



HAL
open science

Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets : application aux évènements réels

Yeison Cuervo

► To cite this version:

Yeison Cuervo. Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets : application aux évènements réels. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAI066 . tel-01256375

HAL Id: tel-01256375

<https://theses.hal.science/tel-01256375>

Submitted on 14 Jan 2016

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Yeison-Stiven CUERVO

Thèse dirigée par **Pascal VILLARD** et
codirigée par **Vincent RICHEFEU** et **Dominique DAUDON**

préparée au sein du **Laboratoire 3SR - Grenoble**
dans **l'École Doctorale Ingénierie, Matériaux, Energétique, Environnement, Procédés, Production (I-MEP2)**

Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets : application aux évènements réels

Thèse soutenue publiquement le 4 novembre 2015, devant le jury composé de :

M. Jordi COROMINAS

Professeur à l'UPC de Barcelone, Président du jury

M. Luuk DORREN

Professeur à l'HAFL de Berne, Rapporteur

M. Alfredo TABOADA

Maître de conférences HDR à l'Université de Montpellier, Rapporteur

Mme. Marina PIRULLI

Professeure au Politecnico di Torino, Examineur

M. Eric DIMNET

Directeur de recherche à l'IFFSTAR, Examineur

M. Pascal VILLARD

Professeur de l'Université Joseph Fourier, Directeur de thèse

M. Pierre PLOTTO

Expert en risques naturels et président de la société IMSRN



Yeison-Stiven Cuervo

Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des
éléments discrets : application aux évènements réels

Résumé

Yeison-Stiven CUERVO

Université de Grenoble, 2015

MOTS-CLÉS : éléments discrets, modélisation, risques naturels, éboulements rocheux, événements réels.

La compréhension et la prévision des phénomènes d'éboulements rocheux sont des éléments déterminants pour la gestion des risques dans l'aménagement des zones et des infrastructures de montagnes, qui nécessitent, entre autre, la mise au point d'outils numériques opérationnels permettant d'anticiper la trajectoire des épisodes rocheux et les zones susceptibles d'être impactées. L'approche numérique proposée dans le cadre de la thèse, est basée sur une modélisation numérique discrète qui permet de simuler le comportement collectif de blocs rocheux lors d'un éboulement, en considérant des blocs de géométrie réaliste et une topographie tridimensionnelle du versant de propagation. Pour faciliter son utilisation en bureau d'études, le modèle numérique de contact, qui gère les interaction entre les blocs et entre les blocs et le versant de propagation, fait appel à un nombre restreint de paramètres, pouvant être estimés par des mesures in situ ou par des rétro-analyses de cas existants. Les paramètres les plus influant sur les mécanismes de propagation sont : la géométrie des blocs et la topographie de surface, les paramètres dissipatifs de contact tels que le coefficient de restitution normale qui agit dans la direction normale au contact, le coefficient de frottement qui agit dans la direction tangentielle au plan de contact, et la résistance au roulement entre la pente et les blocs rocheux dans l'hypothèse d'un impact rocheux sur un sol meuble.

La thèse présente des nombreuses données de terrain qui ont servies de base à l'analyse des mécanismes de propagation sur d'anciens cas d'éboulements et sur des falaises potentiellement instables. Des méthodes permettant la reconstruction d'un volume instable pour la modélisation de la propagation ont été développées sur la base des modèles tridimensionnels de terrain. Après des tests de validation et de compréhension du modèle numérique, ce dernier a été appliqué à des cas réels. Trois sites, très différents en termes de géométrie, ont été retenus pour tester le modèle numérique. Les paramètres d'études sont suivant les cas, les mécanismes de propagation, les mécanismes de dissipation d'énergie, les zones de dépôt, les forces d'interactions et les énergies d'impact sur des structures de protection.

Ce travail a permis d'établir une méthodologie de modélisation des éboulements rocheux adaptée à l'ingénierie. Un protocole spécifique permettant de déterminer ou d'estimer les paramètres a été proposé et des logiciels de pré et post traitements permettant à la fois une analyse pertinente et rapide des résultats ont été développés. La corrélation entre les résultats numériques et les observations de terrain sont satisfaisantes et les résultats en termes de prévision encourageants.

Abstract

Yeison-Stiven CUERVO

Université de Grenoble, 2015

KEYWORDS : discrete element method, numerical modeling, natural hazards, rockfalls, real events

Understanding and predicting rock avalanches are key elements in risk management when developing mountainous areas. Due to the complexity of the mechanisms involved, developments of numerical and operational tools are useful and necessary to properly estimate block trajectories and define riskiest areas. The numerical approach proposed in this thesis is based in the discrete element method which allows simulating the collective behavior of a group of rocks by using realistic block geometries and three-dimensional slope topographies. The numerical contact model handles interaction between the blocks and between the blocks and the slope by using a limited number of parameters that can be estimated by in situ measurements or feed-back analysis of ancient rockfalls events. The most influential parameters in the propagation phenomena are: the geometry and shape of blocks and topography, the contact parameters such as the normal restitution coefficient which acts in the normal direction to the contact, the friction coefficient acting in the tangential direction to the contact plane and the rolling resistance coefficient of blocks with the slope that somehow accounts of the impact mechanisms in case of soft soil.

Various field results of past rockfall events or instable rocky cliffs are presented in the thesis. In addition, different procedures allowing the modeling of the whole unstable volume involved in the propagation motion are presented through real applications by using three-dimensional terrain models as input data. The numerical model was applied to three real rockfalls events, very different in terms of geometry. The parameters analyzed concerned mainly the propagation distances and energy dissipation mechanisms, deposit zones, interaction forces and impact energies on protective structures.

A specific protocol for determining and estimating the contact parameters was proposed and some pre and post processing software enabling both relevant and rapid analysis of the results have been developed. The correlation between the numerical results and field observations are satisfactory with very encouraging results in terms of forecasting.

Table des matières

Introduction	11
CHAPITRE 1: INTRODUCTION AU PHENOMENE D'ÉBOULEMENT EN MASSE : ETAT DE L'ART	15
1.1. Introduction	15
1.2. L'homme et les phénomènes naturels.....	15
1.3. Aléa, danger ou risque naturel?	16
1.4. Risque gravitaire rocheux	19
1.4.1. Définition et classification	19
1.4.2. Causes et conséquences	22
1.4.3. Catalogue historique d'événements réels.....	24
1.4.4. Base de données.....	26
1.4.5. Démarche d'analyse de risques gravitaires rocheux	27
1.4.5.1. Compréhension du phénomène physique de propagation	27
1.4.5.1.1. Phase 1 : « instabilité des masses rocheuses » : introduction au phénomène de rupture des massifs rocheux	30
1.4.5.1.2. Phase 2 : propagation et comportement dynamique des blocs rocheux	34
1.4.5.1.3. Etudes expérimentales sur la propagation de masse et de blocs rocheux isolés.....	35
1.4.5.1.4. Méthodes analytiques dites « empiriques » pour l'analyse de la propagation	36
1.4.5.1.5. Méthodes numériques pour l'analyse de la propagation.....	38
1.4.5.1.6. Modélisation de la propagation de blocs rocheux isolés – trajectographie	39
1.4.5.1.7. Description du mouvement dans la phase de vol libre	40
1.4.5.1.8. Modélisation de l'impact : coefficients de restitution	41
1.4.5.1.9. Influence de la forme des blocs sur le rebond	43
1.4.5.1.10. Revue non exhaustive des principaux codes trajectographiques de la littérature.....	44
1.4.5.1.11. Introduction au phénomène d'interaction forêt blocs- rocheux	46
1.4.5.1.12. Modélisation de la propagation de masses rocheuses.....	46
1.4.5.1.13. L'approche continue classique	47

1.4.5.1.14. L'approche continue de type MPM (Material Point Method)	48
1.4.5.1.15. L'approche granulaire ou discrète	49
1.4.5.1.16. Les approches combinées continues/discrets et continues/trajectographiques	52
1.4.5.1.17. Phase 3 : Introduction aux méthodes de prévention et de protection vis-à-vis de l'aléa risque gravitaire rocheux	53
1.4.6. Projets de collaboration industrielle et scientifique sur la thématique de propagation de masses rocheuses	55
1.5. Conclusion.....	56
CHAPITRE 2: RECONNAISSANCE DES SITES DE REFERENCE	58
2.1. Introduction	58
2.2. Eboulement de « Saint Pancrasse »	58
2.3. Eboulement de « Millau »	61
2.3.1. Photogrammétrie.....	64
2.3.2. Observations de la matrice rocheuse et de l'état de fracturation.....	65
2.4. Eboulement de « Perrière »	68
2.4.1. Contexte	68
2.4.2. Description du site	68
2.5. Bilan et discussion	71
2.5.1. Les blocs rocheux	71
2.5.2. Le versant de propagation.....	71
CHAPITRE 3: DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DISCRET POUR LA MODELISATION DE LA PROPAGATION DE BLOCS ROCHEUX	73
3.1. Introduction	73
3.2. Outils numériques.....	74
3.3. Spécificités de la méthode utilisée.....	75
3.3.1. Forme des particules	75
3.3.2. Fractionnement d'un bloc en famille de discontinuités	77
3.3.3. Modèle numérique de terrain	77
3.3.4. Propriétés d'inertie.....	78
3.3.5. Mouvement des blocs	80
3.3.6. Modèle de contact dissipatif	83

3.3.7. Détection des voisins et des contacts	87
3.4. Avantages de la méthode	90
CHAPITRE 4: ETUDE PHENOMENOLOGIQUE ET INFLUENCE DES PARAMETRES RHEOLOGIQUES DU MODELE NUMERIQUE	91
4.1. Etude du phénomène multi impact de plusieurs blocs rocheux en interaction	91
4.1.1. Contexte	91
4.1.2. Influence du nombre de blocs dans le phénomène de rebond	92
4.1.2.1. Description des simulations réalisées	92
4.1.2.2. Phénomène de rebond	93
4.1.2.3. Evolution de la dissipation d'énergie	94
4.1.2.4. Evolution des forces de contact	95
4.1.3. Sensibilité aux paramètres de contact	96
4.1.3.1. Paramètre de restitution normal e_n^2	96
4.1.4. Introduction au phénomène d'impact d'un bloc rocheux sur un sol multicouche	98
4.1.5. Conclusion	104
4.2. Influence des paramètres de la loi de résistance au roulement sur l'arrêt des blocs : étude paramétrique	105
4.2.1. Contexte	105
4.2.2. Evolution du moment résistant pendant la durée d'un contact	105
4.2.3. Etude de sensibilité aux paramétriques de la loi de résistance au roulement	109
4.2.4. Conclusion	114
4.3. DEMbox et la modélisation d'avalanches rocheuses	115
4.3.1. Contexte	115
4.3.2. Caractéristiques des simulations numériques	116
4.3.3. Analyse d'un cas de référence (H=2 m et R=20 cm)	117
4.3.3.1. Effet de la géométrie de la rupture de pente	119
4.3.3.2. Interprétation physique/discussion des résultats	121
4.3.4. Analyse phénoménologique du mouvement d'une masse granulaire sur une pente	122
4.3.5. Influence de la vitesse des particules sur les mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage de la rupture de pente	125
4.3.6. Influence de la forme des particules et du mode d'empilement sur les mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage de la rupture de pente	126
4.3.7. Conclusion	128

**CHAPITRE 5: MODELISATION DES EBOUEMENTS REELS EN MASSE : ANALYSE DES
MECANISMES DE PROPAGATION ET ETUDES PARAMETRIQUES 130**

5.1. Cas de Millau.....	130
5.1.1. Introduction.....	130
5.1.2. Contexte et méthodologie	130
5.1.3. Modélisation de l'éboulement de Millau : approche simplifiée en utilisant des blocs parallélépipédiques	132
5.1.4. Influence de la géométrie du point d'impact sur la propagation de la masse rocheuse	138
5.1.5. Modélisation de l'éboulement de Millau : approche simplifiée en utilisant des parallélépipèdes irréguliers	141
5.1.5.1. Détail de la campagne numérique	141
5.1.5.2. Etude de sensibilité aux paramètres de contact	144
5.1.5.2.1. Influence des paramètres de dissipation d'énergie par restitution normale.....	144
5.1.5.2.2. Influence du frottement basal et inter blocs.....	147
5.1.5.2.3. Bilan énergétique au voisinage du premier impact de la masse rocheuse avec le versant de propagation	151
5.1.5.3. Simulations numériques menées avec le jeu de paramètres de référence.....	152
5.1.6. Approche trajectographique de l'éboulement de Millau par utilisation de DEMbox.....	154
5.1.7. Modélisation de l'éboulement de Millau : approche prenant en considération une topographie et des géométries de blocs réalistes issues des données de terrain	158
5.1.7.1. Introduction.....	158
5.1.7.2. Méthodologie	158
5.1.7.2.1. Traitement de la géométrie du versant de propagation.....	158
5.1.7.2.2. Traitement du volume de départ et de la géométrie des blocs	160
5.1.7.2.3. Relevé numérique de terrain après éboulement : cas de l'éboulement de « Millau ».....	160
5.1.7.2.4. Découpage du volume de l'écaille rocheuse en sous blocs	162
5.1.7.3. Simulation de la propagation en utilisant une configuration tridimensionnelle maillée et comparaison avec la configuration simplifiée.....	164
5.1.7.4. Utilisation d'un critère spécifique d'analyse des dépôts d'éboulement réel.....	167
5.1.7.5. Etude sur l'influence du pas de temps dans DEMbox.....	168

5.1.7.6. Influence de la résolution du maillage dans la propagation de blocs rocheux en masse	169
5.1.7.7. Influence de la géométrie et de la blocométrie du volume de départ dans la propagation de blocs rocheux.....	172
5.1.7.7.1. Effet de la position initiale des blocs.....	172
5.1.7.7.2. Influence de l'espace entre les blocs	175
5.1.7.7.3. Influence de la morphologie des blocs	176
5.1.7.8. Influence du comportement mécanique des matériaux des discontinuités sur le phénomène de propagation des blocs rocheux.....	179
5.1.8. Conclusion générale sur la modélisation de l'éboulement de Millau et les différentes études paramétriques.....	183
5.2. Propagation des éboulements rocheux et interaction avec des ouvrages de protection : cas de Perrières	185
5.2.1. Introduction.....	185
5.2.2. Définition du volume potentiellement instable	185
5.2.3. Estimation de la blocométrie de l'événement	188
5.2.4. Etude de la propagation des blocs et du dépôt	189
5.2.4.1. Définition des paramètres d'interaction	189
5.2.4.2. Bilan cinématique des simulations	190
5.2.5. Influence du merlon de protection sur la propagation des blocs	196
5.2.6. Etude de la propagation des blocs isolés par une approche trajectographique.....	197
5.2.7. Identification des zones d'impact critiques lors d'un éboulement en masse.....	199
5.2.8. Conclusion	201
5.3. Cas de l'éboulement de Saint Pancrasse.....	203
5.3.1. Contexte	203
5.3.2. Description de la campagne de modélisation numérique	203
5.3.3. Définition de la géométrie de la falaise et du versant de propagation	204
5.3.4. Volume initial de la partie instable et formes des blocs.....	206
5.3.5. Analyse de la propagation et de la cinématique des blocs de l'éboulement	208
Conclusion	212
Sur l'étude paramétrique	212
Sur la loi de résistance au roulement.....	212

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	213
Sur la méthodologie utilisée	213
Sur la rhéologie et les conditions initiales	214
Sur la modélisation des éboulements réels et des ouvrages de protection de type merlon	216
Limitation du modèle et perspectives	218
ANNEXE A	220
ANNEXE B	223
ANNEXE C	229
BIBLIOGRAPHIE	232
LISTE DES TABLEAUX	243
LISTE DES FIGURES	244

Introduction

Les risques naturels sont aujourd'hui une question centrale dans l'aménagement des territoires. Le constant développement démographique des villes favorise la concentration de plus en plus importante des personnes dans les régions montagneuses. Cela signifie que les populations doivent vivre avec les risques existants sur ces régions mais aussi avec les risques que l'activité humaine déclenche elle-même. Le développement des zones peuplées en montagne signifie également la construction de nouvelles voies d'accès (autoroutes, voies ferrées, etc.) et un développement des systèmes d'agriculture qui modifient l'état naturel de l'environnement montagneux. Lorsque ces ouvrages, ou bien une population se voient menacés, un risque est identifié. Parmi les risques naturels les plus importants (chutes de blocs, glissements de terrains, avalanches, laves torrentielles...) les risques gravitaires à caractère rocheux restent les plus imprévisibles et les plus fréquents en région alpine. A l'heure actuelle leur fréquence est amplifiée par des phénomènes climatologiques comme la pluviosité, les événements de type orageux, le réchauffement en altitude et l'alternance rapide de cycles gel/dégel qui peuvent déstructurer et déstabiliser les massifs rocheux en montagne. Face aux menaces que représentent ces risques, les communautés locales sont amenées à engager des fonds importants pour les minimiser, et sécuriser, quand cela est possible, les régions concernées. Des centaines de millions d'euros sont dépensés chaque année en Europe pour construire ou requalifier des infrastructures de protection dans les zones à risques.

La gestion de ces événements passe, entre autre, par la mise au point d'outils numériques opérationnels permettant d'anticiper la trajectoire des épisodes rocheux et les zones susceptibles d'être impactées. Parmi les approches existantes, on peut facilement identifier trois grandes familles en fonction du volume de masse rocheuse concerné par l'événement gravitaire :

1. L'approche bloc isolé. Cette approche est la plus courante et la plus utilisée dans le milieu opérationnel. Elle est basée sur la cinématique d'un seul bloc (Descoedres et Zimmermann, 1987; Hungr et Evans, 1988; Guzzetti et al., 2002; Dorren, 2003) et consiste à établir des probabilités d'occurrence des trajectoires et des zones d'arrêt des blocs à partir d'un grand nombre de simulations qui visent à prendre en compte le caractère stochastique du phénomène. Bien que puissantes, ces méthodes ne considèrent pas l'interaction entre blocs et des fortes hypothèses s'y voient intégrées.

2. L'approche continue. Pour des volumes importants, voir très importants, les modèles numériques les plus couramment utilisés pour simuler le comportement des avalanches rocheuses, sont issus des modèles continus basés sur un comportement de type fluide à faible épaisseur faisant appel à des rhéologies parfois sophistiquées (Savage et Hutter, 1989; Mangeney-Castelnau et al., 2003; Hungr, 1995). Bien que largement utilisés, ces modèles s'appuient sur un jeu de paramètres difficilement identifiables à priori (par manque de réalité physique dans la définition des rhéologies) et obtenus le plus souvent par rétro analyses d'événements ayant eu lieu (Pirulli, 2008; Sosio et al., 2008).

3. L'approche discrète. Adaptés à des volumes quelconques de masse rocheuse (plus spécifiquement pour des petits volumes et des volumes intermédiaires multi-granulaires) les modèles granulaires discrets sont de plus en plus utilisés (Calvetti et al., 2000; Cleary and Prakash, 2004; Staron, 2008; Tommasi et al., 2008; Banton et al., 2009; Taboada and Estrada, 2009). Ces

modèles considèrent un ensemble de solides généralement indéformables en interaction dont le comportement est régi par le principe fondamental de la dynamique, et mettent en jeu des lois de contact inter granulaire adaptées (Cundall et Strack, 1979). A l'heure actuelle, ces outils sont encore peu utilisés par les bureaux d'études privés, car ils nécessitent une mise en œuvre complexe souvent peu compatible avec les impératifs de l'entreprise. Néanmoins, vue sa pertinence, l'utilisation d'une telle méthode pour des cas réels de chute de blocs de volume intermédiaire, semble pertinente.

Dans le cadre de la thèse, nous avons opté pour un modèle numérique discret qui rend compte du comportement collectif de blocs rocheux lors d'un éboulement en masse sur la base d'hypothèses de calcul intégrant les mécanismes de dissipation d'énergie à chaque choc ou contact. Les volumes concernés sont des petits volumes de plusieurs centaines de mètres cubes à des volumes intermédiaires de plusieurs milliers de mètres cubes. Ce modèle a été validé sur des expériences de laboratoire dans le cadre du Projet Européen Alcotra MASSA (*Medium And Small Size rock fall hazard Assessment*) et permet de considérer des blocs de géométrie réaliste et une topographie 3D. Pour permettre son utilisation en bureau d'études, le modèle numérique fait appel à un nombre restreint de paramètres, identifiables à-priori par des mesures in situ ou par des rétro-analyses de cas existants.

L'un des enjeux de la thèse est de confronter le modèle numérique à des cas réels d'éboulements rocheux et ce pour en évaluer le caractère opérationnel en bureau d'études et pour y apporter des améliorations. L'analyse par la modélisation numérique de ces cas réels d'éboulements rocheux doit également permettre de mieux comprendre la cinématique de propagation et les mécanismes de dissipation d'énergie lors de l'écoulement de la masse rocheuse dans des situations naturelles. On attend de la modélisation une meilleure évaluation de zones impactées et une amélioration de son caractère prédictif notamment dans des situations complexes qui sont difficiles à appréhender avec les méthodes actuelles utilisées par la communauté scientifique et dans les milieux industriels. La question des efforts et des énergies d'impacts sur les structures de protection, lorsqu'elles sont confrontées à des avalanches rocheuses ou lorsqu'elles subissent plusieurs impacts consécutifs, devra également être abordée notamment pour améliorer la démarche de dimensionnement qui actuellement ne considère que des impacts isolés. A noter que le comportement de ces structures vis-à-vis des éboulements rocheux ou des impacts multiples a été très peu étudié d'où l'intérêt des modélisations proposées.

Les travaux effectués au cours de la thèse pour atteindre ces objectifs comprennent de manière non exhaustive:

- La modélisation de trois cas réels d'éboulements rocheux. Deux de ces cas se réfèrent à des événements relativement bien documentés ayant eu lieu récemment en France. Le troisième correspond à une masse rocheuse potentiellement instable, encore en place, qui représente un risque d'éboulement élevé et pour lequel un merlon de protection a été mis en œuvre pour protéger les riverains menacés.
- Des simulations numériques d'avalanches rocheuses menées dans des conditions aux limites simples et contrôlées pour appréhender les mécanismes de propagation et préciser l'influence de certains paramètres.
- La participation à des visites de terrain pour une reconnaissance in situ du phénomène (causes d'instabilité et d'éboulement, géométries, géologie, risque, définition des

surfaces de discontinuités, état général de fracturation naturelle du massif rocheux instable) et pour l'acquisition de données susceptibles de valider la modélisation numérique.

- La mise au point d'une méthodologie numérique adaptée à l'ingénierie pour la reconstruction numérique du versant de propagation et de la masse instable et ce à partir de données de reconnaissance de type photogrammétrique et/ou Lidar.
- L'implémentation d'un protocole spécifique permettant de déterminer la forme, la taille et la position initiale des blocs rocheux en fonction des différentes familles de discontinuités.
- La définition d'une méthodologie de calibration des paramètres, basée sur des rétro-analyses de cas existants ou sur des valeurs issues de la littérature.
- Le développement et l'implémentation dans le modèle numérique d'une loi d'interaction spécifique qui permet de prendre en compte l'enfoncement des blocs rocheux sur des sols potentiellement plastiques ou mous. Ce comportement, qui permet l'arrêt des blocs rocheux sur de très petites distances de propagation est intégré au modèle numérique par le biais d'une loi de résistance au roulement fonction de la géométrie du bloc et de l'énergie d'impact.
- Le développement des logiciels de pré et post traitements permettant à la fois une analyse pertinente et rapide des résultats dans le cadre d'une démarche d'ingénierie.

Ce mémoire comprend cinq chapitres principaux:

- *Chapitre 1 : Introduction au phénomène d'éboulement en masse : état de l'art*

Dans ce chapitre, on présente les différentes méthodes existantes (numériques – empiriques – expérimentales) pour l'analyse de la propagation des éboulements rocheux. On y présente également les aspects morphologiques et géométriques pouvant influencer les mécaniques de propagation.

- *Chapitre 2 : Reconnaissance des sites de référence*

Ce chapitre présente les différents relevés de terrain sur sites réels effectués pendant la thèse incluant deux événements d'éboulements rocheux en région Alpine (éboulements dits de « Saint Pancrasse » et de « Perrières ») et un cas d'éboulement dans le Massif Central (éboulement dit de « Millau »). Ces sites, très différents les uns des autres en termes d'enjeu et de distance de propagation ont fait l'objet chacun d'une campagne complète de modélisation numérique. Ce chapitre présente également plusieurs études structurales des différents pans de falaise, qui ont servi de base pour l'identification des formes caractéristiques des blocs mis en mouvement lors de la phase déboisement en masse.

- *Chapitre 3 : Développement d'un modèle numérique discret pour la modélisation de la propagation de blocs rocheux : lois rhéologiques et méthodologie de calcul*

L'objectif de ce chapitre est de décrire les hypothèses de base du modèle numérique et de présenter les différentes améliorations réalisées pendant la thèse pour prendre en compte les

spécificités inhérentes aux phénomènes réels d'éboulements rocheux. On s'attachera notamment à décrire les lois d'interaction retenues et les choix numériques effectués pour prendre en compte les réseaux de fractures initiaux, la géométrie des blocs et la définition du modèle numérique de terrain.

- *Chapitre 4 : Etude phénoménologique et influence des paramètres rhéologiques du modèle numérique*

Ce chapitre présente diverses applications du modèle numérique à des configurations géométriques d'impacts simples qui ont permis de tester et de valider les développements du modèle rhéologique. Les études de sensibilité réalisées ont permis de mieux comprendre l'influence des paramètres du modèle numérique et de discerner ceux qui sont d'une importance majeure pour les applications à des phénomènes réels.

- *Chapitre 5: Modélisation des éboulements réels en masse : analyse des mécanismes de propagation et études paramétriques*

Dans ce chapitre, on présente les différentes procédures qui ont été intégrées dans le code pour la simulation des cas réels, notamment : l'importation d'une topographie tridimensionnelle, la définition d'un volume de départ cohérent avec les études géo-mécaniques de stabilité, et la définition des paramètres de la loi rhéologique. La pertinence du modèle numérique a été évaluée par comparaison avec des cas réels d'éboulement rocheux dont l'un d'eux vise à appréhender le caractère prédictif du code en simulant la propagation d'une masse instable encore en place. Enfin, les phénomènes d'impacts multiples entre une masse rocheuse et un ouvrage de protection seront abordés en fin de chapitre. Pour analyser les modélisations effectuées, des bilans d'énergies dissipées par frottement ou par collision, au sein de la masse granulaire ou à la base de l'écoulement ont été établis pour mieux comprendre comment est arrêtée ou freinée la masse rocheuse en mouvement. L'intérêt du modèle discret est qu'il permet de définir avec précision les distributions spatiales et temporelles des forces d'interaction. Des études sur la variabilité des résultats du modèle (distance d'arrêt et zone de dépôt) en fonction des paramètres d'entrées tels que topographie (pente moyenne et irrégularité du relief), géométrie (forme et taille des blocs) et coefficient de dissipation d'énergie seront également présentées. Des questions pratiques comme le degré de précision du modèle numérique de terrain nécessaire pour rendre compte d'un comportement réaliste de l'avalanche rocheuse tout en conservant des temps de calcul accessibles seront abordées.

Ce mémoire de thèse se terminera par une conclusion générale et des perspectives précisant les avancées réalisées pendant la thèse et soulignant les pistes encore à explorer.

CHAPITRE 1: INTRODUCTION AU PHENOMENE D'ÉBOULEMENT EN MASSE : ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

Les risques gravitaires rocheux sont des phénomènes très courants en régions montagneuses qui résultent de divers phénomènes naturels tels que les épisodes climatiques et sismiques, ou anthropiques liés aux activités animales ou humaines.

Bien que le cœur de cette thèse concerne la modélisation numérique de la propagation d'éboulements rocheux, l'auteur considère indispensable la connaissance, sans avoir nécessairement la maîtrise, de toutes les étapes d'un événement rocheux de l'initiation à la stabilisation du phénomène. En effet, la compréhension des causes à l'origine d'un éboulement et des conséquences qui en découlent, est indispensable pour réaliser des retro analyses suffisamment pertinentes d'un événement passé et ce pour accroître le caractère prédictif des modèles numériques.

L'objectif de ce chapitre est donc de comprendre le phénomène d'éboulement rocheux dès la détection d'un risque jusqu'à son arrêt. On commencera par définir le langage utilisé, notamment la notion de risque, de danger et d'aléa. Les méthodes couramment utilisées pour identifier, quantifier et suivre au cours du temps une instabilité rocheuse seront également brièvement présentées.

La définition et la prévision des zones d'arrêt lors d'un éboulement rocheux (naturel ou provoqué) est indispensable pour sécuriser les populations et les ouvrages à proximité. Un intérêt particulier sera donc donné aux méthodes quantitatives et qualitatives développées pour prédire la propagation d'une masse rocheuse. Des comparaisons entre les outils et les modèles numériques existants seront présentées.

Les solutions de prévention et de protection, comme les purges de masses instables ou le dimensionnement d'ouvrages de soutènement visant à un arrêt de la masse d'éboulis, seront brièvement évoquées. On présentera notamment quelques-unes des méthodes actuelles permettant d'estimer les énergies d'impacts sur les ouvrages de protection suite à un choc avec un bloc isolé ou un éboulement de masse.

Finalement, on introduira la notion de cartes de risques définissant des probabilités d'occurrence pour la propagation et les zones d'arrêt.

1.2. L'homme et les phénomènes naturels

L'homme consacre, depuis le début de l'humanité, une grande partie de ses capacités à la recherche constante d'un état de vie de plénitude, lié à la survivance et au confort. La survivance qui a été historiquement liée à la migration, s'est traduite par la recherche de territoires aptes à la vie humaine ou encore (plus récemment) à la transformation d'une région et de son écosystème dans son ensemble pour la rendre habitable. La survivance décrit l'accès à des ressources de base nécessaire à la vie comme l'eau potable, les terrains pour l'agriculture, un climat favorable. Le confort, un terme beaucoup plus récent par rapport à l'histoire de l'homme, a redéfini la survivance en y ajoutant un caractère de complaisance. Désormais, l'homme ne veut plus seulement vivre dans

une région apte à la survivance mais aussi dans une région qui remplit un certain nombre d'exigences liées à son confort.

Deux phénomènes expliquent comment un certain nombre de grands centres urbains se sont créés. Le premier, celui de la migration est peut-être le phénomène le plus commun à toutes les civilisations. L'homme, dans son histoire, a été imprégné par une culture de voyage, marquée par le désir naturel de connaître son environnement tout en créant des civilisations au cours de son périple. Nonobstant, la migration apparaîtra aussi dans des contextes sociaux comme conséquence de l'interaction humaine à la vie en société. On y trouve, par exemple, des guerres et des maladies qui ont été une source des grands mouvements de migration au cours de l'histoire. Des situations encore plus complexes, comme celui de la colonisation des peuples ont favorisé également le phénomène de la migration des personnes vers des territoires inconnus.

Dans ce contexte, un nombre important de centres urbains actuels ont vu leur émergence dans la recherche nomade des régions propices (civilisation de Rome) mais d'autres, au contraire, dans des régions inhospitalières où le mot survivance décrivait un panorama beaucoup plus complexe qui les a obligé à habiter dans des régions isolées ou dangereuses (par exemple, les Balkans, les Alpes, l'Amérique et l'Asie mineure). Ce phénomène a été explicitement décrit dans plusieurs ouvrages mythologiques, notamment grecs, où l'on trouve des civilisations obscures appelées « peuples du mal » se référant à des sociétés situées dans des régions très dangereuses parfois sujettes à des éruptions volcaniques, des glissements de terrains, des chutes des blocs ou des séismes, avec des conditions de vie souvent difficile et sévère (Platon, 1992). Des ouvrages littéraires classiques comme « Don Quichotte » font aussi référence aux montagnes comme des paradis naturels mais difficilement habitables (De Cervantes-Saavadra, 1827). Dans ces endroits, l'homme pour la toute première fois a créé un lien direct entre la survivance et la maîtrise des dangers naturels en montagne. Malgré la méconnaissance des phénomènes naturels de la part de l'homme, les diverses sources littéraires montrent une certaine importance de ces phénomènes dans le développement culturel, social et psychologique des civilisations au cours de l'histoire.

Ce n'est donc pas par hasard que les régions situées actuellement en montagne furent les épices des développements les plus novateurs et avancés sur ce sujet. Elles comptent en effet avec des dangers naturels majeurs, potentialisés par leur développement démographique des dernières années mais aussi par des siècles d'expériences dans la prévention des phénomènes naturels, dont la maîtrise représente presque une question d'existence.

1.3. Aléa, danger ou risque naturel?

Pour comprendre la notion de « risque naturel » il faut d'abord comprendre l'univers qui se cache derrière chaque mot qui la compose. Le mot « risque » peut facilement se confondre avec le mot « danger » ou encore le mot « aléa ». En effet, on parle de danger lorsque l'on se réfère à la source ou à l'évènement qui provoque un dommage sur un enjeu donné (économique ou humain).

Lorsque le danger a pour origine un phénomène accidentel on parle spécifiquement d'aléa. L'aléa est donc l'expression pour un type d'accident donné du couple probabilité d'occurrence et gravité des effets. De façon générique, le risque est un aléa ou la combinaison de l'exposition à un danger et de la gravité des effets.

Au final, le risque donne sa dimension au danger, on passe du danger au risque en caractérisant le danger par des modalités d'exposition, une probabilité et une gravité des conséquences (Bourrelier, 2000).

Dans un contexte plus technique, le risque est défini ainsi (Bigot, 2014) :

$$\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{conséquences} \quad [1]$$

En sciences de la terre, le mot « naturel » fait référence aux phénomènes physiques ayant lieu de manière spontanée indépendamment d'une action directe humaine et/ou animale. Dans ce contexte, l'impact d'un météorite sur terre, par exemple, est considéré comme un phénomène naturel. Il est important de comprendre qu'une zone ou région peut être très risquée d'un point de vue géologique avec une fréquence importante d'aléas, mais peu dangereuse vis-à-vis de l'exposition et des conséquences que ces aléas peuvent signifier pour les personnes et les infrastructures (Figure 1.1). La Russie, par exemple, a été le pays pour lequel on a répertorié le plus grand nombre de dangers naturels en 2010 (Novoski, 2011) sans pour autant être le pays avec l'indice de risques le plus élevé au monde sur la même période.

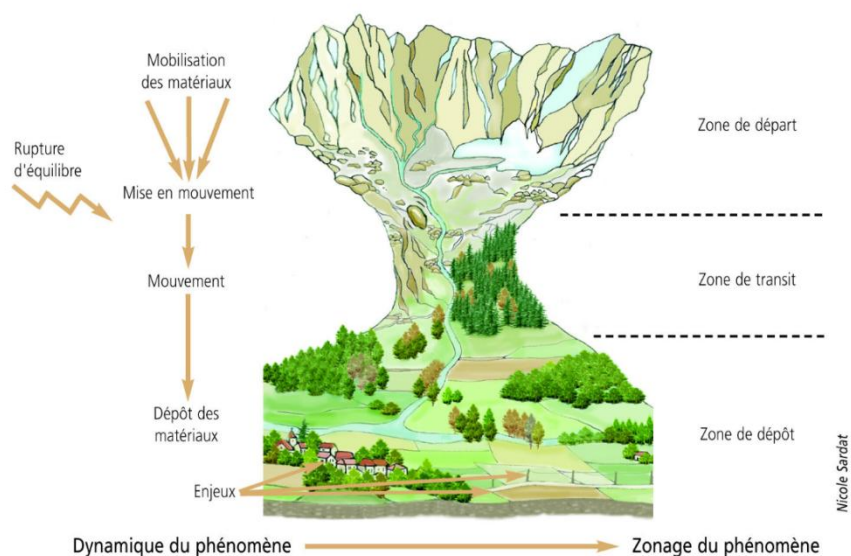
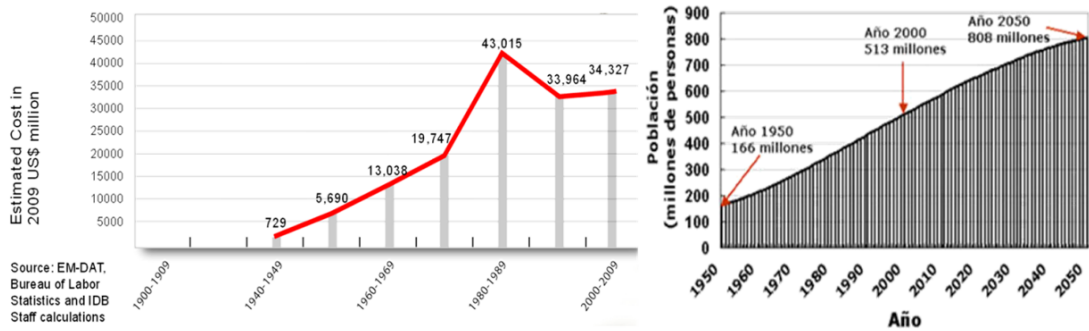


Figure 1.1. Représentation graphique d'un risque naturel en montagne (Bigot, 2014)

Les risques naturels sont liés notamment à la situation et à l'environnement géographique des régions ainsi qu'aux conditions géologiques et météorologiques. Ces risques peuvent évoluer dans le temps suite aux actions combinées de l'activité humaine (par exemple le développement démographique) et des conditions climatiques. Des régions considérées comme sûres peuvent devenir, avec le temps, risquées en raison de ces actions. La Figure 1.2 présente l'évolution du coût économique des risques naturels en Amérique Latine pendant le dernier siècle. On constate sur cette figure une augmentation des coûts liés aux risques naturels, proportionnelle au développement démographique de ces régions.



Note: Disasters considered are earthquakes, floods and storms. All U.S. dollars figures were inflation-adjusted using the U.S. Consumer Price Index For All Urban Consumers, as reported by the Bureau of Labor Statistics. Latin American and Caribbean countries included in the calculations: Argentina, Bahamas, Barbados, Belize, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Dominican Republic, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Guyana, Haiti, Honduras, Jamaica, Mexico, Nicaragua, Panama, Paraguay, Peru, Suriname, Trinidad and Tobago, Uruguay and Venezuela.

Figure 1.2. Evolution du coût moyen en millions de dollars des risques de glissements de terrain, d'avalanches, et de séismes en Amérique latine entre 1900 et 2010 (Institutional - IDB, 2011)

La France est l'un des pays pour lequel la liste d'aléas naturels est la plus exhaustive au monde, du fait notamment de ses nombreux territoires d'outre-mer, situés dans des régions éparpillées sur les cinq continents, et qui sont soumis à des phénomènes naturels variés. Ces derniers sont précisés dans la circulaire ministérielle du 19/05/1998 et ont donné lieu aux Plans de Prévention de Risques (PPR) qui comportent notamment les inondations et coulées de boue, les mécanismes d'érosion liés à l'action de la mer, les mouvements de terrain, les avalanches et les séismes. Une répartition des différentes catastrophes survenues en France et dans les DOM (Départements d'outre-mer) entre 2000 et 2010 est présentée en *Figure 1.3*. On y trouve, par exemple, qu'environ 25 % du total des catastrophes naturelles ont été la conséquence de phénomènes gravitaires : de glissements de terrain, de chutes de blocs ou d'avalanches (de neige, de roche ou de sol).

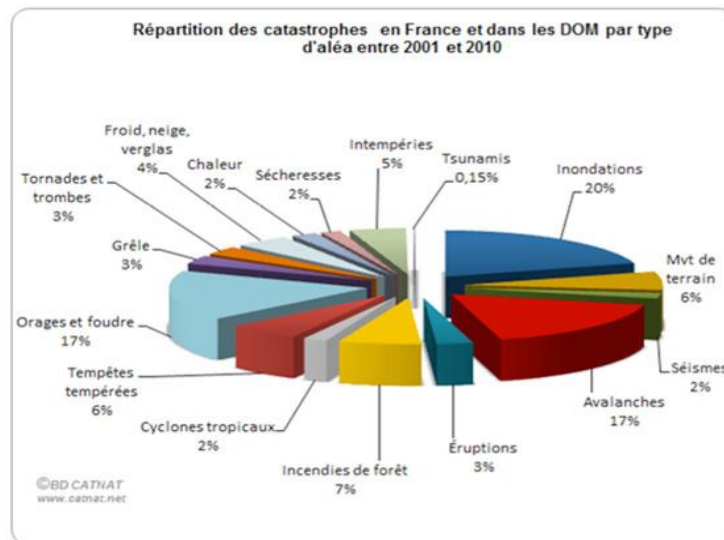


Figure 1.3. Répartition des catastrophes naturelles en France entre 2001 et 2010 (Les inondations restent le principal risque naturel en France, 2011)

D'une manière générale, la compréhension et l'analyse des risques naturels est complexe de par la variété et la diversité des phénomènes rencontrés. L'auteur a présenté de façon générale ces risques mais recommande pour une analyse plus approfondie de ces événements de se référer

aux travaux de la littérature (Hicham, 2005; Keaton, 2012). On s'intéressera, par la suite, aux risques naturels à caractère rocheux, leurs causes, conséquences, méthodes d'évaluation et aux systèmes de protection.

1.4. Risque gravitaire rocheux

1.4.1. DEFINITION ET CLASSIFICATION

On nomme risque gravitaire rocheux, un phénomène naturel qui implique un matériau de type roche (défini selon la classification des normes européennes (Schuppener and Scarpelli, 2006) et qui peut représenter un danger selon la définition discutée au paragraphe « Aléa, danger ou risque naturel ? ». D'une façon concrète, on s'intéresse aux événements rocheux qui ont un impact sur les populations et les infrastructures. Ces mouvements gravitaires, qui vont de la simple chute de blocs à l'avalanche rocheuse de plusieurs millions de mètres cubes, restent parmi les événements naturels les plus imprévisibles et les plus fréquents en zones montagneuses.

Actuellement, une définition couramment acceptée définit un mouvement gravitaire rocheux comme le détachement instantané et rapide d'une masse rocheuse ayant un volume supérieur à un mètre cube (Bourrier, 2008). Diverses classifications et définitions de ces événements ont été proposées. Certaines prennent en considération le mode de rupture, d'autres le volume de masse rocheuse impliquée. Quoiqu'il en soit, les travaux de la littérature montrent qu'il existe une corrélation entre le type de mécanisme de rupture, le volume, le nombre et la vitesse des blocs rocheux (Hungr and Evans, 2001; Banton, 2009a; Pirulli, 2005; Varnes, 1978; Sharpe, 1938; Nemcok et al., 1972; Hutchinson, 1988; Sassa, 1989; Cruden and Varnes, 1996).

Les risques gravitaires rocheux, peuvent être classifiés suivant leur volume en trois catégories : la chute de blocs, l'éboulement rocheux et les avalanches rocheuses (Keaton, 2012).

La chute de blocs que l'on appelle dans le milieu anglophone « Fragmental rockfalls » (Evans and Hungr, 1993), se caractérise par le détachement d'une masse rocheuse dont les éléments, en nombre limité, interagissent lors de la phase de propagation principalement avec le relief (pas d'interaction entre blocs).

Les éboulements rocheux sont présentés comme des mouvements gravitaires de taille intermédiaire ($< 10\ 000\ m^3$) mais extrêmement rapides (vitesses $> 5\ m/s$) où un comportement en masse – inter granulaire – est clairement identifié (Bourrier, 2008) et dont l'origine et le mouvement résultent de surfaces de discontinuité facilement identifiables. En général, ces phénomènes sont peu étudiés dans la littérature comparativement à ceux de type « Fragmental rockfalls ».

Enfin, les avalanches rocheuses consistent en des mouvements gravitaires de très gros volumes ($> 10\ 000\ m^3$) dont le comportement peut être assimilé à celui d'un fluide, de la même manière que les avalanches de sol ou de neige. Pour ces phénomènes, de nombreux modèles d'analyse ont été proposés ces dernières années et appliqués à des cas réels (Scavia et al., 2010; Pirulli, 2005; Mckinnon et al., 2008). On y reviendra plus en détail dans la session « modèles numériques continus ».

Certaines classifications comme celle proposée par (Varnes, 1978) prennent en considération le mode de rupture (*Figure 1.4*). On distingue ainsi (*Figure 5*) des mécanismes aussi

variés que l'effondrement, le basculement ou la propagation en masse ou en blocs isolés. Bien souvent, ces phénomènes peuvent être couplés les uns aux autres, ce qui les rend encore plus difficiles à appréhender (IGME, 1997).

Movement type	Rock	
Fall	1. Rock fall	
Topple	4. Rock topple	} Rockslide
Rotational sliding	7. Rock slump	
Translational sliding	10. Block slide	
Lateral spreading	13. Rock spread	
Flow	15. Rock creep	} Rock avalanche
Complex	27. Rock slide-debris avalanche	

Figure 1.4. Classification des mouvements gravitaires rocheux proposée par (Varnes, 1978)

La classification proposée par (Hungr et al., 2013) est dérivée de la classification proposée par (Varnes, 1978). Elle regroupe tous les mouvements gravitaires, y compris ceux concernant les sols, en fonction du mode d'instabilité à l'origine de l'événement et en fonction de la nature du risque que ces événements peuvent représenter pour les populations. Cette classification, plus complète que celle proposée par (Varnes, 1978), fait suite aux derniers développements technologiques et informatiques (par exemple la photogrammétrie, les analyses sismiques, les simulations numériques, etc.) qui ont permis une meilleure analyse et détection des sources d'instabilité ainsi que leur suivi dans le temps, ce qui était très difficile il y a encore quelques années. Les mouvements gravitaires peuvent alors être identifiés selon différents mécanismes de rupture, dont certains très complexes. On cite à titre d'exemple : le basculement, le glissement sur dièdre, le flambage, et bien d'autres encore (Figure 1.6).

