans fictifs. Numériquement (Figure 5.51(b)), nous avons pu déterminer les largeurs des écrans à mettre en place dans un contexte de dimensionnement. Les valeurs obtenues sont : pour le Profil P1 (12.7 m pour l'écran EC11 et 22.6 m pour l'écran EC12) et le Profil P2 (12.75 m pour l'écran EC21 et 27.5 m pour l'écran EC22).

Le Tableau 5.29 présente, pour chaque forme de blocs et chaque type de profil, les angles de déviation de l'axe de référence (α_{ref-1}) et (α_{ref-2}) et les angles de déviation latérale total θ_{P1} et θ_{P2}. Ces valeurs correspondent à l'ouverture maximale, en degrés, du "cône" délimitant l'étalement des dépôts pour les Profils P1 et P2, respectivement. Elles sont calculées à partir de la déviation latérale par rapport au plan XZ en faisant la somme des déviations maximales (positive) et minimales (négative), en valeurs absolues. On remarque que les valeurs de l'angle de déviation de l'axe de référence semblent être liées à la topographie du terrain et à la géométrie des blocs. Pour les blocs de forme cubique (Num1A, Num2A et Num2B), les valeurs moyennes de déviation de l'axe de référence sont de +5.72°et +10.55°pour les Profils P1 et P2, respectivement. Le Bloc Num3A, de forme "Rectangulaire", tend en moyenne à dévier un peu moins que les autres formes de blocs : $\alpha_{ref-2} = +4.81$ pour le profil P1 et $\alpha_{ref-2} = +7.88$ pour le Profil P2. La géométrie semble donc jouer un rôle crucial sur la déviation latérale, comme c'était le cas précédemment pour les distances de propagation. Pour le Profil P1, nous remarquons que plus le bloc est gros, plus il a de chance de dévier latéralement, ce qui est moins évident pour le Profil P2. Ces résultants semblent être en accord avec les résultats expérimentaux présentés dans le Tableau 5.10.

Afin de tester la capacité des méthodes empiriques à prédire la dispersion latérale des blocs en fonction de la distance de propagation des Blocs (L_{P1} et L_{P2} pour les Profils P1 et P2 respectivement) et de l'étalement du dépôt (W_{P1}) et (W_{P2}) pour les Profils P1 et P2 respectivement) nous avons calculé les dispersions latérales ($\delta\theta_{P1}$ et $\delta\theta_{P2}$) déduites de la formule proposée par Jaboyedoff *et al.* [2005]. Ce calcul est utilisé dans les analyses dites *pseudo-3D*, afin d'y intégrer les probabilités de déviation latérale d'un bloc qui part depuis un point fixe de la pente. Les résultats obtenus à partir des valeurs obtenues numériquement des distance de propagation des blocs (W en mètre) et de l'étalement du dépôt (L en mètre) sont présentée dans le Tableau 5.30. Les valeurs $2\delta\theta_{P1}$ et $2\delta\theta_{P2}$ sont à comparer aux valeurs θ_{P1} et θ_{P2} du Tableau . Comme on peut le constater, la simple application d'une méthode empirique dans le calcul de la déviation latérale semble produire des valeurs plus élevées par rapport aux

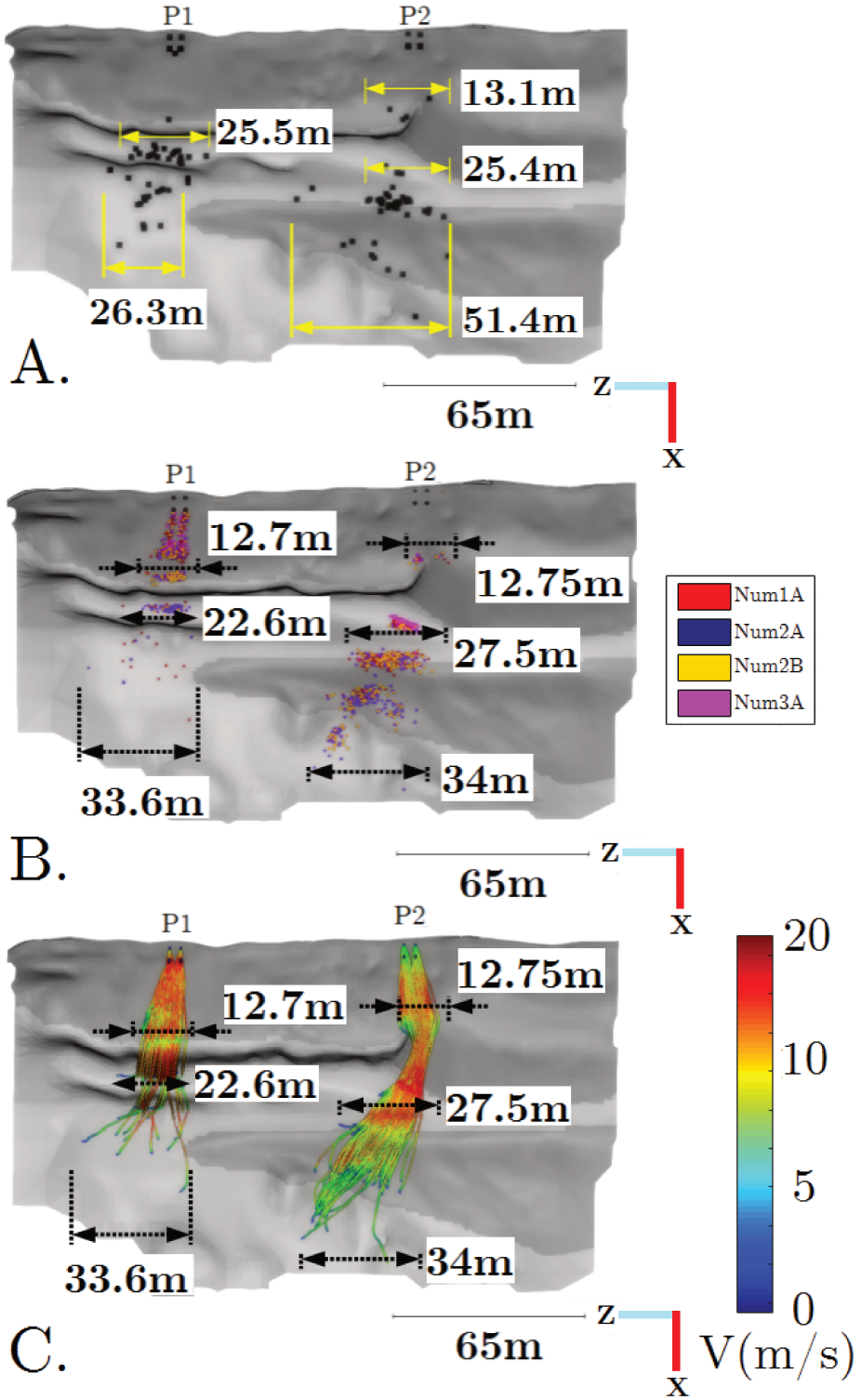


FIGURE 5.51 – (a) Points d'arrêt des blocs lors de la campagne d'essais, (b) Points d'arrêt obtenus numériquement pour l'ensemble des simulations effectuées (Zonage C) et (c) Trajectoires des blocs pour l'ensemble des simulations effectuées.

Tableau 5.29 – Valeurs expérimentales de l'angle de déviation de l'axe de référence (α_{ref}) et déviation latérale totale (calculée à partir de la somme des valeurs maximale et minimale de déviation, en valeurs absolues, pour chacun des blocs et pour chaque profil, en degrés (Annexe E).

	α_{ref-1}	α_{ref-2}	θ_{P1}	θ_{P2}
Bloc Num1A	+5.21	+12.26	50	40
Bloc Num2A	+5.25	+10.49	50	40
Bloc Num2B	+7.62	+11.59	45	50
Bloc Num3A	+4.81	+7.88	30	35

observations expérimentales et numériques. Ces valeurs sont largement surestimées, surtout pour les Blocs Num2B et Num3A, où la valeur de $2 \times \delta\theta$ varie de 88°à 154.72°.

Tableau 5.30 – Valeur de la dispersion latérale, en degrés (°) d'après Jaboyedoff *et al.* [2005] en fonction de l'étalement du dépôt (W) et de la distance maximale de propagation (L).

	W_{P1}	W_{P2}	L_{P1}	L_{P2}	$\delta\theta_{P1}$	$\delta\theta_{P2}$
Bloc Num1A	30	52	75	70	23.07	43.60
Bloc Num2A	30	52	58.5	96.9	29.71	31.13
Bloc Num2B	30	52	40	87.6	44.05	34.53
Bloc Num3A	30	52	24	68	77.36	44.96

5.3.5.7 Influence des conditions initiales de largage des blocs sur leurs trajectoires - Zonage C

Dans cette section nous présentons l'influence des conditions initiales de largage des blocs (position du lâcher et orientation du bloc) sur les trajectoires et déviations des blocs. Dans la pratique, la détermination de la zone de départ est très incertaine et l'orientation des blocs totalement inconnues d'où l'intérêt d'étudier la variabilité sur les résultats introduite par ces deux configurations. Dans un premier temps, nous étudierons l'effet local introduit par une modification des conditions de lâcher comme cela a pu se produire dans la campagne d'essais C2ROP (lâcher des blocs dans une zone de 4 m x 4 m) puis nous décalerons d'une dizaine de mètres la position initiale de la zone de lâcher (en conservant le même Modèle Numérique de Terrain que celui utilisé jusqu'alors) pour prendre en compte les incertitudes liées à la position de départ des blocs. Pour ces études, seul le Profil P1 sera considéré car sur les deux profils c'est celui qui comporte le moins de variabilité.

Pour l'étude à l'échelle locale, les deux variables (position du lâcher et orientation du bloc) ne sont pas modifiées en même temps. Nous considérerons un seul bloc (Bloc Num2A) qui : (a) Chute depuis plusieurs points de départ dans une région de 4 m x 4 m avec une orientation de départ fixe ; et (b) ce même bloc qui chute depuis un point de départ fixe, mais avec des orientations variables. La Figure 5.52 résume l'effet de ces changements sur la trajectoire et l'étalement des blocs. Comme on peut le constater, un changement dans les conditions de départ, même minime, entraîne une variabilité importante sur les trajectoires

et les zones de dépôts. On remarquera sur cette figure l'importance d'un calcul 3D et le fait que certains blocs ont des trajectoires qui sont parfois en dehors du *"cône"* de dépôt final.

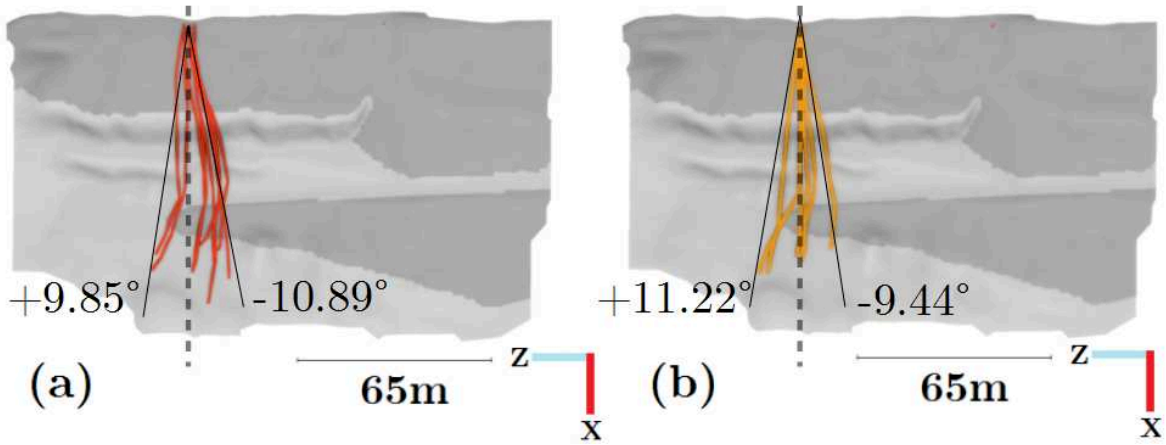


FIGURE 5.52 – (a) trajectoires des blocs pour 9 points de départ (espacement de 2 m entre les points) dans une zone de 4 m x 4 m. (b) exemple de trajectoires qui démontrent l'influence de l'orientation initiale des blocs.

Pour prendre en compte les incertitudes liées à la position de départ des blocs à une échelle un peu plus grande nous avons décalé arbitrairement d'une dizaine de mètres la position initiale de la zone de lâcher de 4m x 4m vers la droite (vers le Profil P2). Dans la pratique, les zones de départ sont approximatives. Son choix dépend de la subjectivité de l'opérateur, qui peut parfois commettre des erreurs d'interprétation ou d'hypothèse. La Figure 5.53 montre l'influence de ce changement de position de la zone de départ sur les points d'arrêt des blocs. Le dépôt résulte des 256 simulations pour les Blocs Num1A et Num2A et concernent uniquement le Profil P1. Comparativement aux résultats précédents (Figure 5.51), on remarque que les distances de propagation sont globalement plus importantes, et une tendance des blocs à dévier plutôt vers la droite (déviation négative) qu'à gauche (déviation positive). Pour le Bloc Num1A, la distance maximale parcourue par le bloc est de 83.48 m (contre 75 m avant décalage) et pour le Bloc Num2A cette distance est de 100.51 m (contre 58.5 m avant décalage).

Le Tableau 5.31 montre l'influence du changement de position de la zone de départ sur l'angle de déviation de l'axe de référence. Pour le Bloc Num2A, nous avons une déviation moyenne de -3.25°(contre une valeur de +5.25 avant décalage) et l'angle d'ouverture du *"cône"* délimitant le dépôt est de 47.55°(contre θ_{P1} =50°avant décalage). De même, pour le Bloc Num1A, la déviation moyenne est de -3.43°(contre +5.21 avant décalage) et l'angle d'ouverture du *"cone"* de dépôt est de 34.37°(contre θ_{P1} =50°avant décalage). L'étendue de ces dépôts est un peu plus faible que celle obtenue avant décalage et les axes de référence moins écartés. Les répartitions en fréquence de l'angle de déviation sont également très différentes (Figure 5.54). Nous observons que le décalage de la zone de départ a une énorme influence sur la direction de l'axe moyen de propagation. Au lieu de dévier à gauche, la plupart des blocs dévient à droite. Les couloirs de propagation diffèrent puisque les trajectoires sont très sensibles aux variations topographiques. Ces variations jouent un rôle très important sur la propagation des blocs, dont les distances parcourues maximales peuvent varier de 20 à 50 mètres pour les deux scénarios. Plus le terrain est accidenté, plus le choix du profil-type (en 2D) semble crucial pour la justesse des résultats. Les étalements des dépôts pour les nouvelles simulations, pour les écrans EC11 et EC12 sont de 18.89 m et 21.56 m, respectivement.

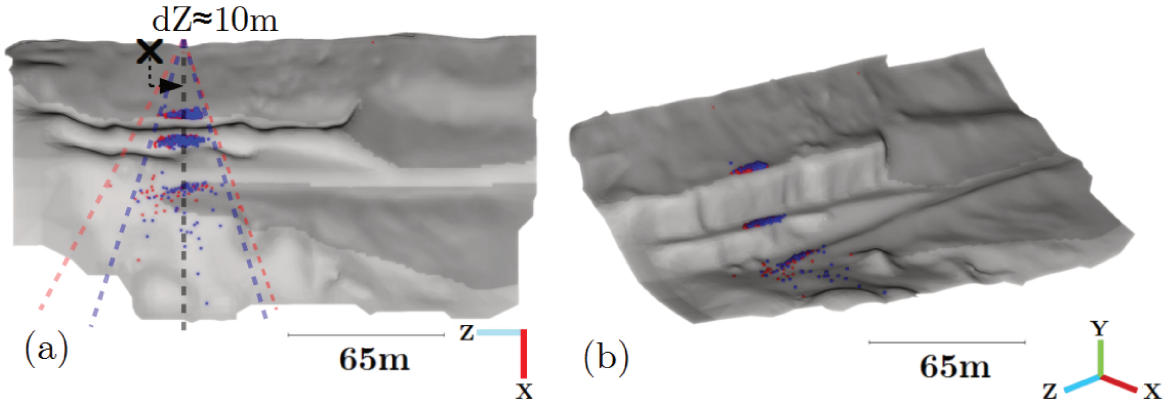


FIGURE 5.53 – Profil P1 : Dispersion latérale des blocs Num1A et Num2A lors du décalage de la zone de départ de 10 mètre sur la droite. Vue de dessus (a) et perspective (b). Les poins rouges représentent les points d'arrêt du Bloc Num1A et les points bleus les points d'arrêt du Bloc Num2A.

Par rapport aux simulations faites précédemment, nous avons une majoration de 32% dans l'estimation de la largeur minimale requise de l'écran EC11 et une sous-estimation de la largeur requise de l'écran EC12 de -4%.

TABLEAU 5.31 – Angle de déviation de l'axe de référence en degré (α_{ref}) pour les Blocs Num1A et Num2A après décalage de la zone de départ.

	α_{ref-1}	max	min
Bloc Num1A	-3.43	+21.86	-12.51
Bloc Num2A	-3.25	+31.53	-16.02

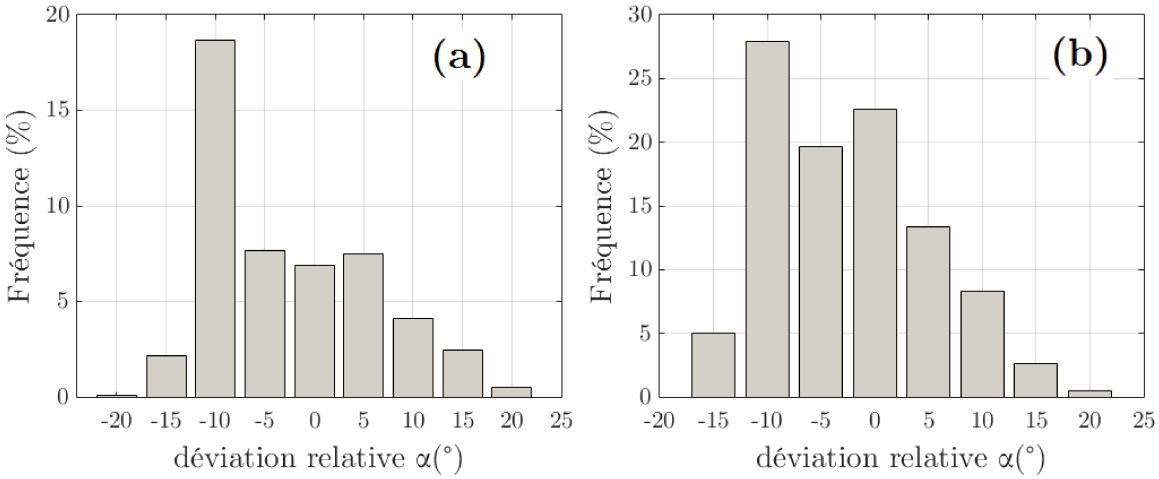


FIGURE 5.54 – Fréquence en pourcentage des blocs Num1A (a) et Num2A (b) par rapport à la déviation relative calculée pour le Profil P1.

Les Tableaux D.1, D.2, D.3 et D.4 de l'Annexe D présentent les valeurs statistiques de passage pour chaque écran du Profil P1 (EC11 et EC12, respectivement). Pour les Blocs

Num1A et Num2A, les vitesses de passage par l'écran EC11 semblent être proches de celles que l'on avait avant décalage de la zone de départ. En moyenne, la vitesse de passage est de 2.36 m/s pour le Bloc Num2A (Tableau D.1) (contre 2.64 m/s avant) et de 3.41 m/s pour le Bloc Num1A (Tableau D.2) (contre 3.62 m/s avant). On remarque également que le Bloc Num2A a une énergie totale moyenne de 1.28 kJ lors du passage par l'écran EC11. Cette valeur est très similaire à celle avant décalage de la zone (1.57 kJ). Concernant le Bloc Num1A, nous avons une énergie totale moyenne de passage par l'écran EC11 égale à 11.35 kJ. Cette valeur est également proche de celle obtenue avant décalage de la zone qui est de 12.40 kJ (Tableau C.1(b)). Nous concluons ainsi que, en termes de vitesse et d'énergie de passage des blocs, la modification de la position de départ semble avoir une importance moindre que celle constatée sur les trajectoires, du moins, jusqu'au passage de l'écran EC11.

Le Tableau D.3 présente les résultats pour l'écran EC12. En moyenne, les valeurs de vitesses ont subi un changement significatif. On note, pour le Bloc Num2A, une vitesse de passage par l'écran EC12 de 4.98 m/s contre 6.54 m/s auparavant. Pour le Bloc Num1A, cette valeur est de 7.99 m/s, presque deux fois plus petite que celle obtenue précédemment (12.55 m/s). Nous avons donc des valeurs moyennes de vitesse de passage plus faibles. En revanche, les distances de propagation sont plus importantes, ce qui témoigne de l'effet important que peut avoir un changement de topographie en partie basse du profil. De plus, ces distances sont liées aux valeurs d'énergie de passage maximales qui sont plus élevées, lors du passage par EC12, pour les deux types de blocs.

Pour les hauteurs de passage, on note également une variation importante : c'est toujours le Bloc Num2A qui franchit l'écran EC11 avec la hauteur de passage la plus élevée par rapport aux autres blocs. La valeur maximale de passage est de 0.43 m (contre 1 m avant le décalage de la zone de lâchers). En revanche, le Bloc Num1A franchit l'écran EC12 avec une vitesse plus élevée, avec une valeur maximale de 7.85 m (contre 5.82 m avant décalage). Il semblerait donc que le décalage de la zone de lâchers induise une augmentation de la vitesse et de la hauteur de passage qui est de l'ordre de 2 m pour l'écran EC12 et une diminution des hauteurs de passage par EC11 de l'ordre de 60 cm. Ceci expliquerait également les distances de propagation plus importantes qui ont été constatées.

5.4 Contribution Interne de IMSRN au Benchmark C2ROP

5.4.1 Introduction

Ce Benchmark interne à IMSRN a été réalisé avec comme objectif principal de tester les différents logiciels trajectographiques utilisés en ingénierie et d'évaluer l'influence qu'à l'opérateur sur les résultats en fonction de son expertise. Les logiciels utilisés sont soit en deux dimensions (2D) ou en trois dimensions (3D).

- Le logiciel Kayass V.40 : logiciel interne IMSRN qui est basé sur le principe du point matériel (*Lumped Mass*), en deux dimensions ;
- Le logiciel Rockyfor3D V2017 : modèle trajectographique probabiliste qui combine à la fois des approches stochastiques couplées à des approches physiques déterministes, en trois dimensions [Dorren, 2016].

Au total 4 opérateurs, plus ou moins expérimentés (Tableau 5.32), ont effectué les simulations numériques en utilisant les deux logiciels sur la base des hypothèses suivantes :

1) Pour la géométrie des blocs :

- **Kayass2D** : Volume des blocs variable entre 0.25 et $0.7m^3$.

- **RockyFor3D** : Volume des blocs variable entre 0.25 et $0.59m^3$, en choisissant une forme cubique pour le calcul des inerties (d1=d2=d3). Autrement dit, les blocs sont classifiés comme des blocs équants.

2) Pour la définition des couloirs de propagation et des zones de départ :

- **Kayass2D** : Choix des profils à partir du MNT fourni. Chaque ingénieur a choisi son propre profil suivant ses propres critères, mais en tenant en compte de la convention suivante établie par l'ensemble des participants (Figure 5.55). Utilisation de *segments* ayant une longueur supérieure à 1 m de longueur sur le profil 2D. Ainsi, chaque profil présente une résolution de plus de 1 m. Le lâcher des blocs s'effectue entre le haut de la pente et +-4 m à l'aval et à une hauteur de 4 m pour le Profil P1 et à une hauteur de 2 m pour P2.
  RockyFor3D : Définition d'une zone de départ sur le versant dans une zone de 4 m x 4 m. Chute d'une hauteur de 4 m par rapport au sol. Résolution des *Rasters* > 1 m.

Tableau 5.32 – Nombre d'années d'expérience de l'opérateur qui a réalisé les simulations.

	Op.1	**Op.2**	**Op.3**	**Op.4**
Nombre d'années d'expérience	4	1	3	2

La Figure 5.55 présente les quatre profils de propagation retenus par l'un des opérateurs pour les calculs trajectographiques 2D. Compte tenu des limitations de l'approche point matériel (pas de déviation latérale), chaque opérateur définit des couloirs de propagation probables, selon son expérience. Pour faciliter la comparaison des résultats, tous les opérateurs ont effectué leurs simulations avec des profils assez voisins de ceux de l'opérateur 2.

5.4.2 Résultats synthétiques et comparaison entre les différents logiciels et opérateurs

Nous présentons dans cette section les résultats numériques obtenus à partir des simulations 2D et 3D. Les résultats (énergie totale, hauteur et probabilité de passage) sont sous forme du quartile à 95% (référencé 95 %P), des valeurs maximales (référencé Max) et des valeurs proposées par l'opérateur pour un dimensionnement (qui est fonction de la valeur la plus probable selon le critère défini par chaque opérateur - référencé Dim.). Le code Kayass 2D n'intègre pas la rotation du bloc et l'énergie totale est donc calculée simplement à travers l'équation $\frac{m.v^2}{2}$). L'énergie totale donnée par Rockyfor (approche 3D utilisée) intègre en revanche les énergies de translation et de rotation.

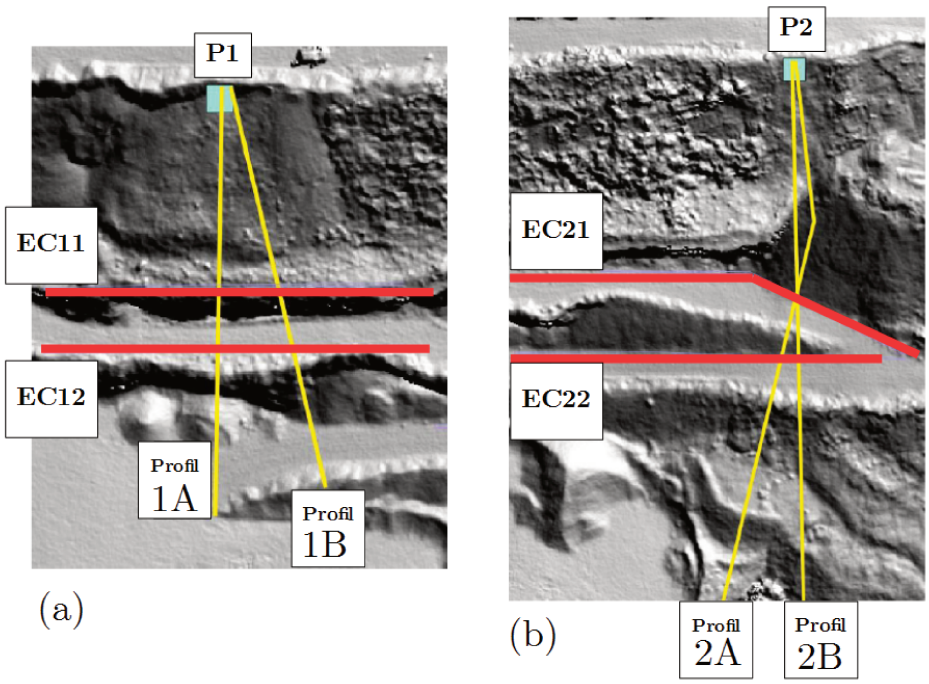


FIGURE 5.55 – Profils-type retenus pour les simulations en 2D par l'opérateur 2. (a) Profils P–1A et P–1B, (b) Profils P–2A et P–2B.

Pour une meilleur comparaison entre les résultats des opérateurs (qui sont exprimés en termes d'énergie et non des vitesses de passage) et les énergies de passage des blocs expérimentaux, nous avons estimé les valeurs des énergies de passage expérimentales à partir de la méthode suivante : Le calcul de l'inertie pour chaque bloc est fait en utilisant les trois dimensions principales $L1$, $L2$ et $L3$ des *Bounding Box* et les masses correspondantes ; où l'énergie totale est calculée comme la somme de l'énergie en translation et en rotation (Équation (5.6)).

$$E_{tot} = E_k + E_{rot} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \tag{5.6}$$

avec $I = 1/3Tr(\mathcal{I})$, où $\mathcal{I}$ est la matrice d'inertie du *Bounding Box*. La vitesse de rotation ω et la vitesse en translation v sont estimées à partir des vidéos.

Les résultats obtenus par chaque opérateur pour l'écran EC11 sont présentés dans les Tableaux 5.33 (en 2D) et 5.34 (en 3D). Les valeurs du quartile à 95% et maximales des énergies de passage obtenues expérimentalement s'affichent en dernière ligne de chacun de ces tableaux (désignées Exp.). On note une grande variabilité des résultats. L'opérateur 1 obtient une valeur d'énergie de passage, en termes de quartile à 95%, de presque 15 fois plus élevée que celle obtenue par l'opérateur 3. On note également que la valeur la plus élevée de la hauteur de passage par l'écran EC11 n'est pas forcément associée à la plus grande énergie de passage. La probabilité de passage, en pourcentage, varie énormément : nous avons un opérateur qui l'estime de 0 à 0.5%, alors que les résultats des simulations effectuées par l'opérateur 2 nous indiquent une probabilité qui s'élève à 33%. Remarquons aussi que, malgré cette grande disparité des résultats, ces derniers sont assez éloignés des résultats expérimentaux. En réalité, la plupart des blocs franchissent la barrière EC11 (les blocs rectangulaires y sont une exception, mais ces simulations ne les englobent pas, puisque la méthode appliquée en 2D est celle du point matériel). Les valeurs d'énergies obtenues par l'opérateur 3 sont très faibles et correspond au seul jeu de données dont les énergies sont sous-estimées. Or, la valeur

retenue pour dimensionnement proposée par cet opérateur s'élève à 50kJ, soit 5 fois plus élevée que la valeur maximale. Les valeurs retenues pour le dimensionnement varient entre 50 kJ et 150 kJ en énergie et entre 1 m et 4 m pour les hauteurs de passage. Le Tableau 5.34 présente les résultats obtenus avec les simulations 3D. On voit ici moins de variabilité, les opérateurs trouvent à peu près les mêmes valeurs statistiques et les valeurs retenues pour le dimensionnement semblent être en concordance. L'utilisation d'un code stochastique produit moins de variabilité dans l'estimation des énergies (moyennes et maximales) et des hauteurs de passage (moyennes et maximales) pour l'écran EC11, quel que soit l'opérateur, même si ces valeurs s'avèrent plus importantes par rapport aux résultats des essais expérimentaux. Les valeurs retenues pour dimensionnement obtenues tant par Kayass 2D que par Rockyfor3D semblent être suffisantes pour retenir les blocs expérimentaux. Le Tableau 5.35 présente

Tableau 5.33 – Résultats au passage de l'écran EC11 - Kayass 2D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**			**Blocs Passants**
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.	%
Op1	73	75	92	1.56	1.76	2	6
Op2	44	122	150	1.34	2.89	3.5	33
Op3	5	10	50	0.5	1	1	0 à 0,5
Op4	15	131	150	1.12	3.11	4	25.70
Exp.	12.2	33.8	–	–	–	–	– 95.8