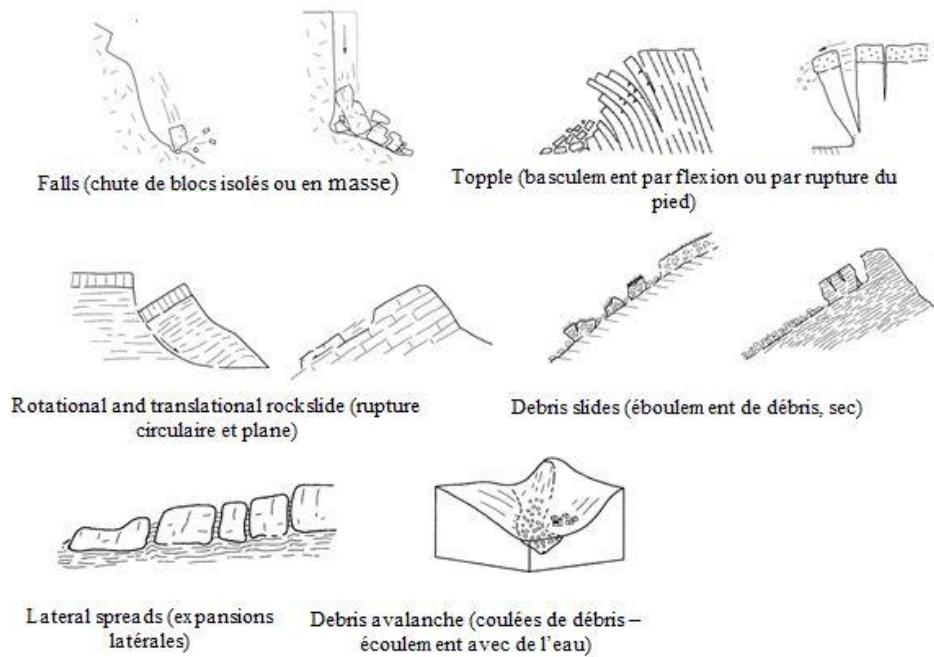


Figure 1.5. Mécanismes de rupture et mouvements associés. Adaptation du modèle présenté par (Corominas and García Yagüe, 1997)

Par ailleurs, (Hungar et al., 2013) associe le terme « chute de blocs » (Rockfall) au phénomène qui décrit un mouvement de masse rocheuse dont le comportement résulte de la propagation de blocs rocheux isolés, même pour des événements pour lesquels un mouvement en masse a pu être identifié au début du phénomène. Ce choix est justifié par le fait qu'il existe des mouvements de masses rocheuses où un comportement inter granulaire est présent au début du phénomène, mais dont le risque majeur est lié aux particules rocheuses isolées, et non à la masse rocheuse principale. Dans cette situation, le risque étant fonction des blocs isolés et non de la masse rocheuse dans son ensemble, le phénomène sera appelé « rockfall » ou « chute de blocs » en français, au lieu de « rockslide » ou « éboulement rocheux » en français (Hungar et al., 2013). De ce fait, d'après la nouvelle classification proposée, la frontière entre chute de blocs et éboulement rocheux de volume intermédiaire est très mince et porte principalement sur le type d'interaction prédominant (bloc/sol ou bloc/bloc). Cette nouvelle nomenclature ne fait pas actuellement l'unanimité et suscite de nombreuses discussions dans la communauté scientifique.

Type of movement	Rock
Fall	1. <i>Rock/ice fall</i> ^a
Topple	3. <i>Rock block topple</i> ^a
	4. <i>Rock flexural topple</i>
Slide	6. <i>Rock rotational slide</i>
	7. <i>Rock planar slide</i> ^a
	8. <i>Rock wedge slide</i> ^a
	9. <i>Rock compound slide</i>
	10. <i>Rock irregular slide</i> ^a
Spread	15. <i>Rock slope spread</i>
Flow	18. <i>Rock/ice avalanche</i> ^a
Slope deformation	28. <i>Mountain slope deformation</i>
	29. <i>Rock slope deformation</i>

Figure 1.6. Classification des mouvements gravitaires proposée par (Hungr et al., 2013)

Dans le cadre de ce travail de thèse, et par analogie avec les développements numériques récents, le terme « chute de blocs » fera référence aux mouvements rocheux qui englobent des mouvements de blocs isolés, alors que le terme « éboulements rocheux » sera utilisé dès lors qu'il existera une interaction inter granulaire ayant une influence sur le mécanisme de propagation de l'ensemble.

1.4.2. CAUSES ET CONSEQUENCES

Les risques gravitaires rocheux sont le résultat d'une perte de cohésion de la roche suite à des actions climatiques complexes (action gel/dégel, intempéries, séismes), à des mécanismes d'érosion, à des effets externes liés aux activités humaines ou animales (quelques cas par an sont répertoriés d'animaux de montagne qui font chuter des blocs (Wyllie and Mah, 2014)) ou à des phénomènes naturels comme les séismes et le vent (Keaton, 2012) (*Figure 1.7*).

D'autres facteurs externes, comme les développements technologiques du siècle dernier, motivés par la productivité industrielle, se sont traduits par une source indirecte de risques supplémentaires vis-à-vis des phénomènes gravitaires rocheux. On cite à titre d'exemple la forte demande en matériaux d'origine minière qui a nécessité la réalisation de mines à ciel ouvert de grande envergure. Sur ces sites, les éboulements rocheux sont très fréquents et engendrent des pertes économiques et de vies humaines parfois très importantes (Scholtès and Donzé, 2012). On peut citer l'exemple du secteur minier de Khao Yoien en Thaïlande où la chute de 10 000 m³ de roche a provoqué la mort de 3 personnes (Bauwens, 2013).

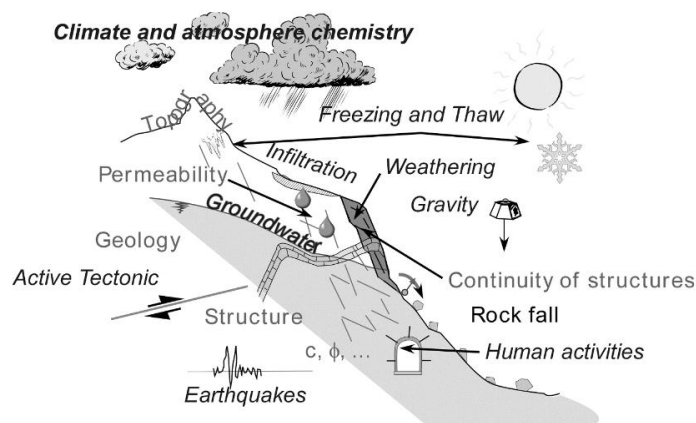


Figure 1.7. Phénomènes naturels et artificiels qui donnent lieu à des risques gravitaires rocheux (Volkwein et al., 2011)

Dans la littérature, il existe une certaine complexité dans la compréhension du mot « cause » lorsque l'on veut parler de risques gravitaires rocheux. En effet, celui-ci peut être associé aux phénomènes externes qui ont favorisés l'apparition ou le développement d'un risque comme un séisme ou le vent, mais aussi lié à des phénomènes internes, propres à la mécanique du matériau concerné. En présence d'un éboulement rocheux on peut dire, par exemple, qu'il s'est produit à cause d'une pluie très forte mais aussi à cause du basculement d'un pan de falaise rocheuse. A ce niveau, il existe donc plusieurs causes qui impliquent *in fine* la mécanique à la rupture des roches et des discontinuités.

En termes de propagation et de dynamique, ces mécanismes de rupture, dont les principaux ont été présentés sur la *Figure 1.5*, sont particulièrement importants car ils permettent de définir les volumes, la forme et la taille des blocs impliqués dans le phénomène de propagation. Ces grandeurs ayant un rôle important sur les mécanismes de propagation (Cuervo et al., 2014a) on reviendra sur ces caractéristiques dans la session « compréhension du phénomène physique de propagation » pour analyser plus en détail l'importance des mécanismes de la rupture dans la propagation des masses rocheuses.

La dangerosité de ces phénomènes est liée au volume très important de roche impliqué, notamment lorsque la zone de rupture est très étendue. A titre d'exemple, un éboulement unique peut comprendre un volume compris entre 100 à 100 000 m³, ce qui à l'échelle humaine, peut être comparé à une avalanche de blocs atteignant la taille d'un éléphant adulte.

L'évolution du phénomène va dépendre de phénomènes géologiques mais aussi géométriques. Par exemple, en fonction de la déclivité du terrain et de la rugosité de surface, la masse rocheuse peut être animée par des mouvements de translation, des tressautements, des roulements ou des glissements. En général, les blocs rocheux de grande taille ont une force destructrice énorme sur leurs tracés de chute et de propagation. Néanmoins, par rapport aux conséquences et au regard des vitesses élevées constatées, une chute de blocs de petite taille peut déjà être mortelle.

Lors d'un éboulement, les zones impactées peuvent être vastes et les répercussions importantes, que ce soit sur le site lui-même, les infrastructures ou les populations (amas de remblais importants, détériorations et modifications du terrain). Ils ont aussi des conséquences

économiques importantes : fermetures de voies routières ou ferrés dans des sites touristiques (Figure 1.8) ou industriels. La multiplicité des causes et le nombre insuffisant de sites analysés montre toute la complexité liée à la prévention de ces risques.



A. B.
Figure 1.8. A. Eboulement rocheux de 1200 m³ proche de la ville de Nice en janvier 2014. B. Impact d'un bloc rocheux sur un train touristique à Digne-les-Bains en février 2014. Sources Nicematin.fr et BFMTV

1.4.3. CATALOGUE HISTORIQUE D'ÉVÉNEMENTS REELS

Les premiers enregistrements avérés d'événements gravitaires rocheux datent du 18^{ème} siècle (Schoeneich et al., 2008). Il existe cependant un nombre important d'épisodes encore plus anciens, particulièrement dévastateurs, dont les impacts sociaux, démographiques et économiques ont rendu possible leur recensement. Tel est le cas du grand éboulement de Mont Granier situé dans les Alpes françaises où en 1248 la chute d'au moins 150 millions de mètres cube de roche calcaire a provoqué la mort d'environ 5 000 personnes et un changement radical de la morphologie du site. Des blocs de taille importante sont encore observables dans les zones à proximité du site. Certains d'entre eux sont couramment visités du fait de leur extraordinaire taille et impact dans le paysage. On donne sur la Figure 1.9 l'exemple de la roche dite « La pierre hachée » d'environ 1 000 m³.

D'autres cas anciens d'éboulement ont pu être répertoriés par analogie morphologique ou par des études spécifiques grâce aux récents développements technologiques. Les études et campagnes géophysiques, par exemple, permettent d'observer des cônes d'éboulis qui se sont formés le long d'anciens tracés d'éboulements (Banton, 2009b). La plupart des événements connus à ce jour correspondent donc à des événements relativement récents (datant des trois derniers siècles) voire très récents (dernier siècle). Le manque de moyens pour accéder à des topographies très escarpées ainsi que l'absence d'outils d'instrumentation dans les siècles passés, notamment avant la révolution industrielle, rendaient difficile l'accès en montagne et le suivi des masses rocheuses.



Figure 1.9. A. Mont Granier en fond d'image et au premier plan la roche dite « Pierre hachée » de 1000 m³ faisant partie du dépôt de l'éboulement. B. Zone affectée par l'éboulement estimée à 23 km² (Baron, 2007)

L'accroissement du nombre de cas répertoriés, consécutivement au développement économique et à l'amélioration des techniques d'observation, ont permis d'obtenir une quantité de données croissante. La *Figure 1.10* présente l'évolution du nombre de cas de chute de blocs et d'éboulements rocheux répertoriés en région alpine depuis l'année 100 après Jésus-Christ (Hantz, 2011). Le nombre important d'événements enregistrés après le 18^{ème} siècle s'explique par l'extraordinaire essor technologique et démographique lié à cette période dans les Alpes. Sur la *Figure 1.11*, on constate qu'environ 60% des mouvements gravitaires répertoriés en région alpine jusqu'en 2010 sont des phénomènes de chute de blocs et des éboulements rocheux, contre un faible nombre d'avalanches rocheuses de grand volume pour la période étudiée.

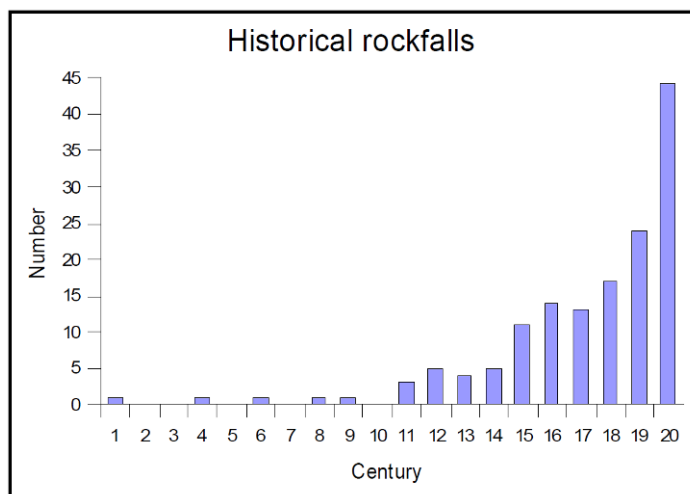


Figure 1.10. Nombre d'éboulements gravitaires répertoriés dans les régions alpines (Hantz, 2011)

L'intérêt de répertorier des événements passés est lié à la possibilité de mettre en œuvre dans ces régions des dispositifs de prévention face aux risques gravitaires rocheux, soit par analogie à la fréquence de ces événements (Amato et al., 2013), soit à partir de modèle numérique. Compte tenu de la complexité du phénomène et malgré des modèles de plus en plus sophistiqués,

l'expertise de terrain (qui peut seulement être obtenue par analogie et compréhension de cas déjà recensés) semble être le facteur clé.

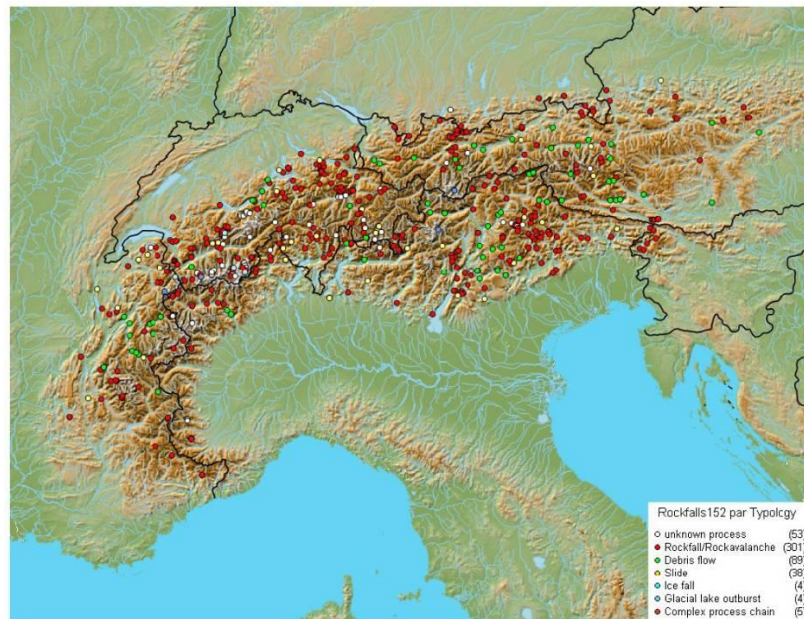


Figure 1.11. Nombre d'éboulements gravitaires répertoriés dans les régions alpines (Schoeneich et al., 2008)

Les inventaires d'événements gravitaires réels sont également une source importante d'informations qui permettent la compréhension des phénomènes tel que l'étude de la progression des instabilités dans les matériaux rocheux (Scholtès and Donzé, 2012). Enfin, ces inventaires sont aussi une source précieuse pour le repérage de nouvelles régions à risques.

Tous ces éléments conduisent à la réalisation de cartes de risques ou bien à la définition de critères servant d'aide au dimensionnement des ouvrages de protection.

1.4.4. BASE DE DONNEES

L'établissement d'une base de données fiable et bien documentée est souvent complexe compte tenu du nombre important d'informations qu'il faut recueillir, de la quantité importante de zones montagneuses concernées par les risques gravitaires, et du nombre élevé de cas répertoriés chaque année en France et à l'étranger. Plusieurs pays, y compris la France, ont opté pour le développement de bases de données sophistiquées permettant de répertorier ces phénomènes sur la base de critères spécifiques bien définis. La raison essentielle à cela est que cette procédure permet à long terme une meilleure compréhension et analyse de tous ces phénomènes (Hantz, 2011).

En France, il existe deux organismes publics majeurs pour cette gestion : le service RTM (Restauration des Terrains en Montagne) et le BRGM (Bureau de recherches géologiques et Minières). Le RTM, organisme public depuis 150 ans a à sa charge le développement et la mise à jour des inventaires des risques naturels, y compris les risques gravitaires rocheux, et la préparation ou formation des populations face aux risques majeurs. Le BRGM, à caractère public a été créé en 1959 pour comprendre et réduire les risques majeurs d'origine géologique. Ce dernier compte avec une importante bibliothèque de cartes géologiques et de cartes de risques qui sont en France couramment utilisées par les communes. Néanmoins, des études au cas par cas sont de plus en plus

nécessaires (à l'échelle d'une maison individuelle, par exemple) pour assurer la politique du risque zéro.

References	Site	Geological setting	Number of events	Time window	Sampled volumes (m ³)	Range of the power law fit (m ³)
Gardner, 1970	Alberta, Canada, natural cliffs	Calcareous and quartzitic rock	409	2 summer periods	10 ⁻⁶ -10	10 ⁻² -10
Our study, data from Jeannin (2001)	Upper Arly gorges, French Alps	Metamorphic and sedimentary rocks	59	22 years	5-10 ⁴	20-3000
Our study, data from RTM (1996)	Grenoble, French Alps	Calcareous cliffs	87	60 years	0.5-10 ⁶	50-10 ⁶
Our study, data from Wiczorek et al. (1992)	Yosemite Valley, California	Granitic cliffs	101	78 years	1-10 ⁶	50-10 ⁶
Dussauge et al. (2001)	World wide	Undifferentiated rock cliffs	142	10 000 years	10 ³ -2.10 ¹⁰	3.10 ⁷ -2.10 ¹⁰
Hungry et al. (1999)	British Columbia Canada Road cuts	Massive felsic rock	389 ^{b,1} 123 ^{b,2}	30 years 13 years	10 ⁻² -10 ⁸ 10 ⁻² -10 ⁸	10 ⁻² -10 ⁴ 1-10 ⁴
		Jointed metamorphic rock	64 ^{b,3} 122 ^{b,4}	- 22 years	10 ⁻² -10 ⁸ 10 ⁻² -10 ⁸	1-10 ⁴ 1-10 ⁴
Rousseau (1999)	Mahaval, La Réunion, French Island Instrumental measurements	Single natural basaltic cliff	370	2 months	V _{max} = 9.10 ^{6(c)}	1.5 order of magnitude

Tableau 1.1. Bases de données présentées par (Hantz 2011)

Compte tenu de la multitude de bases de données et la variété des données recensées, il serait difficile de toutes les présenter. Pour information, on notera l'existence de bases des données fondées sur des études bibliographiques ou des revues de presse comme celle proposée par Serge Tisseron et LHMEC (Histoire et mémoire des catastrophes) qui contiennent un grand nombre d'événements naturels survenus en France (Abbatucci, 2001). Pour aborder d'une façon plus générale les bases de données existantes relatives aux risques gravitaires rocheux, on présente dans le tableau 1.1 quelques exemples de bases de données développées par (Hantz, 2011) dans une perspective d'analyse des fréquences d'occurrence.

On verra néanmoins par la suite que ces bases de données ne sont généralement pas suffisamment complètes pour permettre une bonne calibration des modèles, et ce, par un manque d'informations pertinentes et précises. Cela explique également pourquoi, les phénomènes induits par l'homme, en laboratoire ou sur terrain naturel (dans des conditions particulières) ou particulièrement bien répertoriés (c'est l'idéal) sont les seuls à pouvoir être utilisés aisément pour la validation des outils numériques.

1.4.5. DEMARCHE D'ANALYSE DE RISQUES GRAVITAIRES ROCHEUX

1.4.5.1. Compréhension du phénomène physique de propagation

Avant d'aborder les différentes méthodes qui ont été proposées pour analyser la dynamique des masses rocheuses en mouvement, il est très important de comprendre d'abord ce qui se passe quand un tel phénomène a lieu et ce que l'on cherche à simuler. On remarquera que les modèles existants, de même que celui qui est proposé dans le cadre de cette thèse, utilisent un certain

nombre d'hypothèses qui cherchent à simplifier le problème en fonction des besoins (en restant le plus réaliste possible) ou à faire face aux limites et contraintes (numériques ou naturelles) qui peuvent subsister.

On peut décomposer le phénomène d'éboulement rocheux en trois phases principales (*Figure 1.12*) :

- Phase 1 : déclanchement. D'un point de vue physique, un éboulement rocheux a lieu principalement lorsqu'une masse rocheuse se désolidarise d'un pan de falaise. Ce détachement résulte de mécanismes complexes liés à la mécanique des matériaux mais surtout à la mécanique de la rupture des discontinuités qui définiront la forme, la taille et le volume des blocs impliqués dans le phénomène de propagation. Certains événements, comme celui du mont Néron à Grenoble (Bottelin et al., 2014) sont évolutifs, c'est-à-dire qu'après un premier événement, il subsiste des zones instables qui représentent encore un risque potentiel d'effondrement. Le suivi de ces massifs et de leur état de fracturation avant et après chaque évènement est très important dans la prévention et la compréhension des éboulements rocheux.
- Phase 2 : propagation. Cette phase correspond au comportement dynamique des blocs rocheux entre la phase de décrochement et jusqu'à ce que la masse ou les blocs rocheux s'arrêtent définitivement. Divers modes d'interactions surviennent pendant la phase de mouvement :
 - o Des interactions entre la masse rocheuse et le substratum que l'on appelle couramment dans la littérature interaction bloc-sol (Nicot and Lambert, 2011),
 - o Des interactions inter-granulaires au sein de la masse rocheuse,
 - o Des interactions entre la masse rocheuse et la végétation en place,
 - o Des interactions entre la masse rocheuse et les ouvrages de protection ou les infrastructures,
 - o Des interactions en phase de vol avec le vent ou la pluie.

Ces interactions se font par une combinaison de phénomènes divers que l'on peut résumer principalement en impact, frottement et roulement (*Figure 1.13*). Vu la nature très complexe de ces interactions, des phénomènes tels que la fracturation des blocs rocheux en phase de propagation, des interpénétrations dans le sol avec plastification du matériau ou de la dissipation d'énergie lors des chocs peuvent avoir lieu. Tous ces phénomènes sont fortement influencés par la géométrie du versant rocheux ou la présence d'eau, par exemple.

Eboulement rocheux de Termento, Italie

21-01-2014

Phase 1 : Instabilité d'une masse rocheuse (description du mécanisme de rupture, volume, et forme des blocs).



Phase 2 : Phase de propagation et arrêt de la masse. Interaction de la masse rocheuse avec l'environnement :

- Géométrie du versant de propagation,
- Matériau au sol,
- Végétation,
- Ouvrages de protection,
- Interaction en phase de vol.



Phase 3 : Quantification du risque.

Figure 1.12. Description d'un phénomène d'éboulement rocheux. Cas de l'éboulement de Termento en Italie le 21-01-2014. Photos tirées de la vidéo de la compagnie Drones Tareom



Figure 1.13. Description des mécanismes de propagation (Basson, 2012)

L'arrêt s'établit de deux façons différentes : arrêt naturel quand l'énergie cinétique emmagasinée lors de la chute est complètement dissipée par les interactions lors de la propagation, ou arrêt induit par la présence d'ouvrages de protection ou par l'interaction avec des infrastructures à proximité (enjeux). La zone d'arrêt est un paramètre très important couramment utilisé pour l'établissement des cartes de risques dans le contexte français des PPR. Dans toute perspective d'analyse de la propagation, les points d'arrêt restent le principal paramètre à déterminer

- *Phase 3 : quantification du risque.* Il s'agit d'une étape importante pour les élus (maires, conseillers généraux, etc.) et les partenaires privés, qui consiste à définir les limites géographiques sûres (en fonction d'un risque acceptable) pour le développement d'une activité économique ou démographique en région de montagne.

1.4.5.1.1. Phase 1 : « instabilité des masses rocheuses » : introduction au phénomène de rupture des massifs rocheux

Le point de départ d'un risque gravitaire est lié à une masse rocheuse potentiellement instable qui perd toute adhérence avec un pan rocheux consécutivement à un élément/phénomène déclencheur appelée ci-dessous « source ». Dans une démarche d'évaluation des risques, on cherchera à déterminer comment et qu'elle masse est susceptible de se détacher. Les principales sources d'instabilité à l'origine de la destruction du massif rocheux sont :

- Gravitaire : poids propre,
- Sismique : aléa sismique ou mécanique (vibrations d'engins mécaniques),
- Météorologique : pluies torrentielles, action gel/dégel (contraintes de traction –au sein de la roche suite au gel/dégel de l'eau qui se trouve à l'intérieur du massif rocheux), et des cycles de périodes sèches humides qui induisent dilatation et/ou contraction. Il ne faut pas oublier que la roche peut être un matériau fortement altérable et sensible aux cycles climatiques et à l'érosion ce qui potentialise leur détachement de la montagne,

- Animale : passage d'animaux,
- Humaine : altération de l'état naturel, de la géométrie, de l'humidité, du niveau de sollicitation mécanique.
- Le résultat principal de ses actions est :
- La déstructuration du massif rocheux et la perte totale de la stabilité.

Pour les falaises rocheuses, il est bien connu que la déstructuration et la fracturation s'opère suivant des familles de faiblesses mécaniques, appelées diaclases et failles lorsqu'un déplacement apparent est observé (Lambert and Nicot, 2011). Dans les roches sédimentaires, ces surfaces se rencontrent préférentiellement dans des zones de stratigraphie où l'adhérence, à cause du changement de sédimentation, est moins développée que celle rencontrée dans le reste de la roche. Dans les roches magmatiques, l'identification de telles surfaces de discontinuité nécessitent souvent une analyse plus fine de la matrice rocheuse pour leur identification.

Ces surfaces de discontinuités peuvent subdiviser la roche en une série des blocs anguleux qui sont reliés entre eux par la nature cohésive de leurs discontinuités. Dans un nombre important de cas, ces surfaces définissent la taille et la forme caractéristiques des blocs concernés dans une phase de propagation. Néanmoins, des phénomènes de fracturation au cours de la propagation peuvent également avoir lieu spécialement aux premiers moments du phénomène (fortes énergies d'impacts) et dans le cas de très grandes distances de propagation où les blocs peuvent s'arrondir de la même façon que les pierres s'arrondissent dans une rivière par effet de l'interaction multi-blocs et avec le substratum.

Des phénomènes tels que l'infiltration d'eau superficielle ont également préférentiellement lieu dans les surfaces de discontinuités compte tenu de la nature imperméable de la matrice rocheuse. Ce phénomène peut avoir deux conséquences directes : l'altération puis le remplissage des discontinuités par des matériaux érodés pouvant fortement influencer le phénomène de rupture, de dégradation et de progression des discontinuités.

L'analyse de l'instabilité de la masse rocheuse doit par conséquent susciter plusieurs questions très importantes :

- *Comment va s'initier le mouvement de la masse rocheuse ?*

L'état de fracturation du massif doit permettre d'identifier les mécanismes de rupture et les mouvements associés ou espérés.

- *Quelle zone va être impactée ?*

L'état de fracturation du massif doit permettre d'identifier les limites physiques de la zone instable, d'en estimer le volume, la position ainsi que la forme, la taille et le volume des sous-blocs caractéristiques, comme résultat des différentes familles de rupture présentes dans le massif rocheux.

L'analyse de l'instabilité doit également donner des indices sur le type de matériau concerné, de son état de dégradation et de décohesion. Ce travail étant principalement consacré à la quantification de la phase de propagation, on ne s'intéressera pas ici aux mécanismes ayant donné lieu à l'instabilité, car dans notre cas, il est assumé que le phénomène d'éboulement a été déjà

déclenché ce qui revient à dire que le facteur de sécurité (vis-à-vis de la stabilité) est inférieur à 1. Néanmoins, et au vu de l'importance de ces phénomènes dans la dynamique des blocs rocheux lors d'un éboulement, des compléments sont donnés en Annexe B portant sur : les mécanismes de stabilité des massifs rocheux, les données qu'il faut recueillir sur le terrain en vue d'une étude de propagation, le vocabulaire couramment utilisée dans ce domaine.

Projection stéréographique des surfaces de discontinuités et relation avec le phénomène de propagation de masses rocheuses

Pour représenter les plans et surfaces de discontinuités, des projections de type stéréographiques sont utilisées. Une projection stéréographique établit une correspondance entre les points d'une demi-sphère et son plan équatorial. Etant une démarche qui ne rentre pas dans le cadre d'étude de la propagation de masses rocheuses, on se limitera à préciser son intérêt pour la compréhension des mécanismes de décrochement et de propagation des masses rocheuses. Une explication très complète sur cette procédure est donnée par (Gill et al., 2002). La *Figure 1.14* présente les mécanismes de rupture les plus courants de la littérature ainsi que les projections stéréographiques associées. On y observe la projection du plan du talus (traits noirs) et l'enveloppe des pôles de fractures (vecteurs normaux aux plans de fracture - régions en gris). En fonction de la position de cette enveloppe par rapport à la droite qui représente le plan du talus, il est possible d'en déduire la masse totale de l'instabilité, le mécanisme de rupture développé et les familles de discontinuités critiques.

En présence d'un massif très fracturé, il est parfois nécessaire de recourir à des simplifications tant le problème peut s'avérer complexe (Thoeni et al., 2014) (*Figure 1.17*). Des logiciels très puissants tels que SIROVISION (Haneberg, 2008) sont capables de construire des modèles tridimensionnels de falaise et d'en déduire les familles de discontinuités à partir d'une collection d'images. D'autres caractéristiques géométriques peuvent également être identifiées par ce logiciel, ce qui le catalogue comme un des logiciels les plus puissants dans l'analyse de la stabilité des massifs rocheux, notamment dans le secteur minier où plusieurs applications ont déjà été traitées.

Les mécanismes présentés sur la *Figure 1.14* sont possibles lorsque l'instabilité se produit sur des discontinuités persistantes dans l'espace. Dans le cas où les discontinuités ne sont pas persistantes (présences de ponts rocheux) (Bonilla-Sierra, 2013), des comportements très complexes peuvent être observés, rendant le phénomène encore plus difficile à analyser avec les méthodes dites « classiques ». Dans ce cas, le recours à des modèles numériques est nécessaire, que ce soit par des approches continues (Shen and Karakus, 2014) (*Figure 1.15*) que par des méthodes discrètes (Scholtès and Donzé, 2012) (*Figure 1.16*).

De façon générale, l'analyse du comportement à la rupture par des méthodes analytiques reste très complexe (même si plusieurs modèles semblent être développés) compte tenu du grand nombre de variables et de la complexité des géométries rencontrées. Les méthodes numériques développées par Itasca (FLAC3D et UDEC) sont couramment utilisées dans les milieux professionnels et scientifiques pour l'analyse des phénomènes de stabilité de masses rocheuses. L'utilisation des modèles discrets, comme YADE (Šmilauer et al., 2011) et DEMbox par exemple, est moins fréquente mais en plein développement (Thoeni et al., 2013; Cuervo et al., 2014a) compte tenu de leur très bonne capacité à restituer indirectement des mécanismes complexes comme la fracturation et la rupture dans les massifs rocheux et à prendre en compte les géométries complexes des blocs mis en mouvement.

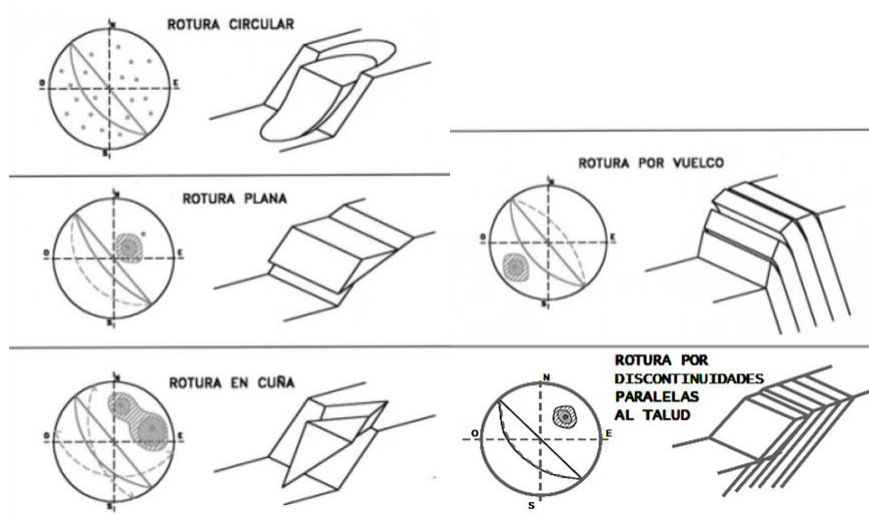


Figure 1.14. Mécanismes de rupture courants et projections stratigraphiques associées (Monge and Oyanguren, 2004)

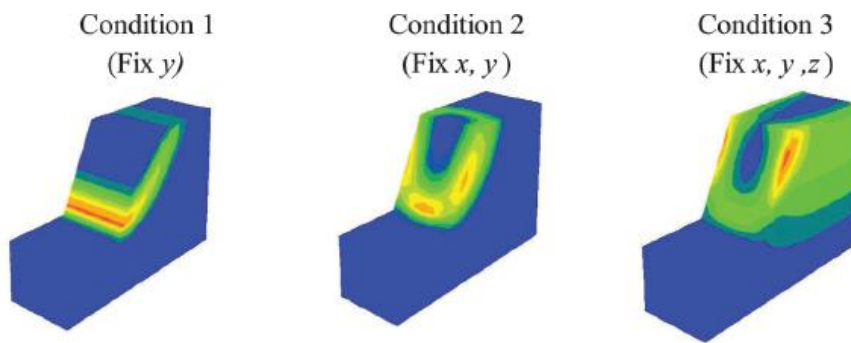


Figure 1.15. Identification des surfaces de rupture sous différentes conditions de chargement en utilisant un modèle numérique continu (Shen and Karakus, 2014)

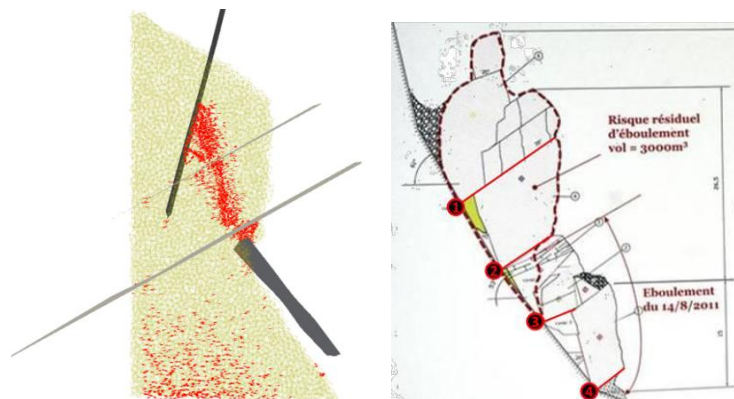


Figure 1.16. Vue latérale du volume instable déduit d'un calcul discret en présence de discontinuités non persistantes (Bonilla-Sierra, 2013)

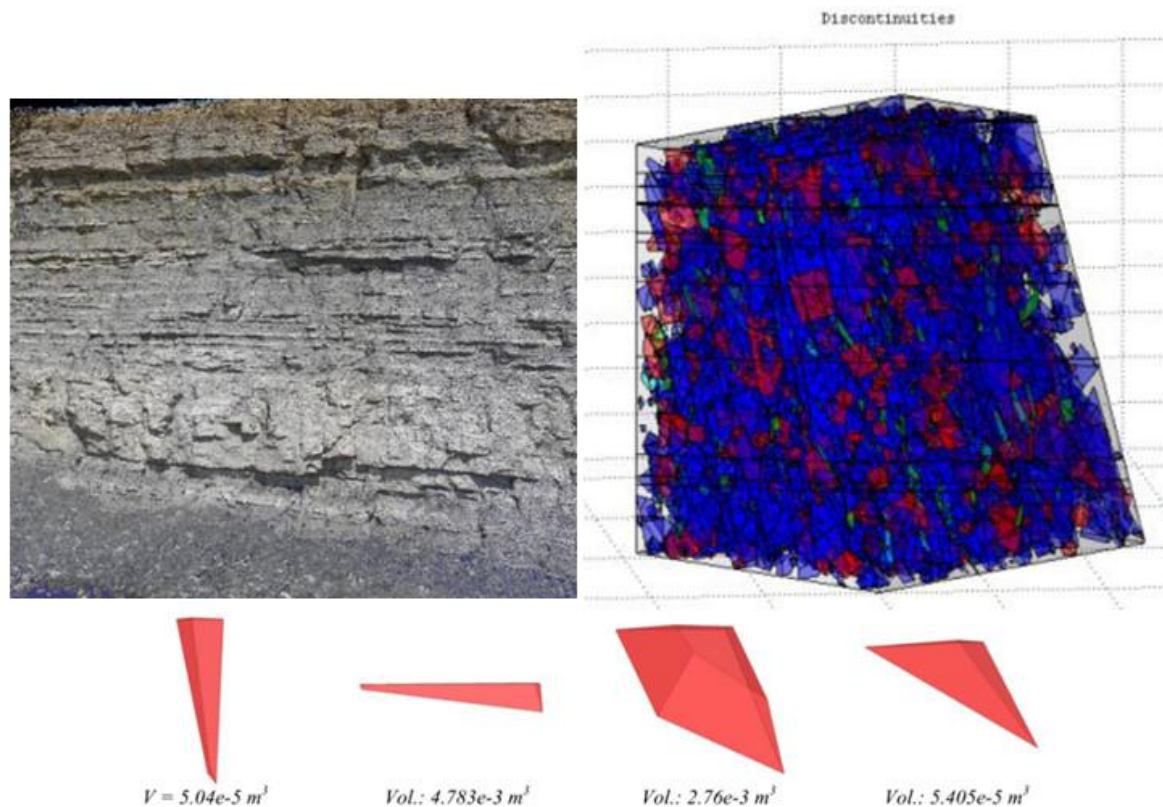


Figure 1.17. Famille de discontinuités dans un massif rocheux très fracturé et estimation stochastique des tailles et formes caractéristiques des blocs issus du système fracturé (Thoeni et al., 2014)

1.4.5.1.2. Phase 2 : propagation et comportement dynamique des blocs rocheux

La compréhension du phénomène de propagation est une question qui a intéressé les milieux scientifiques et industriels particulièrement après le XX^{ème} siècle consécutivement au nombre croissant d'éboulements rocheux qui ont eu lieu suite au développement démographique des villes et à l'essor industriel (notamment le développement de l'industrie automobile qui a eu pour conséquence la construction d'autoroutes et d'infrastructures en montagne). Les premières méthodologies mises en place ont été évidemment de type empirique.

Avec le développement des outils informatiques de grande capacité, notamment l'ordinateur, les modèles numériques ont commencé à se développer. Les modèles les plus simples consistent à modéliser la trajectoire d'un seul bloc rocheux. Ces méthodes, dites « trajectographiques » sont les plus anciennes et les plus couramment utilisées dans l'ingénierie actuelle compte tenu de leur simplicité et du nombre peu important de paramètres qu'elles impliquent. Malgré des hypothèses très fortes, leur bonne adéquation avec des cas réels ou expérimentaux, font de ces modèles des outils très pratiques. Avec les progrès numériques et la possibilité d'analyser des comportements de plus en plus complexes, des méthodes dites « continues » et « discrètes » ont été proposées notamment pour l'analyse des éboulements de volume intermédiaire mais aussi pour de grand volume.

L'objectif de cette section est de présenter les concepts généraux et l'évolution de chacune de ces méthodes pour comprendre comment le phénomène de propagation a été vu par les acteurs scientifiques et industriels au cours de ces dernières années. Après trois années de travail approfondi sur cette thématique, l'auteur de cette thèse considère que les modèles numériques

actuels sont complémentaires et que leur fondement est indissociable des méthodes les plus anciennes. Aujourd'hui, on compte avec des outils informatiques très performants, qui permettent le développement de modèles numériques. On montrera par la suite que le grand nombre de modèles et de méthodes développés est un indice évident de la complexité de ce phénomène pour lequel des comportements à priori « simples » comme l'interaction sol-roche restent encore des phénomènes peu connus et qui motivent toujours le développement de projets de recherche (Zhang, 2015).

Dans le cadre de cette thèse nous avons développé un modèle numérique innovant qui nous a permis de comprendre des phénomènes très complexes tels que :

- Interactions entre les blocs au cours de la propagation,
- Interaction des blocs avec des ouvrages de protection,
- Phénomènes de dissipation d'énergie à l'échelle des blocs,
- Sensibilité de plusieurs aspects géométriques et rhéologiques dans la propagation des éboulements.

Cette section doit enfin permettre au lecteur de comprendre le travail présenté dans les chapitres suivants et de se familiariser avec les concepts de la modélisation numérique des éboulements rocheux et des chutes de blocs.

1.4.5.1.3. Etudes expérimentales sur la propagation de masse et de blocs rocheux isolés

Les études expérimentales de propagation sont très importantes, non seulement pour comprendre la physique du phénomène, mais aussi pour accroître la pertinence des outils numériques. Néanmoins, il existe un grand nombre de phénomènes physiques qui sont difficilement identifiables par les expérimentations comme celui, par exemple, de la dissipation d'énergie, d'où l'intérêt de compter avec des outils numériques validés dans des conditions bien maîtrisées.

Dans la modélisation des éboulements en masse, les modèles s'appuient sur des jeux de paramètres qui sont obtenus le plus souvent par rétro analyses d'événements ayant eu lieu (Pirulli & Mangeney 2007; Sosio et al. 2012; Cuervo et al. 2014), ou par comparaison avec des traces physiques d'anciens éboulements (Paronuzzi, 2008). Bien qu'utiles, les événements passés ne peuvent être utilisés que dans une perspective de comparaison « physique » (vis-à-vis du dépôt) pour lesquels les mécanismes liées à la dynamique sont inconnus.

Les expérimentations en laboratoire ont été couramment utilisées pour comprendre les mécanismes de propagation ; les plus récents étant ceux réalisés par (Manzella et al., 2008; Labiouse and Heidenreich, 2009; Bourrier, 2008; Asteriou et al., 2012; Okura et al., 2000). On peut noter que ces données ont été déjà utilisées dans le cadre de validation de plusieurs modèles numériques avec des résultats remarquables, par exemple, (Manzella, 2011; Mollon et al., 2012). Cependant, l'expérience montre que le comportement à l'échelle du terrain reste plus complexe que le phénomène couramment représenté en laboratoire, d'où la nécessité de collecter plus de données expérimentales sur site.

A ce jour, il existe des expérimentations sur sites réels (Giacomini et al., 2012; Spadari et al., 2012, 2013; Fityus et al., 2013) visant notamment à démontrer l'effet de la forme des blocs sur la propagation et les mécanismes d'interaction avec la forêt. Certains auteurs comme Duncan D. Willie (Wyllie and Mah, 2014) ont proposé de mettre à disposition leurs bases de données expérimentales sur site réel pour faciliter le calage des modèles numériques. Enfin, on peut espérer que les travaux en cours et à venir (expérimentations sur site menées par le laboratoire IRSTEA sur le site de Vaujany, en France (France3-Alpes, 2014) et les perspectives d'expérimentations dans le cadre du futur projet national C2ROP - Chutes de blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection) fourniront des bases des données de dernière génération comportant en plus des informations traditionnelles des informations complémentaire telles que les vitesses de rotation, la fracturation en cours de propagation et l'interaction avec la végétation.

1.4.5.1.4. Méthodes semi-analytiques pour l'analyse de la propagation

Les modèles empiriques utilisés pour prédire la distance de propagation des mouvements gravitaires rocheux, établissent une relation entre les caractéristiques topographiques moyennes du versant et la position finale du dépôt rocheux. En général, la position des blocs les plus éloignés est prise en considération dans le calcul car ces derniers représentent un risque plus élevé sur un enjeu (Bourrier, 2008).

Heim a été le premier à caractériser la trajectoire d'un événement gravitaire rocheux à partir d'une relation géométrique entre le centre de gravité initial de la masse rocheuse (avant déclenchement) et la position du bloc le plus éloigné (après le phénomène de propagation) (Heim, 1932) (*Figure 1.18*). Suivant le caractère bi ou tridimensionnel à partir duquel est analysé le phénomène, Heim propose deux approches pour quantifier cette relation :

- Un angle de propagation β_f classiquement appelé « Fahrböschung » (ou Travel angle dans le contexte anglophone) dont la tangente est égale au rapport $(\Delta Z_1)/L_2$, où ΔZ_1 est la différence de hauteur entre la position du centre de masse et celle du point le plus éloigné, et L_2 la longueur développée de la projection horizontale du chemin de propagation (*Figure 1.18B*),
- Un angle géométrique β_g (ou Geometric angle dans le contexte anglophone) dont la tangente est égale à $(\Delta Z_1)/L_1$, avec L_1 la projection horizontale en ligne droite du chemin de propagation.