Tableau 5.34 – Résultats au passage de l'écran EC11 - Rockyfor3D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**		
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.
Op1	69	80	86	1.06	1.26	1.5
Op3	60	60	100	0.5	1	1
Op4	73	85	100	1.06	1.19	2
Exp.	12.2	33.8	–	–	–	–

les résultats obtenus pour l'écran EC12 à partir des simulations 2D. La variabilité selon l'opérateur est toujours très importante : énergies de passages qui varient de 20 kJ à 295 kJ (ici encore on constate un rapport de 1 à 15 entre les opérateurs). A l'exception de l'opérateur 3, tous les opérateurs semblent s'accorder sur la valeur de l'énergie maximale (valeur d'environ 400 kJ qui a été retenue pour le dimensionnement). Concernant les probabilités de passage, les valeurs sont extrêmement variables et varient de 0 à 21.90 %. Ici encore, les simulations de type point matériel semblent sous-estimer, par rapport aux résultats expérimentaux, le nombre de blocs qui franchissent l'écran. Contrairement à ce que l'on avait obtenu précédemment pour les simulations 3D pour l'écran EC11, les résultats obtenus pour l'écran EC12 (Tableau 5.36) sont très différents. Par exemple, nous avons une différence de plus de 85% entre les valeurs maximales d'énergie de passage estimées par les opérateurs 3 et 4. Cet écart s'élève à 87.5% pour les valeurs proposées pour le dimensionnement (hauteurs de passage retenues 7 fois plus élevées entre les opérateurs 3 et 1). Les opérateurs 1 et 4 semblent obtenir des valeurs, pour les hauteurs de passage, qui se situent dans le même ordre de grandeur. Cependant, les valeurs maximales d'énergie de passage diffèrent de 29%. Par rapport aux énergies retenues pour dimensionnement tirées des simulations 2D, seul l'opérateur 3 sous-estime la capacité

minimale requise. Pour les résultats de la 3D, seul l'opérateur 4 fournit une valeur suffisante. Pour le Profil P2, les résultats des simulations 2D pour l'écran EC21, sont présentés dans

Tableau 5.35 – Résultats au passage de l'écran EC12 - Kayass 2D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**			**Blocs Passants**
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.	%
Op1	295	303	370	3.5	4	4.5	0
Op2	34	345	350	3.66	4.16	4.5	13
Op3	20	40	50	1.5	3	2	0 à 0.5
Op4	70	353	400	4.13	13.8	7	21.90
Exp.	213.6	293.8	–	–	–	–	– 39.6

Tableau 5.36 – Résultats au passage de l'écran EC12 - Rockyfor3D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**		
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.
Op1	225	250	281	5.76	7.56	7.5
Op3	50	50	50	1	1	1
Op4	308	340	400	5.33	6.15	7
Exp.	213.6	293.8	–	–	–	–

le Tableau 5.37. Concernant les probabilités de passage, nous observons une variabilité des résultats très importante : de 0 (Opérateur 3) à 55% (Opérateur 2). Pour les hauteurs de passage, elles varient entre 3 et 5 mètres. Étonnement, les hauteurs de passage maximales ne sont pas associées aux valeurs maximales d'énergie de passage. L'opérateur 3 obtient une énergie maximale égale à 150 kJ et une hauteur associée de 1.5 m, alors que l'opérateur 4 estime à 114 kJ l'énergie maximale et à 4.65 m la hauteur de passage. En 2D, l'opérateur 3 est celui qui sous-estime souvent les énergies de passage, que ce soit le quartile à 95%P ou la valeur maximale. L'opérateur 4 sous-estime la valeur maximale en 24%, ce qui rend sa valeur retenue pour dimensionnement insuffisante par rapport aux résultats expérimentaux. Les résultats pour les simulations en 3D pour l'écran EC21 sont présentés dans le Tableau 5.38. En termes d'énergie maximale, nous avons un rapport de 2 entre l'opérateur 3 et l'opérateur 4. L'opérateur 1 estime la hauteur de passage maximale à 3.06 m, mais la hauteur qu'il a retenu pour le dimensionnement est de 2.5 m. Cependant, nous observons que les opérateurs 1 et 4 fournissent des valeurs de dimensionnement satisfaisantes, contrairement aux résultats obtenus par l'opérateur 3.

La variabilité des résultats obtenus à partir des simulations 2D pour la barrière EC22 (5.39) est très faible en termes de probabilité de passage, mais aucun de ces valeurs ne correspond à la réalité (82%). Cependant, pour les énergies et hauteurs de passage, ces valeurs sont très éloignées si l'on compare, par exemple, les opérateurs 2 et 4, ou encore 3 et 4. Les résultats des simulations 3D sont présentées dans le Tableau 5.40. Les hauteurs de passage retenues pour le dimensionnement sont de l'ordre de 1 à 5 mètres. Les écrans semblent être dimensionnés en fonction des énergies maximales, et les hauteurs de passage à partir des valeurs les plus probables (qui sont définies de manière subjective par l'opérateur en fonction de la valeur du quartile à 95% ou 99% ou plus simplement en fonction des caractéristiques des produits disponibles sur le marché). Cette fois ci, c'est l'opérateur 2 qui sous-estime les valeurs

Tableau 5.37 – Résultats au passage de l'écran EC21 - Kayass 2D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**			**Blocs Passants**
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.	%
Op1	175	180	220	2.15	3.07	3	4
Op2	76	194	200	1.2	2	3	55
Op3	20	150	50	1	1.5	1	0 à 10
Op4	65	114	150	1.41	4.65	5	13.59
Exp.	52.5	152.5	–	–	–	–	– 92.9

Tableau 5.38 – Résultats au passage de l'écran EC21 - Rockyfor3D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**		
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.
Op1	171	178	214	1.86	3.06	2.5
Op3	100	100	100	1	3	1
Op4	179	203	250	0.67	1.29	2
Exp.	52.5	152.5	–	–	–	–

(en 95% et maximale) des énergies en réalisant les simulations 2D, mais les deux opérateurs (2 et 3) échouent dans la proposition des valeurs de dimensionnement. Néanmoins, les valeurs retenues pour dimensionnement obtenues à partir des simulations 3D (Rockyfor3D) sont satisfaisantes pour n'importe quel opérateur.

Tableau 5.39 – Résultats au passage de l'écran EC22 - Kayass 2D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**			**Blocs Passants**
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.	%
Op1	100	104	125	1.94	1.94	2.5	1
Op2	22	28	25	0.25	0.4	1	1
Op3	50	100	50	1	1.5	1	0 à 2
Op4	65	114	150	1.41	4.65	5	4.05
Exp.	43.2	73.9	–	–	–	–	– 82.1

Tableau 5.40 – Résultats au passage de l'écran EC22 - Rockyfor3D.

	Énergie de passage (kJ)			**Hauteur de passage (m)**		
	95% P	Max	Dim.	95% P	Max	Dim.
Op1	98	110	123	3.06	3.56	4
Op3	90	90	100	1	2	1
Op4	147	157	200	3.48	4.6	5
Exp.	43.2	73.9	–	–	–	–

5.4.3 Dimensionnement des écrans

Suite au Benchmark interne réalisé au sein de l'entreprise IMSRN, une réunion entre les participants a permis d'établir une proposition commune pour le dimensionnement des barrières EC11, EC12, EC21 et EC22. Vu la variabilité des résultats obtenus entre les opérateurs et les codes 2D et 3D, deux propositions de dimensionnement ont été faites (Tableaux 5.41 et 5.42). On constate qu'au final les valeurs retenues pour les énergies sont proches de celles de l'opérateur 4, en 2D et en 3D, et pour les hauteurs de passage de celles de l'opérateur 1.

Tableau 5.41 – Proposition de dimensionnement : Simulations 2D.

	EC11	EC12	EC21	EC22
Qualification de l'aléa de propagation :	Élevé	Moyen	Élevé	Moyen
Capacité de la protection (kJ) :	100	500	250	250
Énergie maximale (Exp.) (kJ) :	33.8	293.8	152.5	73.9
Hauteur nominale (m) :	2	7	3	2.5
Longueur (m) :	25	25	30	30

Tableau 5.42 – Proposition de dimensionnement : Simulations 3D.

	EC11	EC12	EC21	EC22
Qualification de l'aléa de propagation :	Élevé	Moyen	Élevé	Moyen
Capacité de la protection (kJ) :	100	500	250	250
Énergie maximale (Exp.) (kJ) :	33.8	293.8	152.5	73.9
Hauteur nominale (m) :	1.5	7.5	2.5	4
Longueur (m) :	25	25	30	30

Le dimensionnement en utilisant les valeurs maximales de passage et d'énergies sont bien employés. D'une manière globale, les valeurs retenues pour le dimensionnement suivent la logique suivante : l'énergie la plus élevée (généralement obtenue par l'opérateur 4) est celle qui est prise en compte, et qui est augmentée en fonction de la valeur de la sollicitation des produits disponibles sur le marché. Pour l'estimation de la hauteur de passage, celle qui est retenue est la hauteur la plus probable (souvent obtenue par l'opérateur 1), au lieu de la hauteur maximale de passage. Il existe une grande variation de résultats selon l'opérateur, ce qui est attendu vu la grande variabilité des hypothèses initiales et des subjectivités qui peuvent se présenter dans un tel exercice [Delonca *et al.*, 2016]. Ces hypothèses ont évidemment une influence sur la quantification de l'aléa de propagation *"à dire d'expert"*, qui dans ce cas spécifique, n'est rien d'autre qu'une valeur retenue après réflexion faite à partir des résultats des logiciels qui ont été utilisés. L'expertise en trajectographie et les années d'expérience de l'opérateur semblent également avoir un poids important sur la justesse des résultats, mais ne sont pas toujours une règle. Par exemple, dans le dimensionnement de l'écran EC12 et pour l'opérateur 3, la valeur estimée du 95%P est de 34kJ et de l'énergie maximale est égale à 345kJ. Cet opérateur est souvent celui qui s'éloigne le plus des résultats expérimentaux, tant pour l'estimation au quartile à 95%P que pour l'estimation des énergies maximales ; et aussi pour les énergies retenues de dimensionnement. Pourtant, il est un des opérateurs les plus expérimentés en trajectographie, derrière l'opérateur 1. Les résultats obtenus par l'opérateur

1, 2 et 4 sont, dans la plupart des cas, largement satisfaisants. Ce dernier, n'ayant que très peu d'expérience vis à vis d'autres participants, est celui dont fournit les meilleurs résultats.

Pour le dimensionnement des barrières, les longueurs retenues pour les barrières EC12 et EC22 sont montrées dans les Tableaux 5.41 et 5.42, et semblent avoir une bonne correspondance avec les valeurs des longueurs données par les simulations du Zonage C. Nous observons une majoration de 2.5% par rapport à la barrière EC12 (22.6m , Figure 5.51 (B)) et une majoration de 8% par rapport à EC22 (27.5m, Figure 5.51 (B)). Pour les longueurs des barrières EC11 et EC21, nous remarquons une surestimation des longueurs en relation aux résultats des simulations numériques : nous obtenons une augmentation de la longueur estimée de presque 50%, pour EC11 (12.7m) comme pour EC21 (12.75m).

Les résultats fournis par le Benchmark interne d'IMSRN des longueurs des barrières fictives permettent de préconiser une marge de sécurité vis à vis des résultats des longueurs obtenues à partir des essais expérimentaux. Ces longueurs semblent, dans un premier moment, être suffisantes pour contenir l'ensemble des blocs passants. Par contre, aucune précision quant à la méthodologie d'estimation des déviations latérales n'a été fournie pour la 2D.

Ces propositions de dimensionnement doivent également prendre en considération le positionnement de la barrière sur les profils. Les données fournies telles qu'elles nous ont été transmises ne nous permettent pas de les préciser. Si cette proposition de dimensionnement est effectuée par rapport à l'écart entre les deux sections (ou profils) P1—A et P1—B pour le Profil P1 et entre les sections P2—A et P2—B, l'emplacement reste imprécis et n'englobe pas les trajectoires réellement effectuées. Les résultats expérimentaux et numériques affichent la tendance des blocs à dévier à gauche (vers le sens positif de la convention faite en début de chapitre), plutôt qu'à droite. La proposition de dimensionnement devient alors insuffisante du moment où l'emplacement exact devient nécessaire, mais les estimations des longueurs minimales restent cohérentes.

5.4.4 Remarques et discussion

On note, après une analyse des vitesses de passage du Profil P1, que les codes numériques basés sur les approches de type *lumped mass* se sont montrés insuffisants dans la modélisation des pentes très raides où on remarque un effet de roulement plus important ; les valeurs de vitesses de passage par l'écran EC11 présentées sont soit très élevées (proches de la valeur maximale ou dépassant la valeur réelle maximale) soit extrêmement faibles comparativement aux résultats expérimentaux (les blocs s'arrêtent sur la pente, sans franchir l'écran EC11). Le peu de contrôle sur les paramètres dissipatifs du sol lors de l'application aléatoire des paramètres de contact, ajouté à la non-prise en compte de la vraie géométrie du terrain ni de la dispersion latérale peuvent avoir un effet important sur l'estimation de ces vitesses de passage. L'opérateur essaie d'ajuster les paramètres choisis aléatoirement de manière à compenser le fait que dans ce type de code, l'intégration de l'énergie de rotation est inexistante. Ces choix ont donc pour conséquence que les blocs ralentissent excessivement ou sont bloqués en haut de la pente.

Les résultats partiels du Benchmark C2ROP ont été présentés par F. Bourrier lors du Symposium international Rock Slope Stability en 2018. Ces analyses dérivent des données de la Phase 1 (essais numériques à *l'aveugle*). Les Figures 5.56 et 5.57 synthétisent ces résultats sous forme de *boxplot*. Les valeurs expérimentales des vitesses de passage par les écrans EC11, EC12, EC21 et EC22 (vitesse moyenne sur la Figure 5.56 et vitesses maximales sur

la Figure 5.57) sont représentées respectivement sur les Figures (a), (b) (c) et (d) par les traits rouges (quartiles à Q_{50}) et verts (valeurs moyennes). Les résultats obtenus par les différents participants sont représentés en noir : valeurs minimales et maximales en traits fins, valeurs moyennes par des points, et valeurs du quartile à 50% en traits pleins. Parmi les 17 participations du Benchmark, nous avons :

- 10 : simulations de type 2D *"Lumped Mass"*;
- 1 : simulation de type 2D avec intégration explicite de la forme ;
- 5 : simulations contenant des approches 3D de type *"Lumped Mass"*;
- 1 : approche 3D avec prise en compte de la forme explicite des blocs (Rockable) menée pendant la thèse.

Excepté pour les simulations de IMSRN et les simulations 3D de forme explicites, nous n'avons aucune autre information sur la méthode de calcul employée par les autres participants ni sur leurs approches. On note qu'il existe une large variabilité des résultats, qui est probablement issue non seulement du changement de l'opérateur, mais aussi de son expérience et des prises de décision qui peuvent être subjectives. Tous ces facteurs combinés, ajoutés au choix de l'approche, donnent comme résultat cette énorme variabilité sur les réponses. Cependant, les prédictions des valeurs maximales semblent converger pour tous les opérateurs. A ce stade du Benchmark (simulations réalisées à l'aveugle), certains phénomènes n'ont pas été correctement traduits comme : les faibles vitesses de passage au niveau de l'écran EC11 (généralement mal estimées par la plupart des participants – cf. Figure 5.56), les petits rebonds (qui dans certains codes sont difficiles à modéliser et qui sont traduits par un mécanisme de roulement) et les rebonds excessifs en bas de pente (ceci est l'un des problèmes numériques auquel nous avons été confrontés lors du premier zonage en utilisant Rockable, et pour lequel les blocs arrivaient en pied de falaise avec une vitesse très élevée). Ces résultats témoignent de l'importance de l'exercice de calage des essais numériques aux essais expérimentaux, et ce quelle que soit l'approche numérique utilisée, et la nécessité d'un travail de calibrage préalable qui est souvent négligé (à défaut d'une expertise et d'une grande expérience dans le domaine). L'utilisation "irréfléchie" de ces outils peut avoir une grande influence sur l'estimation des distances d'arrêt, ou encore sur les probabilités de passage (*"Reach Probability"*) qui sont des données d'extrême importance dans l'analyse du risque.