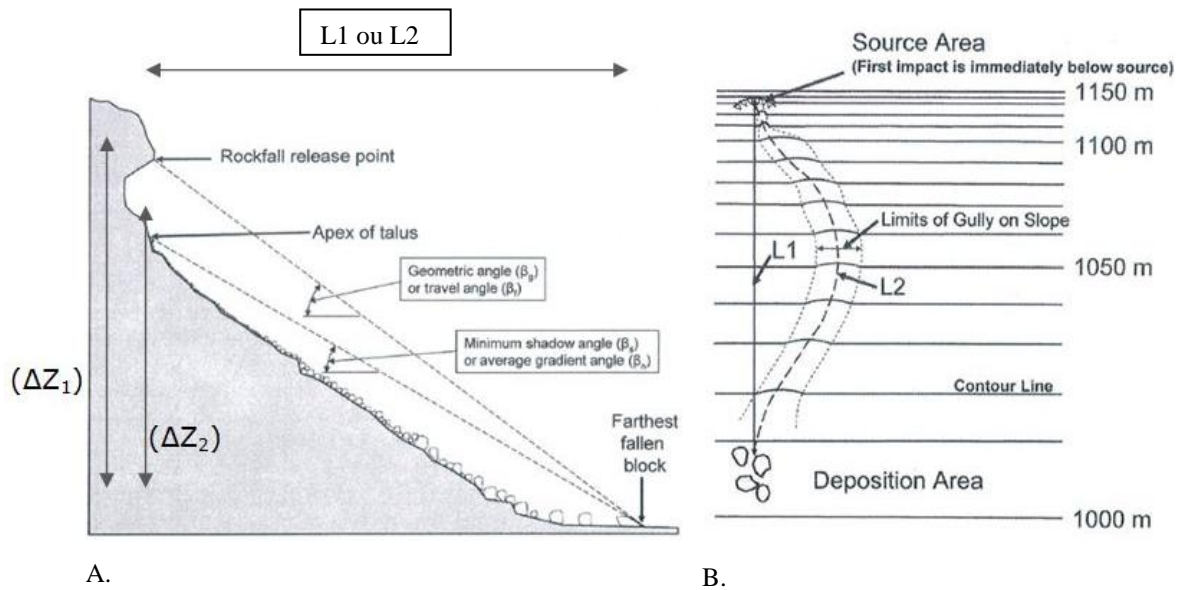


Figure 1.18. A. Représentation dans l'espace des différents angles de propagation. B. Définition de la projection horizontale développée du chemin de propagation (L_2) et projection horizontale en ligne droite du chemin de propagation (L_1). Modifié de (Petje, 2005)

La distance L_2 est dans tous les cas plus grande que la distance L_1 , l'angle β_f sera donc toujours plus petit que β_g .

D'autres auteurs ont proposé de définir ces angles, non plus à partir du centre de masse du volume de roche initial mais à partir de la position du premier impact entre la masse rocheuse et le versant de propagation, sur l'argument que la plupart de l'énergie cinétique obtenue dans la phase de chute libre est dissipée au moment du premier impact avec le versant. De façon analogique aux relations proposées par Heim, deux nouvelles relations ont été obtenues, cette fois-ci en négligeant la hauteur de chute libre :

- Angle de pente moyenne β_s (ou AVERAGE gradient angle dans le contexte anglophone) dont la tangente est définie par le rapport $\Delta Z_2/L_2$, où ΔZ_2 est la différence de hauteur entre la position du premier impact et celle du bloc le plus éloigné,
- Angle géométrique minimum β_n (ou minimum shadow angle dans le contexte anglophone) dont la tangente est définie par le rapport $\Delta Z_2/L_1$.

Les analyses menées jusqu'à aujourd'hui ont montré que les valeurs de ces angles sont généralement comprises entre 22° et 30° quel que soit le point sommital retenu pour leur définition. Pour les avalanches, cet angle peut être inférieur, de l'ordre de 10° (Schoeneich et al., 2006). Les variations importantes obtenues sont fonction des sites étudiés, du nombre de blocs considérés et du volume des blocs (Bourrier, 2008). De cette façon, et par analogie avec d'autres cas déjà répertoriés, il est possible d'estimer très approximativement la position finale d'une masse potentiellement instable et de proposer des mesures de prévention voire de protection d'une façon très simple.

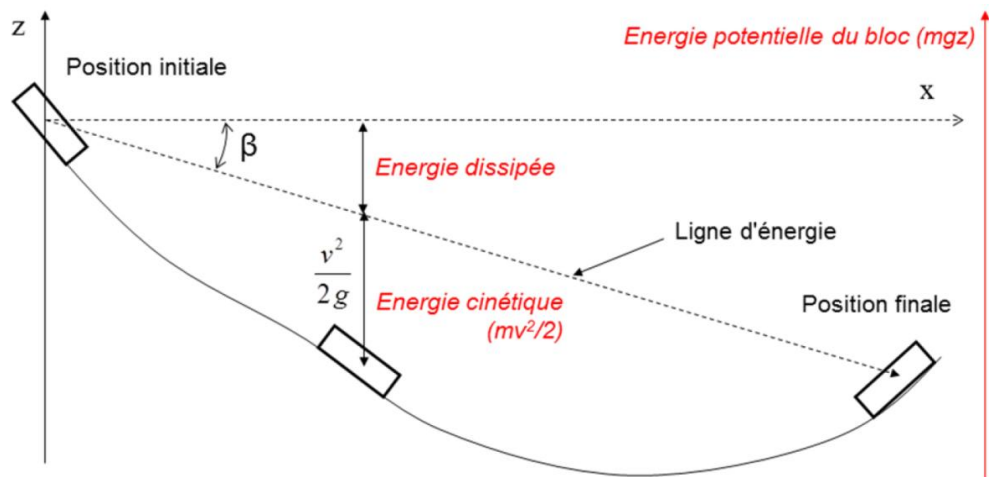


Figure 1.19. Notion de ligne d'énergie, illustrée ici dans le cas d'un glissement. β : angle d'énergie (égal au Fahrböschung), V : vitesse du bloc, m : masse et g : la gravité. Axe des ordonnées à gauche : altitude. Axe des ordonnées à droite : énergie potentielle (Hantz and ROSSETTI, 2014)

Concernant la dynamique de propagation, le mouvement des blocs implique des phénomènes de rebonds, de roulement et de glissement avant l'arrêt. La complexité à décrire mathématiquement ce phénomène a suscité le développement de modèles empiriques où le mouvement et la perte d'énergie moyenne sont assimilés à un glissement pur sur une surface rugueuse. L'interaction entre la roche et la surface de propagation est caractérisée par un angle de frottement dynamique (β) similaire à l'angle de propagation « Fahrböschung » défini par Heim (Figure 1.19). L'appellation « ligne d'énergie » pour la droite proposée par Heim est courante dans ce type d'approche (Jaboyedoff and Labiouse, 2011).

1.4.5.1.5. Méthodes numériques pour l'analyse de la propagation

D'après la classification proposée par Rochet en 1987 (Keaton, 2012) et reprise dernièrement par Bourrier et al. 2013, le phénomène de propagation va dépendre fortement du volume et du nombre d'éléments rocheux impliqués dans l'événement. D'un point de vue expérimental, il est évident que la propagation d'un bloc isolé, qui n'interagit qu'avec le sol, peut difficilement être comparée à celle d'une masse rocheuse où plusieurs particules interagissent entre elle et avec le sol.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons tout d'abord aux modèles trajectographiques de type « blocs isolés » puis aux modèles numériques continus et discrets qui permettent d'appréhender et de considérer le comportement d'une masse granulaire en mouvement. Une particularité des modèles trajectographiques est qu'ils sont fondés non pas sur une base de calcul déterministe mais sur une analyse de type probabiliste où certains paramètres sont définis aléatoirement pour rendre compte d'une certaine variabilité du phénomène. Les modèles numériques continus ou discrets, permettant d'introduire de la complexité dans la forme des blocs ou dans la géométrie du problème, sont beaucoup plus robustes d'un point de vue numérique que les méthodes de type « bloc isolé », ce qui permet bien souvent de restreindre l'étude à un calcul de type déterministe.

1.4.5.1.6. Modélisation de la propagation de blocs rocheux isolés – trajectographie

D'un point de vue de la physique de la propagation des blocs isolés, il existe d'après (Volkwein et al., 2011) trois familles de modélisation:

- Les modèles qui assimilent le bloc à un point matériel (couramment appelées « Lumped mass » dans le contexte anglophone),
- Les modèles qui considèrent le bloc comme un corps rigide en mouvement,
- Les modèles « hybrides » qui utilisent le concept de point matériel pour la phase de vol et de la mécanique des corps rigides pour l'interaction bloc-sol.

Différents auteurs considèrent que la propagation d'un bloc rocheux peut être assimilée à une suite de rebonds pendant toute la durée de l'événement. En effet, des mouvements par roulement pur sur des distances importantes ont rarement été observés sur site réel (Volkwein et al., 2011). Le mouvement par glissement est aussi peu fréquent mais a été observé notamment lorsque les vitesses sont petites (pendant les premières secondes ou à la fin du phénomène de propagation) ou dans des conditions très particulières où le bloc rocheux s'enfonce fortement dans le sol (Volkwein et al., 2011). Ce phénomène d'enfoncement est très peu détaillé dans la littérature car son analyse nécessite une étude approfondie de la mécanique de l'impact où les phénomènes de plastification du sol doivent être considérés. Les travaux les plus récents sur ce sujet sont menés au laboratoire IRSTEA de Grenoble (Zhang, 2015). Dans ce cadre, on peut également citer le modèle trajectographique RAMMS qui a été développé en vue d'intégrer ce comportement dans l'analyse de la propagation en prenant en compte un glissement au niveau de l'impact pour simuler les phénomènes locaux liés à l'interpénétration (Figure 1.20).

La plupart des modèles de type « bloc isolé » sont basés sur l'analyse des rebonds successifs d'un élément (point ou solide) en interaction avec un terrain naturel (en 2D ou en 3D). L'énergie du système est donc dissipée à chaque contact par le biais d'un coefficient de rebond appelé également coefficient de restitution.

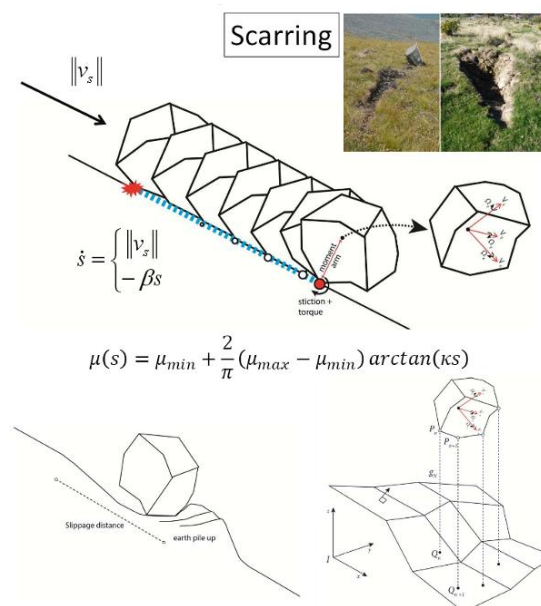


Figure 1.20. Représentation de l'impact dans le code trajectographique RAMMS (Leine et al., 2013)

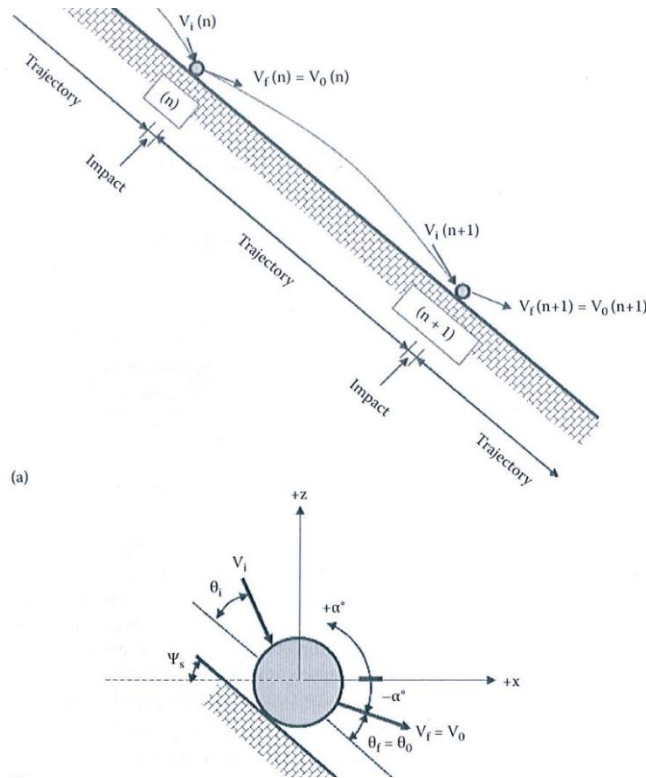


Figure 1.21. Représentation schématique du rebond d'un bloc rocheux (Wyllie and Mah, 2014)

Très peu de modèles trajectographiques prennent en compte des phénomènes de roulement ou de glissement. Les plus récents sont présentés dans les ouvrages suivants (Nicot and Lambert, 2011; Wyllie and Mah, 2014; Keaton, 2012; Volkwein et al., 2011).

On appelle rebond le phénomène correspondant au changement de direction d'un objet en mouvement quand celui-ci rencontre un obstacle. On distingue deux phases caractéristiques : le vol et l'impact (*Figure 1.21*).

La trajectoire en phase de vol d'un bloc rocheux est décrite par un mouvement balistique. Lors de l'impact avec le sol, le mouvement du bloc rocheux est contraint par la géométrie de l'impact (incidence) et par un terme dissipatif qui décrit d'une façon très grossière toute la mécanique de l'impact (voir section Coefficient de restitution).

1.4.5.1.7. Description du mouvement dans la phase de vol libre

Le mouvement en vol libre d'un bloc rocheux (*Figure 1.21*) consiste en un mouvement uniforme dans les directions « X » et « Y » et à un mouvement accéléré (par effet de la gravité) dans la direction verticale « Z ». Ce comportement peut être facilement décrit par les équations classiques de la mécanique du mouvement [équations 3-4] par intégration de l'équation [2]:

$$\vec{a} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad [2]$$

$$x = V_{x_0} \times t + x_0 \quad [3]$$

$$y = V_{y0} \times t + y_0 \quad [4]$$

$$z = \frac{g \times t^2}{2} + V_{z0} \times t + z_0 \quad [5]$$

Pour les modèles de type « point matériel » aucune considération n'est faite sur la physique de rotation qui est totalement négligée.

Pour les méthodes de type « corps rigide », le mouvement comporte une composante rotationnelle (vitesse de rotation constante lors du vol libre lorsque l'on fait abstraction des forces de frottement avec l'air). Le plus souvent, des géométries simples dont les caractéristiques inertielles de rotation peuvent facilement être déduites sont utilisées. On trouve généralement des formes telles que les sphères, les parallélépipèdes et les cylindres (Keaton, 2012).

1.4.5.1.8. Modélisation de l'impact : coefficients de restitution

D'après la littérature, la notion physique du coefficient de restitution est largement acceptée si l'on se réfère aux nombreuses applications traitées et au grand nombre de tests réalisés sur site réel et en laboratoire (Spadari et al., 2012). Dans toute analyse de la propagation de masses rocheuses à caractère granulaire, parler d'un coefficient de restitution est devenu presque naturel d'où l'intérêt de le considérer dans toute démarche de modélisation. Cette section vise à définir ce paramètre et à faire un bilan sur les différentes valeurs rencontrées dans la littérature en fonction de la nature de sol.

De façon générale, le coefficient de restitution est la manière la plus simple de mettre en rapport les vitesses relatives après et avant un impact. Pour certains, ce paramètre est défini comme la rapport entre l'énergie cinétique avant et après le choc avec prise en compte (ou pas) de l'énergie cinétique de rotation des blocs (Volkwein et al., 2011). La plupart des modèles trajectographiques distinguent deux paramètres de restitution : l'un, défini dans la direction normale (R_n) et l'autre dans la direction tangentielle (R_t) à l'impact et ce en fonction des composantes normales (V_n) et tangentielles (V_t) de la vitesse après (+) et avant (-) impact [équations 6].

$$R_n = -\frac{v_n^+}{v_n^-} \quad \text{et} \quad R_t = -\frac{v_t^+}{v_t^-} \quad [6]$$

On peut également définir le coefficient normal de restitution en fonction des hauteurs maximales avant (h_d) et après rebond (h_r) (Jaboyedoff and Labiouse, 2011) [équation 7]. C'est une approche intéressante car dans la pratique de l'ingénieur et pour le dimensionnement d'ouvrages de protection, la hauteur du rebond est un paramètre clé.

$$R = \sqrt{\frac{h_r}{h_d}} \quad [7]$$

D'autres auteurs (Jaboyedoff and Labiouse, 2011), définissent un seul coefficient de restitution comme le rapport de l'énergie cinétique totale avant impact (fonction des vitesses de translation normales et tangentielles et des vitesses de rotation) et l'énergie cinétique totale restituée après impact [équation 8].

$$R_{TE} = -\frac{E_{tot}^+}{E_{tot}^-} = \frac{m[(V_n^+)^2 + (V_t^+)^2] + I(\omega^+)^2}{m[(V_n^-)^2 + (V_t^-)^2] + I(\omega^-)^2} \quad [8]$$

Dans la majorité des cas, le coefficient de restitution est, pour un même sol, supposé constant tandis qu'il ne l'est pas. En effet, le coefficient de restitution peut être influencé par les conditions d'impact (vitesse, angle d'incidence, rapport entre la taille du bloc et l'épaisseur de couche, etc.) (Labiouse and Heidenreich, 2009; Bourrier, 2008). De nombreux auteurs ont tenté de regrouper les différentes valeurs des coefficients de restitution à partir de la définition de familles représentatives de sol (Labiouse and Heidenreich, 2009; Heidenreich, 2004). La grande variabilité observée pour la définition de ce paramètre pour un même sol permet d'en déduire que sa caractérisation est fortement tributaire de la façon dont il est mesuré. Un tableau récapitulatif des différents coefficients de restitution proposés dans la littérature suite à des essais en laboratoire, ou suite à des essais sur terrain naturel, est présenté en Annexe B. Des valeurs à priori irréalistes (supérieures à l'unité) sont même recensées (Asteriou et al., 2012; Spadari et al., 2012). En fait, dans ce dernier cas, la rotation des blocs n'est pas considérée, et des valeurs supérieures à l'unité traduisent le fait qu'une partie de l'énergie de rotation est transformée en énergie de translation après l'impact.

D'après les différentes études menées sur ce sujet, il apparaît que l'énergie engendrée par un mouvement rocheux soit majoritairement dissipée lors de l'interaction bloc-sol même si des interactions plus complexes ont lieu (dissipation inter granulaire ou par interaction avec la forêt, etc.). Ceci ne veut pas dire que ces dernières ne sont pas importantes dans le mécanisme de propagation puisque, comme observé in situ, il suffit d'une petite variation dans les conditions de l'impact pour que la trajectoire d'un bloc soit fortement déviée (Spadari et al., 2012).

A titre indicatif, nous présentons dans le Tableau 1.2, les valeurs moyennes des coefficients de restitution proposées dans la littérature pour les substratums rigides et les sols meubles. Ses valeurs serviront de référence dans la modélisation numérique pour définir les paramètres de la modélisation. On conclut de ces valeurs que, comme attendu, les sols meubles sont plus dissipatifs que les substratums rigides et que la restitution normale semble prépondérante par rapport à la restitution tangentielle. Pour les sols mous, le coefficient de restitution normal moyen est de l'ordre de 0,2 contre 0,75 pour les substratums rigides.

Sol dur - roche	
R_n	R_t
0,8-0,9	0,65-0,75
0,2-0,8	0,5-0,75
0,53	0,99
0,5	0,95
0,35	0,85
0,2	0,53
0,69-0,77	0,93-1,10
0,25-0,88	0,74-1,63
valeurs moyennes	
0,52-0,75	0,90 - 1,1

Tableau 1.2. Coefficients de restitution moyens pour des sols rigides (voir annexe A)

Sol meuble	
0,2-0,4	0,2-0,3
0,4	0,9
0	0,24
0,28-0,32	0,80-0,83
0,28-0,32	0,78-0,82
0,1-0,2	0,5-0,8
valeurs moyennes	
0,20 - 0,30	0,55 - 0,70

Tableau 1.3. Coefficients de restitution moyens pour des sols meubles (voir annexe A)

1.4.5.1.9. Influence de la forme des blocs sur le rebond

La forme des blocs à une incidence majeure sur la nature du rebond. Prenons l'exemple d'une sphère qui chute verticalement et impacte un plan horizontal. Le rebond se fera dans la direction verticale avec une dissipation importante d'énergie dans la direction normale à l'impact. Au contraire, si l'élément qui chute est cubique sa trajectoire après l'impact, sera selon son incidence initiale, fortement perturbée par des mouvements de translation et de rotation.

La forme des blocs est une caractéristique qui a récemment suscité l'intérêt de la communauté scientifique comme en témoignent les nombreuses études expérimentales et numériques menées ces dernières années. A titre d'exemple, on cite les travaux de (Leine et al., 2013; Lambert et al., 2013; Basson and Humphreys, 2013) qui montrent l'importance de la forme des blocs dans l'étude de la propagation des blocs isolés (Leine et al., 2013), et les travaux de (Basson, 2012) et ceux de (Cuervo et al., 2014a; Mollon et al., 2011) qui concernent plus spécifiquement le comportement collectif des masses rocheuses. D'autres phénomènes plus complexes, comme l'interaction multi points qui a lieu lorsqu'un solide de forme complexe rentre en interaction avec le sol, sont actuellement à l'étude.

1.4.5.1.10. Revue non exhaustive des principaux codes trajectographiques de la littérature

D'après la liste des modèles trajectographiques proposée par (Volkwein et al., 2011) (Tableau 1.4), on observe que les premiers modèles numériques 2D ou 3D cherchaient à représenter principalement la cinématique d'un élément (point ou solide) en fonction des équations classiques du mouvement [2-5] plutôt qu'à décrire l'impact lui-même, qu'à considérer les aspects stochastiques du phénomène, ou qu'à introduire des effets spécifiques liés à l'irrégularité du terrain ou à la présence d'arbre.

Avec le développement des outils informatiques et la réalisation de plus en plus courante d'expérimentations en laboratoire et sur site réel (Keaton, 2012), des indices sur la sensibilité de la propagation à des caractéristiques géométriques et de site ont été clairement observés. Les modèles initialement très simples vis-à-vis de la modélisation des géométries et des matériaux, ont dû évoluer pour prendre en compte cette sensibilité, sur la base d'hypothèses très fortes, en introduisant le concept de variabilité ou de calcul stochastique. Ces outils sont à l'origine des premières cartes de risques. Les modèles développés après les années 80 sont très répandus dans la communauté scientifique mais aussi industrielle au sein de laquelle un grand nombre de codes de calculs à caractère « confidentiel » semblent avoir été développés. Des modèles qui permettent l'utilisation des coefficients de restitution supérieur à l'unité pour la prise en compte des phénomènes de rotation liées à la forme des blocs seraient notamment utilisés (NURock) (Spadari et al., 2013) que ce soit par des approches de corps rigide (Basson and Humphreys, 2013) ou des approches discrètes (Thoeni, 2012). Nonobstant, la concurrence commerciale dans l'analyse de la propagation de chute de blocs dans le milieu industriel fait qu'un nombre important de ces codes sont très souvent utilisés mais peu diffusés. Dans ce cadre, la réalisation de benchmarks, basés sur des expérimentations sur site, comme celui mis en place en 2011 par le CEMAGREF (actuellement IRSTEA), est indispensable pour le développement de stratégies communes visant à améliorer la connaissance de ces phénomènes (Berger et al., 2011).

Table 1. Main characteristics of a selection of existing rockfall trajectory models (modified from Guzzetti et al., 2002).

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	(Descoedres and Zimmermann, 1987)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	No
PROPAG/CETE Lyon	(Rochet, 1987a)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
N.N.	(Hungry and Evans, 1988)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
CRSP (4.0)	(Pfeiffer and Bowen, 1989)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
	(Jones et al., 2000)				
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)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
	(Krummenacher and Keusen, 1996)				
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
Sturzeschwindigkeit	(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)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	Yes
	(Le Hir et al., 2006)				
Rocky3	(Dorren and Seijmonsbergen, 2003)	2.5-D (x,y coupled with slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
HY-STONE	(Crosta et al., 2004)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
	(Frattini et al., 2008)				
	(Agliardi et al., 2009)				
RockyFor	(Dorren et al., 2004)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
	(Dorren et al., 2006)				
	(Bourrier et al., 2009a)				
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)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	Yes
	(Rammer et al., 2007)				

* Forest characteristics such as tree density and corresponding diameters can be taken into account explicitly

Tableau 1.4. Liste des logiciels trajectographiques existants jusqu'en 2012 présentée par (Volkwein et al., 2011)

Les modélisations numériques continues et discrètes ont eu une influence importante sur la nouvelle façon de reconsidérer le phénomène gravitaire rocheux d'un point de vue de la trajectographie des blocs isolés. Des phénomènes constamment négligés par les logiciels trajectographiques tels que le roulement et le glissement local lors d'un impact, ont été mis en évidence tant d'un point de vue expérimental (Spadari et al., 2012) que d'un point de vue numérique. Les derniers logiciels trajectographiques se rapprochent de plus en plus des méthodes dites discrètes avec des rhéologies qui prennent en compte une dissipation par frottement au niveau de l'impact (Leine et al., 2013).

Des approches numériques mixtes (approche continue + trajectographique) dédiées à la simulation des événements de chute de blocs en masse (Bourrier et al., 2013) sont également développées. Cependant, dans ce type d'approche, d'après (Bourrier et al., 2013), il existerait un manque de réalité physique, notamment dans la définition de la quantité d'énergie transférée de la masse rocheuse au bloc isolé, lorsque l'on ne prend pas en compte le mouvement de masse. On

notera qu'un des objectifs de cette thèse porte précisément sur la possibilité de modéliser avec un même code aussi bien le mouvement de masse que le suivi des blocs qui s'en détachent.

1.4.5.1.11. Introduction au phénomène d'interaction forêt blocs-rocheux

L'intérêt de prendre en compte l'effet de la forêt sur la propagation des blocs rocheux est relativement récent. A part quelques analyses présentées sur ce sujet en 1995, les avancées principales font suite aux travaux de thèse de Luuk Dorren en 2002 qui ont conduit au développement du logiciel RockyFor3D. Des simulations numériques sur site réel, tenant en compte ou non la forêt, ont montré l'importance de la végétation sur la diminution du risque gravitaire rocheux (Dorren, 2002) (Figure 1.22). Enfin, toujours en relation avec le rôle de la forêt sur la prévention des risques gravitaire on peut citer les travaux numériques récents menés avec le logiciel YADE au laboratoire IRSTEA de Grenoble pour l'étude approfondie de la mécanique de l'impact d'un bloc rocheux avec un arbre.

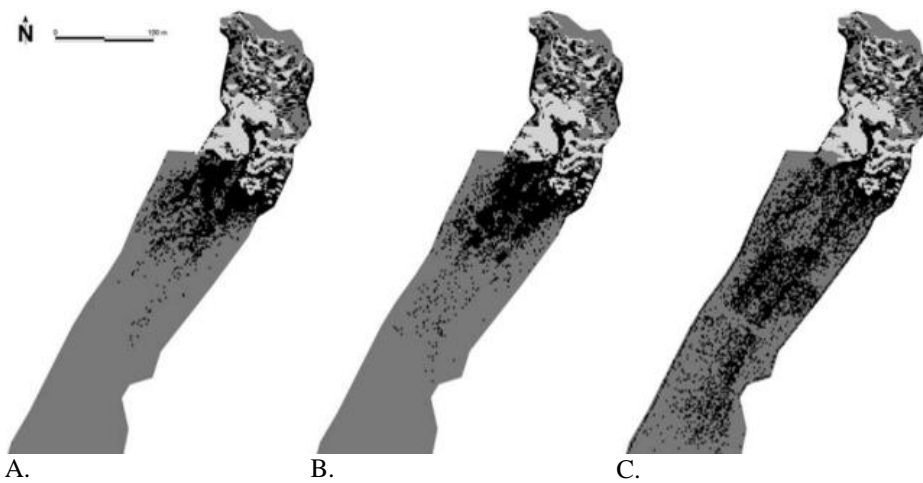


Figure 1.22. Effet de la forêt sur la propagation de blocs rocheux A. prise en compte de la totalité de la forêt B. surface de forêt réduite de 50% C. calcul sans prise en compte de la forêt. (Dorren, 2002)

1.4.5.1.12. Modélisation de la propagation de masses rocheuses

Pour étudier la cinématique de propagation des masses rocheuses il existe différentes approches que l'on peut classer en quatre catégories principales :

- Les approches continues classiques qui assimilent la masse rocheuse à un fluide équivalent,
- Les approches continues telles que la MEFPIIL (Méthode des Eléments Finis avec Points d'Intégration Lagrangien) ou la MPM (Materiel Point Method) dont le continuum est représenté par des points lagrangiens appelés « points matériels » qui se déplacent dans une grille Eulérienne fixe,
- Les approches granulaires ou discrètes pour lesquelles la masse rocheuse est représentée par un ensemble de particules qui interagissent entre elles et dont le comportement général est régi par la loi fondamentale de la dynamique,
- Les approches couplées continues/trajectographiques ou continues/ discrets.

L'objectif de cette section est de donner un aperçu de ces méthodes. On s'attardera sur les modèles discrets qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail de thèse.

1.4.5.1.13. L'approche continue classique

Cette approche considère le mouvement granulaire rocheux comme un écoulement à surface libre dont l'épaisseur est supposée très petite devant la géométrie du problème. Cette condition permet de considérer une vitesse constante sur l'épaisseur de la masse et de reporter l'ensemble des mécanismes de dissipation d'énergie (frottement basal et dissipation au sein de la masse) aux niveaux des interactions qui ont lieu à la base de l'écoulement (*Figure 1.23*). Cette hypothèse forte, mais néanmoins avantageuse en termes de résolution des équations à la base des modèles continus (équations de Saint Venant) (Pirulli, 2005), nécessite l'introduction de rhéologies parfois sophistiquées mais quelquefois dénuées de réalité physique, pour rendre compte du caractère granulaire de certains mouvements rocheux.

Les principales rhéologies utilisées par ces méthodes sont à caractère : plastique avec une force résistante T proportionnelle à la surface de contact, frottant avec une force résistive T fonction de la contrainte normale effective et de l'angle de frottement à la base, de Bingham où T est fonction de la vitesse et d'une contrainte de cisaillement seuil, et de Voellmy où T est principalement fonction de la vitesse de l'écoulement (rhéologies visqueuses) (Banton, 2009a).

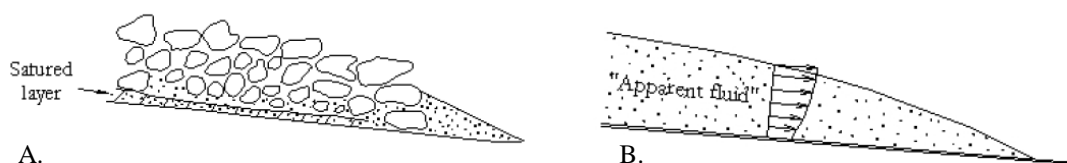


Figure 1.23. Illustration du concept de milieu continu équivalent A. Avalanche rocheuse B. Fluide homogène équivalent (Banton, 2009a)

Des applications de ces méthodes aux éboulements rocheux en masse de taille intermédiaire ont été traitées entre 2010 et 2013 dans le cadre du Projet Européen Alcotra MASSA (*Medium And Small Size rockfall hazard Assessment*) par l'intermédiaire de trois modèles continus : DAN3D (Mckinnon et al., 2008), RASH3D (Pirulli, 2005) et EPAN3D (*Medium and Small Size rock fall hazard Assessment Medium and Small Size rock fall hazard Assessment*, 2013). De façon générale, les simulations numériques menées dans le cadre de ce projet ont permis de mettre en évidence, pour les petits volumes et les volumes intermédiaires, le caractère très sensible des méthodes continues à la géométrie des versants de propagation (surfaces non planes ou ruptures de pente) et le manque de réalisme des lois de comportement pour traiter des mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage des singularités. Une des perspectives du projet Intereg MASSA, finalisé en 2013 et auquel l'auteur de cette thèse a également participé, portait sur la possibilité d'enrichir les rhéologies utilisées par les modèles continus à partir des résultats des modélisations de type discret. Dans ce but, des simulations numériques discrètes ont été réalisées pour appréhender notamment les mécanismes de dissipation d'énergie au niveau d'une rupture de pente (influence du rayon de courbure sur les modes d'énergie dissipée) qui seront présentées dans le chapitre dédié à la modélisation numérique « DEMbox et la modélisation d'avalanches rocheuses ».

Dans l'analyse des mouvements rocheux impliquant des volumes importants, notamment des avalanches et des coulées de boues (debris flow), ces méthodes s'avèrent beaucoup plus

pertinentes car elles permettent de mieux assimiler les bilans quantitatifs et qualitatifs. Le lecteur intéressé par la résolution des équations de Saint Venant et à leur implémentation dans un code de calcul peuvent se référer aux articles suivants : (Hung, 1995; Mangeney-Castelnau et al., 2003).

1.4.5.1.14. L'approche continue de type MPM (Material Point Method)

La méthode MPM (Material Point Method) est une méthode très récente (première apparition en 1996 (Schreyer., 1996)) qui peut être vue comme une extension de la méthode des éléments finis dont le continuum est représenté par des points lagrangiens appelés « points matériels » ou encore particules. Parmi ses caractéristiques remarquables, la MPM permet très simplement de considérer des géométries complexes, des déformations importantes et des grands déplacements. La déformation du continuum est prise en compte par le suivi des particules qui se déplacent à travers un maillage eulérien fixe (*Figure 1.24*). Les points matériels portent toutes les propriétés mécaniques du continuum comme la masse, les paramètres rhéologiques, les déformations, les contraintes et les forces externes alors que le maillage eulérien et ses points de Gauss portent les caractéristiques liées à la cinématique de l'écoulement (vitesse et quantité de mouvement) (Al-Kafaji, 2013).

Cette approche combine les aspects les plus favorables des deux formulations du continuum, lagrangienne et eulérienne, tout en évitant autant que possible leurs déficiences. Par exemple, la diffusion numérique associée aux termes de convection dans l'approche Eulérienne ne figure pas dans la solution MPM. De plus, les problèmes liés à une déformation excessive de la maille sont aussi supprimés. De ce fait, il apparaît que cette méthode soit bien adaptée pour traiter des problèmes d'ingénierie impliquant de grandes déformations (Al-Kafaji, 2013).

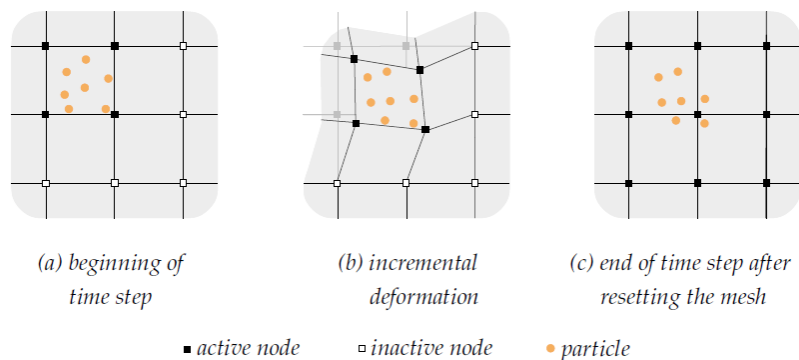


Figure 1.24. Représentation schématique de l'approche MPM : Les particules lagrangiennes se déplacent à travers une grille eulérienne fixe (Al-Kafaji, 2013)

Des applications très récentes de cette méthode aux problèmes d'écoulement rocheux (Gracia, 2014) ont démontré son potentiel (*Figure 1.25*). Si cette méthode semble plus couteuse en temps de calcul par rapport aux méthodes continues classiques elle l'est beaucoup moins comparativement aux modèles discrets (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment Medium and Small Size rock fall hazard Assessment, 2013).

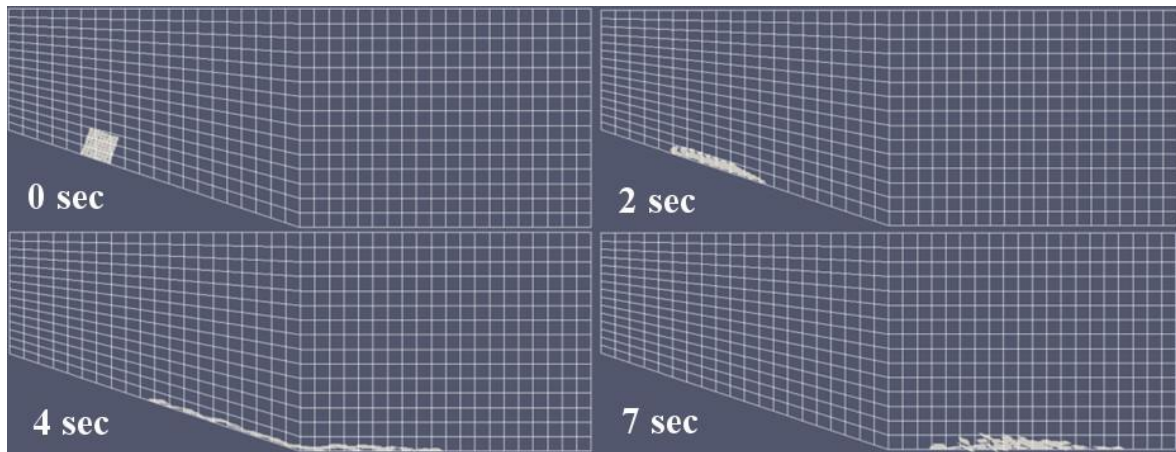


Figure 1.25. Etude de la propagation d'une masse rocheuse en utilisant la méthode MPM Adapté de (Gracia, 2014)

1.4.5.1.15. L'approche granulaire ou discrète

Les approches granulaire ou discrète considèrent un ensemble de solides en interaction dont l'évolution collective est régie par le principe fondamental de la dynamique (Cundall and Strack, 1979). On peut diviser ces approches en deux grandes familles : la dynamique moléculaire qui utilise des corps déformables et pour laquelle une interpénétration locale est acceptée (méthode couramment appelée méthode des éléments discrets) et la dynamique de contacts qui considère des contacts rigides entre les éléments (Radjai and Richefeu, 2007). Dans la première, lorsque deux éléments sont en contact, ils peuvent se chevaucher ou s'interpénétrer. Les contacts ont une durée non nulle et les interactions entre les éléments varient graduellement au cours du chevauchement (Figure 1.26). Pour déterminer l'évolution d'un tel système, il est nécessaire d'intégrer les équations différentielles du second ordre de la mécanique classique de Newton. Pour la dynamique des contacts, basée sur l'hypothèse de corps indéformables, le choc est considéré comme instantané. Le contact a lieu en un point et les éléments ne peuvent pas se chevaucher (Pierre-Olivier, 2003). Nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette thèse plus particulièrement à la dynamique moléculaire où les particules sont rigides mais localement déformables aux points de contact (Donzé and Richefeu, 2010).

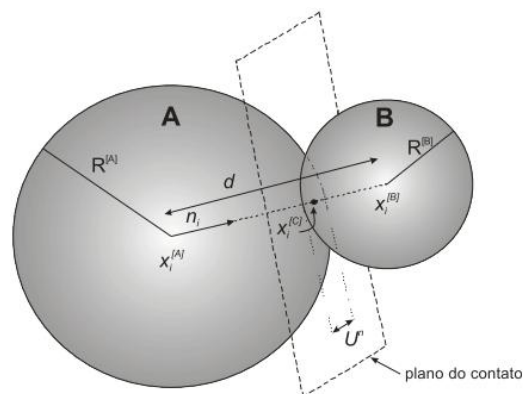


Figure 1.26. Représentation du contact «chevauchement» dans la méthode des éléments discrets. (Mejia et al., 2010)

De nos jours, de nombreuses applications ont été abordées par la modélisation discrète. Partant du caractère discret de la plupart des matériaux et de la nature elle-même, des applications

diverses ont naturellement été traitées que ce soit dans les domaines de la géotechnique, du béton (Donzé and Richefeu, 2010) et des roches, mais également dans le domaine biomédical (Jauvert et al., 2013) avec des applications assez courantes dans l'industrie (Pouliquen, 2009).

Concernant l'étude de mouvements gravitaires et d'avalanches, cette méthode a été utilisée tant dans l'analyse de la propagation de blocs rocheux (Banton, 2009a; Mollon et al., 2012, 2011; Thoeni et al., 2014), de la neige (Favier, 2009; Teufelsbauer et al., 2011), que pour l'analyse des interactions écoulement/obstacle (naturel : forêt ou artificiel : murs) (Lambert et al., 2013; Lorentz and Muquet, 2010; Plassiard and Plotto, 2006), que pour des phénomènes d'impacts (Favier et al., 2009) sur ouvrage de protection (Breugnot, 2011).

Parmi les outils numériques utilisés dans les études de propagation de masses rocheuses, les plus courants sont sans doute ceux développés par Itasca : PFC (Tommasi et al., 2007; Lo et al., 2011), 3DEC (Olofsson and Fredriksson, 2005) et FLAC (Bozzano et al., 2012). Les auteurs ayant utilisé ses logiciels sont entre autres : pour PFC (Tommasi et al., 2007; Banton, 2009a), (Lo et al., 2011), pour 3DEC (Olofsson and Fredriksson, 2005), et pour FLAC (Bozzano et al., 2012). D'autres codes de calcul développés par des universitaires sont également largement utilisés : le code de calcul open source YADE développé à l'Université de Grenoble (Šmilauer et al., 2011; Thoeni, 2013), le code LMGC90 de l'Université de Montpellier (Dubois et al., 2011) et le code de calcul DEMbox de l'Université de Grenoble utilisé pour cette thèse (Cuervo et al., 2014b; Mollon et al., 2012). Quelques une des applications traitées avec ces logiciels sont : pour Yade (Thoeni et al., 2014), pour LMGC90 (Dubois et al., 2011) et pour DEMbox (Mollon et al., 2012; Cuervo et al., 2014a).

L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent d'implémenter très facilement de nouveaux mécanismes une fois qu'ils sont identifiés et de traiter des applications complexes et variées. Toutefois, les temps de calcul parfois très longs et le manque de données précises sur les rhéologies ou les mécanismes d'interaction, font encore de ces dernières des approches peu développées en bureaux d'études. Les développements actuels de ces méthodes portent essentiellement sur la recherche de nouvelles rhéologies plus adaptées (Zhang, 2015) ou sur la manière de discrétiser et de générer des éléments « discrets » de formes plus réalistes. En effet, il a été montré expérimentalement et numériquement (Banton, 2009a) que la forme des blocs avaient un rôle important dans la physique de propagation et notamment sur les zones d'arrêt.

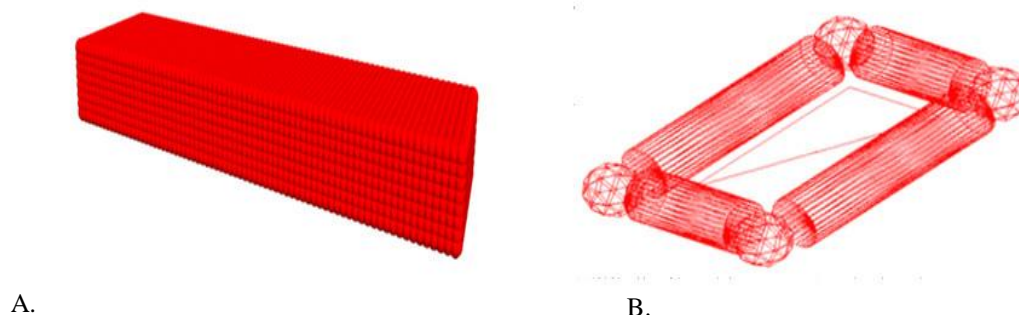


Figure 1.27. A. discrétisation par un assemblage de sphères (Thoeni et al., 2014). B. Discrétisation par sphéro-polyèdres : solides constitués de volumes élémentaires tels que sphères (pour les coins), cylindres (pour les côtés) et plans (pour les faces) (Mollon et al., 2012; Cuervo et al., 2014b)

La plupart des méthodes discrètes ont été développées sur la base d'assemblages d'éléments sphériques qui limitent considérablement les temps de calcul notamment dans la phase de détection des contacts. Cela expliquerait pourquoi les méthodes utilisées actuellement dans la modélisation des masses rocheuses ne considèrent que des formes simplifiées résultant d'un assemblage limité de disques ou de sphères. Par ailleurs, le choix de construire des éléments de forme complexe par un assemblage de sphères nécessite généralement un nombre très important de sous éléments discrets qui peut au final augmenter considérablement les temps de calcul (*Figure 1.27A*).

D'autres études de propagation réalisées en utilisant des éléments de type « sphéro-polyèdre » (*Figure 1.27B*), par exemple, ont montré l'intérêt de prendre en considération des formes de blocs plus réalistes (Mollon et al., 2012) (*Figure 1.28*). Néanmoins, la forme des blocs dans un phénomène rocheux est fortement tributaire des mécanismes de rupture et des discontinuités des falaises rocheuses. C'est pour cette raison que les calculs les plus récents intègrent ces données dans la définition de la géométrie des blocs pour l'analyse de la propagation de blocs isolés (Thoeni et al., 2014) où des mouvements de masse (Cuervo et al., 2014a).

Même si elle était déjà dans l'imaginaire collectif, l'idée que la propagation de masses rocheuses comporte une partie continue (où le comportement de l'ensemble peut s'assimiler à celui d'un fluide) et une partie discrète (propagation de blocs rocheux isolés qui sont les plus dangereux vis-à-vis du risque) est de plus en plus présente dans le milieu industriel et scientifique. L'utilisation d'un modèle discret (où toutes les particules sont modélisées explicitement) est très pertinente dans ces phénomènes à laquelle s'ajoute également la possibilité d'accéder à des données microscopiques à l'intérieur des écoulements granulaires, ce qui est impossible pour les modèles continus ou trajectographiques. Néanmoins, et compte tenu des limites de temps de calcul et de l'expertise déjà obtenue dans l'utilisation de modèles plus simplistes, l'utilisation des méthodes hybrides semblerait plus pertinente. Par exemple, (Bourrier et al., 2013) propose une démarche de simulation qui consiste à modéliser la partie « éboulement en masse » (clairement observable sur la *Figure 1.29*) par un modèle de type continu (DAN-W) alors qu'un calcul en parallèle avec un modèle trajectographique (RockyFor3D) permet d'appréhender la trajectoire et la position des blocs isolés, à la fois les plus éloignés.

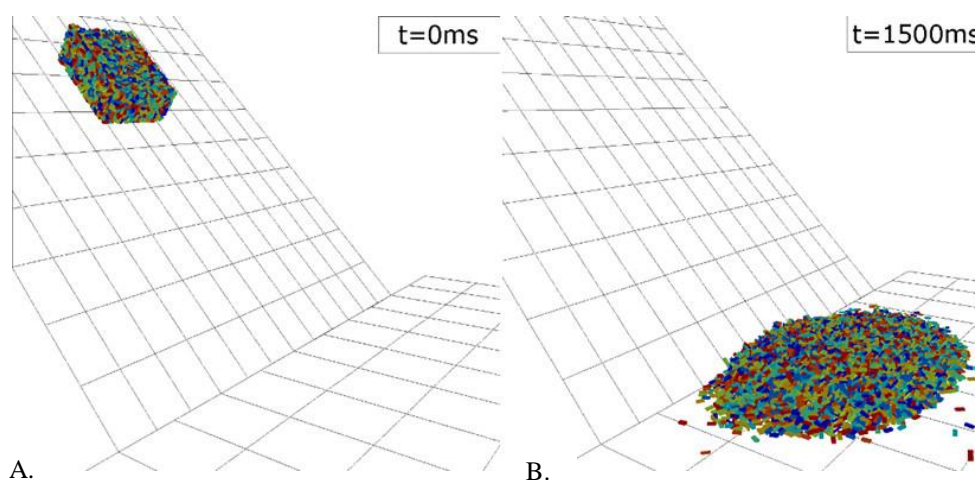


Figure 1.28. Modélisation de la propagation d'une masse granulaire dont les particules sont des solides de type sphéro-polyèdre avec le code DEMbox (Mollon et al., 2012)

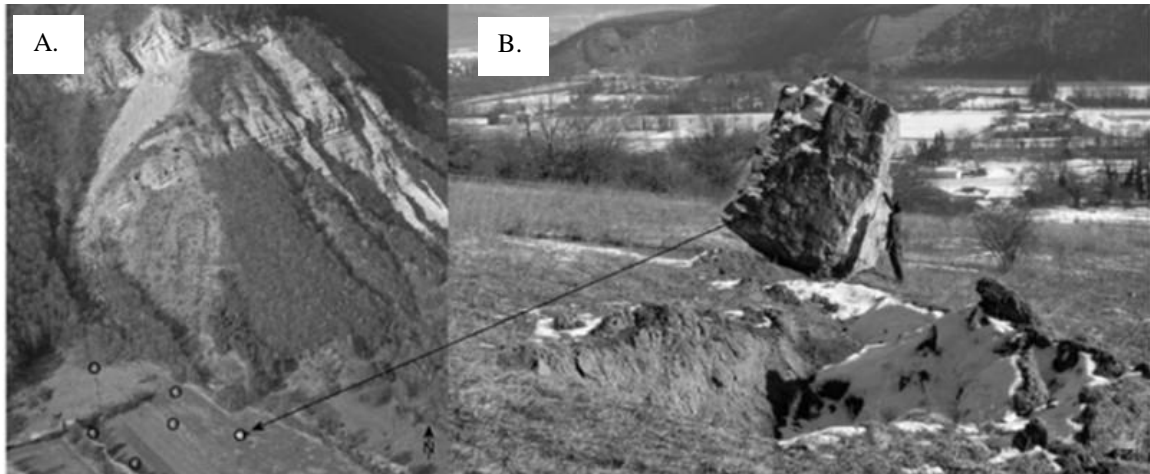


Figure 1.29. Eboulement de Varcès 2008. A : vue d'ensemble et trajectoires de certains blocs volumineux. B : visualisation du bloc le plus éloigné (Bourrier et al., 2013)

1.4.5.1.16. Les approches combinées continues/discrets et continues/trajectographiques

Différentes techniques de couplage entre les méthodes éléments finis et éléments discrets existent. On peut citer les techniques de couplage par sous domaines (avec ou sans recouvrement) qui permettent de discrétiser avec un modèle discret les zones fortement sollicitées et par un modèle continu, les zones dont le comportement peut être assimilé à un milieu continu. Ces techniques ont notamment été utilisées pour des applications d'impacts sur ouvrages de protection de type merlon (Breugnot, 2011). Des approches mixtes ayant pour objectif l'étude de la propagation et la fracturation des masses rocheuses avec un modèle DEM/FEM ont également été proposées (Lisjak and Grasselli, 2010). Dans ce cas, le maillage éléments finis initial est prédécoupé (dans les zones potentiellement instables) en sous domaines maillés qui interagissent entre eux via des conditions d'interaction très similaires à celles utilisées dans les codes éléments discrets (liaisons cohésives, frictionnelles ou dissipatives). On peut voir ces sous domaines maillés comme des éléments discrets déformables qui interagissent au cours de la simulation via leurs points de contact. Des applications de cette méthode à des problématiques de mouvements granulaires rocheux ont été proposés par (Manzella, 2011). L'étude a consisté à la modélisation numérique par le logiciel *Y-Geo* d'un écoulement granulaire d'un ensemble de briques se propageant sur un plan incliné (Manzella et al., 2008). Bien que puissante, cette méthode a montré des déficiences dans la modélisation de la propagation finale de cet écoulement, notamment due au caractère tridimensionnel de l'expérience qui n'est pas pris en compte par le modèle numérique utilisé. Les applications actuelles de cette méthode portent principalement sur la mécanique des roches, la stabilité des talus (Figure 1.30) et le domaine minier (Mahabadi and Lisjak, 2014).

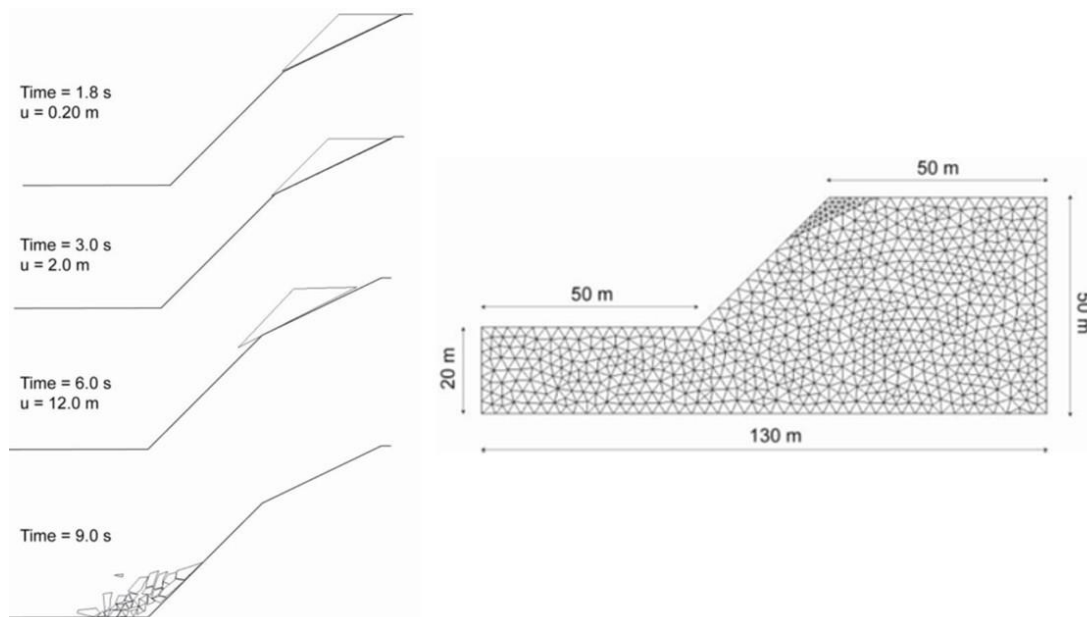


Figure 1.30. Modélisation de la propagation d'une masse rocheuse suivant un plan de rupture prédéfini (Lisjak and Grasselli, 2011)

1.4.5.1.17. Phase 3 : Introduction aux méthodes de prévention et de protection vis-à-vis de l'aléa risque gravitaire rocheux

Il est très difficile voire impossible de faire disparaître complètement un aléa naturel. Les méthodes de contrôle de risques gravitaires rocheux passent donc par la formulation de deux questions principales : veut-on diminuer la fréquence d'un risque ou bien diminuer l'effet et/ou les conséquences ? Bien que proches, prévention et protection font l'objet d'une définition particulière.

En matière de risques, la prévention a pour but de réduire l'impact d'un phénomène prévisible sur les personnes et les biens. Elle intervient en amont du problème. On y trouve différentes mesures:

- Les cartes de risques interdisant la construction dans des zones classées comme « dangereuses » (Louis, 2012),
- La purge des zones instables pour accélérer de façon contrôlée la probabilité d'occurrence d'un aléa pour ensuite en maîtriser les conséquences (Bottelin et al., 2014) (Figure 1.31),
- Le déplacement des biens ou des personnes,
- Le suivi des instabilités rocheuses associé à des systèmes d'alerte et d'urgence. (Cloutier, 2014; Ebeltoft and Larsen, 2006; Arosio et al., 2009; Hartmeyer et al., 2013; Bottelin et al., 2014).

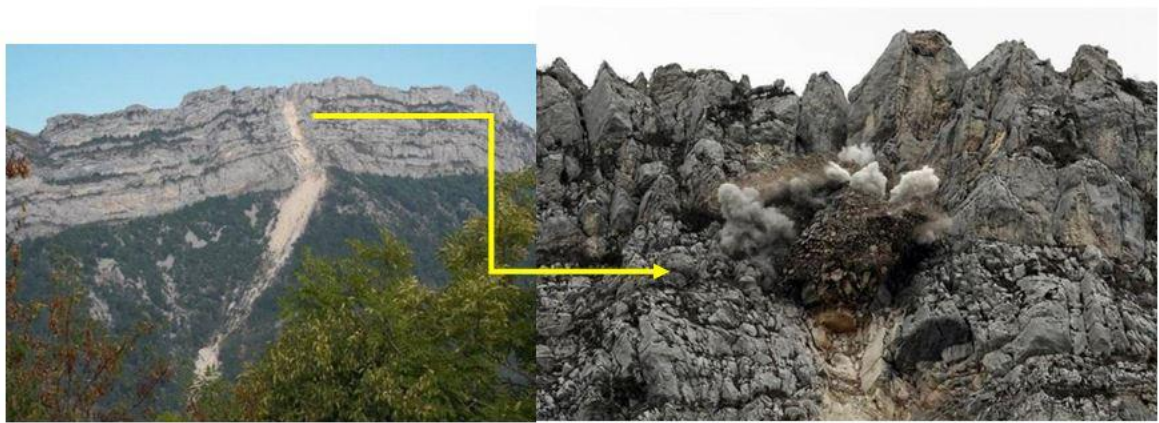


Figure 1.31. Minage de 2500 m³ de roche au mont Néron en France en décembre 2011

La protection a également pour but de réduire l'impact d'un phénomène mais dans le cas où l'évènement se produit. Une mesure de protection consiste à la mise en place d'un dispositif tangible pour réduire un risque. Par exemple, le fait de poser un filet sur une paroi rocheuse peut permettre d'orienter la chute des blocs et d'éviter qu'ils n'atteignent des zones sensibles. Pour les risques gravitaires rocheux, les ouvrages de protection les plus courants sont :

- Les merlons (murs de protection) (Plassiard and Plotto, 2006; Breugnot, 2011),
- Les filets. Arrêt (partiel ou total de la masse) ou canalisation du mouvement (Giacomini et al., 2012; Thoeni et al., 2014),
- Le clouage (ancrage des masses rocheuses instables). Augmentation du facteur de sécurité,
- Les galeries,
- Les tranchées.

Les méthodes numériques permettant d'analyser la propagation des événements gravitaires rocheux sont généralement utilisées pour définir certaines mesures de prévention, notamment dans la préparation de cartes de risques (Stock et al., 2012; Clouet et al., 2012; Guzzetti et al., 2003; Wiczorek et al., 1996; Budetta, 2004, 2010; Dorren, 2005) mais peuvent également servir pour dimensionner les ouvrages de protection déjà cités, d'où l'intérêt pour l'ingénierie de développer des méthodes capables d'analyser, de façon réaliste, la dynamique de blocs rocheux.

Les méthodes trajectographiques ont également un rôle assez important dans la réalisation de ces cartes notamment grâce à leur approche stochastique qui leur permet de faire des estimations probabilistes des hauteurs de passage des blocs rocheux en différents points du site (*Figure 1.32*). Dans les cas d'éboulements en masse, la définition du risque reste plus problématique car comme présenté par (Bourrier et al., 2013), le risque peut être une conséquence du mouvement de masse lui-même ou de l'action de blocs isolés.

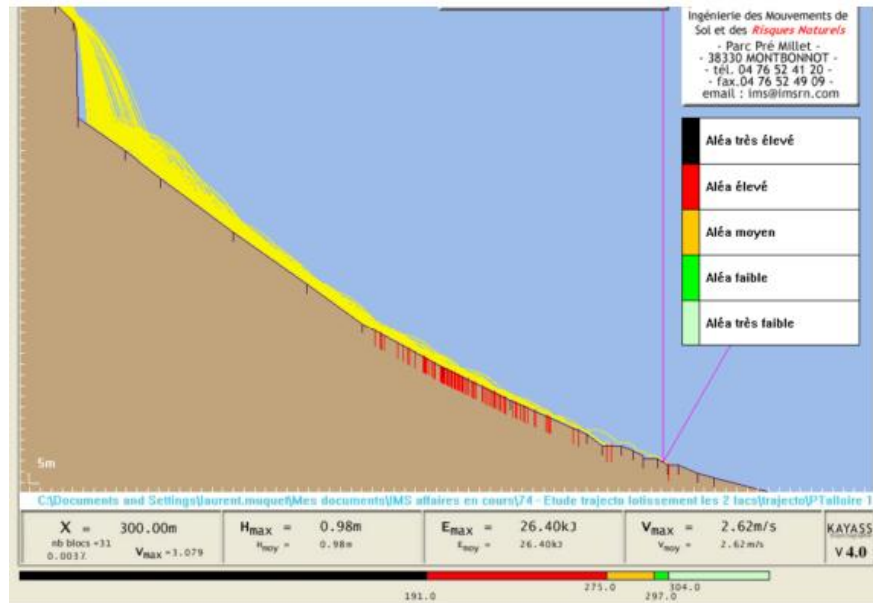


Figure 1.32. Utilisation du logiciel trajectographique KAYASS pour l'étude de la propagation d'un bloc rocheux avec définition de l'aléa en fonction du pourcentage des blocs passants (Lorentz, 2012)

1.4.6. PROJETS DE COLLABORATION INDUSTRIELLE ET SCIENTIFIQUE SUR LA THEMATIQUE DE PROPAGATION DE MASSES ROCHEUSES

De nombreux projets collaboratifs ont été menés sur la thématique des risques gravitaires. D'un point de vu structurel, *Ecorisq* (association franco-suisse créée en 2012 autour de l'analyse de la propagation de blocs rocheux avec prise en compte des conditionnes forestières) montre l'intérêt qu'ont les communautés scientifique et industrielle à développer des outils numériques versatiles, simples et réalistes pour la définition de zones à risques.

Des projets de collaborations scientifiques ont été aussi développés à l'échelle européenne. On notera pour exemple le Projet Européen Alcotra MASSA (*Medium And Small Size rock fall hazard Assessment*) qui s'est déroulé entre 2008 et 2012. Ce projet, rassemblait un grand nombre d'acteurs autour de la thématique du risque rocheux, de la stabilité des massifs jusqu'à l'aménagement des territoires face à ces risques. De manière générale, ce projet a créé des liens importants entre les différents acteurs de diverses communautés et a permis la mise au point de stratégies d'évaluation, de calcul et de contrôle. Concernant la modélisation des avalanches rocheuses, ce projet a permis de mettre en évidence les limites des méthodes de type continue par rapport aux modèles discrets (dont le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette thèse) et vice-versa. Cette collaboration a débouché sur une meilleure compréhension du risque gravitaire et a permis aux acteurs privés et publics d'avoir un accès privilégié à des méthodes sophistiquées qui ont été testées et comparées dans des cadres maîtrisés.

Enfin, le projet Européen Mumolade 2012-2015 (*Multi Scale Modeling of Landslides and debris flows*) qui intègre environ 16 partenaires européens, est l'un des plus importants projets récents portant sur la modélisation des mouvements gravitaires autres que les avalanches rocheuses. On y trouve les coulées de boues, les glissements de terrain de moyenne amplitude et l'étude de l'interaction grain/solide pour l'analyse du comportement des structures de protection (Figure 1.33). L'utilisation des méthodes continues et discrètes, de plus en plus courante dans le

milieu scientifique par le biais de ce genre de projets, devrait permettre le développement de nouvelles rhéologies qui pourraient peut-être être appliquées à des problèmes particuliers.

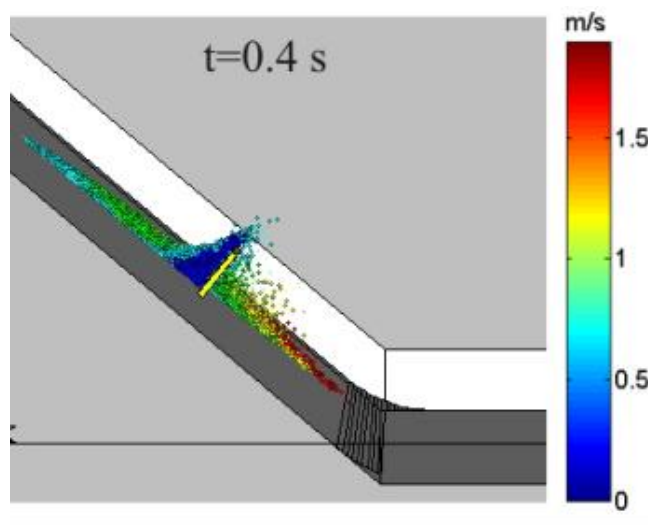


Figure 1.33. Exemple de modélisation discrète de coulées de boues (debris flows) présenté sur le site internet du projet Mumolade

La complexité de la gestion des risques ne porte pas seulement sur des aspects techniques ou physiques mais aussi sur la gestion et l'organisation. A ce jour, il existe un grand nombre de modèles et de méthodes, mais il n'existe pas une démarche cohérente vis-à-vis de la gestion et de l'analyse efficace du risque. En France, les auteurs scientifiques et industriels ont compris cette difficulté et des perspectives de synthèse existent actuellement. Un projet national qui a comme objectif d'aborder de manière globale la problématique des risques rocheux en intégrant leur genèse (aléas), les stratégies globales de gestion du risque, et enfin les parades, est en cours de montage. Il s'agit du projet C2ROP (*Chutes de blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection*) qui devraient débiter en 2015 pour une durée de 4 ans. L'objectif de ce projet est de rassembler les éléments de connaissances et les outils à ce jour disponibles dans le domaine du risque rocheux, de développer et transférer vers le monde opérationnel des outils, méthodes et concepts nouveaux en s'appuyant sur l'ensemble des plateformes expérimentales, et ce afin d'améliorer tant les produits que les procédures techniques à mettre en œuvre (Dossier de montage : Projet National C²R²OP, 2014).

1.5. Conclusion

Il existe une relation directe entre le développement démographique des villes en montagne et les risques naturels rocheux qui sont particulièrement potentialisés par l'action humaine. Le besoin de protéger ces régions en croissance a accéléré le développement de stratégies adaptées à l'ingénierie pour la prévention et la prévision des risques, notamment au cours du XX^{ème} siècle. Dans cette perspective, et grâce aux énormes progrès informatiques, des méthodes numériques ont été proposées remplaçant les approches empiriques utilisées auparavant. Ces méthodes numériques se divisent en trois grandes familles : les approches de type trajectographique (étude isolé de la propagation de blocs rocheux), les approches granulaires ou discrètes (étude du comportement d'un assemblage de particules) et les approche continues (qui assimilent l'ensemble des blocs rocheux à un fluide équivalent). Les méthodes numériques les plus courantes sont celles basées sur des approches de type trajectographique (bloc isolé) qui sont simples d'utilisation et facile à

paramétrer. L'importance de la forme des blocs a été mise en évidence dernièrement par des expérimentations en laboratoire et sur site réel accélérant le développement des modèles trajectographiques sophistiqués. Ces derniers se rapprochent des méthodes discrètes notamment dans la discrétisation de l'impact et de la forme des blocs. Ces méthodes s'avèrent cependant peu adaptées aux études de propagation de masses rocheuses.

Actuellement, on trouve dans la littérature une large quantité des modèles numériques qui sont capables de décrire plus ou moins correctement certains mécanismes liés à la propagation des masses rocheuses et des blocs isolés. Néanmoins, on constate dans la plupart des cas, que le caractère prédictif de ses modèles repose plus sur l'expérience de la personne qui l'utilise que sur le modèle lui-même et que les paramètres sont obtenus par retour d'expérience et n'ont pas toujours un sens physique très marqué.

A ce jour, les modèles numériques discrets ont été très peu utilisés dans l'étude de la propagation des éboulements rocheux de volume intermédiaire. Les progrès récents sur la prise en considération des formes de blocs complexes dans l'étude de la propagation des éboulements rocheux ont rendu possible la mise au point d'outils numériques (comme celui utilisé dans le cadre de ce travail de thèse) de plus en plus performant. A l'heure actuelle les problématiques sont plutôt liées à des questions phénoménologiques qu'à des verrous numériques ce qui expliquerait la tendance actuelle à étudier les mécanismes d'interaction et de dissipation sur sites réels ou dans des conditions très bien maîtrisées.

CHAPITRE 2: RECONNAISSANCE DES SITES DE REFERENCE

2.1. Introduction

Lorsque l'on veut étudier un phénomène naturel aussi complexe que les avalanches rocheuses, il faut partir du principe que nous ne sommes pas en mesure de modéliser numériquement tout ce que l'on observe dans la nature. De fait, la modélisation doit être vue comme une sorte de représentation « grossière » de cette réalité. Cependant, il existe des caractéristiques primaires qu'il faut impérativement identifier et considérer dans une procédure de modélisation pour se rapprocher au mieux de la réalité. L'approche numérique d'un événement réel repose donc sur trois interrogations principales :

- Qu'est-ce que nous observons dans la nature ?
- Qu'est-ce que nous souhaitons modéliser de ce que l'on observe ?
- Comment va-t-on simuler ce qui nous intéresse ?

Afin de recueillir sur le terrain des données de première importance pour la modélisation numérique, nous avons effectué pendant la thèse plusieurs campagnes de reconnaissance sur sites : deux événements d'éboulements rocheux en région Alpine (éboulements dits de « Saint Pancrasse » et de « Perrières ») et un cas d'éboulement dans le Massif Central (éboulement dit de « Millau »). Ces sites, très différents les uns des autres en termes d'enjeu et de distance de propagation, feront l'objet d'une campagne complète de modélisations numériques qui seront détaillées aux chapitres suivants.

2.2. Eboulement de « Saint Pancrasse »

Cet éboulement a eu lieu le 29 novembre 2012 sur la commune de Saint Pancrasse dans le massif de la Chartreuse. Cet événement a consisté au détachement d'une masse rocheuse d'environ 250 m³ qui a glissé et ensuite basculé sur un replat rocheux (ancien chemin d'accès au site d'escalade) (*Figure 2.1*) avant de réaliser une chute verticale de 8 m suivie par une phase de propagation sur une distance d'environ 70 m sur un versant naturel incliné à 45° environ (*Figure 2.3* à *Figure 2.5*). Très récent, cet éboulement a largement attiré l'attention de la communauté alpine car il a eu lieu sur le site d'escalade « Le Luisset », bien connu dans la région, avec une affluence touristique assez importante notamment pendant le printemps et l'été. Même si le bilan de l'événement a été positif en termes de vies humaines (aucun mort ni blessé), il a conduit à la fermeture du domaine d'escalade dit « Tambour » qui a été complètement détruit. L'importance de cet événement porte également sur sa proximité à la commune de Bernin en contrebas où les conséquences d'un tel aléa auraient pu être beaucoup plus importantes vis-à-vis de la population.

A la différence des phénomènes naturels qui ont lieu dans des zones isolées, la géométrie initiale du site est relativement bien décrite dans la littérature et les médias, notamment dans les blogs amateurs des randonneurs fréquentant le site d'escalade (Photos amateur St Pancrasse, 2012), par des cartes d'escalade touristiques (Plaquette TransIsère du site Le Luisset, 2009) et dans des communiqués de presse (M, 2012), ce qui nous a permis d'avoir des informations très importantes, comme par exemple la géométrie de la falaise avant et après éboulement (*Figure 2.1*) et la géométrie et le volume de la zone de départ.

D'un point de vue géologique, le pan de falaise où a eu lieu l'éboulement est constitué de couches alternées de calcaire épais et de marne. Cette zone est géologiquement assez bien connue grâce à sa proximité à la « Dent de Crolles » largement étudiée pendant le dernier siècle vu sa morphologie assez caractéristique (en forme de molaire) et sa réputation d'un des plus hauts pics du massif de la chartreuse (Nicot, 2001). On distingue très nettement dans cette région des bancs calcaires moyennement fracturés, perpendiculairement aux pans de falaise, présentant deux familles de discontinuités facilement identifiables (*Figure 2.2*).

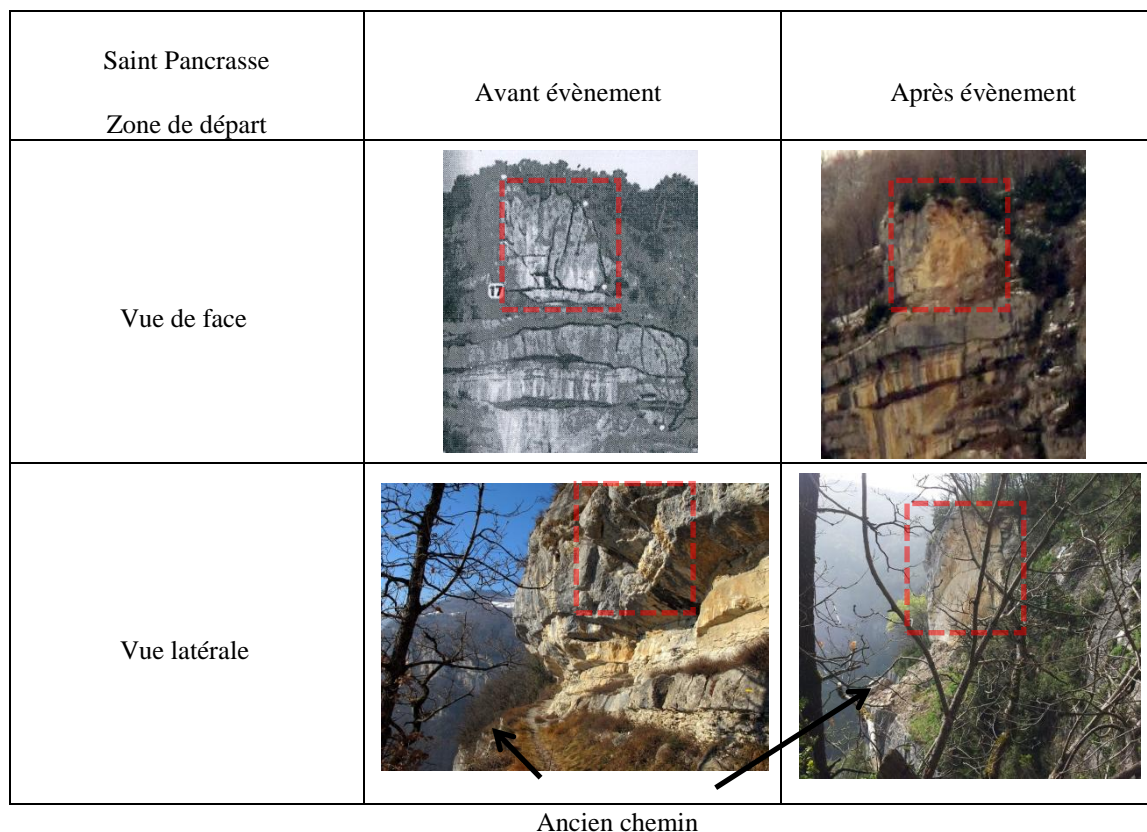


Figure 2.1. Vue de la zone de départ avant et après éboulement (Plaquette TransIsère du site Le Luisset, 2009) (Photos amateur St Pancrasse, 2012)

Une visite de terrain a eu lieu en avril 2013 au cours de laquelle nous avons pu constater l'arrêt de certains blocs de taille importante sur des très petites distances malgré un support très raide (*Figure 2.4B*) ou encore des surfaces de discontinuités secondaires (ou locales) qui présentent des déplacements assez importants qui affectent, entre autres, des régions voisines à celle de l'évènement (*Figure 2.4A*). Nous avons observé également sur le dépôt des blocs assez volumineux (environ 1 à 2 m³) de forme cubique et comportant des angles arrondis (*Figure 2.5B*) ; un signe caractéristique de l'interaction inter-blocs sur des sols de propagations meubles.

En ce qui concerne le dépôt de l'éboulement, les blocs les plus éloignés se sont propagés sur une distance d'environ 110 m (bloc le plus éloigné sur site), avec un dépôt principal d'une longueur d'environ 70m. De façon très étonnante, la plupart des blocs se sont arrêtés relativement près de la falaise (à environ 20 m). Certains se sont encastrés dans le sol comme présenté sur la *Figure 2.4B*. Le versant était boisé avant l'évènement par une végétation très dense d'arbres de petit diamètre (<30 cm), des morceaux de bois se sont mélangés aux blocs rocheux sur le dépôt. Certains secteurs étant encore très dangereux, un drone a été utilisé pour repérer et photographier dans sa totalité l'évènement (*Figure 2.5A*). Une campagne de reconstruction tridimensionnelle de la

falaise et du versant a été réalisée par des techniques photogrammétriques dont le principe est brièvement présenté dans la section suivante. Les relevés photogrammétriques nous ont permis de différencier deux couloirs de propagations prépondérants sur le versant et de repérer les blocs les plus volumineux et les tailles caractéristiques des blocs sur le dépôt (Figure 2.5A). Il faut dire que la photogrammétrie donne des informations très intéressantes et précises sur la zone non boisée. En présence de végétation dense, la qualité du rendu diminue car le sol est moins facilement identifiable. Cette problématique bien connue est l'un des principaux désavantages de cette méthode. Pour les régions très boisées, des approches laser tel que le Lidar s'avèrent plus performantes (Fafournoux and Vautier, 2011). En ce qui concerne ce site, peu de blocs ont été repérés sur le terrain dans les régions latérales plus densément boisées, ceux-ci étant majoritairement regroupés dans les couloirs de propagation.

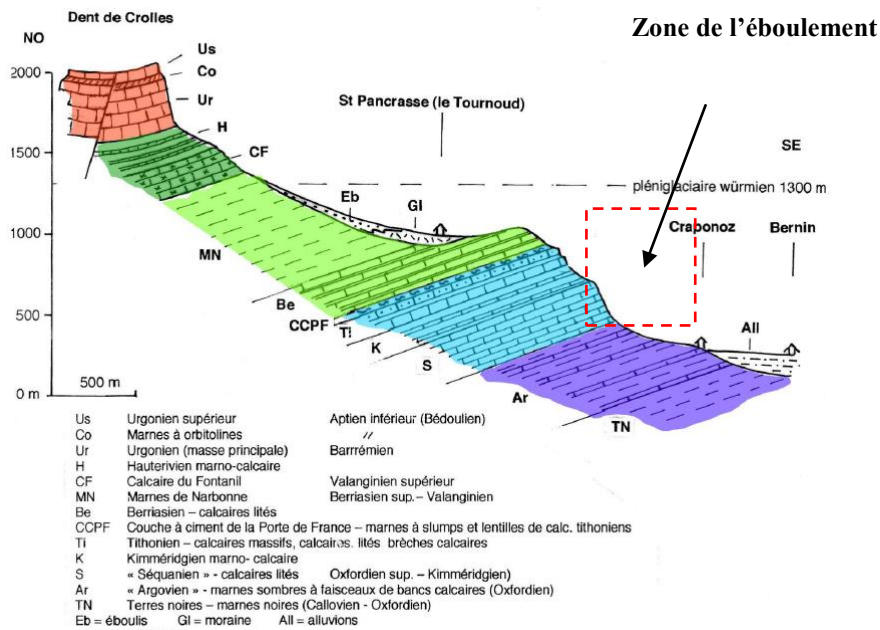


Figure 2.2. Coupe géologique de la région de la Dent de Crolles. Modifié de (Nicot, 2001)

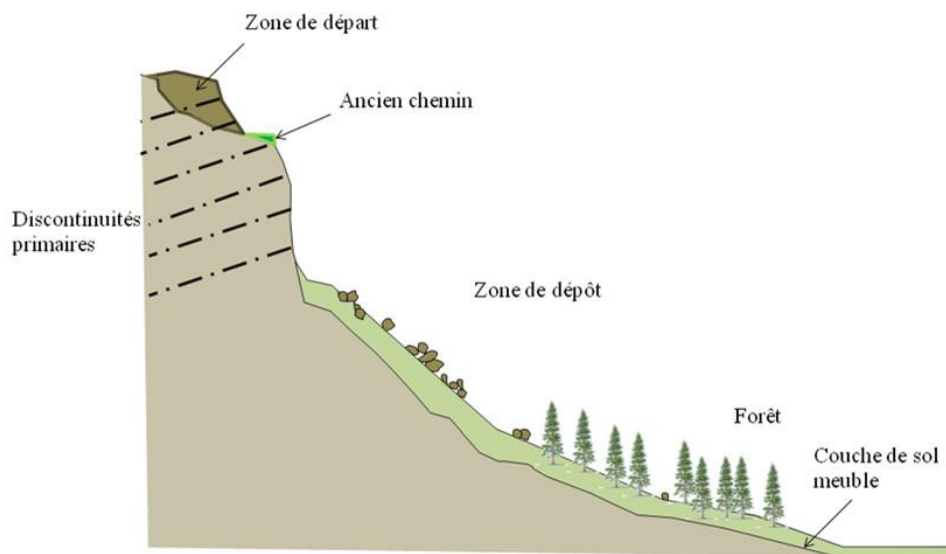


Figure 2.3. Profil type du site de Saint Pancrasse

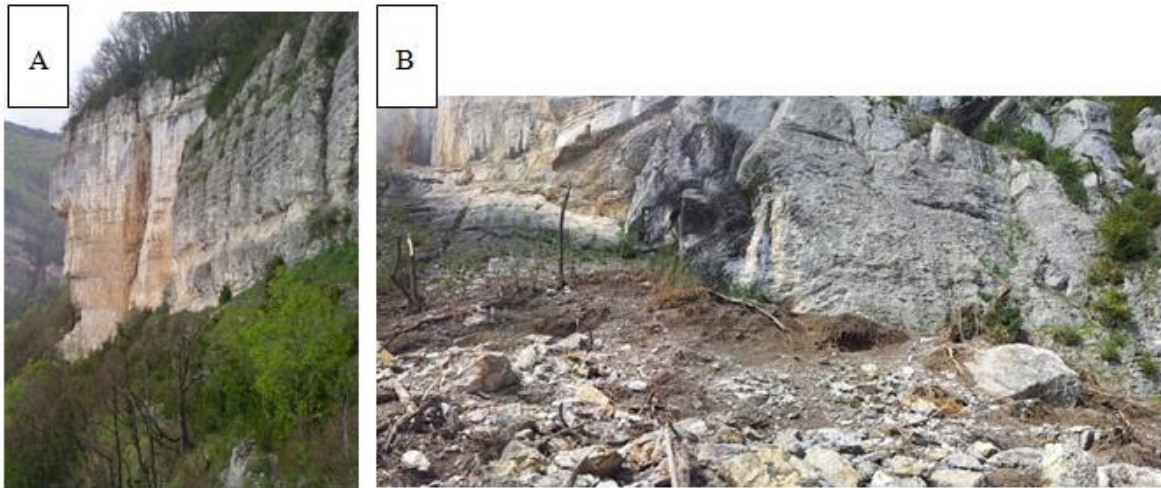


Figure 2.4. A. Falaise rocheuse instable avec faille vertical active à Saint Pancrasse. B. Nature du Versant de propagation de Saint Pancrasse avec blocs rocheux encastrés dans le sol

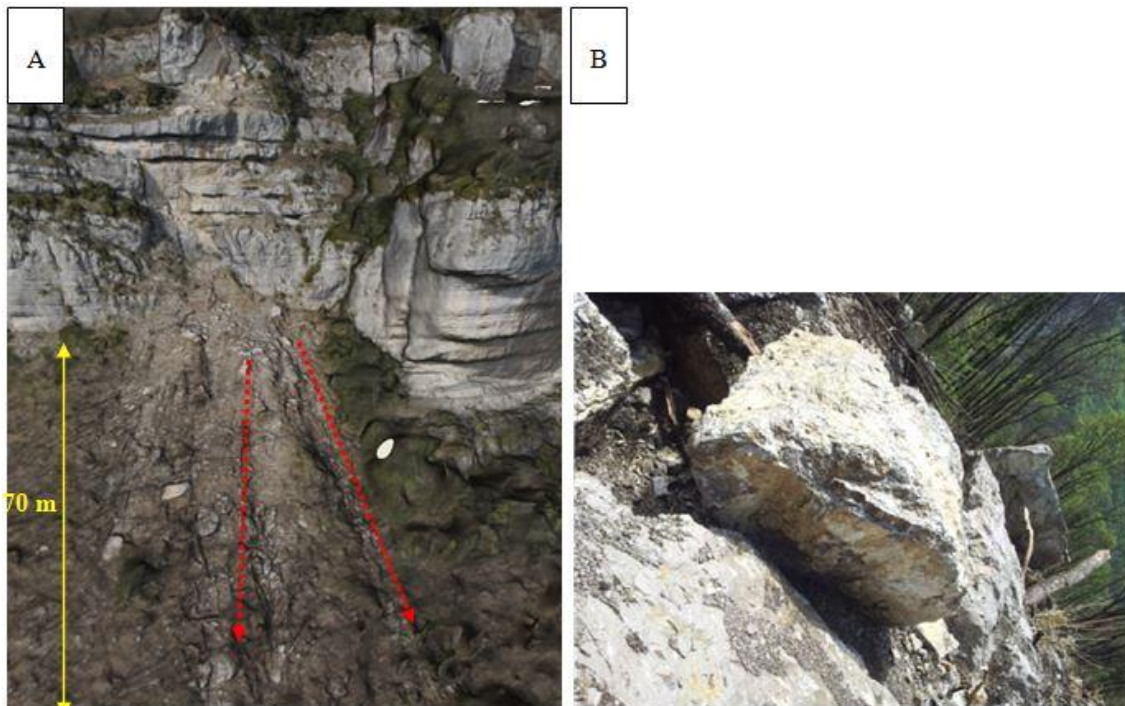


Figure 2.5. A. Vue depuis un drone des zones de départ et de propagation de l'éboulement de Saint Pancrasse. Les traits rouges représentent les deux directions principales de propagation observées sur le terrain. B. Forme caractéristique des blocs du dépôt

2.3. Eboulement de « Millau »

Cet éboulement a eu lieu en 2007 près de la ville de Millau dans le sud du Massif Central en France. Deux visites de terrain ont été effectuées durant la thèse avec comme objectifs : la reconnaissance du site et du dépôt (septembre 2012) et le relevé photogrammétrique pour la définition d'un modèle numérique de terrain 3D (avril 2013). Lors de la première campagne de reconnaissance, le volume rocheux effondré a été estimé à 1000 m^3 par analogie à la teinte de la matrice rocheuse (fraîche/ancienne) facilement observable à l'œil nu (représenté par des traits rouges sur la *Figure 2.6A*) puis validé par des techniques de reconstruction volumique

tridimensionnelle complexes pendant la deuxième campagne (voir section reconstruction numérique de l'évènement dans le chapitre modélisation numérique). La falaise rocheuse est composée de bancs calcaires d'environ un mètre d'épaisseur qui se sont désolidarisés d'une falaise quasi verticale sans basculer et qui se sont ensuite propagés sur un versant incliné. La pente le long de laquelle s'est propagé l'ensemble des blocs rocheux (*Figure 2.7A*) était légèrement recouverte de végétation avant l'éboulement. Le versant ne présentant pas de distorsions importantes dans sa topographie, plus précisément en ce qui concerne la direction perpendiculaire à la propagation, celui-ci a été initialement assimilé par trois plans de différentes tailles et inclinaisons. Le premier plan de faible longueur (2 m) mais fortement incliné (60° par rapport à l'horizontale) est situé au pied de la falaise. Le second plan qui constitue majoritairement la zone de propagation s'étend sur plus de 50 m et est incliné à environ 30° . Enfin la zone de propagation se termine en pente douce (environ 6° par rapport à l'horizontale) et s'étend jusqu'aux habitations.

Lors de la deuxième visite de terrain en avril 2013, il a été possible de corroborer ces informations par la réalisation d'un relevé topographique de type photogrammétrique où l'ensemble du site a été reconstruit en 3D à l'aide d'un drone (*Figure 2.9*).

Nous avons observé un dépôt principal d'environ 50 m de long et de 40 m de large réparti tout le long du versant incliné (*Figure 2.6B*). Des blocs épars se sont cependant dissociés de la masse principale sur des distances très importantes (supérieures à 70 m) et se sont arrêtés pour certains à proximité des habitations (bloc M1 sur la *Figure 2.6B*).

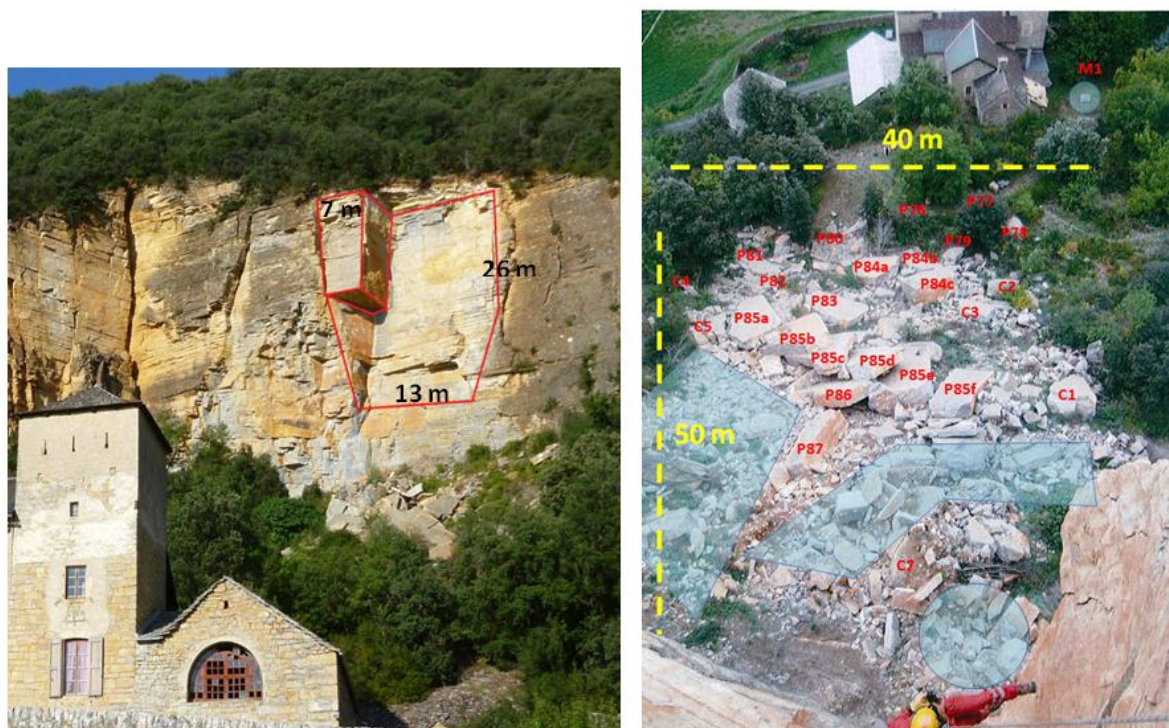


Figure 2.6. A. zone effondrée (en rouge) et géométrie de la falaise. B. dépôt final avec les principaux blocs repérés sur le terrain en Avril 2012 (en rouge)

Environ 30 blocs allant de 10 m^3 à 36 m^3 ont été identifiés à l'intérieur du dépôt principal grâce à des photographies aériennes prise de la falaise. Ils ont été repérés en utilisant un outil GPS au cours des visites de terrain (en rouge sur la *Figure 2.6B*). La taille, le volume et la position de chacun de ces blocs ont été soigneusement repérés et mesurés sur le terrain (*Tableau 2.1*). La

position de chaque bloc est définie dans le système de coordonnées international UTM (abscisse - ordonnée).

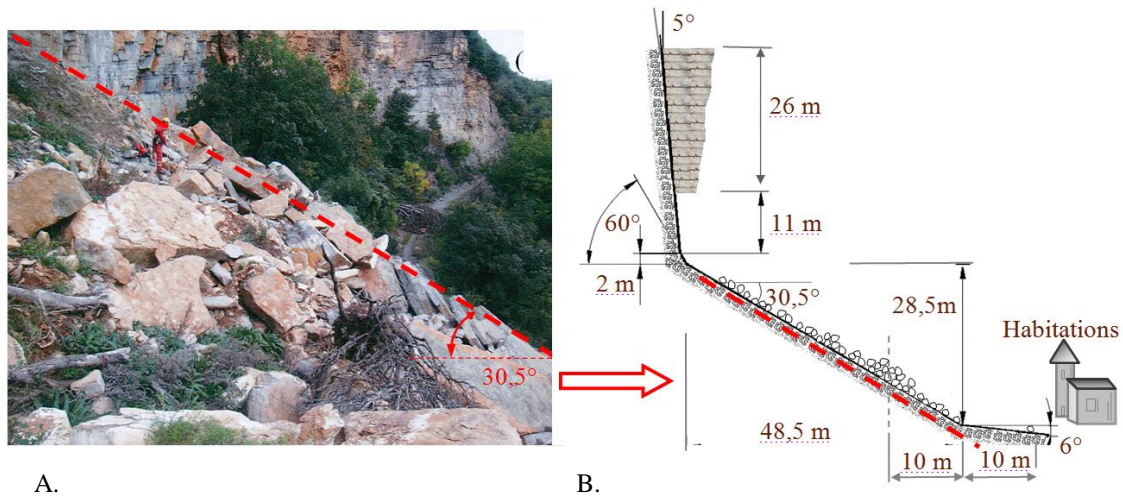


Figure 2.7. A. versant de propagation. B. Géométrie du site de Millau

D'après ces mesures, on observe que le volume des blocs les plus importants varie entre 25 et 35 m³. Nous avons également observé que la plupart des blocs ont des tailles très similaires, plus particulièrement ceux situés autour du point P85 (Figure 2.6B), avec des longueurs d'environ 6 m, des largeurs d'environ 3,5 m et des épaisseurs comprises entre 1 et 1,5 m. La similitude de l'épaisseur des blocs avec les bancs calcaires sur la falaise laisse penser qu'il existe une corrélation entre la façon dont se découpent les blocs et les surfaces de discontinuité. Le volume total des blocs qui ont été repérés est d'environ 783 m³, ce qui représente près de 80% du volume total estimé initialement. Le volume manquant correspond à des particules de plus petite taille qui n'ont pas pu être repérées sur le terrain lors des différentes campagnes de reconnaissance. Ces blocs sont situés en majorité dans les zones repérées en bleu sur la Figure 2.6B.