A titre indicatif, les résultats que nous avons obtenus à la fin de la Phase 2 du Benchmark (soit après calibration des paramètres) avec Rockable en considérant le zonage C sont comparées pour les deux Profils P1 et P2 avec les résultats expérimentaux dans le Tableau 5.43. Dans ce tableau, il apparaît clairement que la calibration des paramètres a permis d'améliorer les résultats en termes de vitesses de passage par les écrans (les seules données disponibles). N'ayant pas reproduit de manière exacte la géométrie des blocs (répartition en masse et en forme) il est logique que des disparités apparaissent tant sur les valeur moyennes des vitesse (représentativité des distributions des blocs en termes de forme insuffisamment réaliste) ou sur les vitesses maximales (présence de formes de bloc non conventionnelle). La seule comparaison des résultats avec les vitesses de passage est aussi très réductrice.

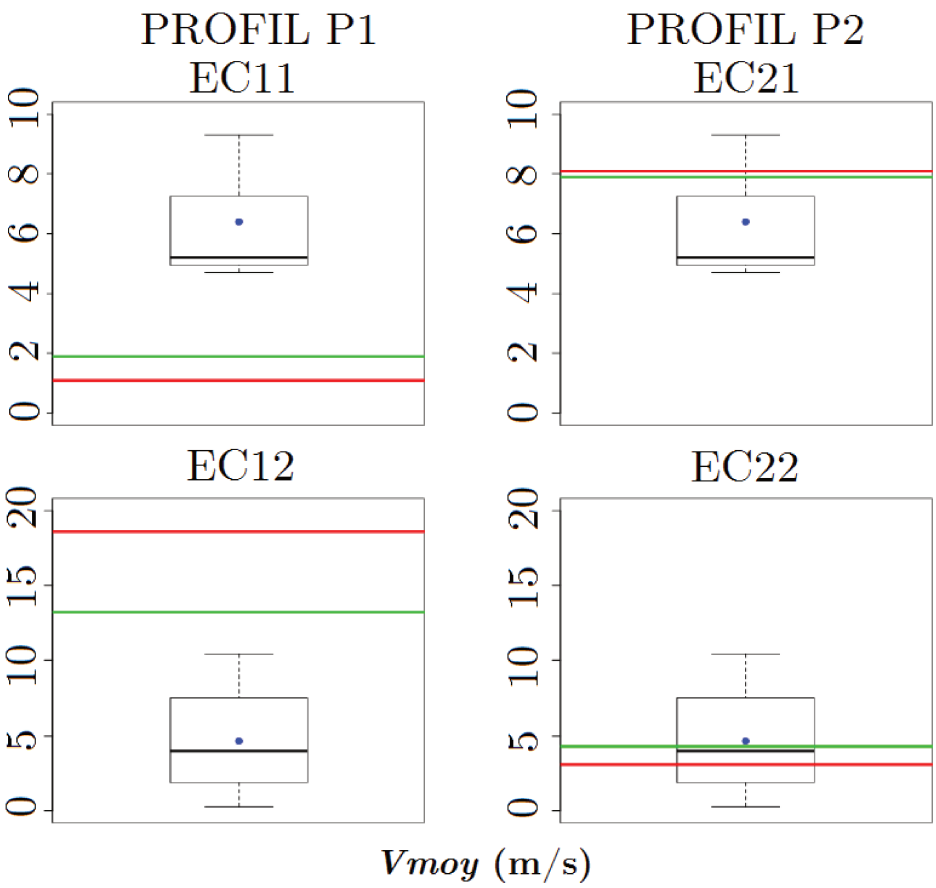


FIGURE 5.56 – *Boxplot* des résultats partiels du Benchmark C2ROP en vitesses moyennes (V_{moy}) de passage [Bourrier, 2018] : valeurs expérimentales en rouge (quartiles à Q_{50}) et vert (valeurs moyennes) ; résultats théoriques en noir : valeurs minimales et maximales en traits fins, valeurs moyennes représentées par des points bleus, et valeurs du quartile à 50% en traits pleins.

TABLEAU 5.43 – Tableau comparatif des vitesses maximales (V_{max}), moyennes (V_{moy}) et du quartile à 95% ($V_{95\%P}$), en mètres par seconde, en fonction des résultats expérimentaux (A) ; résultats numériques issus de la Phase 1 qui ont été transmis à l'organisation du Benchmark C2ROP (B) ; et des résultats numériques obtenus à partir du Zonage C (C).

	V_{max} (m/s)			V_{moy} (m/s)			$V_{95\%P}$ (m/s)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
EC11	9.0	14.05	9.92	1.9	8.39	3.43	10.95	6.8	7.39
EC12	19.5	23.54	19.34	13.2	16.75	9.89	19.2	21.23	18.78
EC21	13.0	15.83	11.07	7.9	7.98	6.29	11.2	12.03	9.08
EC22	14.0	21.54	11.53	4.3	12.17	5.08	8.8	15.52	9.52

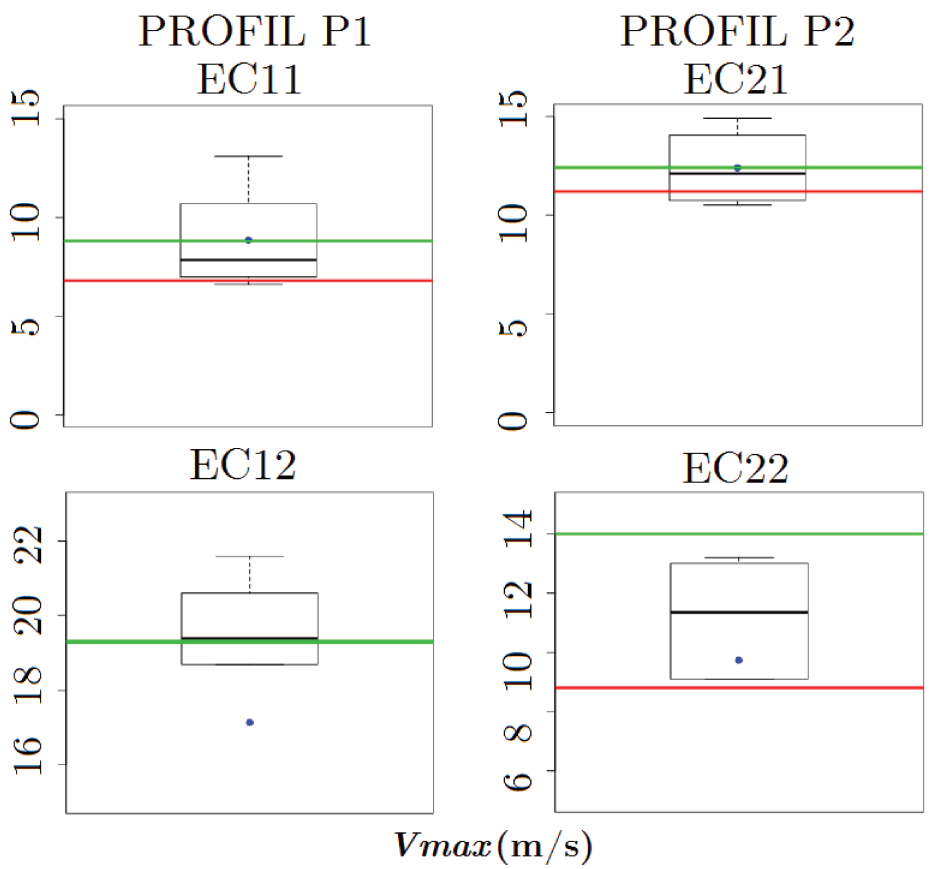


FIGURE 5.57 – *Boxplot* des résultats partiels du Benchmark C2ROP en vitesses maximales (V_{max}) de passage [Bourrier, 2018] : valeurs expérimentales en rouge (quartiles à Q_{50}) et vert (valeurs moyennes) ; résultats théorique en noir : valeurs minimales et maximales en traits fins, valeurs moyennes représentées par des points bleus, et valeurs du quartile à 50% en traits pleins.

5.5 Conclusions et perspectives

- L'effet de la forme du profil de propagation sur la dissipation de l'énergie est remarquable, ainsi que la taille et la géométrie du bloc. L'effet du changement des conditions de lâcher nous indique une forte influence de la topographie sur la propagation des blocs, ainsi que l'orientation de départ. Ces deux effets ont une grande influence sur la déviation latérale. Ceci est une variable souvent peu exploitée, car les codes traditionnels ne tiennent pas compte de la forme des blocs de manière explicite.

- Les classements des blocs suivant leur forme, ainsi que la définition du coefficient de forme (c_f) proposé pour l'exploitation du Benchmark C2ROP, ont une limitation associée à l'utilisation des trois dimensions principales (désignées L_1, L_2 et L_3) sans prendre en compte l'angularité des blocs. Parmi les blocs qui ont été lâchés, environ 3 d'entre eux sont répertoriés comme étant de forme cubique ou rectangulaire alors qu'après une analyse visuelle, on note qu'en réalité ces blocs s'approchent plus d'une géométrie triangulaire. Comme perspective à ce travail, une analyse plus complète permettant une classification des blocs en intégrant les formes triangulaires serait envisageable. Dans des systèmes de classification récents, l'analyse par images 2D serait plus adaptée, comme par exemple le classement *"d'équilibre"* proposé par [Szabó & Domokos, 2010].

- Plusieurs séries de simulations numériques ont été effectuées. La plupart d'entre elles ont été faites non seulement pour répondre aux différentes phases du Projet National C2ROP, mais aussi pour comprendre le rôle des différents paramètres sur la trajectographie de blocs : nous avons fait varier le volume, l'orientation et le point de départ, et des hypothèses sur le zonage ont été pré-établies. Compte tenu du temps important nécessaire à chaque série de simulations, et le temps consacré aux exercices de calage, les analyses ont été faites en considérant seulement 3 zonages (A, B et C), mais d'innombrables configurations sont possibles. Il conviendrait, par exemple, d'estimer la finesse de maillage nécessaire pour limiter les imprécisions dues à la rugosité et résolution du modèle numérique du terrain. L'expérience acquise par l'opérateur au cours du temps lui permet de bien maîtriser son code et de mieux comprendre les mécanismes qui sont reproduits en fonction du choix et de la variation des paramètres. Cette analyse a été effectuée de manière plus rapide grâce aux tests de sensibilité de Sobol effectués au chapitre 3. Même si les simulations ne reproduisent pas les observations à 100%, les trajectoires obtenues peuvent correspondre à des évènements ne s'étant pas encore produits [Dorren & Berger, 2013]. Pour les trajectoires numériques obtenues avec le Bloc Num3A, par exemple, nous avons plusieurs possibilités de position d'arrêt, alors que le Bloc 89 (géométriquement identique au Bloc Num3A) n'a été lancé qu'une seule fois. Cependant, les zones d'arrêt des blocs numériques semblent englober le résultat expérimental avec une précision satisfaisante.

- Les changements subis par le sol impacté durant l'exécution des essais expérimentaux auraient mérité d'être pris en compte numériquement. Ceci aurait permis d'intégrer le changement de la capacité absorbante/dissipative de l'énergie par le sol lors du premier impact dans la zone où se produisent les premiers rebonds. Ce changement peut se faire à travers des déformations du sol, des déplacements de matériau granulaire, de la plastification, ou même par un changement du profil si jamais un des blocs rocheux reste

sur place, modifiant la topographie de façon critique et empêchant un nouveau bloc de traverser cette région. Actuellement, ceci n'est pas intégré au code de calcul, et il est possible que les résultats obtenus pour les probabilités de passage des blocs qui ont été lancés pour le zonage C s'écartent des résultats numériques tout simplement parce que les paramètres géométriques (et pourquoi pas les paramètres de dissipation) locaux auraient du être actualisés après chaque premier impact. D'autres modifications sur le terrain ont aussi été observées : des blocs qui se sont déposés, pour le Profil P1, dans le ressaut intermédiaire n'ont pas été enlevés. Ainsi, les blocs restaient bloqués dans cette partie du profil. La même remarque peut être faite pour les blocs qui se déposent en bas de pente. Cette problématique a moins d'incidence pour le Profil P2. Par contre, certains d'entre eux (environ 5 blocs) se sont fragmentés le long du trajet. Par simplicité, nous avons enlevé de nos analyses les points d'arrêt multiples relatifs à ces essais.

- Un caractère "stochastique" donnerait plus de réalisme aux résultats des simulations mais n'a pas pu être mis en place car nous nous sommes limité aux conditions déterministes du code qui engendrent déjà des analyses complexes. Cependant, nous avons pu analyser le rôle de la forme et en produire des statistiques en fonction des classifications établies. Cela met en valeur les informations produites à travers les simulations effectuées avec l'approche discrète et qui peuvent servir de base pour des futures études.

- Les outils 3D sont souvent utilisés en bureau d'études pour évaluer la déviation latérale (variable encore peu exploitée et inaccessible à travers des codes traditionnels en deux dimensions). Ils sont également couramment utilisés pour définir les possibles couloirs de propagation. Ces couloirs sont ensuite extraits (en coordonnées x,y) et utilisés pour le calcul des vitesses, hauteurs et énergies de passage en 2D. Compte tenu des valeurs maximales souvent utilisées pour le dimensionnement des parades, cette pratique conduit à des résultats satisfaisants. Cependant, cette approximation crée des incertitudes liées aux distances de propagation et sur la quantification de l'énergie et hauteurs de passage. Par ailleurs, les points d'arrêt expérimentaux, ainsi que les résultats des simulations numériques démontrent une tendance des blocs à dévier dans le sens positif de la convention faite en début de chapitre ; soit vers la gauche. Le choix du profil P1–B lors du Benchmark interne IMSRN constitue une incohérence dans l'étude trajectographique, puisqu'il assume que les blocs dévient à droite, vers le sens négatif de la convention. Nous avons vu dans la Section 5.3.5.7 que le passage des blocs par les couloirs plus à droite entraîne des vitesses de passage plus élevées, puisque la géométrie du terrain est extrêmement variable. Comme perspective d'études, un travail basé sur la sensibilité des résultats du au changement de la rugosité du terrain serait envisageable pour quantifier ces effets avec plus de précision, ainsi qu'une étude sur la fragmentation des blocs lors de la propagation.

Conclusions générales

À ce stade, aucune solution logicielle n'est capable d'englober toutes les facettes de la problématique des risques gravitaires telles que la trajectographie, compte tenu de l'énorme complexité que ces phénomènes représentent. À l'origine de ces phénomènes se trouvent les paramètres géométriques, rhéologiques et géomorphologiques, qu'il faut étudier minutieusement. Il est impossible de les analyser tous simultanément, puisqu'un travail de thèse impose des limitations de temps. Ainsi, nous avons choisi de restreindre cette étude aux blocs isolés de petits volumes ($< 100m^3$), pour lesquels les simulations faites dans cette étude avec Rockable n'intègrent ni les phénomènes de fracturation, ni les déformations que subit le sol lors de l'impact. Mais ce sont deux aspects qui peuvent faire l'objet d'une future étude. Les partenariats qui existent actuellement entre les laboratoires de recherche et le secteur privé semblent fructueux, même si la compréhension des tous les aspects liés à la propagation des blocs et à la manière dont l'énergie est dissipée pendant leurs parcours reste encore à améliorer. Nous montrons, néanmoins, des résultats intéressants concernant la détermination des paramètres de contact et l'effet de forme des blocs rocheux, et des possibilités diverses d'études en perspective, malgré le manque de ressources ou de bases de données expérimentales normatives. Les démarches effectuées dans le cadre de la thèse ont été faites suivant les conditions et les moyens disponibles à chaque stade de ce travail, qui comprend non seulement l'expertise acquise dans l'application des méthodes DEM dans la définition des blocs rocheux, mais aussi les moyens matériels qui restent parfois limités. L'utilisation de la DEM nous permet d'avoir une bonne maîtrise des bilans énergétiques et des transferts des forces et moments au niveau de chaque contact de manière plus efficace. La plus grande contrainte actuelle dans l'application de la méthode reste encore les temps de calcul. Ceux-ci augmentent en fonction de la complexité des formes qui sont intégrées dans le code, et ce malgré les efforts mis en œuvre dans de nouvelles techniques de détection de contacts, qui réduisent considérablement le nombre de recherche à effectuer à chaque pas de temps. Par exemple, les calculs effectués dans le cadre des essais de la SNCF (300 pour chaque configuration) avec une géométrie de bloc simple, ont duré environ 30 minutes sur un PC de calcul classique. Pour la campagne expérimentale du projet C2ROP, la durée des calculs dépend énormément de la complexité de la géométrie de chacun des blocs lancés, (plus de 12 jours pour l'ensemble des simulations effectuées avec le bloc le plus complexe). Ces calculs longs sont difficilement compatibles avec des études d'ingénierie compte tenu des délais très serrés imposés par les commanditaires. Dans un futur proche, si la tendance observée ces dernières années dans le développement de la puissance de calcul des ordinateurs se poursuit, c'est seulement une question de temps pour que la DEM devienne de plus en plus utilisée – et, pourquoi pas, quotidiennement appliquée en bureau d'études. Un des plus grands atouts de la DEM est sa capacité à intégrer des formes réalistes de blocs, à partir des nuages de points (obtenus par photogrammétrie ou lidar), ce qui est très rarement fait dans la pratique. Cependant, de nouvelles approches commencent à voir le jour. Avec la DEM, un grand nombre de problématique peut être envisagée, puisqu'il est aisé pour l'opérateur d'y intégrer les phénomènes physiques qu'il souhaite

appréhender. Par contre, l'absence de données expérimentales – surtout à grande échelle – démontre la difficulté du paramétrage et de la corrélation de ces paramètres optimisés avec les données classiques de la géomécanique. Cela rend complexe l'utilisation ou l'extrapolation des paramètres, identifiés pour une étude donnée, à d'autres cas concrets. Ainsi, une procédure d'optimisation pour chaque code et pour chaque application doit être envisagée par ses développeurs ; du moins pour obtenir une première estimation. C'est justement cette idée qui a conduit à l'établissement de la méthodologie présentée dans le chapitre 3. Le choix d'avoir réalisé des essais expérimentaux à petite échelle permet, à un coût raisonnable, de contrôler précisément les conditions d'impact et de maîtriser les moyens d'analyse. Les essais à grande échelle, comme ceux effectués dans le cadre du projet C2ROP sont, par essence, plus pertinents compte tenu de leur réalisme. Cependant, pour la méthode d'optimisation des paramètres que nous avons développée, les données recueillies ne sont pas toujours adaptées. De même, les conditions de réalisation des essais à grande échelle sont plus difficilement maîtrisables et contrôlables, puisque les conditions d'impact et les pertes d'énergie lors du premier rebond ne constituent pas des données facilement accessibles. Le fait que chaque bloc n'ait été lâché qu'une seule fois, ne permet pas d'effectuer une analyse de sensibilité, compte tenu du manque de répétabilité et du peu de contrôle sur les conditions initiales. Dans l'idéal, des essais d'impact de blocs rocheux en milieu naturel seraient souhaitables, mais le coût très élevé de ces essais est un frein considérable souvent rédhibitoire à leur réalisation.

✓ Considérations sur la méthode d'optimisation

Les volumes des petits blocs que nous avons testés lors de cette campagne expérimentale ne sont pas représentatifs des volumes réels les plus souvent rencontrés dans la nature, mais permettent une répétabilité des procédures expérimentales indispensable pour l'application des tests statistiques et pour analyser la sensibilité des paramètres. Pour valider la procédure mise en place, une étude portant sur l'effet de la distorsion entraînée par le système optique de l'appareil photo a été menée. À petite échelle, ces effets ont peu d'influence sur l'estimation des vitesses expérimentales, ce qui a été prouvé à travers des tests statistiques classiques. De même, l'influence du changement d'opérateur dans le traitement des données (et de la reconstruction des trajectoires) est moindre. Finalement, nous pouvons affirmer que cette méthodologie expérimentale de reconstruction des trajectoires expérimentales et d'obtention des vitesses incidentes et réfléchies, bien qu'appliquée à des petits blocs de formes académiques, donne des résultats très satisfaisants. Il nous restait à connaître l'applicabilité de cette méthode dans l'estimation des paramètres dissipatifs en grandeur réelle, ce qui a été fait dans les chapitres 4 et 5 L'identification des paramètres les plus influents qui affectent les vitesses réfléchies a été primordiale pour l'ajustement des paramètres estimés lors de la campagne expérimentale C2ROP. Le couple μ et μ_R semble avoir un plus grand impact sur les vitesses réfléchies V_{x+} et ω_+ ; alors que la vitesse verticale V_{y+} est quasi exclusivement contrôlée par le coefficient de restitution normale e_n^2, dans le cas d'un sable fin. D'autres types de sol doivent être testés dans le futur afin d'établir une corrélation entre les paramètres DEM et les paramètres classiques d'interaction. Des développements dans ce sens ont été effectués en lien avec le code MPM développé dans le cadre de la thèse de Gracia Danies [2018], pour lequel la cohésion et la viscosité du sol peuvent être intégrées dans un contexte de contrôle des processus physiques liés à l'impact. Dans le cadre de la thèse, nous avons constaté qu'un modèle stochastique simple (application des distributions uniformes) est capable de prédire les vitesses avec une très bonne précision, même pour des formes complexes, telles que les blocs triangulaires. Ceci ayant été établi pour des expérimentations simples impliquant un seul rebond et un seul type de sol, des tests, prenant en compte d'autres conditions initiales de départ et de vitesses, seraient souhaitables pour établir des corrélations plus appropriées. Le couplage mécano-probabiliste en utilisant le test de Monte Carlo a permis de valider l'uti-

lisation des paramètres sous forme de distribution uniforme, dont les valeurs des vitesses de sortie qui sont en très bonne concordance avec les résultats expérimentaux. A l'avenir, une combinaison de techniques telles que le *Tracking Motion* pour la reconstruction automatisée des trajectoires réelles des essais expérimentaux, et l'optimisation des paramètres de contact à travers des techniques qui dérivent du *Deep Learning* serait envisageable. L'application de l'intelligence artificielle aux techniques de traitement d'images et dans l'analyse des trajectoires des blocs permettra l'évaluation et l'identification plus rapides des paramètres impliqués dans le rebond. Le développement croissant de ces techniques d'optimisation seront nécessaires et certainement de plus en plus courantes. Mais pour cela, un nombre encore plus important d'essais expérimentaux est demandé. L'automatisation de la procédure de traitement des vidéos devient alors incontournable par souci d'économie de temps.

✓ Essais expérimentaux à moyenne échelle

Les essais expérimentaux de la SNCF nous ont permis de tester la procédure d'optimisation pour la première fois lors d'une campagne de lâcher de blocs *in situ* à moyenne échelle. Le but initial était de parvenir à estimer les vitesses d'impact des blocs sur le ballast et les zones de répartition des blocs sur la voie ferrée. Trois types de blocs B1, B2 et B3 ont été lancés, mais seules les données concernant les blocs de type B1 et B2, lâchés des positions 1 et 2, ont été fournies pour comparaison. Nous avons remarqué que, pour une valeur fixe de e_n^2, l'utilisation arbitraire d'une gamme de valeurs aléatoires pour les paramètres μ et μ_R engendre des résultats irréalistes, vis à vis des résultats expérimentaux. Les effets de glissement excessifs et l'encastrement des blocs dans le sol démontrent l'importance du choix de ces deux paramètres qui doit être compatible avec les observations de terrain, puisque, comme nous l'avons démontré, il existe un domaine plus conforme contenant les valeurs de μ et μ_R. Les conditions limites qui ont guidé l'identification de ce domaine sont tirées directement des observations faites à partir des vidéos de lâcher qui ont été enregistrées. Selon le Chapitre 2, le paramètre μ intègre la butée du sol, en plus de la dissipation par frottement pur. Ainsi, une première estimation de la valeur minimale égale à $\tan\phi$ semblerait cohérente, où ϕ est le coefficient de frottement interne du matériau.

✓ Considérations sur le chapitre des essais expérimentaux à grande échelle

La campagne expérimentale menée dans le cadre du projet national C2ROP a rendu possible la confrontation, à des données expérimentales en vraie grandeur, des résultats numériques obtenus avec différents logiciels et acteurs du domaine des risques naturels. Dans le contexte de l'ingénierie, ce type d'étude est très enrichissante car elle permet d'évaluer la variabilité des résultats obtenus face à un outil qui est, parfois, considéré comme une boîte noire. C'est principalement le manque d'expertise lié au choix ou à la détermination des paramètres de calcul des codes commerciaux (notamment ceux liés à la dissipation d'énergie) qui est à l'origine de cette démarche collaboratrice. Notons également que les méthodes empiriques décrites dans l'introduction ne sont pas applicables à cette campagne d'essais, compte tenu des configurations topographiques très particulières. Les logiciels trajectographiques sont de plus en plus utilisés car ils peuvent produire des milliers de calculs et des prédictions sur les probabilités de dépôt qu'un homme seul n'est pas capable de réaliser dans un délai acceptable. En revanche, compte tenu de leur facilité de prise en main, certains praticiens peuvent penser que leur utilisation est triviale, mais l'expérience montre que la bonne compréhension et la maîtrise des jeux de paramètres d'un code numérique sont cruciales dans l'obtention de bons résultats. Les hypothèses de calcul doivent être bien fondées et aussi tenir compte des limitations de l'outil numérique utilisé. Dans notre cas, ces limitations sont directement liées

à la non prise en compte lors de l'impact de la déformation du sol, dont le caractère meuble ou rigide est majoritairement contrôlé par un jeu de paramètres dissipatifs qui englobe un grand nombre de phénomènes non explicitement pris en compte (plastification, indentation, grande déformation, etc.). La première estimation des paramètres de la phase 1 a été faite suivant la procédure expérimentale utilisée et validée à petite échelle. Un protocole de reconstruction photogrammétrique des blocs rocheux a permis de générer, à partir de forme réelles recueillies sur le terrain, les volumes maillés nécessaires aux simulations numériques. Nous avons par la suite ajusté ces volumes en fonction des besoins et informations diffusées par les organisateurs du Benchmark (valeurs maximale, moyenne et minimale des masses des blocs). L'étude de la forme des blocs indique qu'il existe une influence majeure de la géométrie et de la taille des blocs sur leur trajectoire, tant en dispersion latérale que pour les distances de propagation. Cette étude a été faite au travers d'un coefficient de forme (c_f) adapté aux observations de terrain. Comparativement à d'autres types de classement, le coefficient de forme proposé permet de différencier uniquement les géométries rectangulaires des formes cubiques. Les résultats que nous avons produit pour le Benchmark ont été obtenus en considérant des masses quelconques et quatre géométrie de blocs arbitraires (trois formes cubiques et une forme rectangulaire, lancées à nombre égal). Nous avons donc 256 simulations effectuées pour le bloc rectangulaire, alors que pour le bloc cubique nous avons 3 fois plus de résultats. Nous avons appris, à posteriori, que le pourcentage des blocs rectangulaires est plus important que ceux des blocs cubiques, et que la masse représentative de l'ensemble des blocs se situe entre 500 et 700 kilos. Une pondération qui relie la taille des blocs et la forme pourrait améliorer la qualité et la justesse des résultats qui ont été produits, surtout pour le calcul des probabilités de passage et l'estimation de la zone de dépôts finale. Le Benchmark réalisé dans le cadre du Projet National C2ROP constitue la deuxième participation du bureau d'études IMSRN à ce type d'analyse. Lors du premier Benchmark, IMSRN a utilisé le code numérique Kayass 2D pour reproduire les lâchers de blocs effectués par IRSTEA, à Vaujany (mentionné au chapitre 1). À l'époque, les résultats fournis par IMSRN étaient satisfaisants, mais un seul opérateur avait conduit l'étude. L'originalité de cette nouvelle contribution d'IMSRN à un Benchmark réside dans la participation de 4 opérateurs différents appartenant à la même entreprise, voir la même agence, utilisant les mêmes outils et les mêmes moyens. La seule variable est le nombre d'années d'expertise en trajectographie des opérateurs, qui n'est, quoi qu'il en soit, pas toujours gage de meilleurs résultats. Cette étude a mis en lumière les limitations de l'utilisation des logiciels 2D et révélé la capacité des codes 3D stochastiques (Rockyfor3D) à garantir moins de variabilité et à fournir une bonne convergence inter-opérateurs. La bonne compréhension des mécanismes physiques impliqués dans le processus de dissipation d'énergie, pour l'utilisation des codes trajectographiques, semble être cruciale, voire incontournable. Pour la pratique de l'ingénierie, l'utilisation des simulations 3D peut déboucher avantageusement sur une première estimation des couloirs de propagation les plus probables. Nous conseillons aux ingénieurs de relier les observations de terrain aux résultats des simulations numériques pour améliorer leur expertise. La simplicité de l'application des codes numériques en 2D est faite au détriment de cette information (détermination du couloir de propagation le plus probable) qui est très précieuse et qui guide au dimensionnement des parades. Grâce aux simulations Rockable effectuées entre la phase 1 du Benchmark et les résultats obtenus à partir du Zonage C (après la phase 2), nous avons pu améliorer le zonage et la compréhension du rôle de chacun des paramètres étudiés. L'utilisation des codes déterministes n'est pas *"aisée"* car l'opérateur en charge de l'étude est confronté à un choix délicat et incertain quant aux paramètres à utiliser. Une bonne base physique et une expertise importante dans le domaine des chutes des blocs suffissent en général ; mais c'est en général à chaque opérateur d'établir sa propre base de données. Il est important de rappeler que pour envisager diverses configurations, que ce soit à grande échelle ou pas, l'exercice d'optimisation des pa-

ramètres est primordial. Suivre une méthodologie rigoureuse lors du processus d'optimisation des paramètres permet au cours du temps d'affiner l'expertise et d'aboutir à de meilleures prédictions. Cette campagne expérimentale a permis de mener diverses études en fonction des données, sur le moment, disponibles : influence des paramètres dissipatifs et géométriques sur la cinématique de propagation des blocs et sur les zones de dépôt, entre autres. Une rétro analyse des résultats obtenus serait riche d'enseignement. Dans le cadre de cette thèse, nous proposons comme perspectives d'études : – Effectuer de nouveaux essais expérimentaux de laboratoire et appliquer la méthode d'optimisation des paramètres de contact proposée par le chapitre 3. Nous suggérons que les prochaines campagnes expérimentales soient effectuées pour d'autres configurations initiales de lâcher :

- Faire varier l'inclinaison de la rampe métallique, puisque nos résultats concernent seulement le lancement de blocs depuis un angle de 45 degrés ;
- Faire varier la nature et l'inclinaison du sol impacté : nous avons réalisé des tests expérimentaux avec un seul type de substrat, positionné à l'horizontale. Il serait intéressant, à l'avenir, de pouvoir valider et d'étendre les observations faites dans ce chapitre à d'autres types de matériaux et de configurations de la surface d'impact ;
- Envisager des formes de blocs différentes, telles que les blocs irréguliers. Par exemple, un bloc de forme triangulaire avec l'une de ses faces arrondies.

De tels essais peuvent aider à identifier et corréler, de manière exhaustive et systématique, les paramètres de contact numériques du rebond aux paramètres classiques des matériaux.

– En ce qui concerne le chapitre des essais expérimentaux de la SNCF :

- Il serait intéressant de regarder l'effet du changement de la résolution du maillage notamment pour le ballast (et de la rugosité) sur les résultats en général et plus particulièrement sur les gammes des valeurs trouvées pour les paramètres μ et μ_R. Une étude plus approfondie portant sur la détermination des gammes les plus adaptées pour reproduire les observations expérimentales serait également souhaitable.
- Tester d'autres types de distribution (non uniformes) pour les paramètres μ et μ_R, et appliquer différents jeux de paramètres à chacun des matériaux.