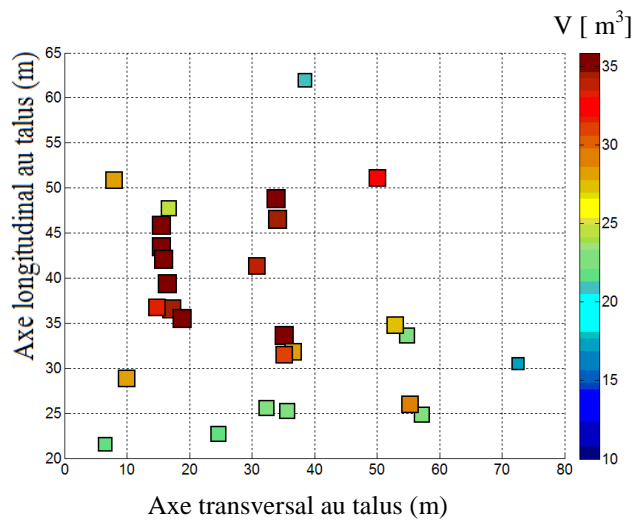


Figure 2.8. Position en coordonnées cartésiennes des blocs rocheux mesurés sur le terrain naturel. Le code couleur fait allusion à la taille des blocs. Seuls la position et le volume des blocs sont représentés sur ce schéma. La forme carrée des points est arbitraire et n'est aucunement liée à la forme des blocs

Par souci de simplicité, nous avons représenté sur la *Figure 2.8* les informations présentées dans le *Tableau 2.1* en coordonnées géographiques Easting-Northing. Ces informations sont la source principale de données dites « réelles » qui serviront de base dans la comparaison avec les résultats numériques des sections suivantes. Le code couleur représente le volume des blocs du plus petit (bleu) au plus grand (rouge).

Nom du bloc	Easting (m)	Northing (m)	Volume (m ³)
P76	511967,19	4893264,7	23,1
P77	511960,52	4893270,9	22,5
P78	511962,74	4893270,9	28,8
P79	511969,41	4893264,7	27,7
P80	511980,53	4893252,4	32,5
P81	511996,07	4893249,4	34,8
P82	511991,61	4893264,8	34,5
P83	511991,59	4893271	33,7
P84a	512000	4893274,9	35,2
P84b	511981,71	4893275,9	28,4
P84c	511982,71	4893276,9	31,2
P85a	512007	4893275,2	35,3
P85b	512005,68	4893277,2	34,7
P85c	512004,68	4893278,2	35,8
P85d	512002,68	4893280,2	35,9
P85e	512000,68	4893282,2	34,5
P85f	511998,68	4893282,2	35,7
P86	512002,67	4893283,3	31,5
P87	512002,65	4893292,6	28,1
C1	511987	4893290	21,6
C2	511979	4893282	22,3
C3	511982	4893283,5	22,9
C4	511993	4893263	21,3
C5	512007	4893273	25
C6	512016	4893275	27,9
C7	512001,65	4893300,6	21,5
M1	511950,52	4893257,9	17,4
Volume total			783,8

Tableau 2.1. Position et volume des blocs repérés sur le terrain

2.3.1. PHOTOGRAMMETRIE

La photogrammétrie, comme son nom l'indique, est basée sur l'analyse de données photographiques en 2D qui suppriment l'information de la profondeur, ce qui peut poser des problèmes pour la compréhension d'un phénomène dû au manque d'information dans une

direction. Le but de la photogrammétrie est de retrouver l'information 3D par l'analyse croisée de données en 2D. A priori, la photogrammétrie est une technique qui date du XIX siècle avec l'apparition de la photographie (Lowe, 2004) mais qui a été potentialisée ces dernières années notamment grâce à l'essor informatique et à l'apparition de nouvelles techniques de prise d'images comme les appareils de type UAV (appareils sans pilote tel que les drones, en anglais *Unmanned Aerial Vehicle*) où des applications très diverses en ingénierie et géologie (Bonilla-Sierra, 2013) mais aussi militaire (Lanzi, 2009) sont désormais très courantes. La *Figure 2.9* présente brièvement les étapes nécessaires à la reconstruction tridimensionnelle des falaises et des versants des sites étudiés. Pour les lecteurs intéressés par les procédures de croisement d'images et de données, l'auteur propose de se diriger vers des bibliographiques spécialisées sur ce sujet (Carbonnell, 1968; Lanzi, 2009; Haneberg, 2008; Lowe, 2004).

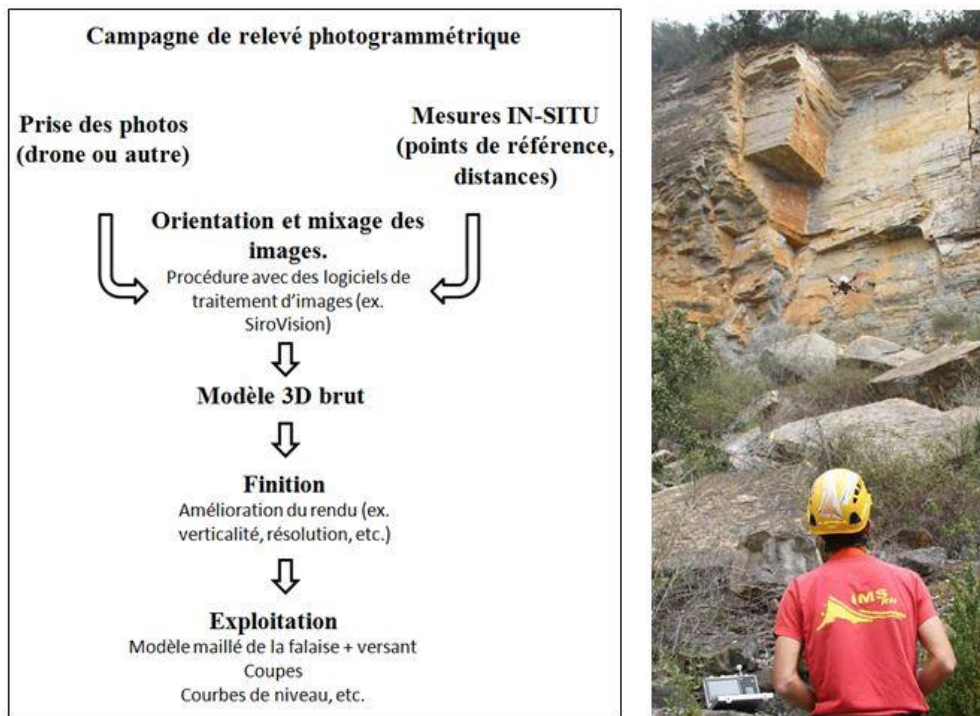


Figure 2.9. Etapes d'une étude par photogrammétrie appliquée à l'aléa éboulements rocheux. Relevé photogrammétrique de l'événement par utilisation d'un drone

2.3.2. OBSERVATIONS DE LA MATRICE ROCHEUSE ET DE L'ETAT DE FRACTURATION

Bien que nous nous soyons principalement focalisés sur la modélisation du phénomène de propagation des blocs rocheux, il reste important de comprendre quels sont les mécanismes initiateurs de la rupture puisqu'ils conditionnent la taille et la forme des blocs impliqués dans les phénomènes de propagation. Ces derniers ont en effet une importance capitale sur le mouvement des blocs et la distance de propagation (Cuervo et al., 2014a; Thoeni et al., 2013). Des modèles numériques complexes ont été développés ces dernières années dans le but de mieux comprendre les mécanismes de fissuration des massifs rocheux en présence de fractures préexistantes et qui pourraient conduire à une instabilité de l'ensemble (Scholtès and Donzé, 2012). Pour les différents sites visités, nous avons observé que la roche se fracture majoritairement dans les premiers instants, le long des familles de discontinuités présentes sur la falaise.

Dans le cas de Millau, trois familles de discontinuités ont été observées sur la falaise lors des visites de terrain. L'accès difficile à la zone encore instable de l'éboulement ne nous a pas permis de déterminer manuellement le pendage et la direction du pendage de ces familles directement sur la falaise. C'est pourquoi, nous avons choisi d'utiliser un logiciel spécialisé (SiroVision) pour la reconnaissance automatique des directions de failles. Le logiciel (SIROVISION Internet, 2014) se compose de deux applications: Siro3D pour la création 3-D du modèle numérique de terrain et SiroJoint pour la cartographie et l'analyse structurale.

Comme attendu, le logiciel a identifié 3 familles de discontinuités à partir d'une série de photographies de l'environnement du site. Ces surfaces sont représentées en rouge, vert et bleu sur la *Figure 2.10* et répertoriées de façon quantitative (pendage/direction de pendage) dans le *Tableau 2.2*. La première famille de diaclases (en rouge) est presque parallèle à la paroi de la falaise ce qui la rend particulièrement critique. La famille représentée en vert correspond à une famille de plans perpendiculaires à la face de la falaise et orientés verticalement. Enfin la famille représentée en bleu caractérise les plans de stratification de la roche – dont le pendage est perpendiculaire à la falaise et orienté horizontalement. La *Figure 2.10B* présente un modèle type fourni par Sirovision avec les surfaces articulaires et projections stéréographiques. Le volume de roche initialement défini sur la *Figure 2.6A* est présenté en contour blanc sur la *Figure 2.10B*.

Famille de discontinuité	Pendage (°)	Direction du pendage (°)
Rouge	85.7	241.2
Verte	79.9	356.6
Bleu	9.8	154.9

Tableau 2.2. Informations sur les principales familles de discontinuités de la falaise (précision d'environ $\pm 10\%$)

Certaines failles, verticales ou horizontales sont très exposées à la dégradation par altération chimique (ex. dissolution...), érosion ou par friction. Lorsqu'il existe un déplacement relatif important entre deux diaclases, la matrice rocheuse devient perméable ce qui facilite la dissolution au travers de ces failles et leur altération (*Figure 2.11*). Cela peut avoir plusieurs conséquences sur la propagation :

- Diminution de la résistance de la roche et augmentation de la susceptibilité à la fracturation de la roche en cours de propagation,
- Augmentation du nombre de blocs mis en mouvement,
- Création de contacts cohésifs entre deux blocs rigides.

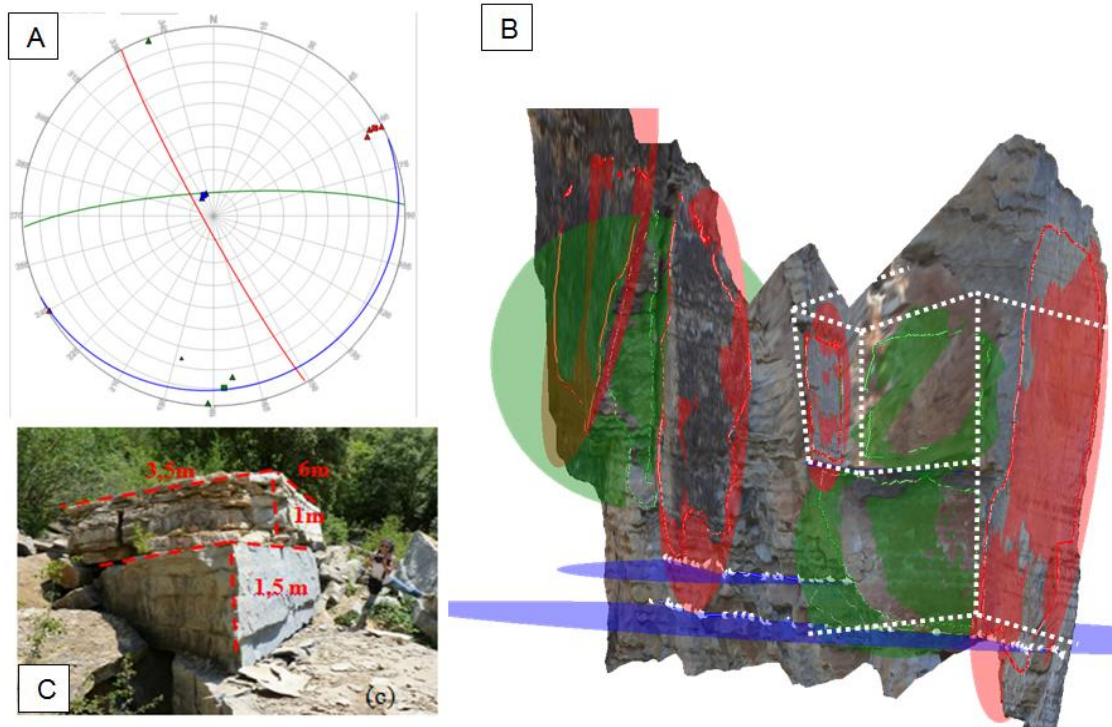


Figure 2.10. Projection stéréographique des surfaces de discontinuités en utilisant une projection de type Wulff. B: disques caractérisant l'orientation des différentes surfaces de discontinuités données par Sirovison. C: épaisseur caractéristique des blocs comme résultat de la famille de discontinuité représentée en bleu (bedding plane)

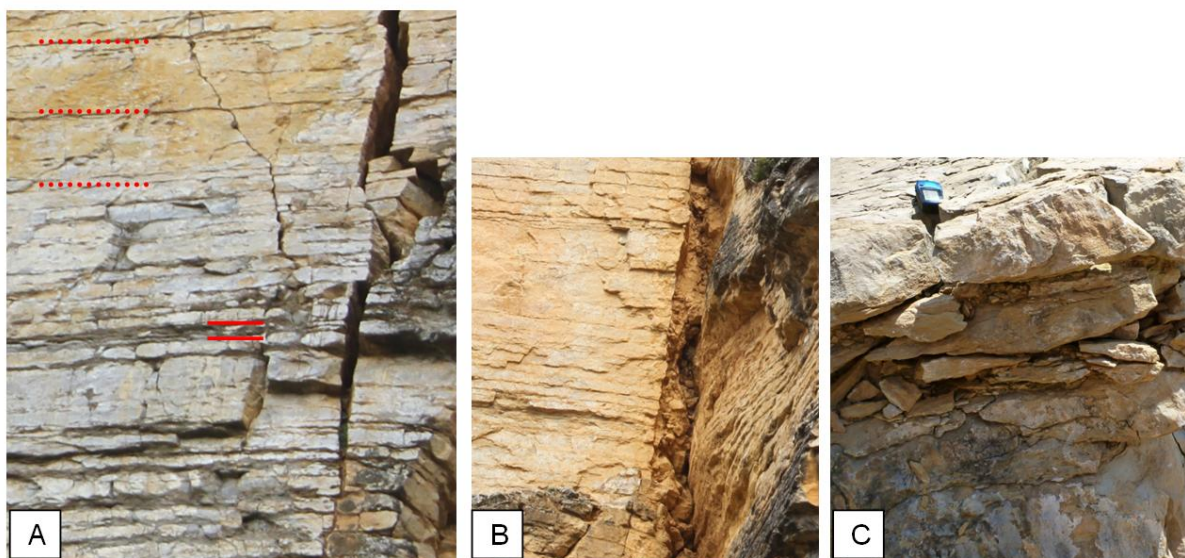


Figure 2.11. A. Plans de stratification définis par des bandes de matériaux altérés (traits rouges). B. Diaclase verticale remplie par un matériau altéré suite aux processus de dépôt. C. Faille horizontale de la matrice rocheuse très altérée et abondamment fracturée

2.4. Eboulement de « Perrière »

2.4.1. CONTEXTE

Le site dit de «Perrière» est situé dans le massif du Vercors en France, à proximité de la ville de Grenoble. Le site consiste en une falaise rocheuse très raide de 60 m de hauteur constituée de couches de calcaire du paléocène de 30 cm d'épaisseur environ. Ce site présente des signes d'instabilité récurrents comme en témoignent les dépôts successifs d'anciens éboulements et la présence de blocs rocheux en pied de falaise. Un merlon a été construit en 2007 pour assurer la sécurité des infrastructures à proximité : habitations et route départementale. En 2012, des mouvements significatifs de la falaise ont été mesurés par différents capteurs positionnés stratégiquement dans cette zone. Devant la possibilité d'un effondrement d'un pan important de falaise rocheuse, on peut s'interroger sur la capacité du merlon à contenir l'évènement reste posée.

La société IMSRN a été contactée par la Métropole de Grenoble pour quantifier le volume de masse instable et évaluer la capacité du merlon à faire face à un éventuel phénomène d'éboulement. Des analyses préliminaires sommaires laissent penser que la capacité du merlon à arrêter la masse instable identifiée est insuffisante et une recommandation de rehaussement du merlon a été donnée. Les questions en suspens auxquelles doit répondre la modélisation numérique sont : l'étendue et le volume de la zone de dépôt, le taux de remplissage de la fosse, le nombre de blocs susceptibles de franchir l'ouvrage actuel, la répartition des énergies d'impact sur l'ouvrage, la hauteur optimale en termes de coût et de sécurisation.

2.4.2. DESCRIPTION DU SITE

De façon générale, l'environnement du site comporte (Figure 2.12 et Figure 2.13) :

- Une falaise d'une hauteur totale d'environ 60 m,
- Une zone instable (représentée en jaune sur la *Figure 2.12*) d'environ 38 m de hauteur et facilement identifiable par deux diaclases ouvertes (en rouge sur la *Figure 2.13*),
- La fosse de réception du merlon, d'une largeur moyenne de 27 m au niveau des profils 1, 2 et 3 de la *Figure 2.12*,
- Le merlon proprement dit, d'une hauteur de 3 et d'une largeur en tête de 1,5 m (en blanc sur la *Figure 2.12*),
- Une voie de circulation plane d'environ 22 m de longueur permettant la desserte des habitations,
- La zone d'habitation à proximité du merlon de protection et la zone résidentielle.

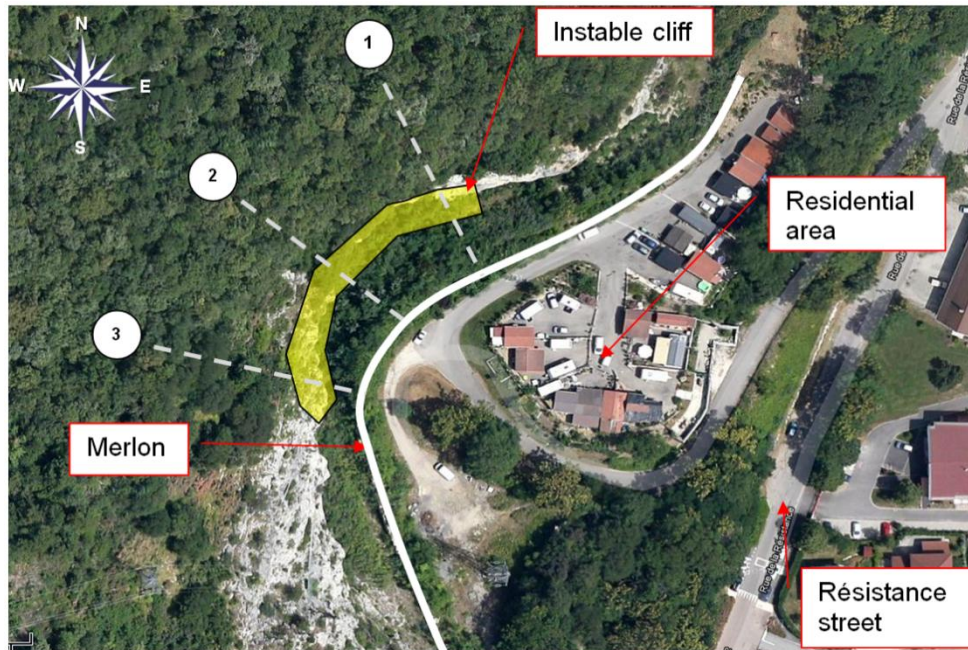


Figure 2.12. Vue aérienne du site

Profile	L (m)	L' (m)	H (m)	H' (m)	h (m)	d (m)
1	27	9,6	37	18	3,1	3
2	30,5	8,3	37	19	3,1	3
3	27	7,4	37	19	2,9	3

Tableau 2.3. Géométrie du site sur les trois profils étudiés

Une étude géologique de la falaise a été réalisée en 2013 afin d'évaluer la stabilité de ce massif. Un dièdre rocheux potentiellement instable entouré par deux failles actives F1 et F2 (dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 2.4) a été identifié avec un volume initialement estimé à 2500 m³. Les deux plans définissant les rives du dièdre se rejoignent au niveau du pied de la masse, créant une sorte d'entonnoir incliné à 60°, canalisant grossièrement les matériaux en cas de rupture. L'état de fragmentation de la falaise et les blocs déjà présents dans la fosse au pied de la falaise témoignent des événements antérieurs permettant d'estimer que le volume moyen des blocs lors d'un éventuel éboulement se situe aux alentours de 2 m³ (Figure 2.14). Ce volume limite potentiellement la hauteur utile du merlon si l'on considère qu'un bloc peut franchir le merlon lorsque son centre de masse dépasse la hauteur de celui-ci.

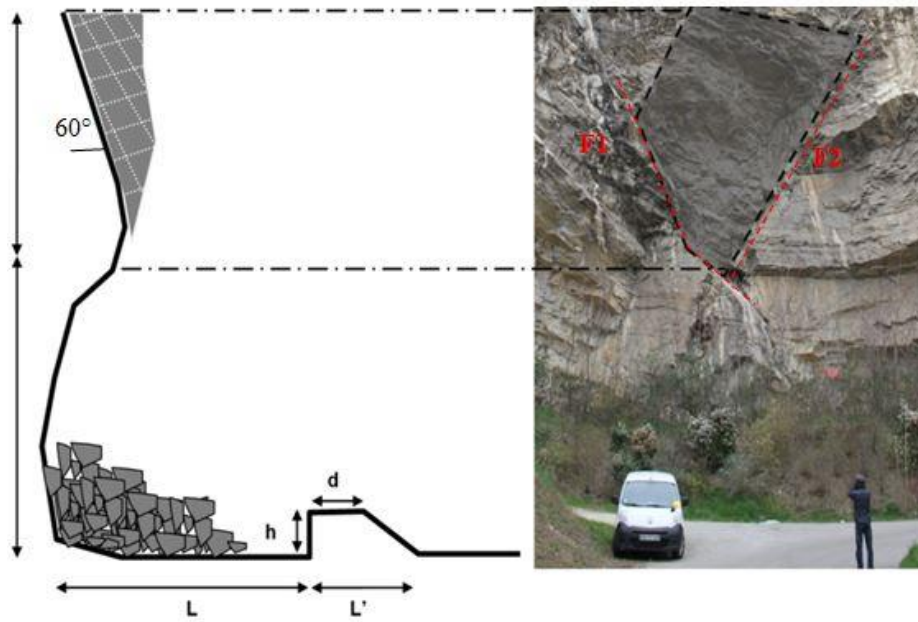


Figure 2.13. Profil et vue de face de la zone instable

Discontinuité	Direction et pendage
F1	1°N/66°
F2	105°N/76°

Tableau 2.4. Caractéristiques des failles identifiées sur la falaise



Figure 2.14. Photo d'un ancien éboulement de petit volume (dépôt d'environ 200 m³)

2.5. Bilan et discussion

Les observations sur sites que nous avons effectuées nous ont permis d'obtenir des informations capitales pour la modélisation numérique concernant les blocs rocheux et le versant de propagation:

2.5.1. LES BLOCS ROCHEUX

Nous avons observé que plus les massifs rocheux sont fracturés, plus le nombre de blocs présent dans l'événement est important. Cependant, la forme et la taille des blocs sont variables et dépendent principalement de l'état de fracturation des massifs rocheux. Ce phénomène a été particulièrement observé sur le site de Millau où les blocs rocheux sur le dépôt avaient des épaisseurs similaires correspondant également à la stratigraphie observée sur la falaise naturelle. De ceci nous en déduisons que les pans rocheux ont tendance à se fracturer principalement en fonction des familles de discontinuités naturelles et que la forme des blocs n'est pas une caractéristique arbitraire.

La propagation de la masse rocheuse peut dans ces conditions se résumer à une interaction complexe entre les blocs et entre les blocs et le sol. Dans la majorité des cas, la fracturation de la masse rocheuse a lieu au début du phénomène de rupture suivant des familles de discontinuités. Cependant, nous savons d'après la littérature que la fracturation est un phénomène aussi courant en phase de propagation sous certaines conditions et que des recherches importantes se font actuellement sur ce sujet (Ruiz, 2013). Cependant et pour les sites visités, nous considérons que de tels phénomènes de fracturation n'ont pas eu un effet considérable sur la propagation.

En conclusion, nous retiendrons que l'état de fracturation et la lithologie de la falaise rocheuse sont les éléments les plus importants dans la définition de la forme et de la taille des blocs lors d'un phénomène de propagation.

2.5.2. LE VERSANT DE PROPAGATION

En règle générale, la géométrie du support conditionne la direction de propagation et constitue un des paramètres les plus importants dans la dynamique des blocs rocheux en mouvement. Même s'il est difficile d'appréhender sur le terrain l'importance de la géométrie du versant dans la propagation des blocs (elle est souvent cachée par la végétation ou par des éboulements anciens), nous savons très bien d'après la littérature et notre expérience qu'il existe une relation partielle entre la propagation et la géométrie du versant et que ce dernier est un critère important à considérer pour comprendre le phénomène de propagation. Ce que nous avons trouvé particulièrement intéressant sur certains sites était la capacité de certains versants à se déformer et à se plastifier au point de permettre l'enfoncement des blocs dans le sol et l'arrêt total de certains blocs sur de très petites distances (par exemple sur le site de Saint Pancrasse). L'effet de la végétation sur la propagation a aussi été observé sur certains sites (site de Saint Pancrasse). Cependant, et vis-à-vis des volumes d'éboulements visités (entre 1000 et 2500 m³) et des géométries des arbres rencontrés sur ces sites (diamètres inférieurs à 30 cm), nous considérons que la forêt a eu, sur ces sites, une influence mineure dans le phénomène de propagation sans pour autant négliger l'influence que cela peut signifier dans d'autres configurations.

Le *Tableau 2.5* résume les caractéristiques les plus importantes à retenir pour chacun des sites visités et présentés dans cette section.

En conclusion, et d'après ces observations sur site réel, un modèle numérique réaliste pour la modélisation et la simulation de ces éboulements rocheux doit au moins être en mesure de :

- Prendre en compte la forme réelle des blocs à partir des études phénoménologiques de la rupture du massif rocheux,
- Générer des surfaces de propagation réalistes,
- Utiliser des lois rhéologiques d'interaction adaptées en fonction de la nature du sol (particulièrement pour les sols meubles).

Nom	Date de l'évènement	Situation géographique (GPS)	Volume total (m ³)	Phénomène de rupture déclencheur	Nombre de familles de rupture sur la falaise	Type de roche	Matériau du versant de propagation
Saint Pancrasse	30/11/2012	45°17'3''N 5°51'21''E	250	Chute. propagation de faille secondaire verticale	2 primaires (persistantes) 1 secondaire	Calcaire et marne	Sol altéré. Marne
Millau	09/2007	44°11'33'' N 3°9'0.7''E	1000	Glissement sur surface vertical	3	calcaire	Sol dur – roche altérée
Perrières	Prédiction	45°10'42'' N 5°41'4''E	2500	Rupture en dièdre	2	calcaire	éboulis

Tableau 2.5. Caractéristiques principales des éboulements retenus pour la modélisation discrète

CHAPITRE 3: DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DISCRET POUR LA MODELISATION DE LA PROPAGATION DE BLOCS ROCHEUX

3.1. Introduction

Les éboulements rocheux sont, comme présentés dans le chapitre 1, des phénomènes très complexes qui impliquent une large gamme de volumes suivant les phénomènes de rupture rencontrés. Pour les éboulements impliquant de grands volumes de masses rocheuses (supérieurs à $100\,000\text{ m}^3$), les modèles numériques de type continu sont bien adaptés et des rhéologies de type « fluide à seuil » suffisent généralement pour la modélisation de ces événements. Pour les chutes de blocs isolés, il existe une grande expertise dans l'ingénierie sur la modélisation trajectographique. Cependant, pour les éboulements rocheux de volume intermédiaire (de l'ordre de quelques dizaines, voire centaines de m^3), les hypothèses faites dans les approches continues et trajectographiques s'avèrent peu réalistes. En effet, il devient difficile dans ce cas d'assimiler le comportement de la masse à celui d'un fluide à cause du faible nombre de blocs. D'un autre côté, il est également difficile de considérer ces événements comme des chutes de blocs isolés compte tenu des interactions multiples au sein de la masse rocheuse lors de la propagation. Les modèles basés sur des approches discrètes rendent compte de façon naturelle de la dynamique de tous les mouvements gravitaires allant de la chute de blocs isolés aux avalanches de grande ampleur. Ceci se paye au prix de temps de calculs significativement plus longs que ceux habituellement observés avec les approches continues et trajectographiques.

Le modèle discret que nous allons décrire dans ce chapitre est classé parmi les approches déterministes dans la mesure où deux calculs avec les mêmes conditions initiales donneront des résultats identiques sur un même ordinateur. Cet aspect peut être sujet à des critiques car il devient habituel aujourd'hui d'introduire de l'aléa sur les rebonds en trajectographie (ceci est notamment dû à l'hypothèse de blocs sphériques). Bien que nous ayons conscience de ce manque, il a été choisi de ne pas introduire explicitement d'aléa dans la modélisation de ce travail de thèse. Il n'y a pourtant pas de difficulté technique à tenir compte d'effets stochastiques sur la direction des forces de collision ou même sur les paramètres d'interactions, mais ceci introduirait des paramètres supplémentaires alors que nous cherchons à réduire leur nombre. De plus, les temps de calcul – plutôt long avec la DEM – permettent difficilement d'envisager une répétition des simulations. En outre, il a été démontré dernièrement (Richefeu et al., 2012) que l'erreur liée à l'incertitude des phénomènes multiples d'interaction diminuait avec le nombre de blocs en interaction. D'autres caractéristiques comme la forme des blocs et la morphologie du versant de propagation deviennent alors plus sensibles. Dès lors, les limites de cette approche – potentiellement plus riche que les approches continues et de trajectographie – doivent être mises en question. Les premiers facteurs limitant sont liés au temps de calcul et aux besoins en stockage qui peuvent assez vite devenir prohibitifs, et donc ingérables. Les autres facteurs limitant sont plus liés à la physique mise en œuvre. Le caractère déterministe, par exemple, doit certainement devenir indispensable à mesure que le nombre de blocs (et donc d'interactions) diminue.

Nous avons choisi dans ce travail de nous appuyer sur le modèle numérique discret développé par (Richefeu et al., 2012) et validé par comparaison à des expériences de laboratoire à échelle réduite (Mollon et al., 2012). L'enjeu avec la présente thèse était d'appliquer le même type de modélisation à des cas réels, donc avec des géométries plus réalistes à échelle réelle.

Après une présentation rapide des outils numériques, le reste du chapitre est consacré à la description détaillée des spécificités de la méthode utilisée. Il s'agit avant tout de la forme des particules qui joue un rôle majeur dans la problématique de propagation de blocs rocheux. L'initiation ou la cause de la déstabilisation en elle-même n'est pas traitée dans ce manuscrit, mais le fractionnement de la masse instable en familles des discontinuités peut avoir des conséquences très significatives sur la granularité des blocs en mouvement et donc sur leur propagation. Les autres aspects géométriques de la modélisation portent sur la description du versant de propagation. L'intégration du mouvement des blocs n'est pas vraiment classique et est décrite en détail, ainsi que le calcul effectif des propriétés d'inertie des blocs. En plus d'avoir établi la modélisation numérique autour d'aspects géométriques, la dissipation de l'énergie des blocs lors de collisions a fait l'objet d'un soin particulier. Pour finir, la question de la construction de la liste de voisins (problématique numérique essentielle pour obtenir des temps de calcul exploitables) est aussi abordée.

3.2. Outils numériques

La méthode des éléments discrets (notée DEM dans la suite pour *Discrete Element Method*) discrétise un milieu en éléments rigides (blocs) indépendants qui ont leur propre mouvement et qui interagissent entre eux. Pour les applications de mouvements gravitaires, la force résultante sur chacun des blocs provient des interactions (contact, frottement, etc.) d'une part, et de l'accélération gravitaire d'autre part. Les interactions sont données par des lois de forces qui expriment explicitement une force en fonction de variables locales, c'est-à-dire définies au niveau des points d'interaction. Les propriétés mécaniques de ces lois de force dépendent des propriétés des objets en interaction (matériaux, rugosité des surfaces, endommagement locaux, etc.). Une caractéristique importante des collisions dans les applications de mouvements gravitaires porte sur la dissipation des différentes énergies qui doit être maîtrisée au mieux dans la modélisation.

Il est courant d'utiliser des éléments sphériques avec la DEM. Ceci s'explique par l'extrême simplification induite par cette forme notamment sur la détection des contacts, la définition des variables locales (interpénétration, vitesses relatives, etc.), et les propriétés d'inerties. Toutefois, en anticipant le rôle crucial de la forme des blocs rocheux sur leur propagation, il a été jugé indispensable de considérer explicitement des géométries plus complexes pouvant être issues du découpage de la masse instable suivant des plans de discontinuités prédéfinies. Les formes qui en résultent sont alors des polyèdres, et certains d'entre eux peuvent présenter des surfaces non convexes et même des évidements provenant de la surface de la masse initiale. Parmi les méthodes existantes pour tenir compte de formes complexes, nous avons retenu celles des sphéro-polyèdres qui peuvent être vu comme des polyèdres aux bords arrondis. Une vision plus mathématique est de les décrire comme la somme de *Minkowski* d'un polyèdre et d'une sphère de rayon R ; on parlera alors du *rayon de Minkowski* des sphéro-polyèdres. En plus de gérer intrinsèquement les formes convexes, concaves, avec ou sans évidement, le rayon des arrondis au niveau des arrêtes et des sommets pourrait rendre compte d'un degré d'usure par abrasion, phénomène qui peut également avoir des conséquences non négligeables sur la propagation des blocs rocheux. Un autre avantage non négligeable des sphéro-polyèdres concerne la définition des normales aux contacts définies de façon unique, c'est-à-dire sans ambiguïté.

L'utilisation de formes complexes a également des répercussions directes sur les critères de proximités (recherche des voisins) et sur la détection des contacts. La mise en mémoire du voisinage immédiat de chacun des blocs est une solution évidente et courante pour optimiser les

temps de calcul DEM. Avec des sphéro-polyèdres, ceci devient encore plus crucial car le nombre de contacts par bloc devient plus important. Surestimer le nombre de voisins a un coût significatif sur la durée des simulations. Il est donc nécessaire de déployer des stratégies pour optimiser la recherche de voisins. Ces stratégies sont souvent adaptées de l'univers des jeux vidéo 3D qui font face à des problématiques similaires.

DEMbox est un code de calcul développé en C++ par Vincent Richefeu au Laboratoire 3SR, qui utilise la méthode des éléments discrets classiques (Cundall and Strack, 1979) et sert, dans ces travaux, de plateforme expérimentale de calculs scientifiques. L'objectif à terme est d'intégrer les modèles et concepts développés dans une plateforme plus large dédiée aux ingénieurs pour faire de la prédiction de zones de propagation ou encore du dimensionnement d'ouvrages de protection. Cette plateforme (projet Geotek IMSRN, études et développements logiciels) est développée et sera maintenue par *YeastLab* de l'Institut Carnot LSI sous la demande (et le financement) de IMSRN. Elle contient actuellement un module de trajectographie (intégration du code *Kayass3D* réécrit en C++) et les développements de cette thèse sont en cours d'implémentation. Pour la Société IMSRN, l'apport se fera à travers (1) des évolutions en terme de fonctionnalités des logiciels existants, (2) un support continu sur les logiciels, (3) une intégration des travaux des thèses CIFRE, (4) une sécurité concernant l'accès aux données, et (5) un partage des applications et des données aux autres régions et clients.

Outre le module de calcul de *DEMbox*, différents outils ou modules ont été utilisés. Il s'agit du module de découpage *carver* qui permet de définir les plans de discontinuités au sein du volume initial qui sera déstabilisé par gravité; du module *stl2dem* qui convertit un modèle de terrain au format STL en sphéro-polyèdres au format *DEMbox*; de l'outil de visualisation *visual* qui permet de visionner les films 3D des événements simulés et d'analyser graphiquement les résultats. Les sections suivantes ont pour objectif de présenter chacune de ces étapes en mettant l'accent sur les développements originaux.

3.3. Spécificités de la méthode utilisée

3.3.1. FORME DES PARTICULES

Nous avons pris le parti de rester fidèle aux géométries des blocs dans notre modélisation et d'utiliser pour cela la méthode des sphéro-polyèdres. Le principe est similaire à celui des « clumps » où des sphères sont assemblées pour former un objet rigide de forme complexe. Avec les sphéro-polyèdres, en plus des sphères, deux formes supplémentaires sont assemblées : des cylindres pour former les arrêtes et des polygones plans pour former les faces. Les sommets sont formés par des sphères. La *Figure 3.1* donne un aperçu d'un sphéro-polyèdre représentant une lettre M qui a la particularité d'être non-convexe.

Un intérêt majeur de cette approche réside dans la détermination des points de contact ainsi que des repères locaux associés. En effet, toutes les configurations de contact entre deux sphéro-polyèdres peuvent être ramenées à un jeu de seulement quatre configurations types de contacts élémentaires : sommet-sommet, sommet-arrête, sommet-face et arrête-arrête (*Figure 3.2*).

On pourra remarquer, à titre d'exemple, que la configuration de contact face-face n'est pas une configuration élémentaire en ce sens qu'elle peut elle-même être décrite comme une combinaison des quatre types de contacts élémentaires définis précédemment. Il pourra s'agir de plusieurs sommet-face ou bien d'une combinaison d'arrête-face et de sommet-face. La *Figure 3.3*

présente un certain nombre (non exhaustif) de configurations de contact entre sphéro-polyèdres. Comme précisé précédemment, des géométries concaves et même ajourées (des maillons de chaîne par exemple) peuvent parfaitement être modélisées avec cette technique. Un avantage supplémentaire des sphéro-polyèdres vient du fait que les normales aux contacts sont obtenues de façon unique, alors qu'avec des polyèdres classiques il existerait une multitude de directions possibles pour les contacts ne faisant pas intervenir de partie plane (sommet-sommet ou sommet-arrête par exemple).

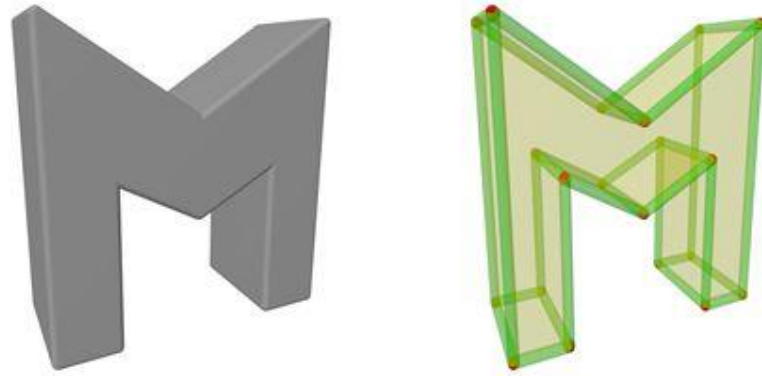


Figure 3.1. Modélisation d'un bloc en forme de M avec DEMbox. L'objet rigide est constitué de formes simples : des sphères (rouges) pour les sommets, des cylindres (verts) pour les arrêtes et des polygones 3D (jaunes) pour les faces

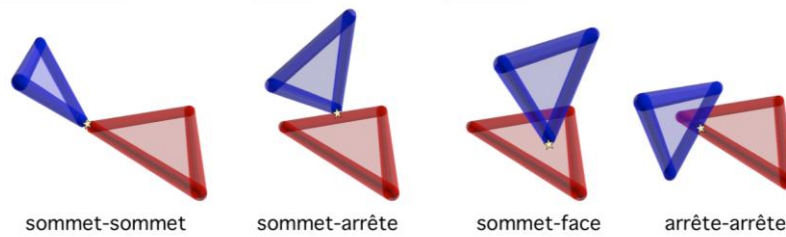


Figure 3.2. Types de contacts élémentaires possibles dans DEMbox entre deux solides

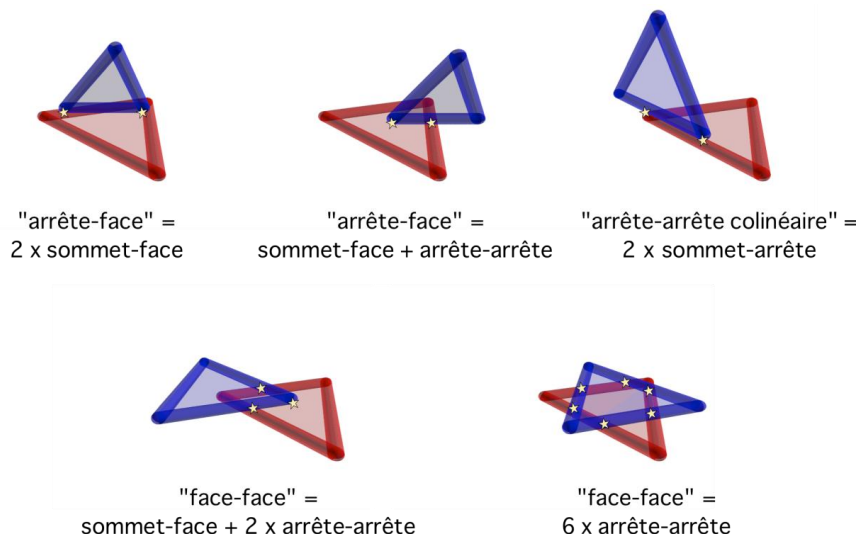


Figure 3.3. Contacts résultant de différentes combinaisons de contacts élémentaires

3.3.2. FRACTIONNEMENT D'UN BLOC EN FAMILLE DE DISCONTINUITES

Des avalanches de petites briques parallélépipédiques ont déjà été simulées dans le cadre du projet européen MASSA (Scavia et al., 2010). Il a ainsi été possible de vérifier les capacités de cette méthode dans la représentation de formes anguleuses et leur influence dans des éboulements rocheux (voir *section 4.3* du *Chapitre 4*). Cependant, notre objectif porte à présent sur la prise en compte de blocs de tailles et de formes réalistes issues de familles de discontinuités (configurations quelques fois complexes) au sein de massifs rocheux. Une procédure numérique permettant de découper un volume tridimensionnel de type sphéro-polyèdre suivant différentes familles de plans a été développée. Cette procédure, purement géométrique, ne sera pas détaillée ici. Elle consiste à fractionner un volume de forme quelconque suivant plusieurs familles de plans, successivement. La *Figure 3.4* donne une illustration du principe de la procédure implémentée dans le code *carver*. Il est important d'avoir en tête qu'une famille de discontinuités est définie par : (1) un vecteur normal commun à tous les plans de discontinuités, (2) un point appartenant au premier plan, (3) un point appartenant au dernier plan, et (4) la distance (constante) entre les plans.

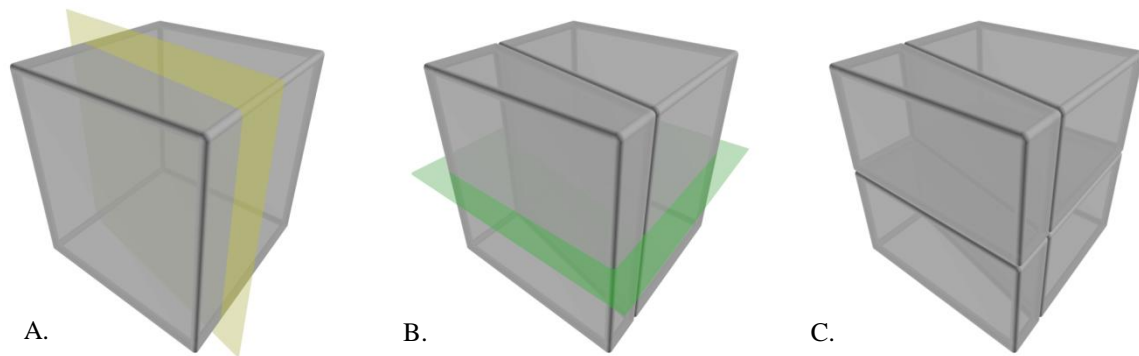


Figure 3.4. Illustration schématique de la procédure de découpage suivant des familles de plans de discontinuités. Le volume initial, représenté ici par un cube, est un sphéro-polyèdre. A. Celui-ci sera découpé suivant la première famille de discontinuités (un seul plan jaune est représenté). B. Les blocs résultants seront chacun découpés suivant la famille suivante de discontinuités (un seul plan vert est représenté). C. Lorsque toutes les coupes sont réalisées, il en résulte un assemblage de blocs qui pourront interagir lorsqu'ils seront déstabilisés par la gravité

Le choix d'un fractionnement suivant des plans a été retenu car les discontinuités sur un massif rocheux sont souvent considérées comme des surfaces planes qui peuvent être continues ou discontinues selon la nature de la discontinuité et de la roche (*Chapitre 2*). Les plans de discontinuités sont ici considérés d'extension infinie, ce qui implique que les fractionnements sont tous débouchant.

Cette procédure permet d'obtenir des géométries de blocs rocheux réalistes à partir d'un modèle numérique 3D du volume instable (au format STL par exemple) et d'un modèle stéréographique détaillé issu d'une reconnaissance du terrain et/ou de bases de données géologiques. Plusieurs applications sur site réelle sont détaillées dans le *Chapitre 5*.