– Pour les résultats concernant le chapitre des essais expérimentaux réalisés dans le cadre du projet national C2ROP, on a constaté que, compte tenu des temps de calcul qui peuvent être très élevés, les exercices de calage sont longs et pas toujours adaptés. Une étude plus approfondie sur le raffinement du maillage utilisé, plus consommatrice en temps de calcul, serait néanmoins souhaitable. Une étude de la fragmentation des blocs lors de la propagation pourrait être envisagée. En effet, certains blocs lâchés durant la campagne expérimentale se sont fragmentés sur les profils P1 et P2 (9 blocs au total). Cet effet n'est pas pris en compte actuellement dans les codes trajectographiques classiques, et il serait donc intéressant d'étudier ce phénomène par la suite en utilisant Rockable. De plus, les changements de topographie lors des expérimentations, tels que les dépôts rocheux en bas de la pente ou l'arrêt des blocs sur les profils de propagations, devraient être considérés. Or, nous savons que les codes numériques en trois dimensions qui tiennent compte de la forme réelle des blocs et du terrain à travers des modèles surfaciques sont extrêmement sensibles aux variations géométriques. C'est un aspect dont nous n'avons pas eu le temps d'aborder. En ce qui concerne les données temporelles, il serait intéressant de corréler les probabilités de dépôt des blocs

aux fréquences de départ des blocs rocheux. Cette démarche devrait intégrer l'aléa de départ (ou rupture) d'un versant aux données spatiales obtenues par ROCKABLE. Pour cela, nous conseillerons l'utilisation d'une étude de cas historique qui présenterait une base de données consistante, concise et accessible. Ces perspectives seraient autant d'éléments nouveaux qui permettraient aux ingénieurs en bureaux d'études, d'améliorer leur méthode et leur pratique.

5.6 Remerciements

Nous remercions Franck Bourrier, Julien Baroth, François Chirouze et Jean-Francois Ferellec pour nous avoir fourni et permis d'utiliser les données expérimentales de la SNCF ; ainsi que Franck Bourrier et David Toe pour avoir mis à notre disposition une partie des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du projet national C2ROP.

Annexe A

Résultats Expérimentaux

Blocs Cylindriques et Triangulaires

Tableau A.1 – Vitesses incidentes et réfléchies des 28 répétitions pour les blocs cylindriques.

V_{x-} (m/s)	V_{x+} (m/s)	V_{y-} (m/s)	V_{y+} (m/s)	ω_- (rad/s)	ω_+ (rad/s)
2.52	3.32	-2.65	0.90	-68.77	-40.90
3.02	3.01	-1.91	0.77	-67.68	-38.88
2.92	3.41	-2.38	1.00	-65.71	-34.67
2.84	3.09	-2.36	0.91	-64.58	-32.21
2.84	3.02	-2.33	0.61	-71.46	-37.18
2.87	3.06	-2.16	0.85	-71.40	-40.70
2.88	2.42	-2.62	0.73	-69.32	-47.07
2.18	3.87	-2.25	0.74	-44.06	-43.93
3.07	3.26	-2.52	0.94	-67.68	-38.17
2.95	3.03	-2.47	0.96	-68.20	-40.39
2.62	2.74	-2.28	0.79	-63.68	-35.23
2.95	2.58	-2.24	0.46	-68.52	-76.40
3.07	2.50	-2.52	0.53	-64.00	-34.10
3.05	3.15	-2.31	0.79	-71.57	-41.30
2.74	2.86	-2.26	0.70	-70.07	-52.55
2.74	3.05	-2.44	0.96	-65.08	-39.44
2.96	3.25	-2.51	1.14	-65.96	-41.64
3.14	3.18	-2.69	1.01	-69.53	-41.62
3.18	3.21	-2.41	0.76	-60.86	-33.50
2.92	2.99	-2.08	0.79	-57.78	-37.08
2.79	2.99	-2.15	1.10	-68.70	-40.06
2.71	3.10	-2.22	0.93	-56.28	-42.09
2.82	3.05	-2.30	1.04	-62.62	-42.71
2.89	3.05	-2.25	0.99	-59.18	-77.82
2.67	3.00	-2.61	0.62	-68.36	-38.27
3.11	3.09	-2.12	1.07	-63.02	-36.25
2.92	3.01	-2.17	0.97	-60.14	-41.49
3.10	3.26	-2.22	0.94	-66.60	-38.71

Tableau A.2 – Vitesses incidentes et réfléchies des 31 répétitions pour les blocs triangulaires

V_{x-} (m/s)	V_{x+} (m/s)	V_{y-} (m/s)	V_{y+} (m/s)	ω_- (rad/s)	ω_+ (rad/s)
4.67	1.53	-3.70	0.54	-21.73	-8.40
4.49	5.87	-4.34	1.10	-64.03	-19.66
2.79	2.32	-1.96	0.74	-23.20	-19.94
3.36	0.85	-2.97	0.46	-27.32	-11.02
4.76	2.37	-3.52	0.39	-22.58	-6.15
3.41	2.04	-2.94	0.20	-25.00	-9.84
5.11	4.46	-3.54	0.72	-68.49	-17.80
5.69	4.92	-4.07	0.82	-53.17	-19.42
3.98	2.31	-2.87	0.38	-17.17	-12.01
5.50	3.56	-4.11	0.29	-28.87	-19.89
5.69	3.67	-3.48	0.43	-28.30	-20.57
3.71	0.67	-3.29	0.52	-13.34	-6.21
4.65	1.12	-4.34	1.06	-26.83	-16.28
5.31	4.08	-3.72	0.30	-51.62	-20.49
3.44	2.25	-2.03	0.28	-28.59	-18.79
3.40	2.10	-2.06	0.43	-26.96	-24.28
2.93	2.84	-1.78	0.44	-38.65	-20.46
2.30	0.24	-1.95	0.18	-14.50	2.41
3.28	2.57	-2.19	0.30	-57.97	-27.65
3.06	3.36	-1.93	0.73	-60.32	-16.37
3.36	2.44	-1.45	0.39	-31.55	-24.69
3.05	3.18	-2.22	0.41	-58.05	-20.30
2.78	2.67	-2.28	0.36	-60.65	-20.49
3.62	2.32	-2.39	0.40	-40.73	-11.62
3.38	2.65	-2.17	0.57	-30.79	-23.65
2.91	2.37	-2.21	0.28	-39.90	-19.21
3.24	1.86	-2.27	0.30	-34.27	-14.40
3.33	2.90	-2.26	0.78	-57.18	-21.31
2.93	2.78	-2.19	0.44	-61.10	-26.38
3.27	2.42	-2.19	0.34	-58.11	-23.02
3.05	3.04	-2.36	1.19	-59.72	-19.12

Annexe B

Photogrammétrie

Protocole de reconstruction

La photogrammétrie est une reconstitution tridimensionnelle d'un objet ou d'une scène à partir de photographies acquises, traitées et corrélées suivant un processus dédié. C'est un domaine qui progresse régulièrement avec les avancées dans les traitements d'images et les technologies d'acquisition d'images.

Le traitement de données est rapide (mais aussi dépendant de la quantité de photos, du niveau de détail désiré – qui varie souvent, selon la nomenclature donnée, de *low* à *high*) et est basé sur les descripteurs *SIFT* (Lowe [1999]) ; une méthode qui consiste à chercher des points homologues en paires de photos dans le jeu de données et établit la meilleure corrélation entre clichés pour reconstruire la scène. Le nuage de points résultant utilise la position du centre optique dans un repère global. L'utilisateur peut aussi indiquer la position des points via une acquisition GPS ou à travers des points de repères spécifiques, qui peuvent avoir des coordonnées GPS ou cartésiennes (*"Ground Control Points"*). La mise à l'échelle peut se faire de manière similaire, en utilisant des repères sur la scène dont on connaît les dimensions.

Généralement, les modèles surfaciques actuels présentent une bonne précision dans les modèles de sortie, d'environ 3 cm. A travers de cette méthode, nous avons la possibilité de faire des mesures dans les modèles sans avoir besoin d'aller sur le terrain à chaque fois, ce qui économise les temps de déplacement sur sites qui sont parfois très éloignés et d'accès difficile. Les applications sont très variées et certaines sont encore en développement.

La génération d'un modèle numérique de qualité et exploitable, dans un temps contenu (en rapport avec le temps de calcul de la machine et en temps de nettoyage des erreurs par un opérateur) et exige un protocole strict, dont une des pierres angulaires est la prise de vues.

L'outil de base de la photogrammétrie est l'appareil photo. En théorie, un appareil optiquement parfait, à la calibration rigoureuse est nécessaire. En pratique, moyennant des traitements supplémentaires et des modèles de qualité moindre, n'importe quel appareil peut convenir, même l'appareil photo d'un téléphone. Lors des essais expérimentaux réalisés pour cette thèse, on a utilisé un appareil de type reflex (DSLR).

La résolution du modèle dépend linéairement de la résolution de l'appareil et la qualité

et l'homogénéité de l'optique déterminent la qualité du modèle. Afin de diminuer l'effet de la distorsion générée par le système optique, une opération de calibration basée sur la méthode de Zhang (Zhang [2000], Brown [1971]) est mise en place. Ce sont des paramètres qui varient en fonction de chaque appareil et qui peuvent aussi varier en fonction du modèle et de son utilisation (les paramètres de correction dans la direction tangentielle et peuvent changer suite à un choc, par exemple). [1]

Plusieurs protocoles de prise de vue existent. Dans cette campagne d'essais, nous allons utiliser le protocole d'acquisition d'images pour un objet en 3D (Fig. B.1). La méthode consiste à circuler autour de l'objet en prenant des clichés à chaque 15 dégrés. Des rapports d'éloignement et de recouvrement sont établis dans l'étude de Trochon [2012].

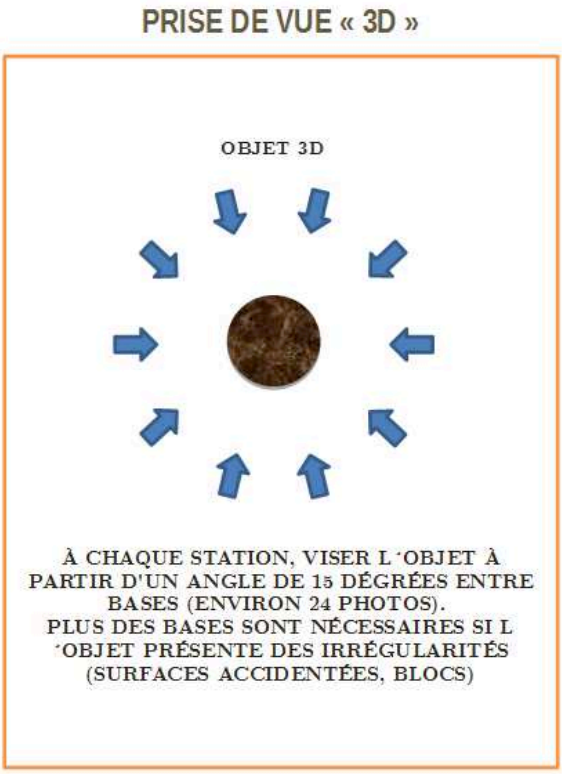


FIGURE B.1 – Aperçu du protocôle de prise de vue 3D utilisé. Pour la mise à l'échelle, un damier de dimensions 60 cm x 60 cm est positionné à côté du bloc.

La figure B.2 montre un petit bloc reconstruit à partir du protocole d'acquisition d'images en 3D.

1. Plus d'informations sur la distorsion radiale et quelques explications : `http://marcodiiga.github.io/radial-lens-undistortion-filtering`.

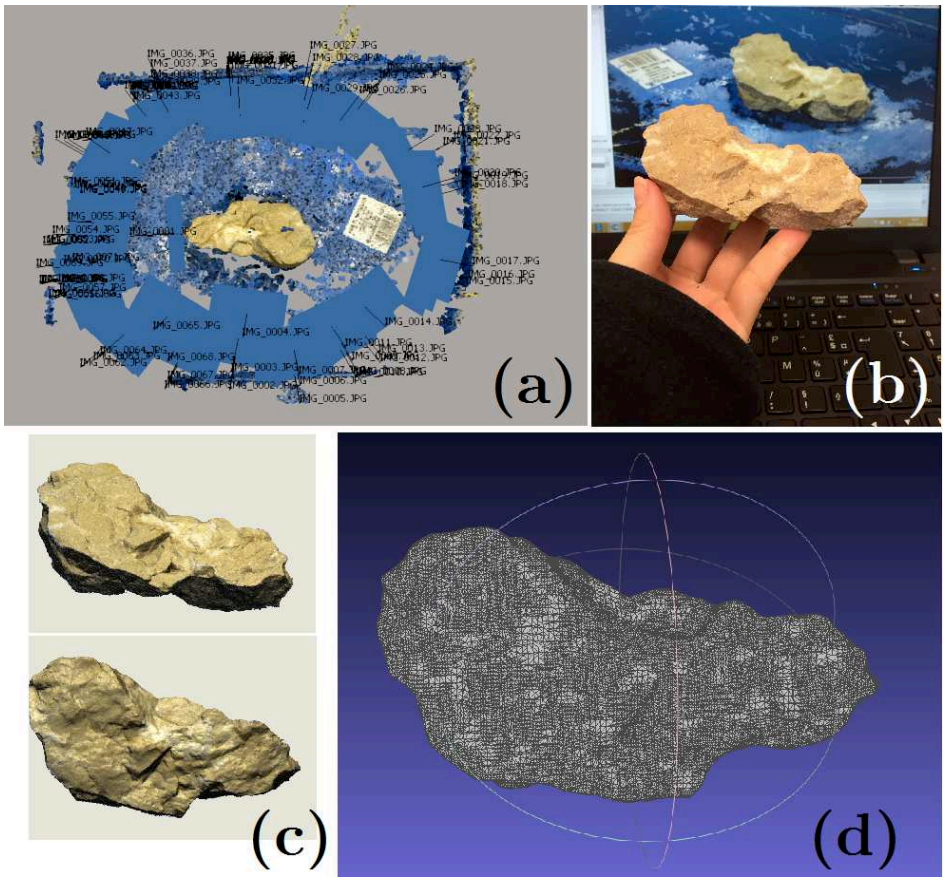


FIGURE B.2 – (a) Nuage de points obtenu par acquisition photogrammétrique et reconstruit avec le logiciel *PhotoScan*. Vue de haut avec l'emplacement des caméras autour de l'objet (protocole 3D) (b) Caillou réel (c) Nuage de points nettoyé (9 Million de points) (d) Maillage résultant : 3939 vertices, 7874 faces, reconstruit à partir de la triangulation de Delaunay sur *Meshlab* [Cignoni *et al.*, 2008].

Annexe C

Résultats des simulations C2ROP

Cette annexe rassemble des résultats des simulations des lâchers de blocs sur la carrière d'Authume. (Hauteurs, vitesses et énergies des blocs au passage sur les profils P1 et P2, avec le Zonage C).