3.3.3. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

La topologie du terrain peut être relevée par différentes méthodes (LIDAR, Stéréocorrélation, etc.). Un tel relevé sur le terrain résulte en général en un maillage de triangles. Du point de vue de la méthode des éléments discrets implémentée dans DEMbox, chaque triangle est un

sphéro-polyèdre à trois sommets dont les degrés de libertés sont bloqués. Tous les avantages apportés par les sphéro-polyèdres sont donc valables pour la modélisation du terrain et de ses interactions avec les blocs mobiles. Cependant, la question de l’influence de la finesse du maillage reste entière, même si l’utilisation des rayons de Minkowski lisse le relief.

La *Figure 3.5* donne une illustration d’un terrain constitué de triangles. Dans cet exemple, le terrain a été relevé par la technique du lidar et différents traitements numériques ont permis d’obtenir une triangulation avec la finesse désirée. Toute autre technique permettant de « scanner » le relief comme la photogrammétrie (*Chapitre 2*) peut, bien évidemment, être utilisée. La triangulation résultante – sous forme d’un fichier au format standard STL – est convertie en sphéro-polyèdres, exploitables par DEMbox, en utilisant le module « *Stl2dem* » développé pour les besoins de la thèse.

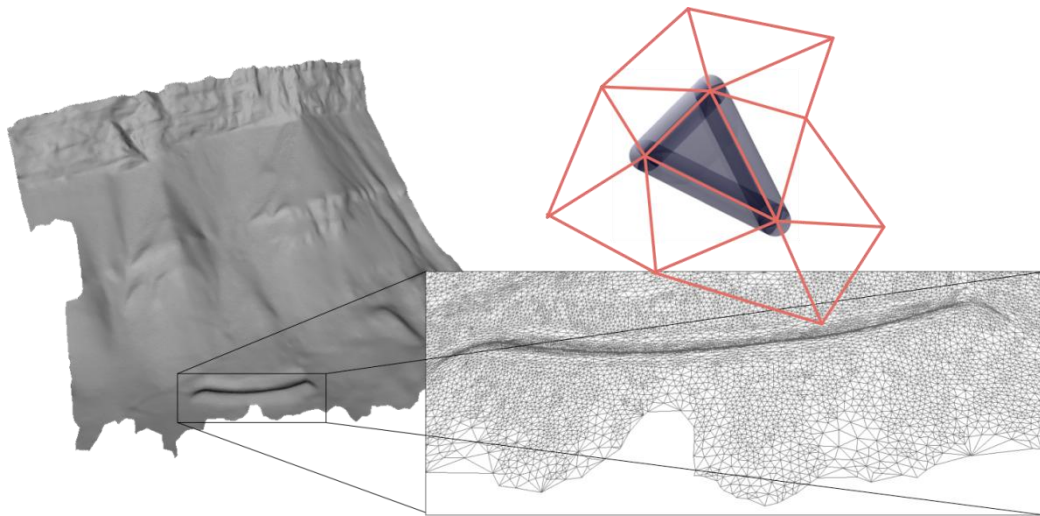


Figure 3.5. Modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation de la propagation d’une avalanche rocheuse déclenchée artificiellement dans le cadre d’une purge préventive d’une écaille rocheuse instable du Néron près de Grenoble en 2011. Image tirée de (Bottelin et al., 2014)

3.3.4. PROPRIETES D’INERTIE

Les propriétés d’inertie sont absolument nécessaires dans le calcul de la dynamique de chacun des blocs. Il s’agit des centres de masse, des masses, des directions principales d’inerties et des inerties correspondantes (valeurs propres). Afin de calculer ces propriétés pour des blocs pouvant avoir des géométries quelconques (concaves, convexes, ajourées), nous avons choisi d’utiliser une technique d’intégration numérique. Il s’agit de la méthode de Monte Carlo (MC) dont le principe de base s’appuie sur l’approximation de l’intégrale d’une fonction f sur un volume V :

$$\int_V f dV \approx V \langle f \rangle \pm \sqrt{\frac{\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2}{N}} \quad [2]$$

Dans cette expression le symbole $\langle f \rangle$ correspond à une moyenne arithmétique sur un échantillon de N points. On comprend alors aisément que l’estimation sera d’autant plus précise que le nombre de points échantillonnés est élevé. Une façon d’optimiser la vitesse de convergence du calcul intégral consiste à générer l’échantillon de points de façon semi-aléatoire à l’intérieur du volume d’intégration. Nous avons choisi pour cela de générer une séquence semi-aléatoire de Sobol

(voir Numerical Recipes in C++) de positions à l'intérieur d'une boîte de volume¹ V^{AABB} entourant, au plus près, le volume V du bloc. À chaque position \mathbf{x} , une fonction $\varphi(\mathbf{x})$ est définie telle que $\varphi(\mathbf{x}) = 1$ si $\mathbf{x} \in V$, et $\varphi(\mathbf{x}) = 0$ dans le cas contraire. En pratique, cette procédure est appliquée au niveau des sommets (sphères), des arêtes (cylindre) et des faces (polygone 3D épais) de façon assez triviale, puis sur le polyèdre central (sans rayon de Minkowski) avec un algorithme basé sur la parité du nombre n_i d'intersection d'un rayon semi-infini partant du point \mathbf{x} . Celui-ci est à l'intérieur du polyèdre si n_i est impair, et à l'extérieur si n_i est pair (l'algorithme est valide pour des géométries non convexes, avec ou sans évidence). Finalement et en termes plus formels :

$$\varphi(\mathbf{x}) = \sum_{\text{Sommets}} \varphi_{\text{sphère}}(\mathbf{x}) + \sum_{\text{Arêtes}} \varphi_{\text{cylindre}}(\mathbf{x}) + \sum_{\text{Faces}} \varphi_{\text{polygone}}(\mathbf{x}) + \varphi_{\text{intérieur}}(\mathbf{x}) \quad [3]$$

Il devient alors aisé d'intégrer numériquement toute quantité sur le volume V^{AABB} en utilisant la formule [9]. Ainsi, le volume d'un bloc sera déterminé à l'aide des formules suivantes :

$$V = \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) dV \approx \langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle V^{AABB} \quad [4]$$

En faisant l'hypothèse d'une masse volumique ρ uniformément répartie, la masse d'un sphéro-polyèdre est $m = \rho V$, et son centre d'inertie est obtenu par intégration numériquement en utilisant la relation suivante :

$$\mathbf{x}_G = \frac{1}{V} \int_{V^{AABB}} \mathbf{x} \varphi(\mathbf{x}) dV \approx \frac{\langle \mathbf{x} \varphi(\mathbf{x}) \rangle V^{AABB}}{V} = \frac{\langle \mathbf{x} \varphi(\mathbf{x}) \rangle}{\langle \varphi(\mathbf{x}) \rangle} \quad [5]$$

La matrice d'inertie est calculée par rapport au point \mathbf{x}_G :

$$\underline{\underline{\mathbf{I}}}(G) = \rho \begin{pmatrix} \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta y^2 + \delta z^2) dV & - \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta x \delta y) dV & - \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta x \delta z) dV \\ & \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta x^2 + \delta z^2) dV & - \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta y \delta z) dV \\ \text{(Sym.)} & & \int_{V^{AABB}} \varphi(\mathbf{x}) (\delta x^2 + \delta y^2) dV \end{pmatrix} \quad [6]$$

Où $(\delta x, \delta y, \delta z)^T = \mathbf{x} - \mathbf{x}_G$. L'intégration numérique est réalisée comme suit :

$$\underline{\underline{\mathbf{I}}}(G) = \frac{m V^{AABB}}{V} \begin{pmatrix} \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta y^2 + \delta z^2) \rangle & - \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta x \delta y) \rangle & - \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta x \delta z) \rangle \\ & \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta x^2 + \delta z^2) \rangle & - \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta y \delta z) \rangle \\ \text{(Sym.)} & & \langle \varphi(\mathbf{x}) (\delta x^2 + \delta y^2) \rangle \end{pmatrix} \quad [7]$$

Afin d'économiser le l'espace mémoire et du temps de calcul, seules les valeurs propres extraites de cette matrice seront stockées sous la forme I_1/m , I_2/m et I_3/m . Les positions des sommets sont exprimées dans le *repère propre* donné par les vecteurs propres de la matrice

¹ Les axes de cette boîte sont alignés avec les axes du repère global, d'où leur appellation AABB pour « Axis Aligned Bounding Box »

² À ce propos, des études approfondies sur des phénomènes tels que la fracturation de blocs rocheux en cours de propagation (Ruiz, 2013) et de l'interaction d'un bloc sur sol meuble (Lingran Zhang, 2015) sont en développement. Ces recherches montrent la complexité de ces interactions et la relative méconnaissance que l'on possède aujourd'hui des mécanismes dissipatifs mis en jeu lors des

d'inertie, par rapport au centre de masse du sphéro-polyèdre. La position et l'orientation de celui-ci seront ainsi définies.

L'utilisation de formes régulières est parfois nécessaire (expériences de laboratoire à échelle réduite, caractérisation de l'influence de la forme, etc.). Il est dans ce cas intéressant de disposer d'une bibliothèque de formes avec leurs propriétés d'inerties (inerties et volume) pré-calculées de façon exacte ou par intégration numérique selon la complexité de la forme. Cette bibliothèque a été ajoutée au code *DEMbox* en définissant chaque forme dans son repère propre avec une dimension unitaire fixe. La mise à l'échelle se fait à travers un facteur d'homothétie H . Par exemple, les positions des éléments constituant un cube sont définies par rapport au centre du cube, les axes principaux de celui-ci étant ceux des arêtes de longueur unitaire. Si un cube de côté 1,8 cm doit être pris de la bibliothèque, un facteur d'homothétie $H = 0,18$ sera utilisé (l'unité de longueur étant le mètre). Le volume sera mis à l'échelle en multipliant le « volume unitaire » par H^3 et les valeurs propres d'inertie par H^5 .

3.3.5. MOUVEMENT DES BLOCS

Les sphéro-polyèdres étant des corps rigides, l'évolution temporelle de la position de son centre de masse \mathbf{x}_G et une orientation suffisent à décrire toute sa cinématique. En effet, le mouvement de chaque élément (sphère, cylindre ou polygone) qui compose le corps est lui-même gouverné par des relations de déplacements solides. Au niveau de l'implémentation numérique dans *DEMbox*, la notion de corps « maîtres » et « esclaves » est utilisée de telle sorte que seule la cinématique des maîtres est calculée par intégration ; les corps esclaves subissent la cinématique des corps maîtres.

Classiquement, un calcul en éléments discrets consiste à alterner deux étapes pour chacun des corps i : (1) le calcul de la force \mathbf{F} et du moment \mathbf{M}_G au centre de masse résultant des efforts de contact (forces et moments) et de la gravité ; (2) l'intégration de la seconde loi de Newton (pour les mouvements de translation) et des équations d'Euler (pour les mouvements de rotation). Cette intégration des mouvements est mise en œuvre par le schéma « *Velocity-Verlet* » qui semble réaliser un bon compromis entre précision du calcul des vitesses et économie de mémoire.

Pour les mouvements de translation, l'algorithme peut être formalisé ainsi pour chaque incrément de temps Δt :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_G(t + \Delta t) \leftarrow \mathbf{x}_G(t) + \mathbf{v}_G(t) \Delta t + \frac{1}{2} \mathbf{a}_G(t) \Delta t^2 \\ \mathbf{v}_G(t + \Delta t) \leftarrow \mathbf{v}_G(t) + \frac{1}{2} (\mathbf{a}_G(t) + \mathbf{a}_G(t + \Delta t)) \Delta t \end{cases} \quad [8]$$

Avec :

$$\mathbf{a}_G(t) = \frac{\mathbf{F}(t)}{m} + \mathbf{g} \quad [9]$$

Il faut noter ici que la vitesse est calculée en deux étapes. Afin de se rapprocher de l'implémentation informatique, le symbole \leftarrow a été introduit ; il signifie que la variable de gauche est remplacée par celle de droite.

Pour les mouvements de rotation, nous avons souhaité utiliser le même schéma, ce qui n'est, à tort, pas toujours le cas dans les modèles 3D présentés dans la littérature. Par commodité, la

position angulaire des blocs est donnée par un *quaternion unitaire* qui présente certains avantages, notamment une meilleure stabilité numérique.

Un quaternion est une entité mathématique qui étend la notion de nombres complexes et se note :

$$q_i i + q_j j + q_k k + s \quad \text{avec} \quad i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad [10]$$

Dire que le quaternion est unitaire signifie que $q_i^2 + q_j^2 + q_k^2 + s^2 = 1$. Par analogie avec les nombres complexes, on peut le représenter par une partie réelle s (scalaire) et une partie imaginaire \mathbf{i} (vecteur) :

$$\hat{\mathbf{q}} \equiv [s, \mathbf{i}] \quad [11]$$

Les valeurs de s et de \mathbf{i} n'ont rien d'intuitif pour représenter une orientation (contrairement aux angles d'Euler par exemple), mais il est aisé de calculer une matrice de rotation ou un angle quelconque *via* des relations mathématiques simples. Lorsque l'orientation d'un corps rigide est donnée par un quaternion unitaire, une propriété intéressante est que la dérivée temporelle de ce quaternion peut être calculée à partir du vecteur vitesse instantanée Ω du corps de la façon suivante:

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}} = \frac{1}{2} \hat{\Omega} * \hat{\mathbf{q}} \quad \text{où} \quad \hat{\Omega} \equiv [0, \Omega] \quad [12]$$

Où l'opérateur $*$ est le produit *Hamiltonien* défini comme suit :

$$[s_1, \mathbf{i}_1] * [s_2, \mathbf{i}_2] \equiv [s_1 s_2 - \mathbf{i}_1 \cdot \mathbf{i}_2, s_1 \mathbf{i}_2 + s_2 \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_1 \wedge \mathbf{i}_2] \quad [13]$$

Il découle de l'Equation 18 que la dérivée seconde du quaternion s'écrit :

$$\ddot{\hat{\mathbf{q}}} = \frac{1}{2} \dot{\hat{\Omega}} * \hat{\mathbf{q}} + \frac{1}{4} \hat{\Omega} * (\hat{\Omega} * \hat{\mathbf{q}}) \quad [14]$$

En respectant le schéma d'intégration « Velocity-Verlet », l'orientation donnée par le quaternion $\hat{\mathbf{Q}}$ s'écrit donc formellement et de façon analogue aux Equations 15 :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Q}}(t + \Delta t) \leftarrow \hat{\mathbf{Q}}(t) + \dot{\hat{\mathbf{Q}}}(t) \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\hat{\mathbf{Q}}}(t) \Delta t^2 \\ \Omega(t + \Delta t) \leftarrow \Omega(t) + \frac{1}{2} (\Omega(t) + \Omega(t + \Delta t)) \Delta t \end{cases} \quad [15]$$

En introduisant les relations [19] et [21] dans l'Equation 22, celle-ci peut se réécrire ainsi :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Q}}(t + \Delta t) \leftarrow \hat{\mathbf{Q}}(t) + \left[-\frac{1}{2} \left\{ \Omega(t) \cdot \mathbf{i} \right\} \Delta t + \left(\Omega(t) \cdot \mathbf{i} + \frac{\Omega^2(t)}{2} \right) \frac{\Delta t}{2} \right], \\ \Omega(t + \Delta t) \leftarrow \frac{1}{2} \left\{ (s \Omega(t) + \Omega(t) \wedge \mathbf{i}) \Delta t + (s \Omega(t) + \Omega(t) \wedge \mathbf{i}) \frac{\Delta t}{2} - \frac{\Omega^2(t)}{2} \mathbf{i} \right\} \\ \Omega(t + \Delta t) \leftarrow \Omega(t) + \frac{1}{2} (\Omega(t) + \Omega(t + \Delta t)) \Delta t \end{cases} \quad [16]$$

Où $\dot{\mathbf{Q}}(t) = [s, \mathbf{i}]$. Les accélérations angulaires sont obtenues avec les équations d'Euler :

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_1^* &= \{M_{G1}^* - (I_3 - I_2)\Omega_2^*\Omega_3^*\}/I_1 \\ \dot{\Omega}_2^* &= \{M_{G2}^* - (I_1 - I_3)\Omega_3^*\Omega_1^*\}/I_2 \\ \dot{\Omega}_3^* &= \{M_{G3}^* - (I_2 - I_1)\Omega_1^*\Omega_2^*\}/I_3 \end{cases} \quad [17]$$

Il faut toutefois noter que ces relations s'expriment dans le repère propre du bloc considéré (dans lequel les moments d'inertie principaux sont définis). Ceci est rappelé par l'exposant * dans l'Equation 24. Pour placer le moment résultant \mathbf{M}_G et la vitesse de rotation Ω dans le repère propre, il est nécessaire d'appliquer une rotation inverse de celle de l'orientation du bloc. Ceci revient à utiliser le quaternion conjugué, c'est-à-dire avec un signe opposé sur la partie imaginaire :

$$\mathbf{M}_G \xrightarrow{\text{conj}(\hat{\mathbf{Q}})} \mathbf{M}_G^* \quad \text{et} \quad \Omega \xrightarrow{\text{conj}(\hat{\mathbf{Q}})} \Omega^* \quad [18]$$

Le vecteur d'accélération angulaire dans le repère global s'obtient en pivotant celui obtenu par l'Equation 24 :

$$\dot{\Omega}^* \xrightarrow{\hat{\mathbf{Q}}} \dot{\Omega} \quad [19]$$

Afin de synthétiser l'algorithme utilisé, le schéma de la *Figure 36* précise et ordonne les différentes étapes du calcul.

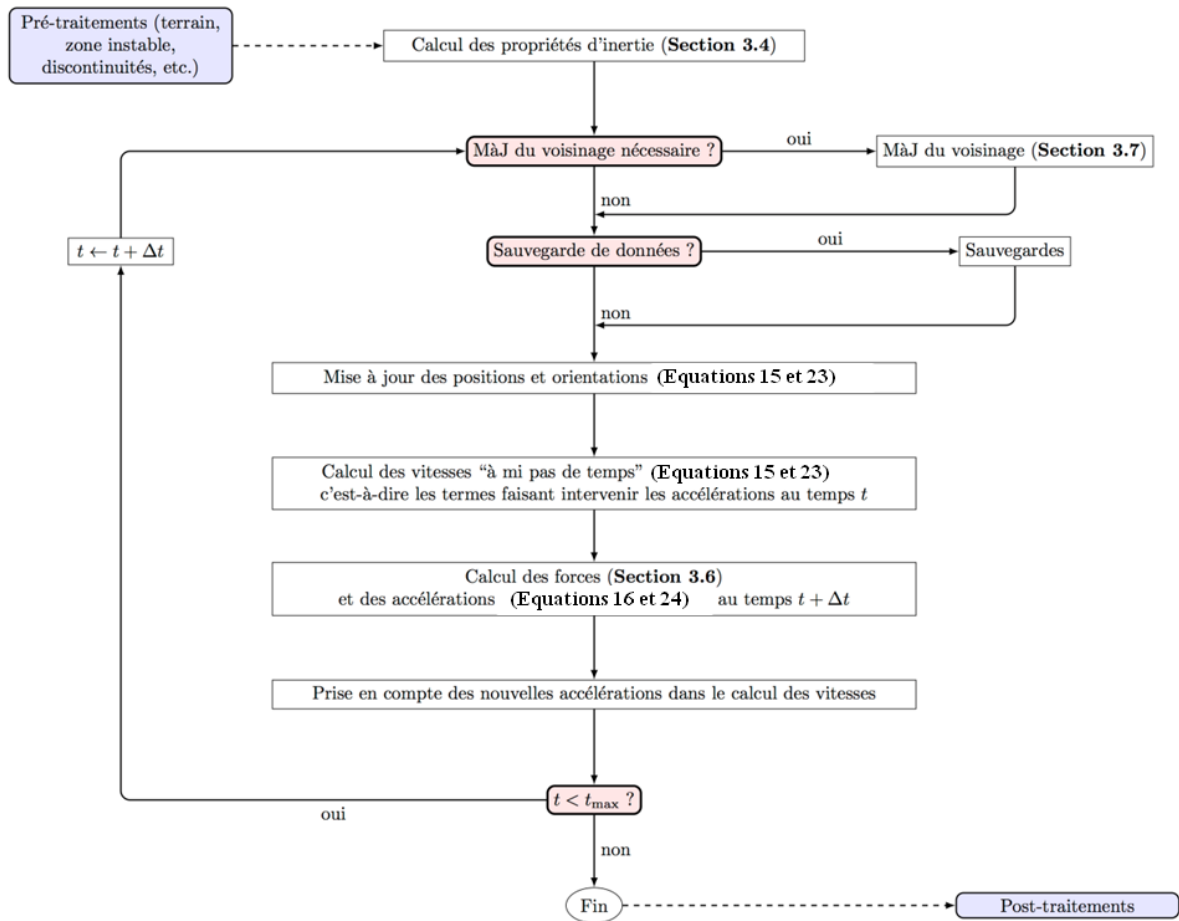


Figure 3.6. Représentation synthétique de l'algorithme de calcul utilisé pour la modélisation de la propagation de blocs rocheux

3.3.6. MODELE DE CONTACT DISSIPATIF

La qualité d'un modèle numérique se mesure d'une part à sa capacité à rendre compte de phénomènes physiques, et d'autre part à la facilité avec laquelle les paramètres requis sont identifiables. En d'autres termes, les enjeux actuels dans la modélisation des risques gravitaires rocheux concernent non seulement le développement d'outils numériques puissants capables de simuler des rhéologies complexes et réalistes, mais également l'aptitude qu'aura un opérateur à identifier et affecter les paramètres du modèle.

Avec cette idée en tête, un modèle dissipatif de contact/collision a été proposé. Ce modèle est par conséquent délibérément minimaliste. Il intègre, selon nous, le nombre minimal de caractéristiques nécessaires pour tenir compte (1) de la déformabilité de la zone de contact, (2) d'une dissipation normale de l'énergie, et (3) d'une dissipation tangentielle de l'énergie.

Formellement, les composantes normale et tangentielle d'une force de contact/collision, f_n et f_t respectivement (n étant la normale au contact), sont calculées de façon incrémentale à chaque pas de temps Δt à partir de la connaissance de la distance normale d'interpénétration h_n et des vitesses relatives normale et tangentielle, \dot{h}_n et $\dot{\mathbf{h}}_t$:

$$\begin{cases} f_n \leftarrow f_n + k_n \dot{h}_n \Delta t & \text{si } h_n < 0 \text{ et } \dot{h}_n \geq 0 \\ f_n = e_n^2 k_n h_n & \text{si } h_n < 0 \text{ et } \dot{h}_n < 0 \\ f_n = 0 & \text{si } h_n \geq 0 \end{cases} \quad [20]$$

$$\mathbf{f}_t \leftarrow \min \left(\mathbf{f}_t^{\text{test}} ; \mu f_n \frac{\mathbf{f}_t^{\text{test}}}{\|\mathbf{f}_t^{\text{test}}\|} \right) \text{ avec } \mathbf{f}_t^{\text{test}} = c_2 \circ c_1(\mathbf{f}_t) - k_t \dot{\mathbf{h}}_t \Delta t \quad [21]$$

Où k_n et k_t sont les raideurs normale et tangentielle, respectivement, qui rendent compte d'une élasticité effective du contact. Les opérateurs c_1 et c_2 corrigent la force tangentielle afin de tenir compte de la rotation et de la vitesse de rotation du contact (Hart et al. 1988) :

$$c_1 : \mathbf{f}_t \mapsto \mathbf{f}_t - \mathbf{f}_t \wedge (\mathbf{n}(t) \wedge \mathbf{n}(t + \Delta t)) \quad [22]$$

Et

$$c_2 : \mathbf{f}_t \mapsto \mathbf{f}_t - \mathbf{f}_t \wedge \left(\frac{\Delta t}{2} (\Omega_i + \Omega_j) \cdot \mathbf{n}(t + \Delta t) \mathbf{n}(t + \Delta t) \right) \quad [23]$$

Où i et j se réfèrent aux blocs en contact.

Dans l'Equation 27, le paramètre e_n^2 rend compte de la part d'énergie restituée dans la direction perpendiculaire au plan de contact à chaque cycle de charge/décharge. Dans le cas d'un bloc lâché sur un plan horizontal (collision ne faisant intervenir que la force normale), ce

coefficient est égal au rapport entre la hauteur du rebond et la hauteur initiale. Une valeur de 1 correspond donc à une collision parfaitement élastique (toute l'énergie est restituée), alors qu'une valeur nulle correspond à une dissipation de toute l'énergie lors de la collision (le bloc ne rebondit pas). Du point de vue de la physique, ce coefficient peut inclure un grand nombre de mécanismes complexes qu'il est en pratique difficile d'identifier et d'isoler (endommagement, plastification, ondes élastiques, production de chaleur, etc.).

Le paramètre μ dans l'Equation 28 est un coefficient qui permet d'introduire une dissipation d'énergie dans la direction tangente au plan de contact. Pour un contact rigide (i.e., engendrant des interpénétrations très faibles), μ correspond simplement au coefficient de frottement dynamique. Pour une collision entre un bloc rigide et un sol meuble, le paramètre μ incorpore, en plus de la force de frottement, une force de butée liée à la déformation interne de la zone de sol impactée.

On peut donc constater que les lois de force proposées – Equations 27 et 28 – sont capables de tenir compte d'un grand nombre de mécanismes locaux et complexes² de dissipation d'énergie tout en les ignorant en fait. Mais en contrepartie, elles permettent d'obtenir un bon contrôle sur la quantité d'énergie perdue lors de collisions ou de contacts persistants en faisant une distinction claire entre les directions concernées (normales ou tangentielles), les corps en interaction (bloc/bloc ou bloc/sol), et les lieux de dissipation. Une autre façon de concevoir ceci est de considérer que les plus petites échelles de temps sont de l'ordre des durées de collisions (du contact jusqu'à la perte de contact) ; ce qu'il se passe lors de la collision ne peut pas être analysé en terme de force, mais l'énergie perdue après un impact a du sens.

Les dissipations ont été prises indépendantes de la vitesse de collision dans un souci de simplification, mais cette dépendance peut tout à fait être considérée en introduisant des relations (empiriques) entre la vitesse de collision et les paramètres de dissipation. Le modèle a également été pensé pour limiter autant que possible les difficultés d'ordre numérique tout en gardant un bon contrôle sur les quantités d'énergie dissipées lors des collisions ou durant un contact persistant sollicité cycliquement. Ceci a conduit à l'introduction d'un saut de force normale qui est en définitive moins gênant – sur le plan numérique – que d'introduire explicitement un retour à force nulle, impliquant en plus une plastification du contact (Luding, 2006).

Pour résumer, le modèle dissipatif de contact frottant ne nécessite que 4 paramètres dont le rôle est illustré sur la *Figure 3.7*. Les relations f_n-h_n et f_t-h_t (force f_n constante) sont également représentées.

² À ce propos, des études approfondies sur des phénomènes tels que la fracturation de blocs rocheux en cours de propagation (Ruiz, 2013) et de l'interaction d'un bloc sur sol meuble (Lingran Zhang, 2015) sont en développement. Ces recherches montrent la complexité de ces interactions et la relative méconnaissance que l'on possède aujourd'hui des mécanismes dissipatifs mis en jeu lors des chutes de blocs et des éboulements rocheux.

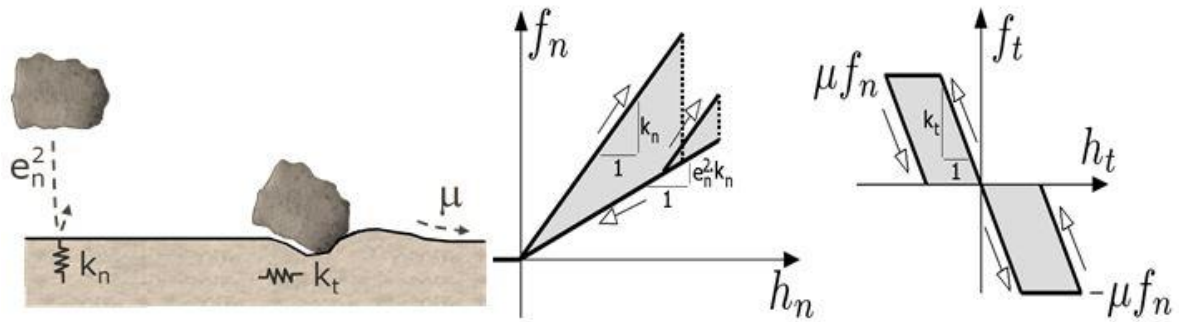


Figure 3.7. (Gauche) Illustration schématique des paramètres du modèle de collision. (Droite) Relations force/déplacement pour les composantes normale et tangentielle ; les zones grisées montrent l'énergie (travail de la force) perdue lors d'un cycle complet de charge/décharge ; chacune des composantes de force est tracée en considérant que l'autre composante ne varie pas – ce qui n'est évidemment pas le cas en situation de collision

Les versants de propagation et les zones d'arrêt des avalanches rocheuses sont parfois très pentus. Il peut, dans ce cas, être impossible d'arrêter un bloc. Pour s'en convaincre, le schéma de la *Figure 3.8* montre différentes situations où, pour une pente d'inclinaison α par rapport à l'horizontal, un bloc pourra ou ne pourra pas se stabiliser. On comprend intuitivement qu'un bloc plat aura dans certaines conditions (angle de frottement supérieur ou égal à celui de la pente) la capacité de s'arrêter sur sa face la plus grande, même si la pente est assez raide, alors qu'un bloc cubique ne le pourra pas nécessairement.

De façon plus pragmatique, une condition nécessaire pour qu'un bloc de forme donnée puisse être arrêté sur une pente d'inclinaison α est la suivante : la position du centre de masse ne doit pas excéder la verticale passant par le point de contact. La forme d'un bloc peut être caractérisée par un angle β défini comme l'angle maximal entre la normale à une face et le vecteur reliant le centre de masse aux sommets de cette face ; voir *Figure 3.8A*. La condition nécessaire pour la stabilisation peut alors s'exprimer formellement par l'équation [31]:

$$\alpha - \beta < 0$$

[24]

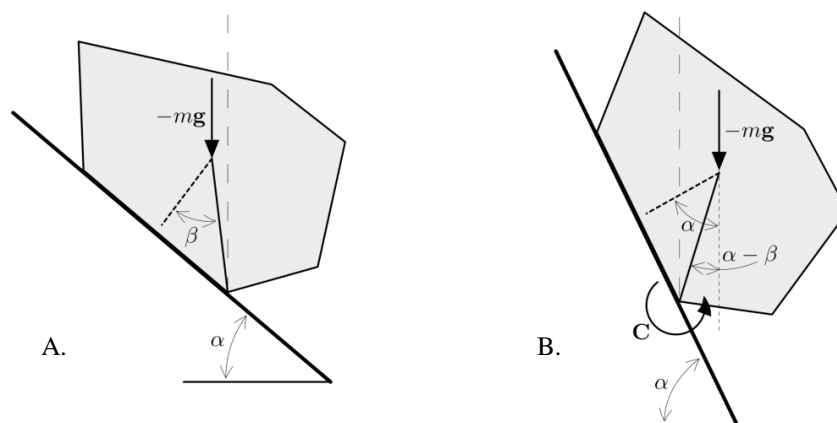


Figure 3.8. A. Position stable. B. Position potentiellement instable

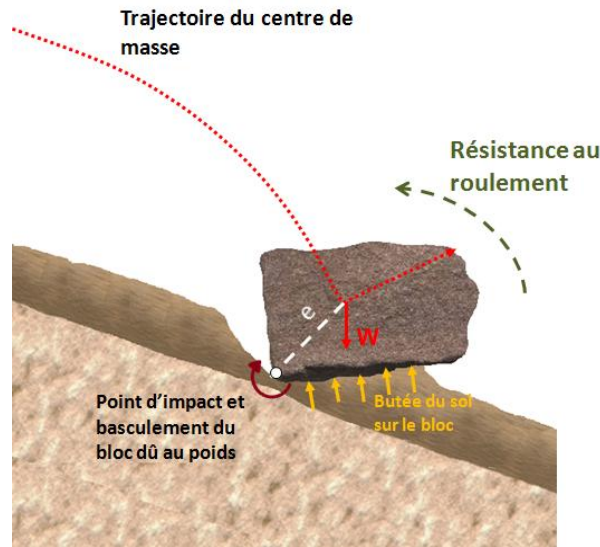


Figure 3.9. Représentation du phénomène de basculement d'un bloc sur un sol meuble

Autrement dit, si cette condition n'est pas satisfaite, il sera impossible au bloc de s'arrêter, à moins qu'un couple au point de contact ne résiste à l'action de levier du poids par rapport à ce point. Ce phénomène physique peut notamment s'observer lors d'un impact sur substratum meuble lorsque le bloc indente de façon significative le sol qui est alors capable d'appliquer une résistance au roulement du bloc sous forme d'un couple résistant C (Figure 3.9).

De façon analogue à la loi de frottement, le critère de résistance au roulement est supposé proportionnel à l'angle de rotation relatif entre l'élément i et l'élément j (défini par $(\Omega_j - \Omega_i) \Delta t$) et est borné par une valeur seuil C_{\max} . Ainsi défini, le modèle de résistance au roulement s'écrit :

$$C \leftarrow \min \left(C^{\text{test}} ; C_{\max} \frac{C^{\text{test}}}{\|C^{\text{test}}\|} \right) \quad \text{avec } C^{\text{test}} = C - k_r (\Omega_j - \Omega_i) \Delta t \quad [25]$$

où k_r est le paramètre de raideur élastique en rotation. C_{\max} est un seuil plastique proportionnel à la la force normale au point de contact mais toujours supérieur à une valeur minimal C_0 . De fait, le seuil plastique traduit le couple résistant appliqué au point de contact qui admet une valeur minimale C_0 permettant l'arrêt du bloc en rotation sur une pente très forte lorsque celui-ci y est déposé délicatement et dont l'intensité est liée à l'indentation du bloc sur la pente et donc fonction de la force au point de contact enregistrée lors de l'impact, d'un coefficient de résistance au roulement μ_r et d'une grandeur ℓ caractéristique de la géométrie du bloc. De cette façon le seuil plastique est défini par :

$$C_{\max} = \max(\mu_r \ell f_n ; C_0) \quad [26]$$

Où, le paramètre ℓ représente la distance entre le centre de masse et le point de contact, et μ_r le coefficient – sans dimension – de dissipation d'énergie par roulement. Pour que l'équilibre du bloc soit possible dans la situation de la Figure 3.8B, il est nécessaire que le moment dû au poids du bloc par rapport au point de contact $\ell \sin(\alpha - \beta) mg$ soit compensé par le couple résistant plafonné à une valeur minimum de $\mu_r \ell f_n = \mu_r \ell mg \cos(\alpha)$. Ceci conduit à un ordre de grandeur

de la valeur minimum μ_r^{\min} du coefficient de résistance au roulement pour que la stabilisation sur une pente d'inclinaison α soit possible (en faisant l'hypothèse que $C_0 = 0$) :

$$\mu_r^{\min} = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha)} \quad [27]$$

En dessous de cette valeur, un bloc ayant une forme caractérisée par β ne pourra pas être en état d'équilibre statique sur une pente inclinée à α tant que C_0 est pris égal à zéro. Par exemple, un cube pouvant être caractérisé par $\beta = \pi/4$, ne pourra s'arrêter en rotation sur une pente inclinée à $\alpha = \pi/3$ que si le coefficient de résistance au roulement μ_r est supérieur à la valeur : $2\sin(\pi/12) \approx 9.2 \times 10^{-3}$.

La condition exprimée par l'Equation 34 s'appuie sur l'hypothèse d'un couple résistant minimum proportionnel à la force normale (elle-même proportionnelle à l'indentation du sol par le bloc). On peut également considérer qu'une résistance au roulement peut être effective même si le bloc ne s'enfonce pas profondément dans le sol. C'est le rôle du paramètre C_0 qui doit alors, si l'enfoncement du bloc est faible et la pente très forte, satisfaire la condition:

$$C_0 \geq \ell mg \quad [28]$$

Il ne s'agit pas ici d'une condition stricte, mais plutôt d'une relation permettant de fixer l'ordre de grandeur de C_0 .

Par ailleurs, si l'on suppose que le moment de résistance seuil est atteint pour un angle de rotation $\pm\theta_0$, il est alors possible d'établir un ordre de grandeur du paramètre de « raideur élastique en rotation » k_r lorsque $C_0 \neq 0$:

$$k_r \approx \frac{C_0}{\theta_0} \quad [29]$$

Pour déterminer ou calibrer les valeurs de μ_r , C_0 et de k_r , il n'y a à priori pas de règle établie et l'utilisation du modèle nécessite de s'en faire une expérience. C'est l'un des objectifs du Chapitre 4.

3.3.7. DETECTION DES VOISINS ET DES CONTACTS

Le but des procédures présentées dans cette section est de construire une liste de contacts potentiels – autrement dit, une liste de voisins – le plus efficacement possible. Dans de nombreuses situations, la mise à jour de cette liste à un coût significatif sur le temps global de calcul (même si son rôle est justement d'optimiser les calculs). La méthode la plus basique pour construire une liste de voisins consiste à tester deux à deux la proximité des éléments, ce qui conduit à un nombre d'opérations égal au nombre d'éléments au carré. On parle alors d'algorithme de complexité en $O(N^2)$, cependant dans la mesure où la mise à jour de la liste peut se faire à intervalle de temps plus grand que celui du pas de temps, un gain significatif est quand même obtenu.

Pour la problématique qui nous intéresse – mettant en œuvre des éléments de formes complexes et impliquant des durées simulées qui se comptent en minutes – une mise à jour efficace de la liste de voisins est un aspect critique. C'est la raison pour laquelle un effort particulier a été consacré à l'adaptation de stratégies plus évoluées, souvent empruntées au monde des jeux vidéo

3D. Ces stratégies portent, d'une part, sur les volumes englobant les éléments, et d'autre part, sur l'algorithme lui-même en visant des complexités en $O(N)$.

Les sphéro-polyèdres sont, comme déjà expliqué au début du chapitre, constitués de sous-éléments convexes. Dire si deux sphéro-objets sont proches nécessiterait de tester chacune des paires de sous-éléments qui les constituent, ce qui impliquerait un grand nombre d'opérations. La stratégie logique avec ce type d'objets est donc de tester la proximité entre des volumes englobant chaque sphéro-objet avec une certaine fréquence, puis de tester la proximité entre les sous-éléments des sphéro-objets identifiés comme étant proches avec une fréquence qui peut être différente.

Dans *DEMbox*, deux distances D_v et d_v en dessous desquelles deux sphéro-polyèdres ou leurs sous-éléments (respectivement) sont ajoutés dans une liste de voisins potentiellement en collision/contact. Chacune de ces distances est associée à une période de mise à jour N_D ou N_d exprimée en nombre de pas de temps. Par cohérence, il est nécessaire que N_d soit un multiple de N_D . Il est tout à fait envisageable de définir une stratégie pour l'affectation dynamique des valeurs de distances et de périodes de mise à jour, mais nous avons choisi pas simplicité et efficacité de ne pas implémenter cette solution. Une solution plus globale, s'appuyant sur une vitesse maximale supposée a été utilisée ; elle est décrite dans l'Annexe C.

Le choix des volumes englobant a une influence significative sur les performances de la reconstruction, surtout si les objets ont une forme allongée. Nous avons testé des boîtes alignées avec les axes principaux (AABB, *Axis Aligned Bounding Box*), et des boîtes orientées (OBB, *Oriented Bounding Box*). Pour ces dernières, un algorithme géométrique a été développé et utilisé afin de déterminer la boîte de plus petit volume. Il faut noter que les axes de la boîte OBB de volume optimum ne correspondent pas nécessairement aux axes d'inertie du sphéro-polyèdre. Tester la proximité de deux OBB est légèrement plus coûteux que de tester la proximité de deux AABB, néanmoins, pour des raisons purement géométriques, l'utilisation de boîtes OBB est plus efficace car elle limite la portée des objets dans toutes les directions comme l'illustre la *Figure 3.10*. Ainsi, nous avons obtenu, avec des simulations d'écoulement dense, des durées 7 fois plus courtes lorsque des boîtes OBB avaient été utilisées. La performance de l'algorithme dépend évidemment de la taille des cellules par rapport à la taille typique des blocs. Il existe donc une valeur optimale de ce rapport qui doit avoir – selon notre propre expérience – une valeur de l'ordre de 2. Cette valeur peut néanmoins varier de façon notable avec la granularité et l'élongation des blocs.

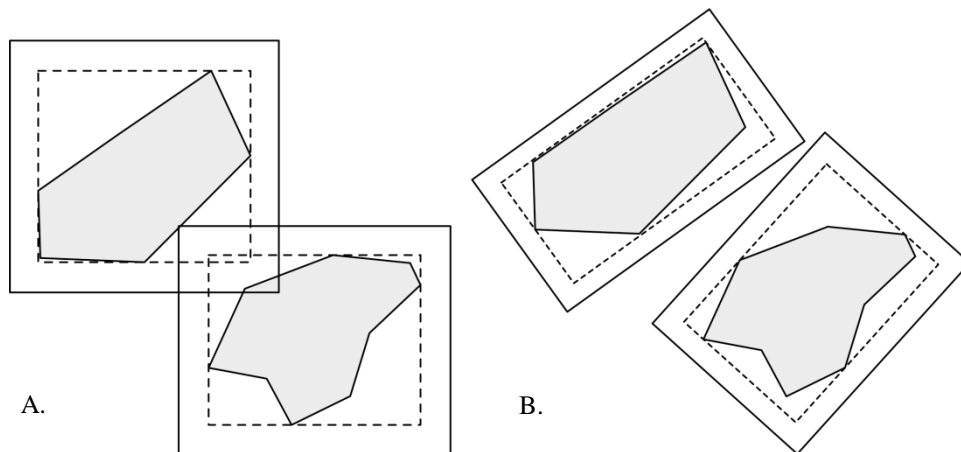


Figure 3.10. Illustration 2D des volumes englobant AABB (A) et OBB (B). Les boîtes en pointillés représentent les plus petits volumes, et les boîtes en traits pleins correspondent aux mêmes boîtes dont les faces ont été décalées d'une distance Dv (ou dv s'il s'agit d'un sous-élément). Lorsque deux boîtes en traits pleins se chevauchent, les sphéro-polyèdres sont déclarés « proches ». Sur cette illustration, avec des boîtes AABB A., les objets sont donc déclarés proches alors qu'avec des boîtes OBB B. ce n'est plus le cas

Toutes les stratégies décrites jusqu'à présent permettent une réduction significative du temps nécessaire à la (re-)construction des listes de voisinage, mais la complexité de l'algorithme reste en $O(N^2)$. Pour pallier à cela, la stratégie de « *link-cells* » a été implémentée. Elle consiste à diviser le système en cellules structurées (une grille) associées à une liste des éléments qu'elle contient, et une cellule fictive associée aux éléments trop grands pour être contenus dans une cellule structurée, comme par exemple les plans infinis. Pour un objet donné, le test de proximité se fait uniquement avec les autres objets présents dans sa propre cellule ainsi qu'avec ceux qui se trouvent dans les cellules voisines. Le nombre de cellules concernées pour la recherche de voisin d'un objet, en 3D, est donc constant et égal à 27. La *Figure 3.11* donne une représentation 2D des cellules concernées dans la recherche de voisins d'un élément ; dans ce cas, les cellules testées sont au nombre de 9. En considérant que le nombre d'éléments par cellule est limité, le nombre d'opérations par bloc est relativement constant et la complexité de l'algorithme se borne dans le pire des cas à $O(N)$.

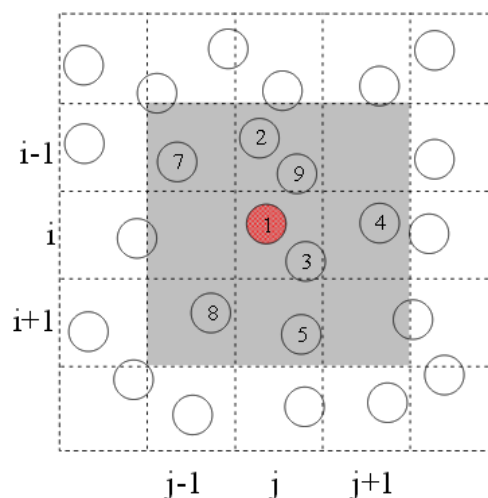


Figure 3.11 Le test de proximité pour l'objet sphérique 1 en rouge se limite aux objets 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 se trouvant dans les cellules grisées

3.4. Avantages de la méthode

L'avantage principal du modèle DEMbox et, en général, des modèles basés sur les méthodes discrètes, porte sur la possibilité de modéliser numériquement une série d'éléments de formes variées et de les faire interagir de façon indépendante avec d'autres éléments. Vis-à-vis du phénomène d'éboulements rocheux et de chute de blocs décrit dans les premiers chapitres de la thèse, c'est un avantage qui fait que la méthode est tout à fait pertinente pour l'analyse de ces événements.

Parmi les autres avantages, on peut souligner également que :

- La DEM permet une analyse détaillée de certaines caractéristiques de la dynamique granulaire qui sont difficilement identifiables par des essais expérimentaux. On peut citer par exemple la détermination du réseau et de l'intensité des forces de contact qui se forment au sein d'un milieu granulaire et qui sont pratiquement impossibles à déterminer en milieu naturel ou en laboratoire,
- La DEM est très efficace pour modéliser des grands déplacements ou des mécanismes de fracturation sans qu'il ne soit nécessaire au préalable de définir les zones de rupture. Un exemple dans une application de mécanique de roches, consiste à la modélisation de la fracture d'un échantillon où les surfaces de discontinuités sont naturellement déduites de la méthode sans aucune supposition sur la position initiale ou la taille des fissures (Bonilla-Sierra, 2013). D'un point de vue géométrique, les particules peuvent avoir des formes réalistes de façon explicite,
- Contrairement aux approches continues, la DEM n'a pas besoin de modèles constitutifs très sophistiqués pour décrire les phénomènes de mouvements de masses rocheuses,
- Cette méthode fait appel à un nombre restreint de paramètres ayant une signification physique claire comme les raideurs du contact, le pourcentage d'énergie dissipée ou le coefficient de frottement,
- De façon générale, c'est une méthode qui peut facilement être combinée avec d'autres méthodes pour introduire des phénomènes spécifiques tels que l'écoulement avec des fluides, la fracturation des blocs rocheux en cours de propagation, etc.