C.1 Écran EC11

(**a**) Bloc Num1A / EC11 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.75	0.15	0.96	0.76	1.00
V (m/s)	2.64	1.24	4.68	2.80	5.12
Énergie de translation (kJ)	1.46	1.18	3.78	1.34	4.51
Énergie de rotation (kJ)	0.11	0.13	0.38	0.06	0.43
ω (rps)	0.42	0.20	0.74	0.45	0.82
Énergie totale (kJ)	1.57	1.26	3.98	1.41	4.76

(**b**) Bloc Num2A / EC11 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.51	0.16	0.75	0.51	0.84
V (m/s)	3.62	1.35	5.57	3.69	6.18
Énergie de translation (kJ)	10.97	6.94	22.85	10.03	28.14
Énergie de rotation (kJ)	1.44	1.00	3.29	1.46	3.85
ω (rps)	0.58	0.21	0.89	0.59	0.98
Énergie totale (kJ)	12.40	7.68	25.68	12.03	30.32

(**c**) Bloc Num2B / EC11 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.07	0.12	0.27	0.07	0.42
V (m/s)	4.54	1.66	7.39	4.59	9.92
Énergie de translation (kJ)	20.66	13.96	48.25	18.60	86.95
Énergie de rotation (kJ)	2.16	1.84	5.50	1.94	11.92
ω (rps)	0.72	0.26	1.18	0.73	1.58
Énergie totale (kJ)	22.82	15.25	52.17	20.58	96.20

(**d**) Bloc Num3A / EC11 / Profil P1 / Zonage C

	Donnée unique
Hauteur de passage (m)	0.84
V (m/s)	2.92
Énergie de translation (kJ)	2.19
Énergie de rotation (kJ)	0.00
ω (rps)	0.46
Énergie totale (kJ)	2.19

C.2 Écran EC12

(**a**) Bloc Num1A / EC12 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.54	0.19	0.83	0.56	0.83
V (m/s)	5.26	1.10	7.37	5.48	7.59
Énergie de translation (kJ)	4.95	2.04	9.39	5.16	9.90
Énergie de rotation (kJ)	1.59	0.96	3.60	1.47	3.80
ω (rps)	0.84	0.18	1.17	0.87	1.21
Énergie totale (kJ)	6.54	2.87	12.95	6.08	13.70

(**b**) Bloc Num2A / EC12 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95 % P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.65	1.52	5.08	1.17	5.82
V (m/s)	12.55	6.80	18.78	16.48	18.93
Énergie de translation (kJ)	149.35	104.98	260.15	200.29	264.18
Énergie de rotation (kJ)	3.91	3.91	11.91	2.63	19.42
ω (rps)	2.00	1.08	2.99	2.62	3.01
Énergie totale (kJ)	153.26	103.79	262.50	203.30	266.49

(**c**) Bloc Num2B / EC12 / Profil P1 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	2.49	2.10	5.94	1.53	10.48
V (m/s)	11.87	6.23	18.65	14.35	19.34
Énergie de translation (kJ)	158.33	120.65	307.51	181.95	330.64
Énergie de rotation (kJ)	5.30	4.16	14.63	4.29	22.73
ω (rps)	1.89	0.99	2.97	2.28	3.08
Énergie totale (kJ)	163.63	119.44	309.45	193.81	333.13

C.3 Écran EC21

(**a**) Bloc Num1A / EC21 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.67	0.38	1.48	0.55	1.93
V (m/s)	6.41	1.31	8.48	6.47	9.60
Énergie de translation (kJ)	7.35	2.89	12.36	7.19	15.85
Énergie de rotation (kJ)	0.22	0.31	0.88	0.06	1.51
ω (rps)	0.59	0.56	1.65	0.42	2.16
Énergie totale (kJ)	7.56	3.01	12.91	7.36	16.51

(**b**) Bloc Num2A / EC21 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.03	0.44	1.98	0.87	2.29
V (m/s)	6.74	1.44	9.08	6.75	11.07
Énergie de translation (kJ)	35.04	14.30	60.86	33.56	90.28
Énergie de rotation (kJ)	2.40	2.25	6.99	1.95	9.82
ω (rps)	0.69	0.43	1.39	0.73	1.65
Énergie totale (kJ)	37.44	15.74	66.55	35.75	97.04

(**c**) Bloc Num2B / EC21 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.10	0.46	2.05	0.96	2.61
V (m/s)	6.60	1.49	8.76	6.71	10.01
Énergie de translation (kJ)	40.40	17.05	67.86	39.77	88.49
Énergie de rotation (kJ)	2.59	2.78	8.56	1.84	12.76
ω (rps)	0.59	0.42	1.31	0.61	1.60
Énergie totale (kJ)	42.99	18.98	75.23	41.21	95.17

(**d**) Bloc Num3A / EC21 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.61	0.45	1.66	0.43	2.02
V (m/s)	5.44	1.15	7.19	5.36	8.82
Énergie de translation (kJ)	7.94	3.35	13.30	7.39	20.02
Énergie de rotation (kJ)	0.13	0.40	0.97	0.01	2.97
ω (rps)	0.87	0.18	1.14	0.85	1.40
Énergie totale (kJ)	8.07	3.49	13.69	7.47	21.15

C.4 Écran EC22

(a) Bloc Num1A / EC22 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.61	0.38	1.20	0.59	1.57
V (m/s)	4.83	1.74	7.76	4.73	8.66
Énergie de translation (kJ)	4.52	3.00	10.34	3.85	12.88
Énergie de rotation (kJ)	0.56	0.66	2.03	0.28	2.97
ω (rps)	0.88	0.62	2.21	0.81	2.64
Énergie totale (kJ)	5.09	3.47	11.88	4.24	15.85

(b) Bloc Num2A / EC22 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.30	0.40	1.85	1.31	3.08
V (m/s)	6.27	1.94	9.21	6.48	11.10
Énergie de translation (kJ)	31.70	17.39	62.59	30.97	90.89
Énergie de rotation (kJ)	5.41	4.71	14.60	4.27	18.38
ω (rps)	1.10	0.63	2.04	1.10	3.04
Énergie totale (kJ)	37.11	21.22	76.50	35.19	96.97

(c) Bloc Num2B / EC22 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.25	0.41	1.88	1.21	2.09
V (m/s)	6.07	2.09	9.52	6.23	11.53
Énergie de translation (kJ)	36.37	22.35	80.04	34.29	117.59
Énergie de rotation (kJ)	5.43	5.23	15.32	4.00	20.72
ω (rps)	0.87	0.55	1.71	0.86	2.02
Énergie totale (kJ)	41.80	26.92	92.78	36.71	137.74

(d) Bloc Num3A / EC22 / Profil P2 / Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.21	0.20	0.69	0.15	1.25
V (m/s)	3.16	1.18	5.49	2.98	7.71
Énergie de translation (kJ)	2.92	2.32	7.74	2.28	15.27
Énergie de rotation (kJ)	0.17	0.32	0.87	0.03	2.24
ω (rps)	0.93	0.47	1.82	0.85	2.32
Énergie totale (kJ)	3.09	2.47	7.84	2.32	17.50

Annexe D

Influence des conditions initiales de largage des blocs

Hauteurs, vitesses et énergies des blocs Num1A et Num2A lors du franchissement des écrans EC11 et EC12 – Profil 1 – Zonage C – Point des lâchers décalés de 10 mètres.

Tableau D.1 – Bloc Num1A : Écran EC11 – Profil P1 – Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.30	0.07	0.40	0.30	0.43
V (m/s)	2.36	1.17	4.38	2.26	5.99
Énergie de translation (kJ)	1.19	1.06	3.29	0.88	6.16
Énergie de rotation (kJ)	0.09	0.14	0.35	0.01	0.67
ω (rps)	0.37	0.19	0.70	0.36	0.95
Énergie totale (kJ)	1.28	1.15	3.60	0.93	6.75

Tableau D.2 – Bloc Num2A : Écran EC11 – Profil P1 – Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.08	0.06	0.19	0.07	0.24
V (m/s)	3.41	1.47	6.10	3.30	7.82
Énergie de translation (kJ)	10.15	8.11	27.44	8.01	45.06
Énergie de rotation (kJ)	1.21	1.09	3.31	1.09	5.95
ω (rps)	0.54	0.23	0.97	0.52	1.24
Énergie totale (kJ)	11.35	8.91	29.72	9.25	49.19

Tableau D.3 – Bloc Num1A : Écran EC12 – Profil P1 – Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	0.83	0.34	1.22	0.79	2.79
V (m/s)	4.98	2.44	7.19	4.96	17.79
Énergie de translation (kJ)	5.27	7.34	8.89	4.23	54.41
Énergie de rotation (kJ)	1.40	1.15	4.08	1.07	4.90
ω (rps)	0.79	0.39	1.14	0.79	2.83
Énergie totale (kJ)	6.67	7.63	12.56	5.53	54.76

Tableau D.4 – Bloc Num2A : Écran EC12 – Profil P1 – Zonage C

	Moyenne	Écart type	95% P	Médiane	Max
Hauteur de passage (m)	1.54	1.42	4.45	1.01	7.85
V (m/s)	7.99	6.30	18.47	4.82	19.30
Énergie de translation (kJ)	75.98	96.37	251.53	17.16	274.74
Énergie de rotation (kJ)	4.22	3.35	9.97	3.30	16.78
ω (rps)	1.27	1.00	2.94	0.77	3.07
Énergie totale (kJ)	80.20	96.35	256.46	24.52	279.40

Annexe E

Déviation latérale des blocs numériques

Déviation latérale des blocs par rapport à l'axe de référence en fonction de leur géométrie – Zonage C

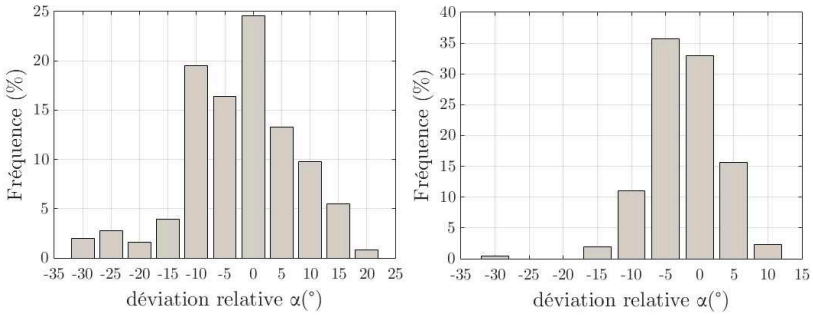


FIGURE E.1 – Bloc Num1A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement.

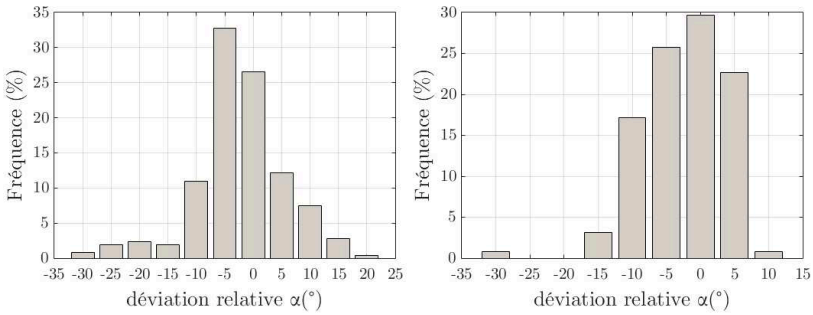


FIGURE E.2 – Bloc Num2A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b).

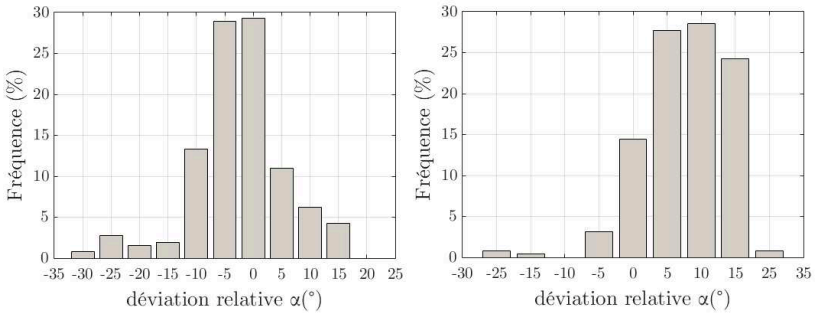


FIGURE E.3 – Bloc Num2B – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement.

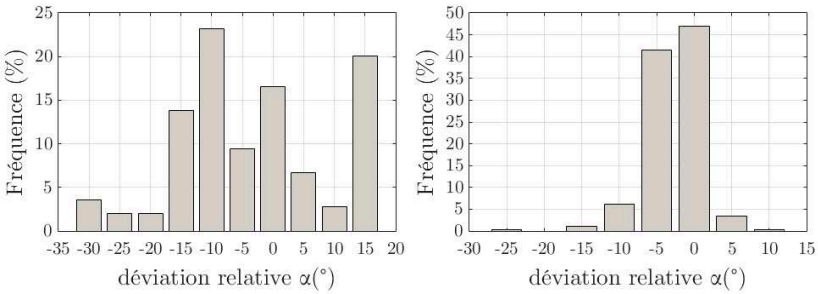


FIGURE E.4 – Bloc Num3A – Déviation latérale des blocs pour les profils P1 (a) et P2 (b), respectivement.

Références

Ahmed, M. & Farag, A. (2005). Nonmetric calibration of camera lens distortion : Differential methods and robust estimation. *Trans. Img. Proc.*, **14**, 1215–1230.

Asteriou, P. & Tsiambaos, G. (2016). Empirical model for predicting rockfall trajectory direction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**, 927–941.

Asteriou, P. & Tsiambaos, G. (2018). Effect of impact velocity, block mass and hardness on the coefficients of restitution for rockfall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **106**, 41 – 50.

Asteriou, P., Saroglou, H. & Tsiambaos, G. (2013). Rockfalls : Influence of rock hardness on the trajectory of falling rock blocks scaling factors for the coefficient of restitution. *Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII 2013. Proceedings of the 13th International Congress, Chania, Sept. 2013*.

Azzoni, A. & de Freitas, M.H. (1995). Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **28**, 111–124.

Banton, J., Villard, P., Jongmans, D. & Scavia, C. (2009). Two-dimensional discrete element models of debris avalanches : Parameterization and the reproducibility of experimental results. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, **114**.

Bar, N., Nicoll, S. & Pothitos, F. (2016). Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock. *Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference*, 457–466.

Baroth, J. (2016). Fiabilité des ouvrages – cours polytech grenoble, département géotechnique.

Bartelt, P., Caviezel, A., Christen, M., Lu, G., Gerber, W. & Buhler, Y. (2018). On four frictional mechanisms in rockfall analysis : ground deformation, surface roughness, vegetation drag and basal sliding with rebound. *Colloque International RSS - Rock Slope Stability 2018. WSL Institute of Snow and Avalanche Research SLF, Switzerland*.

Belheine, N., Plassiard, J.P., Donzé, F.V., Darve, F. & Seridi, A. (2009). Numerical simulation of drained triaxial test using 3d discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, **36**, 320 – 331.

Belut, F., Toudic, L. & Darras, V. (2014). Glissement rocheux à morlaix (ligne ferroviaire paris–brest – gestion de crise et retour d'expérience. *SNCF - Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014*.

Berger, F. (2009). Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du ppr de la commune de veyrier–du–lac.

Bonilla-Sierra, V., Scholtes, L., Donze, F.V. & Elmouttie, M.K. (2015). Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN-DEM modelling. *Acta Geotechnica*, **10**, 497–511.

Bourrier, F. (2018). Benchmark of trajectory analysis models. *4th. International Symposium Rock Slope Stability 2018*.

Bourrier, F. & Hungr, O. (2011). *Rockfall dynamics : a critical review of collision and rebound models*. Wiley Online Library.

Bourrier, F., Nicot, F. & Darve, F. (2008). Physical processes within a 2d granular layer during an impact. *Granular Matter*, **10**, 415–437.

Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F. & Darve, F. (2009). Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, **110**, 68 – 79.

Bourrier, F., Berger, F., Tardif, P., Dorren, L. & Hungr, O. (2012). Rockfall rebound : comparison of detailed field experiments and alternative modelling approaches. *Earth Surface Processes and Landforms*, **37**, 656–665.

Bozzolo, D. & Pamini, R. (1986). Simulation of rockfalls down a valley side. *Acta Mechanica*, **63**, 113–130.

BRGM (1873). Fiche risques - Éboulements rocheux en isère - 1873 : Porte de france.

Brodu, N. & Lague, D. (2012). 3d terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion : Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **68**, 121 – 134.

Brown, D.C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **37**, 855–866.

Browne, A.R.C.H., C. & Kim, H. (2003). *Performance Evaluation of Automated Machines for Measuring Gradation of Aggregates.*, vol. 26.

Buzzi, O., Giacomini, A. & Spadari, M. (2011). Laboratory investigation on high values of restitution coefficients. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 35–43.

Caviezel, A., Christen, M., Bühler, Y. & Bartelt, P. (2017). Calibration methods for numerical rockfall models based on experimental data. *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*.

Caviezel, A., Schaffner, M., Cavigelli, L., Niklaus, P., Bühler, Y., Bartelt, P., Magno, M. & Benini, L. (2018). Design and evaluation of a low-power sensor device for induced rockfall experiments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **67**, 767–779.

Chau, K., Wong, R. & J.J., W. (2002). Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 69–77.

Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y. & Wu, J. (2013). Numerical simulation in rockfall analysis : A close comparison of 2-d and 3-d dda. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **46**.

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. & Ranzuglia, G. (2008). MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool. *Eurographics Italian Chapter Conference*.

Copons, R., Vilaplana, J.M. & Linares, R. (2009). Rockfall travel distance analysis by using empirical models (solÃ d'andorra la vella, central pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 2107–2118.

Crosta, G.B. & Agliardi, F. (2004). Parametric evaluation of 3d dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**, 583–598.

Cruden, D. & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, **247**, 36–57.

Cuervo, Y. (2015). *Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets : application aux évènements réels*. Thèse, doctorat dirigé par Villard, P., Richefeu, V. et Daudon, D. Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie Grenoble Alpes 2015.

Cundall, P., Pierce, M. & Mas Ivars, D. (2008). Quantifying the size effect of rock mass strength. *Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, **2**, 3–15.

Cundall, P.A. & Strack, O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, **29**, 47–65.

Daudon, D., Villard, P., Richefeu, V. & Mollon, G. (2015). Influence of the morphology of slope and blocks on the energy dissipations in a rock avalanche. *Comptes Rendus Mécanique*, **343**, 166 – 177.

Delonca, A., Verdel, T. & Gunzburger, Y. (2016). Influence of expertise on rockfall hazard assessment using empirical methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **16**, 1657–1672.

Dequincey, O. (2017). *ENS Lyon – Laboratoire de Géologie de Lyon DGESCO*.

Descoeudres, F. (1997). Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. *Publications de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches*, **135**, 3–11.

Dhouib, A., Gambin, M.P., Jacquemin, S. & Soyez, B. (1998). Une nouvelle approche de la stabilité des remblais sur sols mous traités par colonnes ballastées. *Rev. Fr. Geotech.*, 37–48.

Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) (2012). Les mouvements de terrain.

Donzé, F. (2008). Impacts on cohesive frictional geomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **12**, 967–985.

Dorren, L. (2016). Rockyfor3d (v5.2) revealed – transparent description of the complete 3d rockfall model.

Dorren, L. & Berger, F. (2013). Modèles de trajectographie : atout ou contrainte. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 175–187.

Dorren, L. & Seijmonsbergen, A. (2003). Comparison of three gis-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology*, **56**, 49 – 64.

Dorren, L., Berger, F. & Putters, U.S. (2006). Real-size experiments and 3-d simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, 145–153.

Dorren, L., Domaas, U., Kronholm, K. & Labiouse, V. (2011). Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. *Rockfall engineering. ISTE Ltd. / John.*

Dorren, L.K. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography : Earth and Environment*, **27**, 69–87.

Duhoo, J. (2010). Le labo. *Spirou Magazine. IBSN : 9782800147208*, 56.

Durville, J.L., Guillemin, P., Berthet-Rambaud, P. & Subrin, D. (2010). Etat de l'art sur le dimensionnement des dispositifs de protection contre les chutes de blocs. *Collection Études et recherches des LCPC—série Géotechnique et risques naturels, Paris (84 pp.).*

Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M. & A., G. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment : potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **2**, 15–26.

Dutra, A.C. (2015). Movimentos de massa associados aos maciços rochosos granito-gnaissicos do municipio de petropolis, rio de janeiro.

Erdogan, S., Quiroga, P., Fowler, D., Saleh, H., Livingston, R., Garboczi, E., Ketcham, P., Hagedorn, J. & Satterfield, S. (2006). Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates : New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1619 – 1627.

Evans, S. & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, **30**, 620–636.

Falcetta, J.L. (1985). Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux. *Rev. Fr. Geotech.*, **30**, 11–17.

Farvacque M., C.C.T.D.B.F., Lopez-Saez J. & N., E. (2019). Quantitative risk assessment in a rockfall-prone area : the case study of the crolles municipality (massif de la chartreuse, french alps). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 7–19.

Ferrari, F., Thoeni, K., Giacomini, A. & Lambert, C. (2015). A new rockfall hazard assessment methodology for open-pit coal mines. *Bowen Basin Symposium.*

Flouest, N., Franck, C. & Cherkaoui, A. (2014). Guide pratique versants rocheux : Phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion.

Frayssines, M. (2005). *Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux (rupture).* Thèse, doctorat dirigé par Hantz, Didier et Jongmans, Denis Géomécanique Grenoble 1 2005.

Garcia, B., Villard, P., Richefeu, V. & Daudon, D. (2017). Experimental and dem analysis of the dissipation involved in the collision of a boulder with a substratum. *EPJ Web Conf.*, **140**, 16010.

Girardeau-Montaut, D. (2019). Cloudcompare (version 2.6.2) [gpl software]. `http://www.cloudcompare.org/`.

Glover, J., Bartelt, P., Christen, M. & Gerber, W. (2015). Rockfall-simulation with irregular rock blocks. *Engineering Geology for Society and Territory*, **2**, 1729–1733.

Gracia Danies, F. (2018). *Application de la Méthode des Points Matériels aux phénomènes gravitaires*. Thèse, doctorat dirigé par Villard, Pascal et Richefeu, Vincent. Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie Grenoble Alpes 2018.

Green, R. (2016). Rockfall : Design considerations for passive protection structures. *New Zealand Geotechnical Society GUIDELINES*.

Guo, Y., Markine, V., Zhang, X., Qiang, W. & Jing, G. (2019). Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast : A review. *Transportation Geotechnics*, **18**, 173 – 211.

Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. & Agliardi, F. (2002). Stone : a computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls. *Comput. Geosci.*, **28**, 1081–1095.

Hatem, M. (2009). *Simulation Probabiliste du Problème de Contact Mécanique*. Thèse, l'université du Québec – co-tutelle avec l'université de technologie de Compiègne.

Heikkila, J., Silven, O. *et al.* (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, **97**, 1106.

Heim, A. (1932). Bergsturz und menschenleben. zürich, fretz und wasmuth. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 77.

Hoek, E. & Bray, J.D. (1981). *Rock Slope Engineering*. CRC Press.

Hungr, O. & Evans, S. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the 5th Int. Symposium on Landslides, Lausanne*, 685–690.

Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, **11**, 167–194.

Iooss, B. & Lemaître, P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods.

Jaboyedoff, M. & Labiouse, V. (2011). Technical note : Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 819–828.

Jaboyedoff, M., Dudt, J.P. & Labiouse, V. (2005). An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **5**, 621–632.

Janoo, V.C. (1998). Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materialss. *U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory*.

Kazhdan, M. & Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **32**, 29.

Keylock, C. & Domaas, U. (1999). Evaluation of topographic models of rockfall travel distance for use in hazard applications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **31**.

Kobal, M. & Zabota, B. (2018). State of the art on rockfall modelling : Report on the state of the art of rockfall modelling in the alps. *RocktheAlps – Interreg Alpine Space*.

Kozicki, J. & Donze, F. (2008). Yade-open dem : An opensource software using a discrete element method to simulate granular material. *Engineering Computations*, **26**.

Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, **11**, 64–72.

Labiouse, V. & Heidenreich, B. (2009). Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1981–1993.

Lambert, S. & Bourrier, F. (2013). Design of rockfall protection embankments : A review. *Engineering Geology*, **154**, 77 – 88.

Lees, G. (1964). A new method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*, **3**, 2–21.

Lehmann, E.L. & D'Abrera, H.J.M. (1976). *Nonparametrics : statistical methods based on ranks*. San Francisco : Holden-Day ; New York ; London : McGraw-Hill, statistical hypotheses. Testing. Nonparametric methods (BNB/PRECIS).

Leine, R.I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P. & Gerber, W. (2014). Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody System Dynamics*, **32**, 241–271.

Lied, K. & Bakkehei, S. (1980). Empirical calculations of snow avalanche run-out distance based upon topographic parameters. *Journal of Glaciology*, **26(94)**, 165–177.

Lorentz, J. (2007). *Etude de la capacité de dissipation sous impact d'une structure sandwich de protection contre les chutes de blocs rocheux*. Thèse, doctorat dirigé par Donzé, Frédéric Victor et Perrotin, Pascal Terre, univers et environnement Grenoble 1 2007.

Lowe, D.G. (1999). *Object recognition from local scale-invariant features*, vol. 2.

Maccaferri (2019). Protection contre les chutes de blocs filets pare-avalanches.

Manzella, I. & Labiouse, V. (2008). Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **41**, 133–151.

Manzella, I., Lisjak, A., Mahabadi, O. & Grasselli, G. (2011). Influence of initial block packing on rock avalanche flow and emplacement mechanisms through fem/dem simulations. *PAN-AM CGS Geotechnical Conference*.

Massey, C., McSaveney, M., Heron, D. & Lukovic, B. (2012). Canterbury earthquakes 2010/11 port hills slope stability : Pilot study for assessing life-safety risk from rockfalls (boulder rolls).

Massey, F.J. (1951). The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, **46**, 68–78.

Masuya, H., Amanuma, K., Nishikawa, Y. & Tsuji, T. (2009). Basic rockfall simulation with consideration of vegetation and application to protection measure. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1835–1843.

Mazet-Brachet, D. (2018). Note méthodologique générale : Cartographie des aléas naturels prévisibles sur le territoire de grenoble alpes métropole, dans le cadre de l'élaboration du plui.

Metropolis, N. & Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, **44**, 335–341.

Mollon, G., Richefeu, V., Villard, P. & Daudon, D. (2012). Numerical simulation of rock avalanches : Influence of a local dissipative contact model on the collective behavior of granular flows. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, **117**.

Moreau, J.J. (2011). On Unilateral Constraints, Friction and Plasticity. In Capriz, Gianfranco, Stampacchia & G., eds., *New Variational Techniques in Mathematical Physics*, Springer, lectures given at a Summer School of the Centro Internazionale Matematico Estivo (C.I.M.E.) held in Bressanone (Bolzano), Italy, June 17-26, 1973.

Moreau, J.J. (2012). Contact et frottement en dynamique des systèmes de corps rigides. *Revue Européenne des Éléments Finis*, **9**, 9 – 28.

Netti, T., Castelli, M. & De Biagi, V. (2016). Effect of the number of simulations on the accuracy of a rockfall analysis. *Procedia Engineering*, **158**, 464–469.

Nicolas, A. & Bousquet, M. (2018). *Atlas Geopolitique de la France 2018*. ESI. IBSN : 9782822605854.

Nishimura, T., Kiyama, H. & Fukuda, T. (2008). Parametric three-dimensional simulations of dispersion of rockfall trajectories. *42nd U.S. Rock Mechanics - 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*.

Ohno, K., Nitta, T. & Nakai, H. (2017). Sph-based fluid simulation on gpu using verlet list and subdivided cell-linked list. *2017 Fifth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, 132–138.

Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T. & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, **58**, 109 – 124.

Pazzi, V., Morelli, S., Pratesi, F., Sodi, T., Valori, L., Gambacciani, L. & Casagli, N. (2016). Assessing the safety of schools affected by geo-hydrologic hazards : The geohazard safety classification (gsc). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **15**, 80 – 93.

Pfeiffer, T.J. & Bowen, T.D. (1989). Computer Simulation of Rockfalls. *Environmental and Engineering Geoscience*, **26**, 135–146.

Pichler, B., Hellmich, C. & A. Mang, H. (2005). Impact of rocks onto gravel design and evaluation of experiments. *International Journal of Impact Engineering*, **31**, 559–578.

Pirulli, M. (2009). The thurwieser rock avalanche (italian alps) : Description and dynamic analysis. *Engineering Geology*, **109**, 80 – 92, the Mechanics and Velocity of Large Landslides.

Piteau, D. & R., C. (1977). Discussion of paper computerized design of rock slopes using inter-active graphics for the input and output of geometrical data by p. cundall. *Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis*, 62–63.

Plassiard, J.P. (2007). *Modélisation par la méthode des éléments discrets d'impacts de blocs rocheux sur structures de protection type merlons*. Thèse, doctorat Mécanique et énergétique Grenoble 1 – 2007.

Plassiard, J.P. & Donze, F. (2009). Rockfall impact parameters on embankments : A discrete element method analysis. *Structural Engineering International*, **19**, 333–341.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P. (2007). *Numerical Recipes 3rd Edition : The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 3rd edn.

Raychaudhuri, S. (2008). *Introduction to Monte Carlo Simulation*. WSC '08, Winter Simulation Conference.

Ribeiro, R. (2013). *Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos*. Thèse, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil.

Richards, L., Peng, B. & Bell, D. (2001). Laboratory and field evaluation of the normal coefficient of restitution for rocks. *Proc. of ISRM Reg. Symp. EUROCK2001*, 149–155.

Richefeu, V. (2005). *Approach by 3D discrete elements of the behavior of cohesive granular materials weakly stressed*. Thèse, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Richefeu, V. & Villard, P. (2016). *Modeling Gravity Hazards from Rockfalls to Landslides*. ISTE Press Ltd, Elsevier Ltd, UK.

Ritchie, A.M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Stability of rock slopes – 5 reports*, 13–28.

Rochet, L. (1987). Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Risques naturels*, 84–95.

Ronco, C., Oggeri, C. & Peila, D. (2009). Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1189–1199.

Scavia, C. (1990). Fracture mechanics approach to stability analysis of rock slopes. *Engineering Fracture Mechanics*, **35**, 899 – 910.

Sneed, E.D. & Folk, R.L. (1958). Pebbles in the Lower Colorado River, Texas : a Study in Particle Morphogenesis. *Journal of Geology*, **66**, 114–150.

Sobol, I. (2001). Global sensitivity indexes for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, **55**, 271–280.

Szabó, T. & Domokos, G. (2010). A new classification system for pebble and crystal shapes based on static equilibrium points. *Central European Geology*, **53**, 1–19.

Toe, D. & Berger, F. (2015). Regional mapping of forest with a protection function against rockfall. *Engineering Geology for Society and Territory*, **2**, 1957–1959.

Trochon, M.L. (2012). Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d images pour l'étude des ouvrages rocheux. *Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg. Mémoire de soutenance de Diplôme d Ingénieur INSA Spécialité Topographie. Réalisé au sein de l'entreprise : SNCF, Direction de l'Ingénierie Département Études de Lignes (IG-LG) Division Assistance Travaux et Topographie (ATT)..*

Valagussa, A., Frattini, P. & Crosta, G. (2014). Earthquake-induced rockfall hazard zoning. *Engineering Geology*, **182**.

Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report*, **176**, 11–33.

Verlet, L. (1967). Computer experiments on classical fluids. i. thermodynamical properties of lennard-jones molecules. *Phys. Rev.*, **159**, 98–103.

Vilajosana, I., Surinach, E., Abellan, A., Khazaradze, G., Garcia-Sellés, D. & Llosa, J. (2008). Rockfall induced seismic signals : Case study in montserrat, catalonia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **8**.

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Gerber, W. & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection : a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 2617–2651.

Wasserstein, R.L., Schirm, A.L. & Lazar, N.A. (2019). Moving to a world beyond p<0.05. *The American Statistician*, **73**, 1–19.

Williams, E.M. (1965). A method of indicating pebble shape with one parameter. *Journal of Sedimentary Research*, **35**, 993–996.

Wright, V.P., Wright, ., V. Paul, Tucker, M.E. & service), W.I.O. (1991). *Calcretes*. Oxford [England] ; Boston : Blackwell Scientific Publications.

Wu, S. (1985). Rockfall evaluation by computer simulation. *Transportation Research Record*, 1–5.

Zhan, C.s., Song, X.m., Xia, J. & Tong, C. (2013). An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters. *Environmental Modelling and Software*, **41**, 39 – 52.

Zhang, D., Huang, X. & Zhao, Y. (2012). Investigation of the shape, size, angularity and surface texture properties of coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, **34**, 330 – 336.

Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **22**, 1330–1334.

Zhao, P., Zhao, W.Z. & Duan, Z.Y. (2014). A calibration method for high precision vision measurement system. *Vehicle, Mechatronics and Information Technologies II*, **543**, 1005–1008.

Zingg, T. (1935). Beitrag zur schotteranalyse (contribution to gravel analysis). *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen - (Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology)*, **15**, 39–140.