Cependant, même si cette méthode est très puissante elle doit être utilisée avec précautions compte tenu du fait que :

- Le nombre maximal de particules et la durée de la simulation sont limités par la puissance de calcul. En effet, un modèle très détaillé peut contenir un nombre très important de particules qui peut augmenter de façon considérable les temps de calcul sans pour autant gagner en exactitude,
- La détermination des paramètres de la modélisation reste délicate et nécessite une certaine expertise et des retours d'expérience quant à l'utilisation du logiciel,
- La grande quantité de codes d'éléments discrets existants et le manque d'applications traitées à l'échelle industrielle sont un signe de la complexité et de l'immaturation de ces méthodes,
- Le formalisme associé aux lois de contact varie d'un code à l'autre, ce qui peut confondre en erreur les nouveaux utilisateurs, et en particulier les ingénieurs habitués à des logiciels normalisés.

CHAPITRE 4: ETUDE PHENOMENOLOGIQUE ET INFLUENCE DES PARAMETRES RHEOLOGIQUES DU MODELE NUMERIQUE

4.1. Etude du phénomène multi impact de plusieurs blocs rocheux en interaction

4.1.1. CONTEXTE

Les mécanismes d'impact et de rebonds entre plusieurs particules sont des phénomènes très complexes (plastification ou fracturation) qui sont très difficiles à mesurer à l'échelle réelle et expérimentale. Appliqué à la chute de blocs, le phénomène d'impact est bien souvent défini comme étant un événement instantané pour lequel les pertes d'énergie sont globalisées par le biais d'un coefficient de restitution ou de rebond, ceci par soucis de simplicité mais également par méconnaissance des phénomènes liés à l'impact. Les nombreux paramètres de rebond présentés dans la littérature et largement utilisés pour les approches monobloc ou trajectographiques (Volkwein et al., 2011) laissent penser que l'interaction bloc-sol est un comportement globalement bien maîtrisé. Cependant, la simplification de l'impact par l'introduction d'un coefficient de restitution (démarche très courante dans les bureaux d'études) génère actuellement des pratiques dangereuses comme par exemple l'utilisation de paramètres perdant leur signification physique initiale lorsqu'ils sont utilisés pour traduire des phénomènes complexes qui sortent des hypothèses de base (par exemple la transformation d'une énergie de rotation en énergie de translation qui engendre des rebonds qui peuvent paraître anormaux).

En présence de plusieurs blocs en mouvement, le phénomène d'impact est encore plus complexe car des transferts énergétiques peuvent avoir lieu entre les particules ce qui peut altérer considérablement la trajectoire de certains blocs, de la même façon qu'une balle de tennis se voit propulsée vers le haut par une balle sous-jacente lorsque celles-ci tombent verticalement l'une sur l'autre (Cross, 2010). A ce propos, les nombreuses recherches menées récemment sur le phénomène d'impact dans les domaines analytiques (Muller and Pöschel, 2010) et numériques (Zhang, 2015) sont la preuve de la complexité de la mécanique lié à ce comportement.

Différentes méthodes numériques ont été développées ces dernières années avec comme objectif la compréhension du phénomène d'impact sur la base de modèles de type discret principalement. De fait, cette approche s'avère particulièrement pertinente pour simuler l'interaction entre plusieurs particules par la définition d'une loi de contact permettant de dissiper de manière globale une certaine quantité d'énergie. De plus, aucune énergie n'est emmagasinée dans les particules (supposées rigides et indéformables) ce qui n'est pas le cas des modèles maillés de type continu où l'énergie peut être stockée dans les corps (énergie de déformation élastique) ce qui rend difficile la maîtrise de la quantité d'énergie réellement dissipée lors de l'impact.

La nature discrète du code *DEMbox* nous permet de suivre dans le temps les contacts qui se développent tout au long de l'événement. C'est un atout important car, dans la pratique, il est presque impossible de mesurer les forces de contact ou les pertes d'énergies, d'où les difficultés actuelles pour développer des lois rhéologiques à partir d'études expérimentales à l'échelle du contact. Les lois rhéologiques proposées dans les codes numériques doivent en général rendre compte d'un phénomène à l'échelle macro comme des hauteurs de rebond, des trajectoires ou des distances d'arrêt.

Afin de comprendre le phénomène d'interaction entre plusieurs blocs rocheux par l'intermédiaire de la loi rhéologique proposée dans le cadre de cette thèse, plusieurs scénarios seront présentés dans cette section :

1. Comparaison entre le rebond avec un support rigide de trois blocs rectangulaires de masse m_i empilés les uns sur les autres et le rebond d'un bloc unitaire de masse équivalente ($M = m_1 + m_2 + m_3$) (Figure 4.1). Un des questionnements vis-à-vis de cette problématique est l'influence du découpage (donc du nombre de blocs) lorsqu'un pan de falaise s'effondre. Si des recherches récentes ont été menées en considérant des contacts purement élastiques (Muller and Pöschel, 2010), le comportement en interaction de solides lorsque les contacts sont dissipatifs reste encore méconnu et analytiquement inabordable.

2. Etude du rebond d'un bloc rocheux sur un massif stratifié (multicouche). Une des principales interrogations dans l'ingénierie de chute de blocs porte sur la nature et l'intensité du rebond d'un bloc lorsque celui-ci impacte un éboulis ou un massif multicouche.

De manière générale, ces simulations doivent permettre de mieux comprendre les mécanismes de transfert d'énergie qui sont mis en jeu dans de pareilles situations et de mieux appréhender le rôle des paramètres de la loi de comportement dans des configurations courantes mais mécaniquement très complexes.

4.1.2. INFLUENCE DU NOMBRE DE BLOCS DANS LE PHENOMENE DE REBOND

4.1.2.1. Description des simulations réalisées

La campagne numérique suivante a pour but d'étudier et de comparer les rebonds d'un empilement de trois blocs parallélépipédiques superposés et le rebond d'un bloc parallélépipédique équivalent, qui tombent verticalement sur un support horizontal (Figure 4.1). Dans un cadre plus pratique, ces modélisations permettent de simuler grossièrement la chute verticale d'une falaise rocheuse fracturée ou non qui impacte un sol avant de se propager librement sur un versant rocheux.

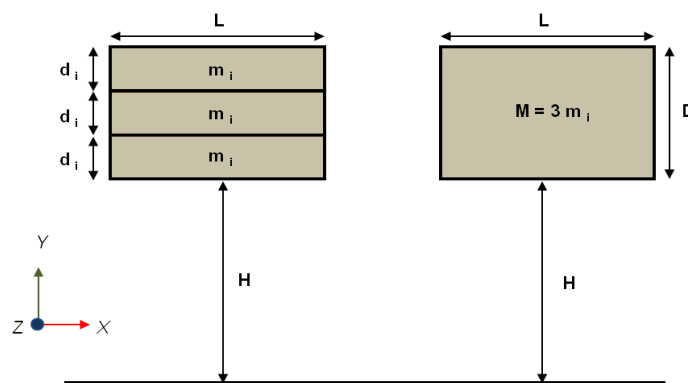


Figure 4.1. Schéma de principe des simulations numériques réalisées

Dans cette étude, et afin de bien décrire l'apport de l'interaction multi bloc, les paramètres dissipatifs de contact ont été fixés à 0.50 (cela signifie qu'à chaque impact on dissipera la moitié de l'énergie développée sur le contact). Les caractéristiques géométriques et les paramètres numériques concernant ces simulations son résumés dans le *Tableau 4.1*.

Données géométriques des blocs	
Masse des mini blocs m_i [kg]	47600
Masse du mono bloc M [kg]	142800
Epaisseur des mini blocs d_i [m]	1
Epaisseur du mono bloc D [m]	3
Hauteur de chute H [m]	10
Longueur des blocs L [m]	7
Profondeur des blocs en Z [m]	4
Densité des blocs [kg/m^3]	1700

Paramètre de contact	Bloc-Support	Bloc-Bloc
Restitution normale (e_n^2)	0.5	0.5
Frottement (μ)	1	1
Raideur normale (k_n) [N/m]	1×10^{11}	1×10^{11}
Raideur tangentielle (k_t) [N/m]	1×10^{11}	1×10^{11}
Pas de temps dt [s]	1×10^{-6}	
Temps simulé T [s]	10	

Tableau 4.1. Paramètres géométriques (gauche) et rhéologiques (droite) des simulations numériques

4.1.2.2. Phénomène de rebond

Nous nous intéressons d'abord au phénomène de rebond des particules pour les deux configurations testées (*Figure 4.2*). On note (B) la position de la face supérieure du bloc le plus haut et (A) la position du centre de masse ou du centre de masse équivalent de la configuration multi blocs CM_{eq} caractérisée par :

$$CM_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n CM_i}{n} \quad [30]$$

Avec : n le nombre de blocs et CM_i le centre de masse des particules i .

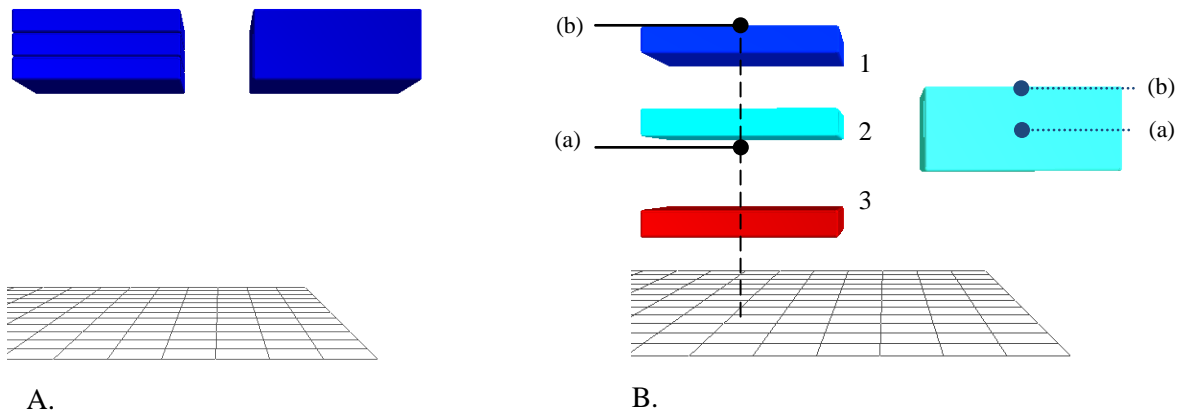


Figure 4.2. Positions des blocs aux temps $t=0$ s (A) et $t=2.6$ s (B)

Les évolutions de trajectoires des points (a) et (b) dans le temps sont présentées respectivement sur les *Figures 4.3A* et *4.3B*.

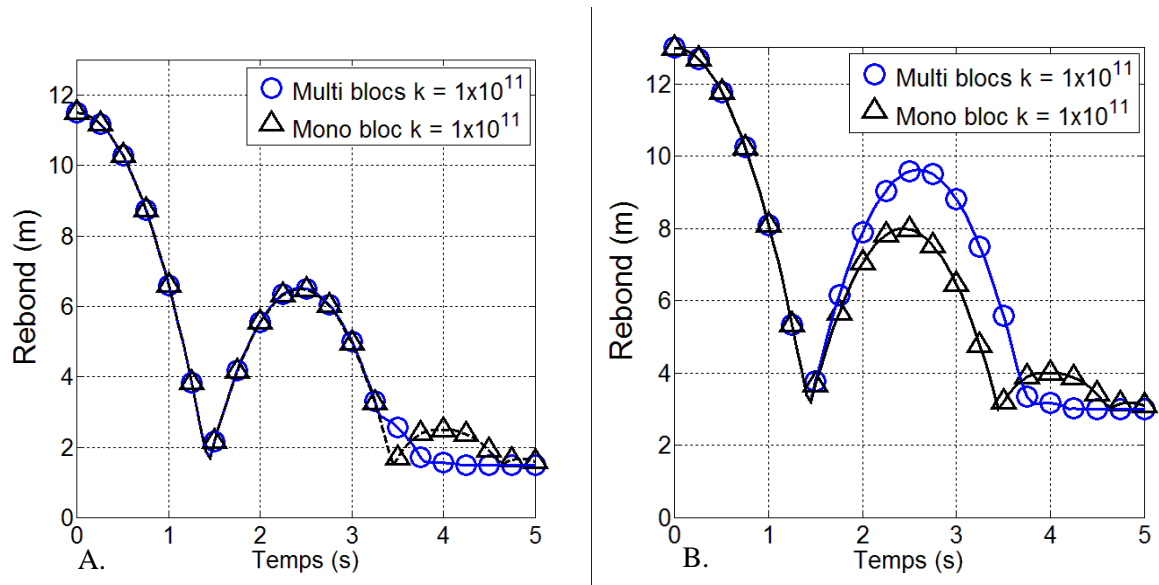
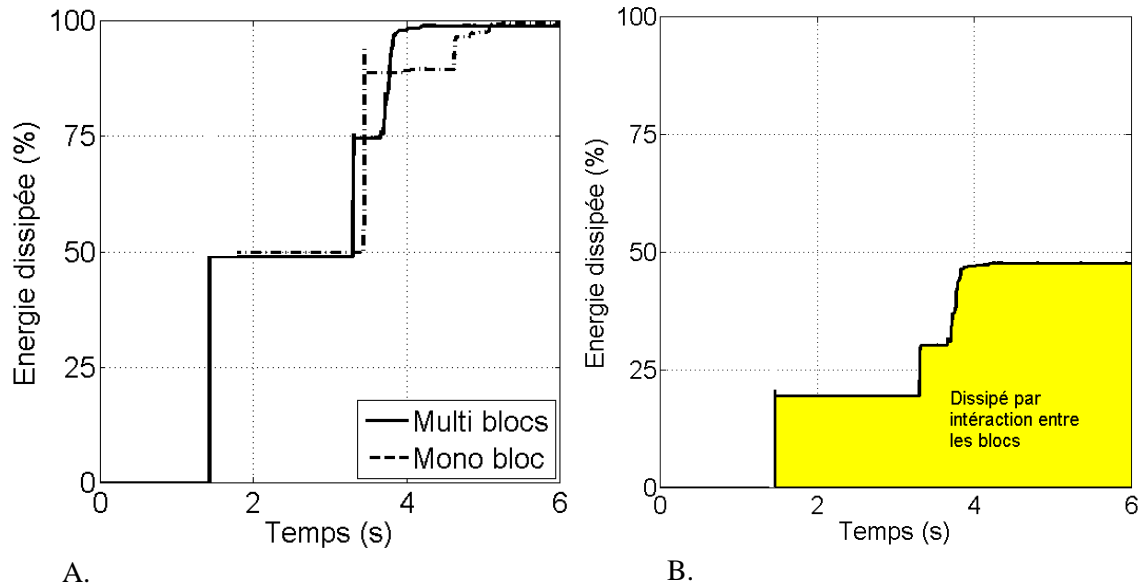


Figure 4.3. Evolution du rebond dans le temps pour : A. Le centre de masse équivalent. B. La face supérieure de l'assemblage

De manière générale, si on étudie la trajectoire du centre de masse équivalent de la configuration multi blocs (*Figure 4.3A*), nous constatons que celle-ci est voisine de celle d'une configuration monobloc. La présence d'un découpage multi blocs favorise le développement d'interactions multiples particulières qui entraînent des changements locaux significatifs avec en particulier des rebonds plus importants de certains blocs au premier impact (*Figure 4.3B*) mais également au-delà. D'un point de vue de la propagation de blocs rocheux, les blocs critiques sont ceux ayant des trajectoires irrégulières et des distances de propagation importantes. La *Figure 4.3B* nous montre que la propagation critique (dans ce cas, liée au rebond) de certains blocs est le résultat d'un transfert cinétique par interaction multi blocs, ce qui reste difficilement identifiable par le biais d'une approche monobloc.

4.1.2.3. Evolution de la dissipation d'énergie

L'influence du mode de découpage de la masse rocheuse initiale sur la quantité d'énergie dissipée lors du premier impact est un point important qu'il convient d'étudier. Sur la *Figure 4.4* nous présentons, pour le jeu de paramètres défini dans le *Tableau 4.1*, l'évolution cumulée dans le temps des énergies dissipées en totalité dans le système ou entre les blocs.



A. Evolution de l'énergie totale dissipée en fonction du temps pour la configuration monobloc (tirets) et multi blocs (trait plein). B. Evolution dans le temps de l'énergie dissipée par interaction entre les blocs dans la configuration multi blocs

Vu le nombre très limité de blocs, il est facile d'identifier sur la *Figure 4.4* chacun des rebonds qui ont eu lieu pendant l'événement. On constate, par exemple, que le premier rebond a lieu approximativement à $t=1.5$ s. Curieusement, nous observons que l'énergie dissipée au premier impact reste globalement la même pour les configurations mono bloc et multi blocs (50%) (*Figure 4.4A*). On constate également que l'énergie dissipée par interaction bloc-bloc dans la configuration multi blocs est, pour le jeu de paramètres retenu, d'environ 50% de l'énergie totale dissipée (*Figure 4.4B*). L'information importante que nous pouvons tirer de ces résultats est que l'énergie dissipée au premier impact n'augmente pas forcément avec le nombre de surfaces en contact. Ce qui change n'est pas la quantité d'énergie dissipée mais la façon dont elle est dissipée (à la base ou entre les blocs).

4.1.2.4. Evolution des forces de contact

La *Figure 4.5A* montre l'évolution, en fonction du temps, du bilan des forces de contact résultantes sur chacun des blocs lors du premier rebond pour la configuration multi-blocs. La force résultante sur un bloc (somme de toutes les actions ayant lieu sur un bloc comme par exemple l'actions des blocs 1 et 3 sur le bloc 2) est selon le cas positive ou négative. Conformément au modèle numérique de contact utilisé, l'impact se déroule en deux phases caractéristiques (une phase appelée de chargement où les blocs s'interpénètrent et une phase appelée de déchargement où les blocs se séparent). Sur la *Figure 4.5A* nous observons que le comportement de chargement et de déchargement d'un groupe de blocs en interaction est très complexe, notamment par la présence de phénomènes de confinement très complexes de certains blocs (sur les blocs 2 et 3 principalement) qui ne sont pas présents sur une configuration monobloc (en bleu sur la *Figure 4.5B*). Par ailleurs la force de contact maximale est fonction de l'interpénétration maximale ce qui n'est pas avéré (il semblerait que la force maximale de contact ait lieu avant l'interpénétration maximale (Guangcheng, 2014). Rappelons néanmoins que l'objectif principal de la loi de contact proposée n'est pas de rendre compte des forces d'impact mais de garantir à chaque impact une certaine quantité d'énergie dissipée.

La Figure 4.5B montre l'évolution de la force totale résultante en fonction du temps pour la configuration multi blocs comparée à la force de contact de la configuration monobloc. On remarque, que le fait de découper un bloc en plusieurs blocs modifie l'intensité des forces d'interaction et la durée apparente du contact. D'un point de vue énergétique (énergie dissipée lors de l'impact), cela a peu d'influence comme en témoigne les surfaces sous les courbes qui sont très similaires pour les deux configurations (Figure 4.5B).

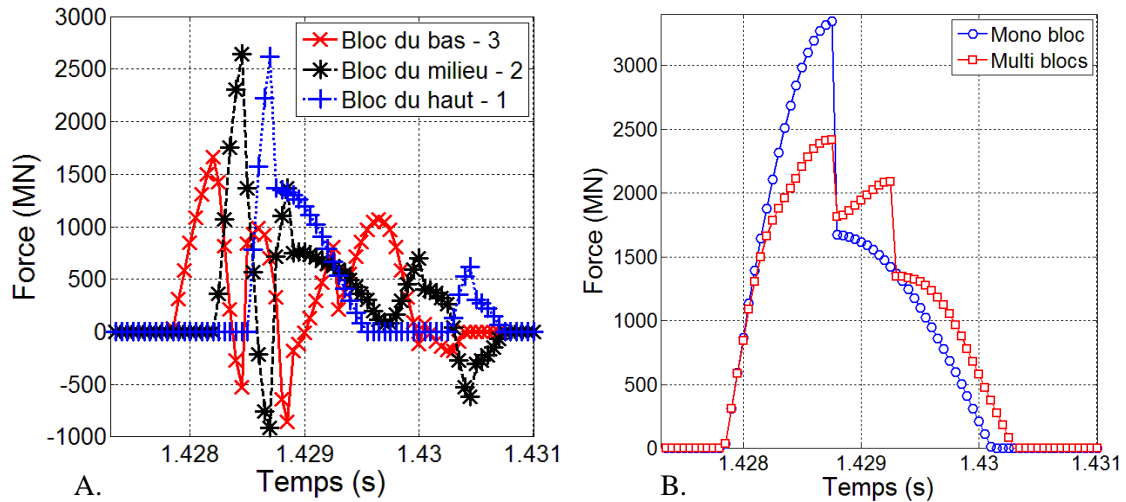


Figure 4.5. A. Forces résultantes agissant sur les blocs pour une configuration multi blocs. B. Force résultante équivalente pour la configuration multi blocs comparée à celle d'une configuration monobloc

4.1.3. SENSIBILITE AUX PARAMETRES DE CONTACT

4.1.3.1. Paramètre de restitution normal e_n^2

Pour vérifier la sensibilité du phénomène de rebond au coefficient de restitution normal e_n^2 , nous avons testé différentes configurations en faisant varier ce coefficient entre 0.01 et 1. La démarche utilisée a consisté à fixer le paramètre e_n^2 à 0.5 pour une des familles de contact (ex. le coefficient $e_n^2_{BB}$) tandis que celui de l'autre famille de contact est modifié (ex. $e_n^2_{BS}$). Pour rappel, $e_n^2 = 0.01$ veut dire que 99 % de l'énergie au contact est dissipée tandis que $e_n^2 = 1$ signifie qu'aucune dissipation n'a lieu. La notation « BB » dénote les contacts de type bloc-bloc tandis que l'indice « BS » fait référence au contact bloc-support. Au total, 5 valeurs du coefficient de restitution ont été testées : 0.01, 0.25, 0.5, 0.75 et 1 soit un total de 10 simulations pour cette étude. Dans cette analyse, nous nous sommes particulièrement intéressés au bilan énergétique au premier impact dont les résultats sont présentés sur la *Figure 4.6*.

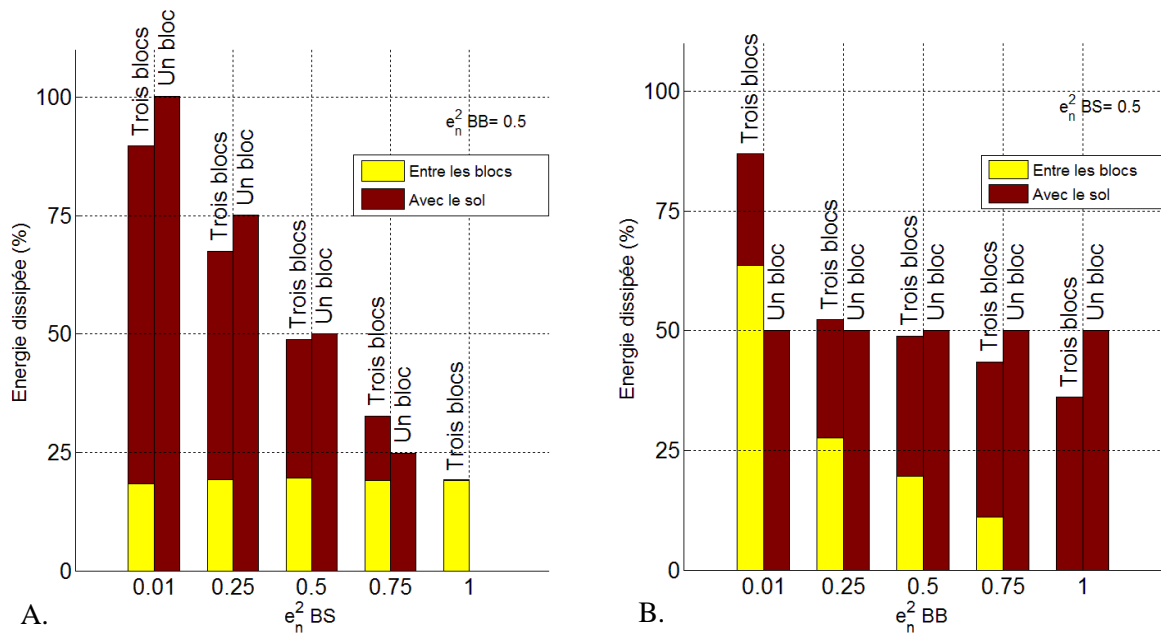


Figure 4.6. Etude de sensibilité du paramètre de restitution normale sur le premier impact. A. Influence du coefficient $e_n^2_{BS}$ ($e_n^2_{BB} = 0.5$). B. Influence du coefficient $e_n^2_{BB}$ ($e_n^2_{BS} = 0.5$)

L'influence du coefficient de restitution normale entre les blocs et le support ($e_n^2_{BS}$) est présentée *Figure 4.6A* pour une valeur de $e_n^2_{BB}$ fixée à 0.5. Pour la configuration monobloc, la quantité d'énergie dissipée au premier impact correspond exactement au ratio d'énergie défini par la valeur de $e_n^2_{BS}$. Pour la configuration multi bloc, il est intéressant de souligner que la quantité d'énergie dissipée par interaction entre les blocs est constante et que l'énergie totale dissipée lors de l'impact est proportionnelle au coefficient $e_n^2_{BS}$ et ce indépendamment du nombre de blocs considérés (un seul bloc ou trois blocs superposés).

Lorsque l'on fixe le paramètre de dissipation $e_n^2_{BS}$ à 0.5 en faisant varier le paramètre $e_n^2_{BB}$ (*Figure 4.6B*), on observe que, quelle que soit la valeur de $e_n^2_{BB}$, la quantité d'énergie totale dissipée au première impact est constante et égale au ratio défini par le paramètre $e_n^2_{BS}$ (soit 50%) excepté pour des valeurs très petites de $e_n^2_{BB}$.

Le coefficient $e_n^2_{BS}$ est donc le seul coefficient qui semble influencer le pourcentage total d'énergie dissipée au premier impact.

Sur la *Figure 4.7* on étudie l'influence des paramètres de dissipation d'énergie sur les déplacements du centre de masse équivalent et de la position de la face supérieur du bloc le plus haut, tel que défini précédemment. Lorsque l'on fait varier le coefficient de dissipation normale entre les blocs et le support ($e_n^2_{BS}$) en fixant $e_n^2_{BB}$ à 0.5, on observe que le rebond des blocs augmente progressivement avec $e_n^2_{BS}$. Plus $e_n^2_{BS}$ est grand, plus le rebond de tous les blocs est important. A noter que pour une configuration multi bloc, le rebond du bloc le plus haut est toujours plus important que le rebond de l'élément dans une configuration monobloc (*Figure 4.7A*).

Lorsque l'on fixe le paramètre de dissipation $e_n^2_{BS}$ à 0.5 en faisant varier le paramètre $e_n^2_{BB}$, on observe que le rebond du bloc le plus haut dans une configuration multi bloc augmente de façon très importante avec $e_n^2_{BB}$ (*Figure 4.7B*).

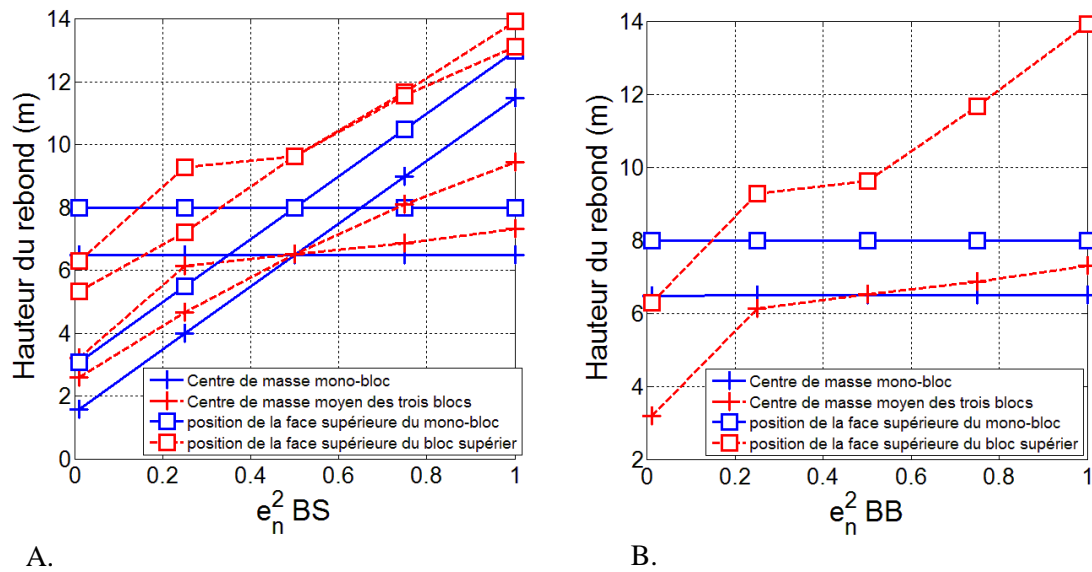


Figure 4.7. Évolution du rebond mesuré sur différents critères en fonction du coefficient de restitution normale

En règle générale, d'après ces résultats, on constate que les écarts entre une configuration monobloc et une configuration multi bloc ne peuvent pas s'exprimer en termes énergétiques mais plutôt trajectographiques car des différences dans les hauteurs de rebonds sont observables malgré des bilans énergétiques globaux assez proches pour les deux configurations.

4.1.4. INTRODUCTION AU PHENOMENE D'IMPACT D'UN BLOC ROCHEUX SUR UN SOL MULTICOUCHE

Une des interrogations actuelles dans l'ingénierie liée à la chute de blocs porte sur le comportement du rebond d'un bloc rocheux lorsque celui-ci impacte un éboulis ou un sol multicouche. Nous avons souhaité dans le cadre de cette thèse aborder sommairement cette problématique afin d'évaluer notre modèle numérique et déterminer l'influence sur le rebond des paramètres de la loi de contact. Les simulations numériques sont minimalistes et consistent au lâché vertical d'un bloc parallélépipédique sur un empilement de 2, 4, 6, 8 ou 10 blocs de même taille (Figure 4.8). La position de la base du modèle, qui est supposée très rigide, est variable en fonction du nombre de blocs considérés dans l'empilement. Les simulations ont été réalisées pour deux hauteurs de lâché ($H=10$ m et $H=20$ m) en utilisant les paramètres rhéologiques définis dans le Tableau 4.2 (paramètres d'interaction bloc support à la base du modèle et paramètres d'interaction bloc-bloc par ailleurs).

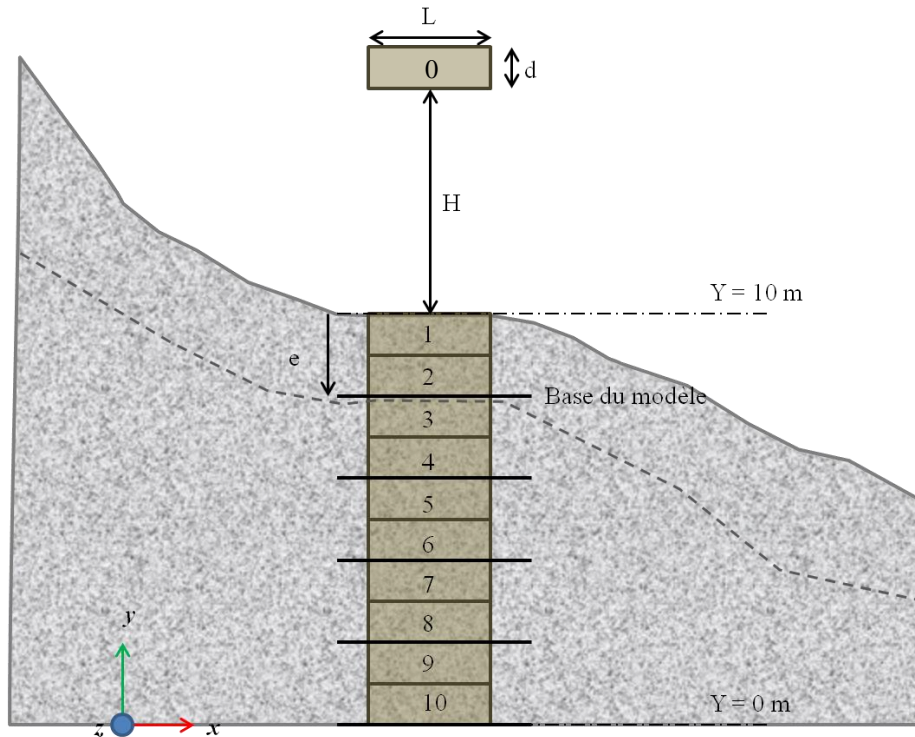


Figure 4.8. Schéma de principe de l'impact d'un bloc sur un sol multicouche

Données géométriques des blocs		Paramètres de contact	Base du modèle	Contact Bloc-Bloc
Epaisseur de l'empilement e [m]	2, 4, 6, 8, 10	Restitution normale (e_n^2)	0.5	0.5
Masse des blocs [kg]	47600	Frottement (μ)	1	1
Largeur des blocs d [m]	1	Raideur normale (k_n) [N/m]	1×10^{11}	1×10^{11}
Hauteur de chute du bloc impacteur H [m]	10 ou 20	Raideur tangentielle (k_t) [N/m]	1×10^{11}	1×10^{11}
Longueur des blocs L [m]	7	Pas de temps dt [s]	1×10^{-6}	
Profondeur des blocs en Z [m]	4	Temps simulé T [s]	10	
Densité des blocs [kg/m ³]	1700			

Tableau 4.2. Paramètres géométriques (gauche) et rhéologiques (droite) des simulations numériques d'un lâché de bloc sur un sol multicouche

Le bilan cinétique des blocs en fonction du temps est présenté sur la *Figure 4.9* pour des hauteurs de chute H de 10 m (A et B) et de 20 m (C et D). Les *Figures A* et *C* font référence au bloc en chute libre (0) tandis que les *Figures B* et *D* se réfèrent aux blocs sous-jacents impactés (du bloc le plus haut – 1 - au bloc le plus bas, soit le bloc 10 pour un empilement de 10 blocs ou le bloc 4 pour un empilement de 4 blocs).

Sur la *Figure 4.9* on présente les rebonds de tous les blocs de l'empilement et ce pour toutes les configurations testées (2, 4, 6, 8, ou 10 blocs). De fait, les rebonds des blocs 1 et 2 sont présentés pour tous les empilements testés tandis que les rebonds des blocs 9 et 10 ne sont présentés qu'une seule fois (empilement de 10 blocs). Sur ces figures, nous observons que le rebond du bloc en chute libre est inversement proportionnel au nombre de blocs considérés dans l'empilement (un nombre important de blocs induit une dissipation d'énergie supplémentaire à chaque interface) et proportionnel à la hauteur de chute (*Figure 4.9A* et *4.9C*).

En ce qui concerne le rebond des blocs de l'empilement, nous observons que l'accroissement de la hauteur de chute entraîne une augmentation du rebond. Pour des empilements de plus de 6 blocs, le phénomène de rebond des blocs à la base du modèle est faible malgré une augmentation de l'énergie d'impact du bloc en chute libre (*Figure 4.9C*). Ceci dit, les blocs se situant en dessous de 6 m oscillent légèrement, ce qui ne veut pas dire pour autant que ces blocs n'ont pas une influence dans le phénomène de dissipation d'énergie.

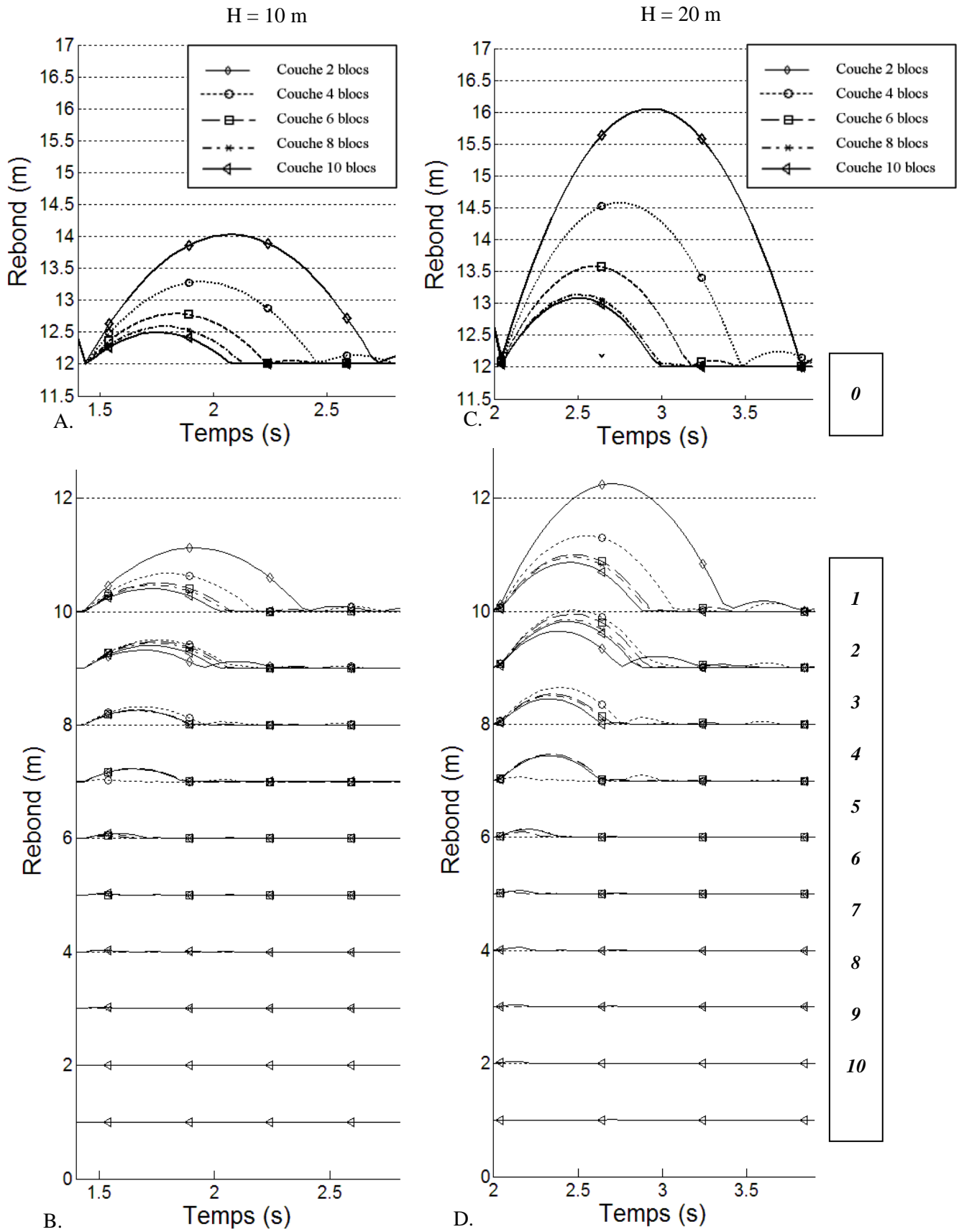


Figure 4.9. Déplacements verticaux des blocs en fonction du temps pour $H = 10\text{ m}$ et $H = 20\text{ m}$ pour chacun des blocs de l'empilement (du plus haut - 1 - au plus bas - 10) et du bloc impacteur (0)

Afin d'étudier l'influence du paramètre de restitution normal e_n^2 , 25 simulations complémentaires ont été réalisées en prenant en compte des empilements de 10 blocs et une hauteur d'impact H de 10 m en faisant varier les coefficients de restitution normal entre les blocs ($e_n^2_{BB}$) et à la base du modèle ($e_n^2_{BS}$) entre 0 et 1 avec un incrément de 0.25.

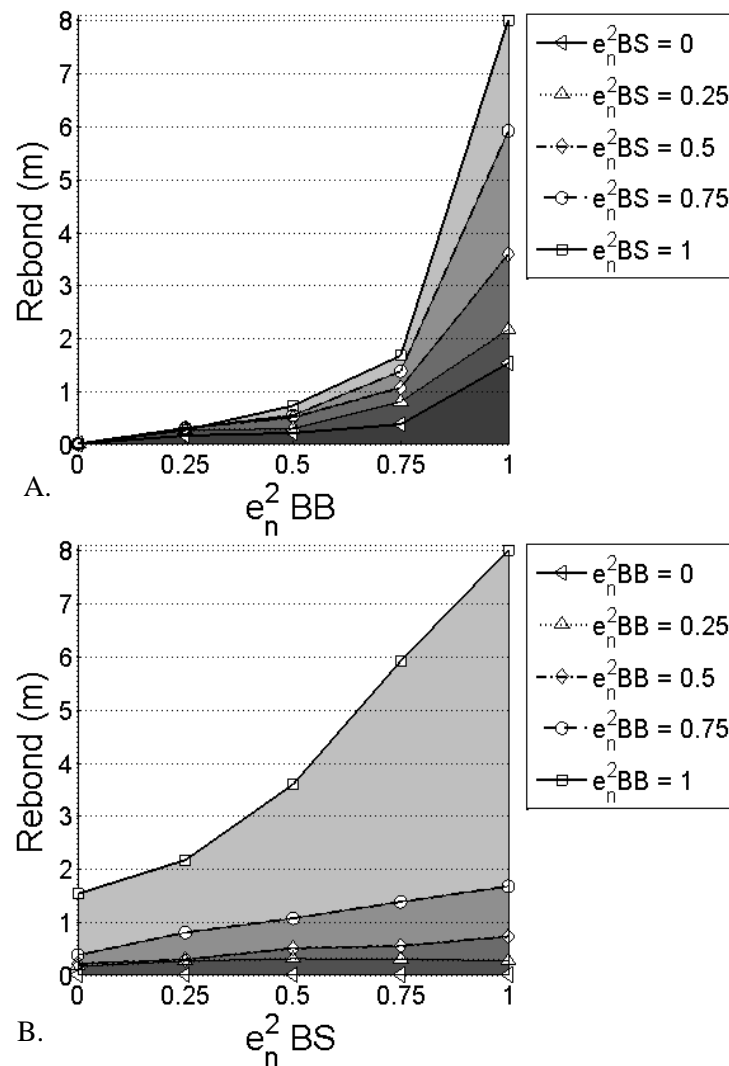


Figure 4.10. Rebound du bloc impacteur en fonction du coefficient de restitution. A. En fonction du paramètre $e_n^2_{BB}$. B. En fonction du paramètre $e_n^2_{BS}$

Sur la *Figure 4.10* on présente l'évolution du rebond maximal au premier impact du bloc en chute libre en fonction des différents coefficients de restitution testés. Comme attendu, nous observons que le rebond du bloc impacteur est fortement dépendant des valeurs des coefficients $e_n^2_{BB}$ et $e_n^2_{BS}$. L'influence du coefficient de restitution $e_n^2_{BB}$, qui agit au niveau de toutes les interfaces Bloc-bloc, est très importante (on note une variation exponentielle de la hauteur du rebond initial du bloc en chute libre en fonction de $e_n^2_{BB}$) (*Figure 4.10A*). Pour des valeurs de $e_n^2_{BB}$ comprise entre 0 et 0.75 la variation de la hauteur du rebond initial du bloc en chute libre en fonction de $e_n^2_{BS}$ est quasiment linéaire ($e_n^2_{BS}$ n'agit qu'à la base du modèle) (*Figure 4.10B*). Cependant, il est intéressant de noter que quels que soient les paramètres utilisés, l'énergie potentielle du bloc en chute libre n'est pas entièrement dissipée au premier rebond que ce soit entre les blocs de l'empilement ou à la base du modèle. Cette énergie est en partie transmise aux blocs de l'empilement qui s'entrechoquent et restituent une part de leur énergie au bloc impacteur dont le

rebond est par la suite modifié. De ce fait il est très difficile de déterminer à priori (en fonction du nombre de blocs de l'empilement et de la valeur des coefficients $e_n^2_{BS}$ et $e_n^2_{BB}$) la hauteur du rebond du bloc en chute libre et de déterminer quel serait le paramètre de restitution global du sol modélisé. En ce qui concerne les mouvements des blocs de l'empilement, et de façon analogue avec les résultats présentés sur la *Figure 4.9*, on constate que les déplacements et rebonds des blocs situés au-dessous de 6 m sont très faibles et cela indépendamment du coefficient de restitution choisi (*Figure 4.11*).

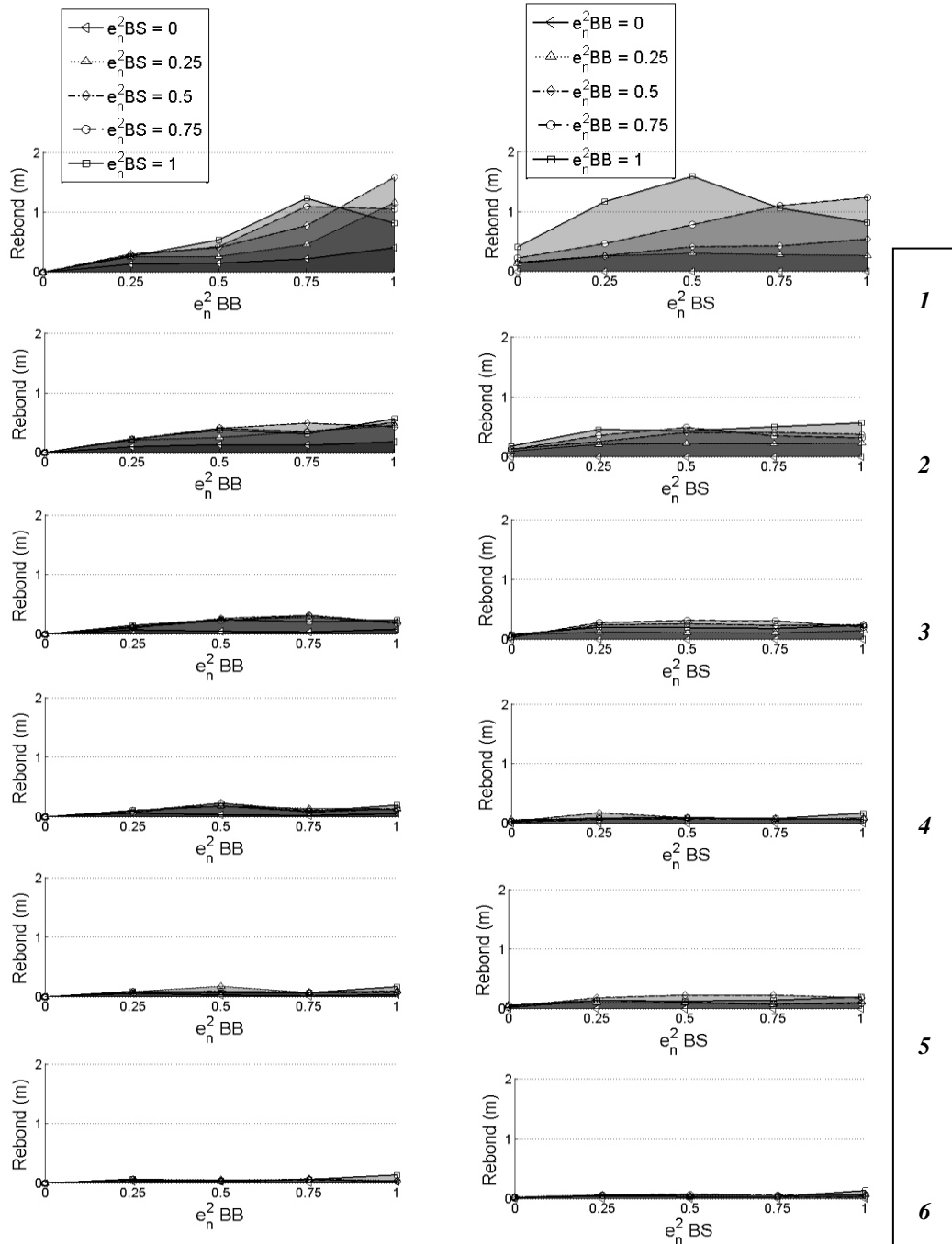


Figure 4.11. Evolution du rebond initial des six premiers blocs de l'empilement (les déplacements des blocs sous-jacents étant très faibles ils ne sont pas représentés)

4.1.5. CONCLUSION

Cette première section a permis de présenter les principes généraux de notre approche numérique pour la modélisation et simulation de l'impact entre plusieurs blocs rocheux en interaction. Dans l'optique de mieux appréhender les mécanismes de dissipation d'énergie et de rebond, cette section a présenté des simulations numériques où plusieurs blocs chutent verticalement sur un plan horizontal. Cette configuration nous a permis de mieux appréhender la réponse de notre modèle numérique lors d'interactions multi blocs, très présentes dans les phénomènes d'éboulements rocheux et de mieux comprendre comment l'énergie est dissipée dans une telle configuration. Les conclusions principales de ces études numériques sont :

- Lorsqu'une masse rocheuse comportant plusieurs blocs vient impacter un sol horizontal, la quantité globale d'énergie dissipée au premier impact est fonction presque exclusivement du coefficient de restitution $e_n^2_{BS}$ (le coefficient de restitution bloc-bloc ayant une influence sur les modes de dissipations d'énergie mais pas sur la quantité globale d'énergie dissipée). En revanche la hauteur de rebond des blocs (qui interagissent les uns par rapport aux autres) est affectée aussi bien par la valeur de e_n^2 bloc-support que par la valeur de $e_n^2_{BB}$.
- En règle générale, nos résultats nous ont permis de comprendre qu'un modèle multi blocs, bien que proche en termes de bilan énergétique qu'un modèle monobloc, peut influencer considérablement la nature des rebonds. En effet, l'interaction multi blocs se caractérise par une phase de transfert d'énergie cinétique entre les blocs ce qui permet à certains d'entre eux d'avoir des rebonds plus importants compte tenu d'un apport d'énergie par les autres blocs. Pour les configurations testées nous avons montré que ce transfert d'énergie permettait des rebonds 2 fois plus importants que la configuration monobloc (*Figure 4.7*).
- Enfin les études paramétriques menées en considérant un sol multi couche montre qu'il est très difficile dans ce cas de déterminer à priori en fonction des paramètres de dissipation d'énergie ($e_n^2_{BB}$ et $e_n^2_{BS}$) la hauteur du rebond du bloc en chute libre et de déterminer quel serait le paramètre de restitution global du sol modélisé. Pour cette raison, et pour les applications aux sites réels, nous avons pris le parti de modéliser le substratum comme une condition aux limites dont le coefficient $e_n^2_{BS}$ garantit un taux de dissipation d'énergie à chaque impact constant et bien maîtrisé.

4.2. Influence des paramètres de la loi de résistance au roulement sur l'arrêt des blocs : étude paramétrique

4.2.1. CONTEXTE

Le contact bloc-sol est un phénomène très complexe principalement à cause de l'hétérogénéité des matériaux concernés. En présence de certains sols meubles, par exemple, des phénomènes tels que l'encastrement des blocs dans le sol sur une certaine profondeur ont lieu. D'un point de vue de la cinématique des blocs rocheux, ce phénomène entraîne un arrêt plus rapide des blocs du fait d'une absorption d'énergie liée à plastification de la zone d'impact, au frottement avec le sol, ou à la résistance au basculement du bloc. Si les mécanismes de butée et de plastification de la zone d'impact ont pu être pris en compte par les coefficients de dissipation normale et tangentielle, il a été nécessaire d'introduire une loi de résistance au roulement (voir Chapitre 3) qui tient compte notamment de la profondeur d'encastrement du bloc dans le sol et de l'énergie d'impact. Dans cette section, les aspects suivants seront étudiés :

- L'évolution du moment résistant pendant la durée d'un impact,
- L'influence des paramètres de la loi de résistance au roulement sur les grandeurs caractéristiques de la propagation : vitesses des blocs (en translation et rotation) et distances d'arrêt.

De manière générale, ces simulations doivent permettre de mieux comprendre les aspects pratiques de la loi proposée en vue d'une estimation pertinente de leur valeur en ingénierie pour des applications à des cas réels d'éboulements en masse sous des conditions comparables.

4.2.2. EVOLUTION DU MOMENT RESISTANT PENDANT LA DUREE D'UN CONTACT

Cette étude consiste à analyser l'évolution du moment de résistance au roulement pendant la durée d'un impact d'un bloc sur un sol. Par souci de simplicité, nous avons étudié les propagations sur un support incliné de blocs rocheux sphériques ou de forme cubique (*Figure 4.12*), de même volume et de même masse, ayant à l'état initial une vitesse de rotation V_{rot} de 20 rad/s et une vitesse de translation nulle ($v_0=0$). Les paramètres physiques, géométriques et d'interaction de la simulation numérique sont résumés respectivement dans les *Tableaux 4.3 et 4.4*. Le paramètre C_0 (moment nécessaire pour contenir, au moins, le moment de renversement dû au poids propre) a été fixé à la valeur $m \times l \times g$ (relation décrite dans le Chapitre 3) avec m la masse ; l la distance entre le centre de masse du bloc et la zone de contact au sol et g la gravité.

Forme du bloc	L (m)	l (m)	Vol. (m ³)	α (°)	densité (kg/m ³)	Masse (kg)
Cube	5	4,20	110	45	2000	220000
Sphère	5,94	2,97	110	45	2000	220000

Tableau 4.3. Paramètres physiques et géométriques de la simulation numérique

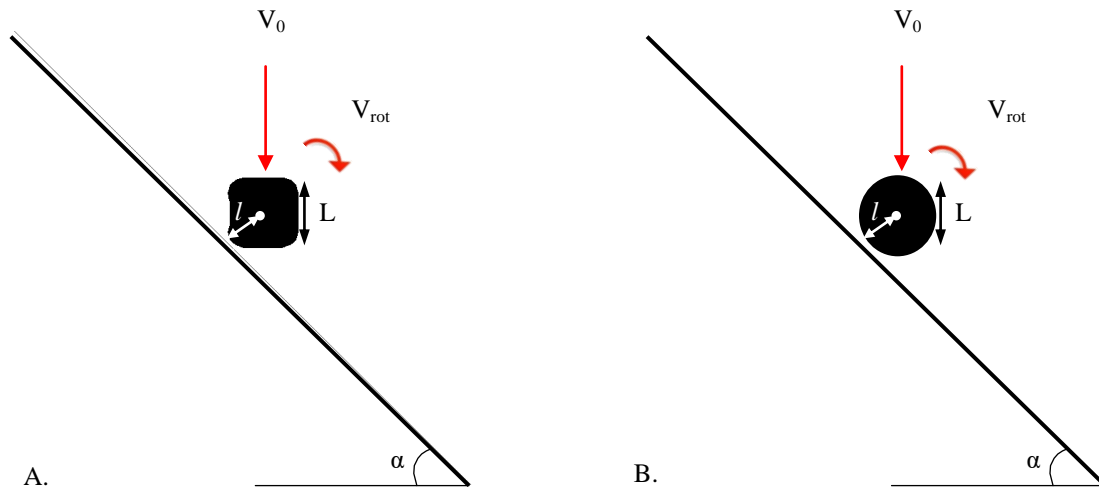


Figure 4.12. Géométries de base des simulations numériques. A. Configuration 1 avec le cube. B. Configuration 2 avec la sphère

Forme du bloc	e_n^2	μ	k_n (N/m)	k_t (N/m)	dt (s)	t (s)	k_r (N.m/rad)	C_0 (N.m)	μ_R
Cube	0,1	2,05	1×10^8	1×10^8	1×10^{-5}	25	5×10^8	9240000	0,50
Sphère	0,1	2,05	1×10^8	1×10^8	1×10^{-5}	25	5×10^8	6534000	0,50

Tableau 4.4. Paramètres de contact et grandeurs caractéristiques des simulations numériques

La Figure 4.13 présente la cinématique de propagation du bloc cubique lors de l'impact avec le support incliné. Le bloc étant légèrement surélevé par rapport à la pente, le premier impact a lieu avec une vitesse de rotation de 20 rad/s à l'instant $t=0,750$ s. A cet instant l'une des arêtes du cube entre en contact avec la pente. Par la suite, le bloc, toujours en contact avec la pente va poursuivre son mouvement de rotation, et subir une perte de vitesse en rotation. Le premier contact est par la suite perdu mais très rapidement un nouveau contact est établi avec une seconde arête du cube. Pour rappel, le moment de résistance au roulement est réinitialisé à 0 à chaque fois que le contact est perdu et recalculé par la suite en fonction des caractéristiques de chaque impact.

Les évolutions en fonction de l'angle de rotation θ et du temps t, du couple résistant appliqué au bloc pendant l'impact et des paramètres ($f_n \times \mu_R \times l$, C_{\max} , C_{test} et C_0) de la loi rhéologique (Chapitre 3) pour les configurations 1 et 2, sont présentées sur la Figure 4.14.

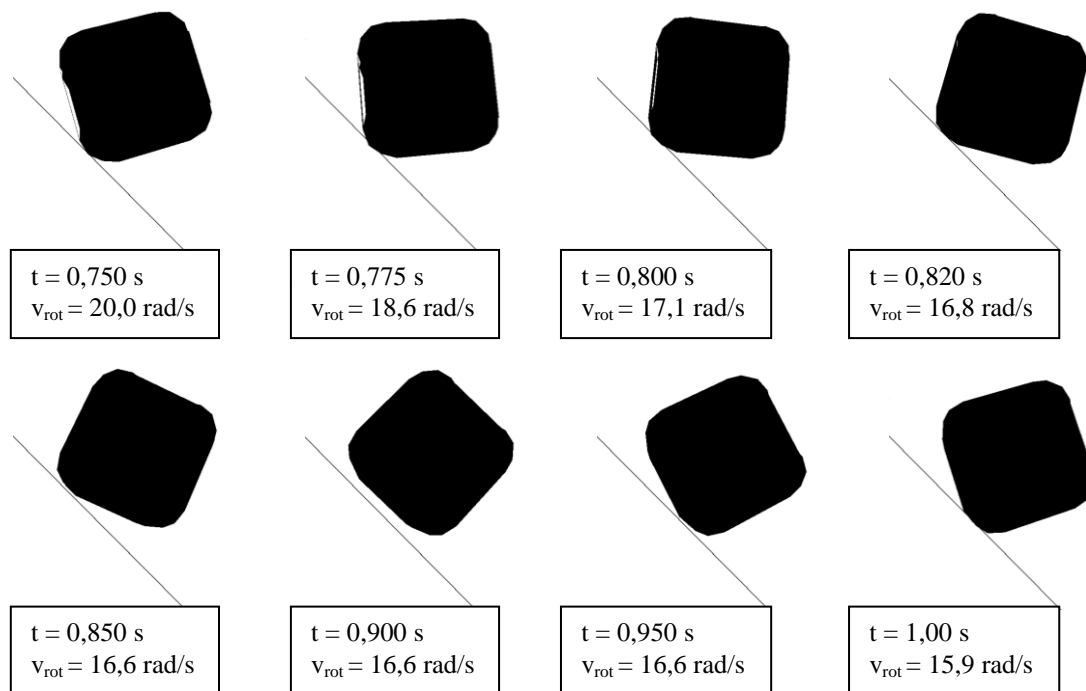


Figure 4.13. Cinématique du cube à différents pas de temps avec sa vitesse de rotation

Sur la *Figure 4.14A*, on distingue très nettement la première phase d'impact du bloc cubique avec le support incliné et la seconde liée au contact avec le second coté du cube. Dans la toute première phase, on constate que la valeur du moment résistant est initialement proportionnelle à la rotation du bloc conformément à la loi de résistance au roulement introduite, et ce tant que la valeur seuil n'est pas atteinte. On rappelle que la valeur seuil est définie comme étant la plus grande valeur entre C_0 et la valeur de $f_n \times \mu_R \times l$ définie à un pas de temps donné. Lors de la décharge du contact (diminution de f_n) le moment résistant diminue jusqu'à la valeur seuil C_0 . Lors du second contact, le moment est réinitialisé à zéro et recalculé en fonction des caractéristiques de l'impact.

Sur la *Figure 4.14B* on constate que le seuil atteint rapidement la valeur C_0 puis augmente en fonction de la force de contact qui croît progressivement. On rappelle que la sphère est posée à la surface du support incliné et qu'elle s'enfonce progressivement dans le sol sous son propre poids. La décharge élastique fait qu'il y a diminution de la force de contact et diminution du moment résistant jusqu'à la valeur seuil C_0 .

La *Figure 4.15* permet de comparer l'évolution de la cinématique des blocs (cube et sphère) en prenant ou non en considération la loi de résistance au roulement. Les variables étudiées sont la distance de propagation suivant l'axe horizontal X (RunOut) et les vitesses de translation et de rotation en fonction du temps. Lorsque la loi de résistance au roulement n'est pas prise en compte on constate que les cinématiques de propagation pour les deux formes étudiées sont assez similaires.

Lorsque la résistance au roulement est prise en compte, on constate qu'il est plus difficile d'arrêter une forme anguleuse (pour laquelle le contact est perdu à chaque rotation et en raison des

rebonds multiples) qu'une forme ronde (pour laquelle le contact est persistant). Pour l'exemple traité, et avec les paramètres définis dans le *Tableau 4.4*, le temps nécessaire pour arrêter la sphère est de 7 s alors que pour le cube l'arrêt a été obtenu à 25 s et pour une distance très importante.

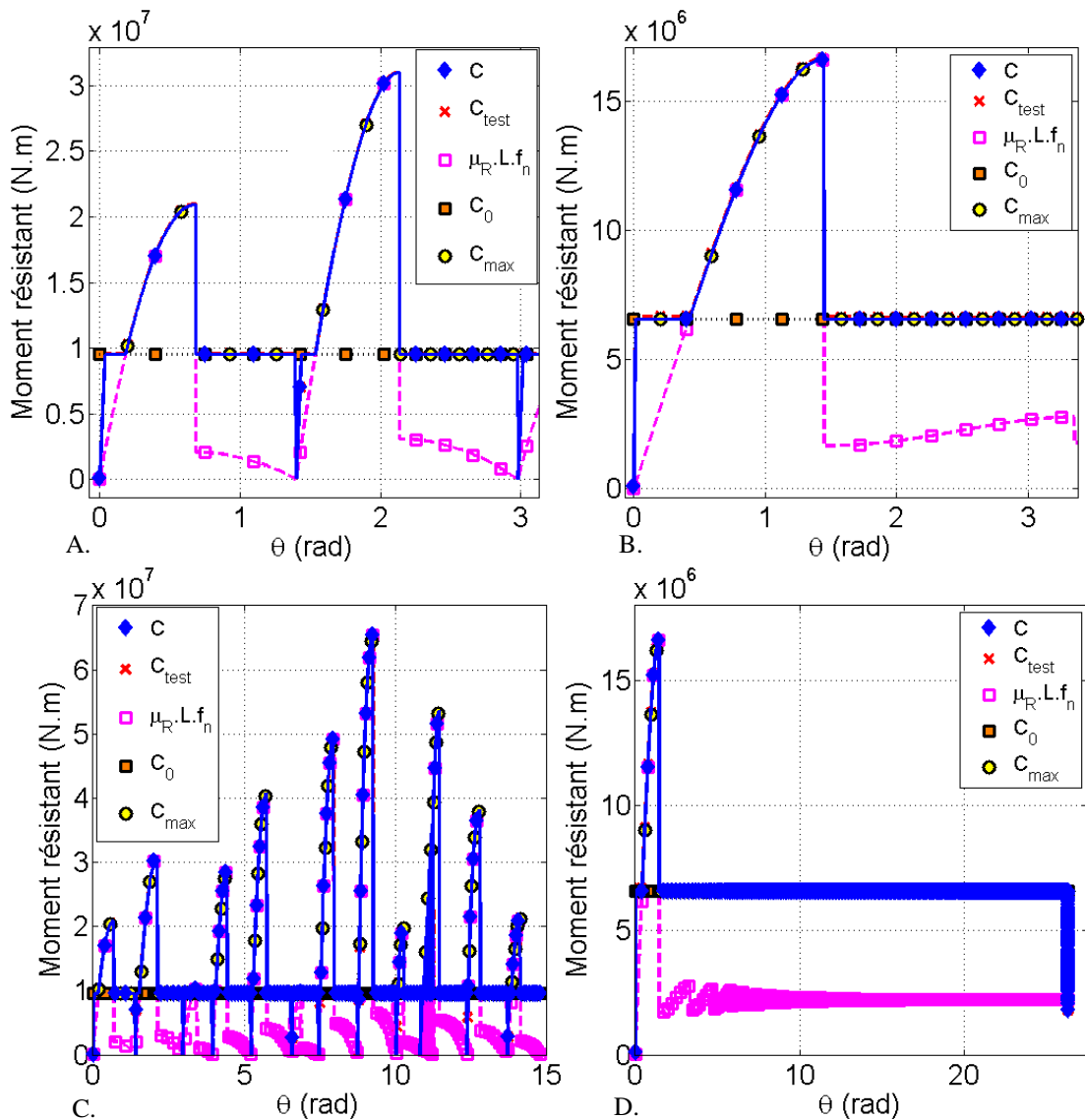


Figure 4.14. Moment de résistance au roulement en fonction de l'angle de rotation pour A. La configuration avec le cube pour les deux premiers impacts avec le support. B. La sphère pendant les premiers moments du contact avec le sol. C. Le cube sur la durée totale de la simulation. D. La sphère sur la durée totale du contact

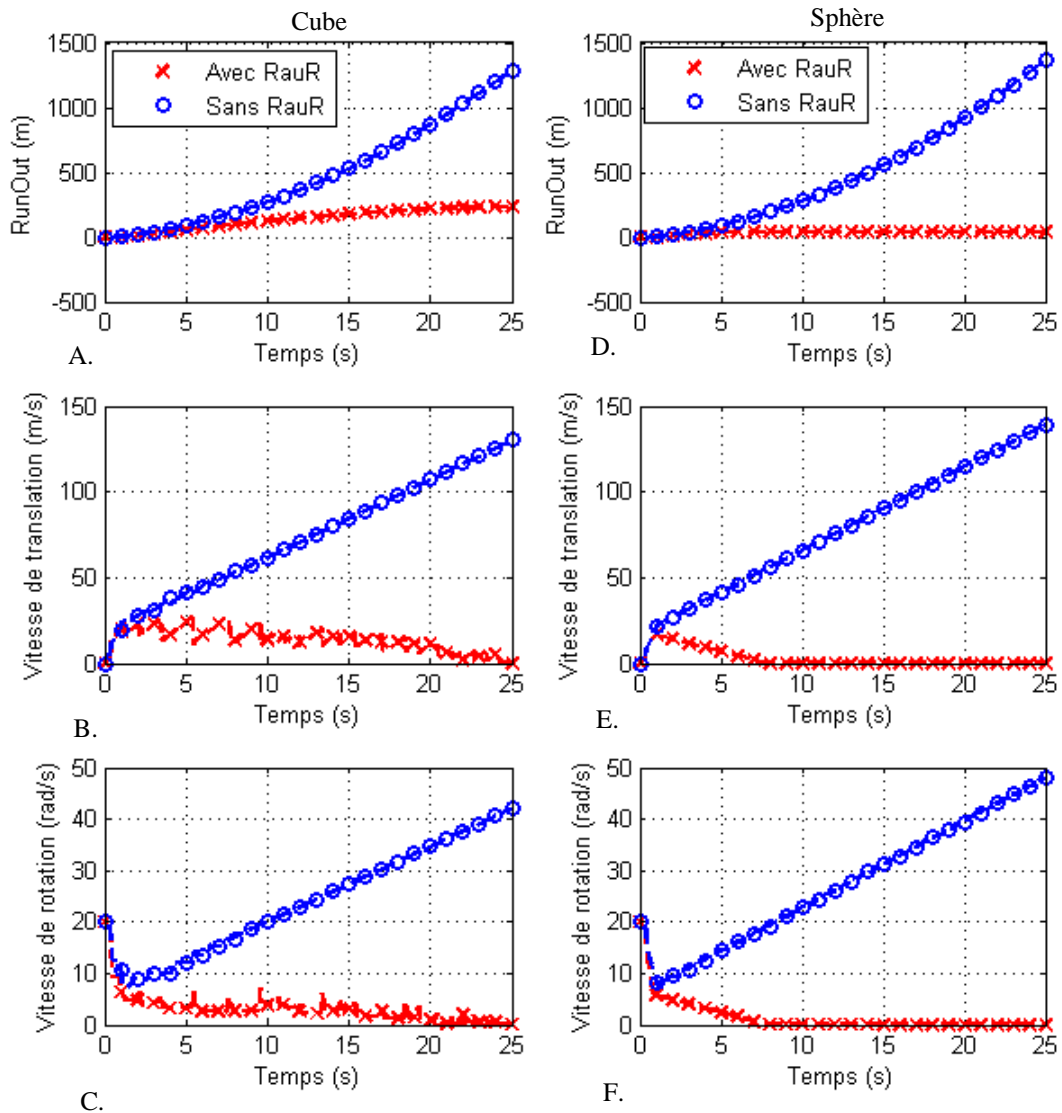


Figure 4.15. Evolution du RunOut et des vitesses de translation et de rotation en fonction du temps pour le cube (A, B et C) et la sphère (D,E et F) avec et sans résistance au roulement (noté RauR)

4.2.3. ÉTUDE DE SENSIBILITE AUX PARAMETRIQUES DE LA LOI DE RESISTANCE AU ROULEMENT

L'étude proposée consiste à analyser la trajectoire d'un bloc cubique (*Tableau 4.3*) se propageant sur un support d'inclinaison α tel qu'il est présenté sur la *Figure 4.12*. Les paramètres de base et grandeurs caractéristiques des simulations numériques sont ceux du *Tableau 4.5*. Pour l'étude de sensibilité aux paramètres, seul un des paramètres de la loi de résistance au roulement est modifié à la fois (paramètres définis en gris dans le *Tableau 4.5*). Un total de 1000 simulations a été réalisé. Notons que le paramètre de frottement μ est bien supérieur à la valeur critique ($\tan(45^\circ) = 1$) en deçà de laquelle le cube glisse à plat sans s'arrêter sur la pente.

Type	e_n^2	μ	k_n (N/m)	k_t (N/m)	dt (s)	t (s)	k_r (N.m/rad)	C_0 (N.m)	μ_R
Bloc/Sol	0.1	2.05	$5 \times 10^7 -$ 5×10^{10}	1×10^8	1×10^{-5}	30	5×10^8	1, 10, 100, ..., 1×10^8	0.1, 0.2, ..., 1.0

Tableau 4.5. Paramètres de contact et grandeurs caractéristiques des simulations numériques

Les variables étudiées sont la position (*Figure 4.16A à 4.16J*), les vitesses de translation (*Figure 4.17A à 4.17J*) et de rotation (*Figure 4.18A à 4.18J*) en fin de simulation ($t=30$ s). Pour chaque valeur de C_0 retenue, nous présentons chacune des variables étudiées en fonction du paramètre de raideurs normales k_n et du coefficient de résistance au roulement μ_R .

Lorsqu'aucun terme de dissipation au roulement n'est introduit ($\mu_r = 0$ et $C_0 = 1$), nous observons que la trajectoire finale du cube peut atteindre les 1500 m de propagation en fin de simulation (*Figure 4.16*), une vitesse de translation supérieure à 100 m/s (*Figure 4.17A*) et une vitesse de rotation supérieure à 40 rad/s (*Figure 4.18A*).

Les résultats de l'étude paramétrique présentés sur les *Figures 4.16 à Figure 4.18* montrent que lorsque le seuil minimal C_0 est inférieur à la valeur critique $C_c = m \times l \times g = 9240000$ N/m, les résultats sont inversement proportionnels à μ_R . En fait plus les valeurs de μ_R sont importantes plus les blocs sont freinés en rotation. Pour des valeurs supérieures à $\mu_R = 0.5$ on constate l'arrêt systématique du bloc.

Lorsque le seuil minimal C_0 est supérieur à la valeur critique C_c , l'arrêt du bloc est très rapide (distance de propagation de l'ordre de quelques mètres) comme le montrent les *Figures 4.16 et Figure 4.18*.

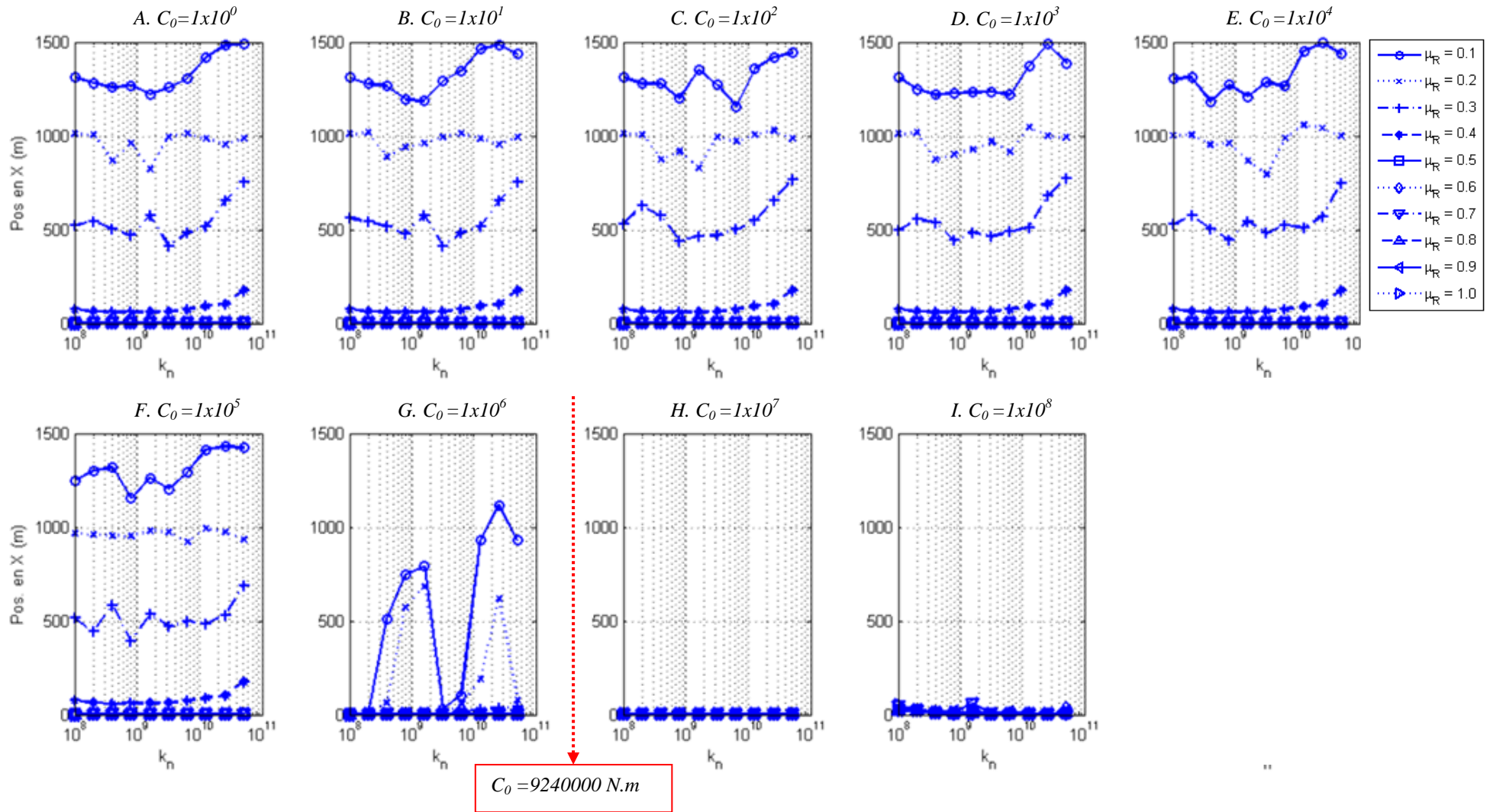


Figure 4.16. Evolution du Run-Out lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement

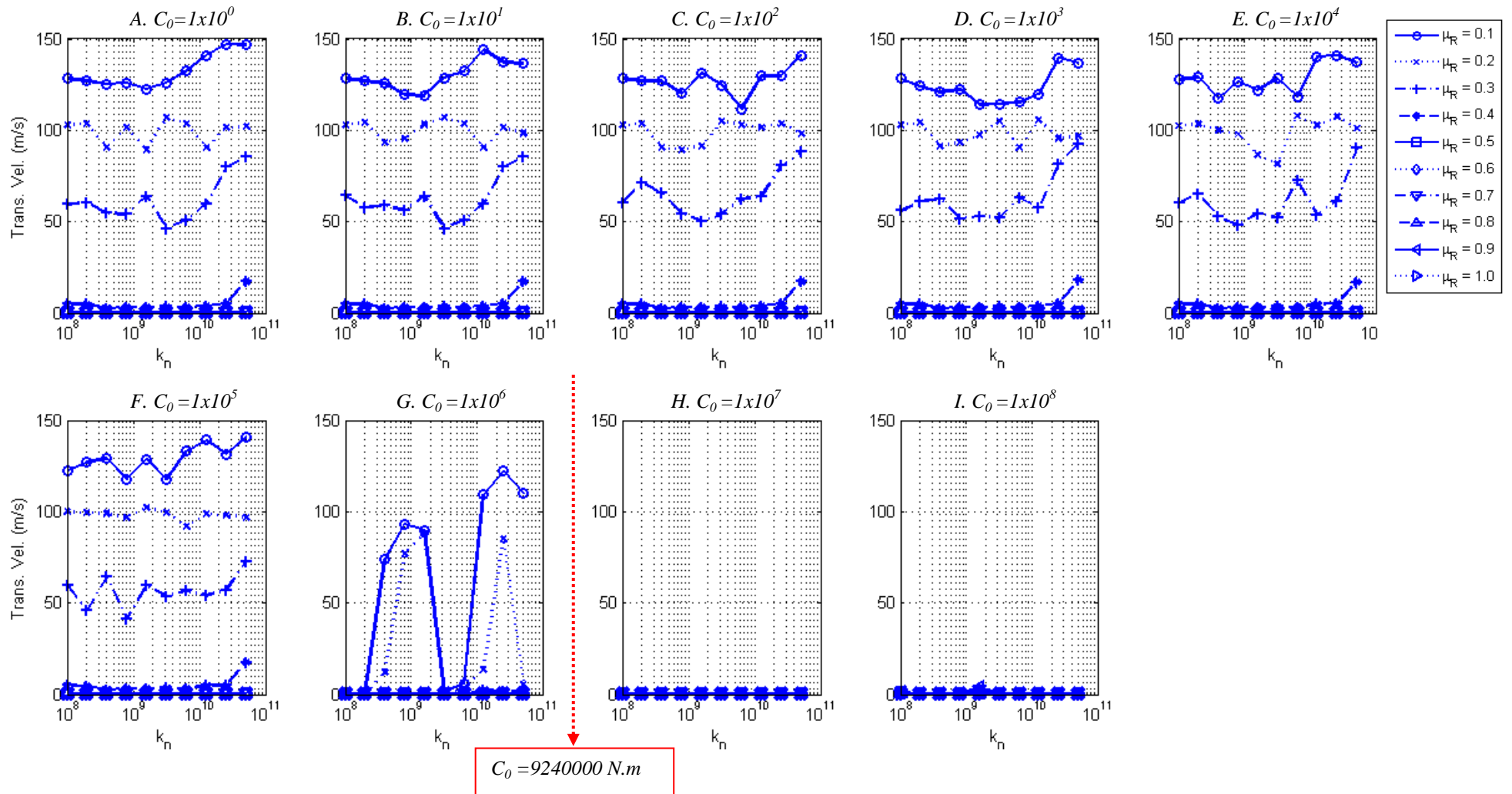


Figure 4.17. Evolution de la vitesse de translation lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement

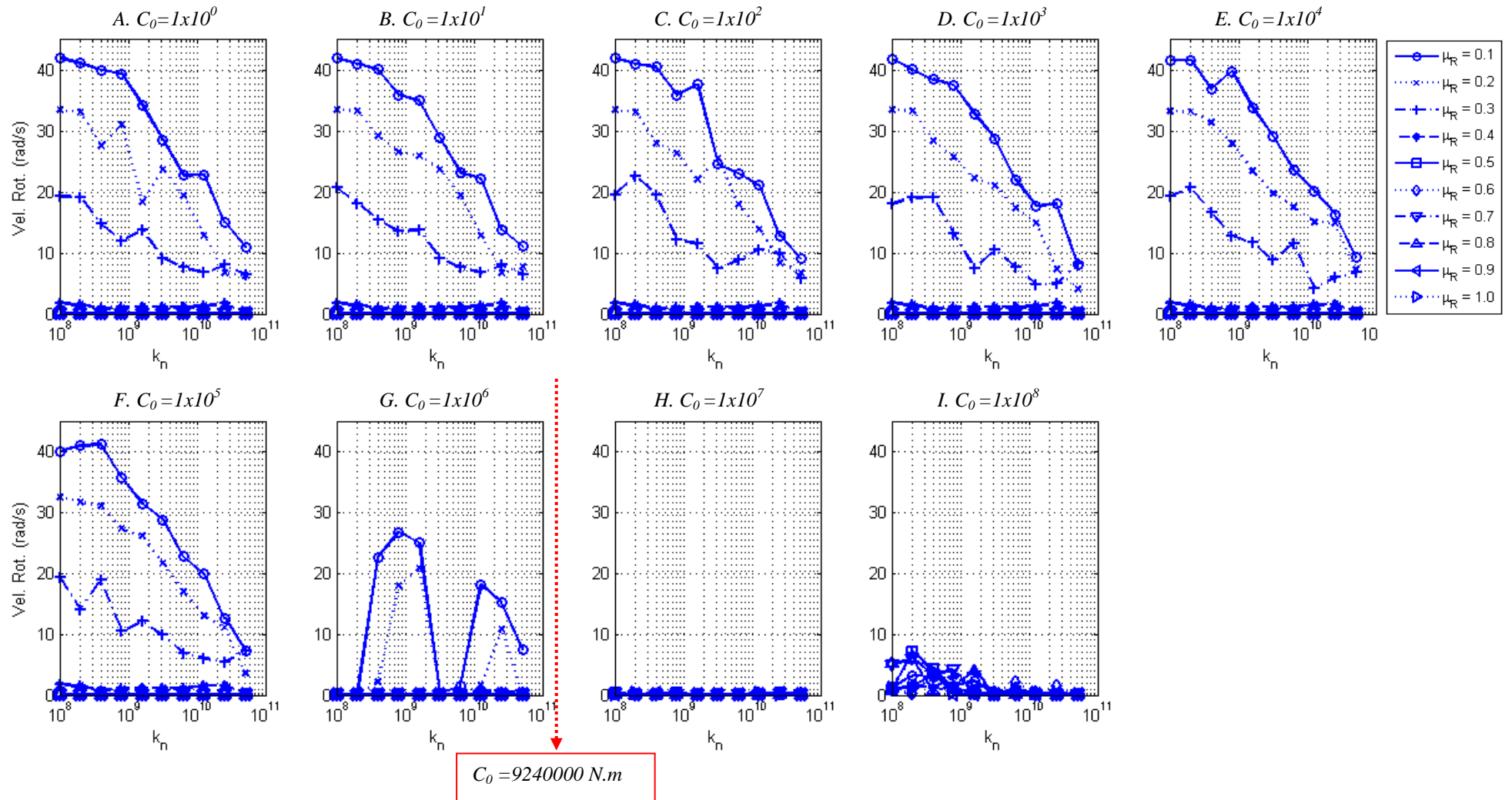


Figure 4.18. Evolution de la vitesse de rotation lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement

4.2.4. CONCLUSION

Une loi de résistance au roulement a été développée dans le cadre de cette thèse et introduite dans le modèle numérique. Cette loi est représentée par trois paramètres principaux :

- μ_R : le coefficient de résistance au roulement,
- k_r : la raideur en rotation,
- C_0 : le seuil minimum.

Le moment de résistance au roulement est déterminé en fonction de ces paramètres et de la force normale à l'impact, d'où une dépendance aux valeurs de la raideur normale également. Cette loi n'a pas de limite de seuil maximum mais un seuil minimum (C_0) doit être défini pour contrer le poids propre du bloc et éviter son basculement du bloc lorsqu'il est immobilisé en translation.

Une étude de sensibilité de ces paramètres a été réalisée. Nous pouvons résumer ces résultats de la façon suivante pour chaque paramètre :

- μ_R : Il s'agit du paramètre le plus influant qui permet de freiner plus ou moins le bloc en rotation et permet de limiter sa vitesse sur des pentes très raides. Pour des cubes et des géométries de pentes similaires à celles étudiées dans cette section, nous avons observé que des valeurs de $\mu_R > 0.50$ étaient généralement suffisantes pour arrêter le bloc en rotation.
- C_0 : Ce paramètre admet une valeur critique au-delà de laquelle le bloc peut s'arrêter de tourner pour une pente donnée. En pratique il est recommandé, au vu des résultats obtenus, de choisir une valeur de C_0 proche ou légèrement supérieur à la valeur $C_c = m \times l \times g$.
- k_r : Dans nos simulations, nous avons travaillé avec une valeur élevée de k_r . Ce paramètre a une influence sur la rapidité à laquelle le seuil est atteint (mais pas sur le seuil lui-même) ce qui nous a permis de mobiliser dans nos simulations très rapidement la résistance au roulement maximale. On peut penser néanmoins que ce paramètre a peu d'influence sur le phénomène de propagation (n'ayant pas d'influence sur la valeur seuil) lorsque celui-ci se réalise majoritairement par rebonds ou en présence de blocs très anguleux.

Pour conclure, l'étude de sensibilité aux paramètres nous a permis de mieux cerner le rôle des différents paramètres de la loi de résistance au roulement et de définir des plages optimales d'utilisation des paramètres. Néanmoins son application à des problèmes réels reste une question d'actualité que l'on essaiera d'aborder dans la partie dédiée à la modélisation du site dit de Saint Pancrasse sur le Chapitre 5.

4.3. DEMbox et la modélisation d'avalanches rocheuses

4.3.1. CONTEXTE

Le modèle numérique *DEMbox* a été développé en 2011 et utilisé dans le cadre du projet européen MASSA (*Medium and Small Size Rockfall hazard Assisment*) (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment Medium and Small Size rock fall hazard Assessment, 2013) pour modéliser des expérimentations de laboratoire réalisées à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Manzella et al., 2008) et ce afin de mieux comprendre le phénomène de propagation d'avalanches rocheuses. Dans le cadre de ce projet et dans sa continuité, plusieurs modèles numériques ont été testés et comparés : approches continues (avec le logiciel DAN3D), approche discrète (avec *DEMbox*) et approches hybrides FEM-DEM (Manzella, 2011).

Un des avantages les plus remarquables du modèle numérique discret (comparativement aux expérimentations de laboratoire) porte sur sa capacité à accéder, au sein de l'écoulement, à des informations difficilement identifiables expérimentalement, telles que les vitesses des grains ou encore les modes de dissipation d'énergie au cours de la propagation, aussi bien à la périphérie qu'au sein de la masse granulaire. L'accès à ces informations a facilité la réalisation de diverses études paramétriques dont les résultats ont été largement publiés. Ont ainsi été étudiés les mécanismes de dissipation d'énergie, de propagation et d'arrêt des blocs rocheux, au travers de l'influence de la rugosité du support (Daudon et al., 2014), des paramètres de contact (Mollon et al., 2012), de la taille et la forme des blocs (Daudon et al., 2014) et ce principalement dans le cadre du projet MASSA (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment Medium and Small Size rock fall hazard Assessment, 2013). La bonne corrélation entre le modèle numérique *DEMbox* et les données expérimentales (Mollon et al., 2011) a permis de valider tant le code que la loi rhéologique pour des applications telles que les chutes de blocs rocheux en masse.

Pour rendre opérationnelle une méthode de modélisation dans l'ingénierie, il est important que celle-ci soit capable de rendre compte du phénomène de propagation à l'échelle naturelle et soit validée sur des cas réels d'éboulement rocheux. La première application du code de calcul *DEMbox* à des applications réelles concerne le minage en 2012 du mont Le Néron près de Grenoble. Des simulations numériques ont été réalisées sur la base d'hypothèses topographiques et rhéologiques simplifiées (Bottelin et al., 2014). Même si les résultats obtenus ont été jugés encourageants, des caractéristiques telles que la géométrie des blocs ou leur positionnement sur le versant naturel n'ont pas pu être considérées en raison principalement de la complexité du phénomène de fracturation ayant eu lieu lors de l'explosion. Par ailleurs, d'autres phénomènes complexes tels que l'interpénétration et l'interaction des blocs avec des pentes meubles n'avaient été que rapidement abordés.

Avant d'entreprendre des simulations numériques complexes de cas réels nous avons décidé de poursuivre les études de modélisations numériques entreprises dans le cadre du projet MASSA (lâché, propagation sur un plan incliné et stabilisation sur un plan horizontal d'une masse granulaire) pour mieux appréhender les mécanismes de dissipation d'énergie. Nous nous sommes intéressés en particulier aux mécanismes de dissipation d'énergie aux niveaux des singularités et des ruptures de pente qui sont sources d'instabilités numériques dans les modèles continus.

Pour mieux comprendre le phénomène de propagation dans la rupture de pente, le modèle numérique discret a été utilisé en considérant des zones de transition brusques ou progressives entre le plan incliné et le plan horizontal. Dans cette étude, on ne veut pas seulement déterminer où

s'arrête la masse mais on souhaite également comprendre pourquoi elle s'est arrêté et quelle a été l'influence de la transition sur ce phénomène. Cette nouvelle campagne numérique a donc pour objectif une meilleure compréhension des phénomènes dissipatifs au sein de la masse granulaire au passage d'une singularité.

4.3.2. CARACTERISTIQUES DES SIMULATIONS NUMERIQUES

Les expériences utilisées comme référence pour la modélisation numérique (Manzella et al., 2008) ont été effectuées à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et ont consisté en des lâchers de briques rectangulaires sur un biplan incliné et horizontal de 3 m par 4 m. L'inclinaison du plan incliné est réglable mais un angle de 45° a été retenu dans le cadre du projet. La transition entre les deux plans est assurée par une zone de transition courbe dont on peut fixer le rayon de courbure. Une boîte rectangulaire contenant une masse donnée de petites briques (en vrac ou empilées) est positionnée sur le plan incliné à une hauteur définie (H). L'ouverture de la boîte déclenche l'avalanche granulaire sur le plan incliné, puis le dépôt sur le plan horizontal (Figure 4.19) (Manzella et al., 2008).

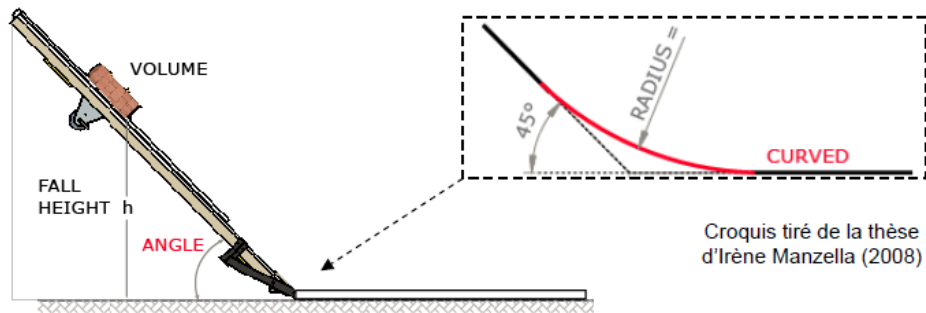


Figure 4.19. Schéma du dispositif expérimental d'avalanche granulaire de l'EPFL (Manzella et al., 2008)

Des simulations numériques similaires à celles réalisées par (Mollon et al., 2011), impliquant des briques ou des cubes en vrac ou ordonnés, ont été réalisées pour différentes hauteurs du lâché (H) et pour des zones de transition brusques ou progressives avec des rayons de courbure allant de 0 à 90 cm. Les paramètres de contact du modèle numérique (Tableau 4.6) et les caractéristiques géométriques de la boîte de départ et des briques (Tableaux 4.7 et 4.8) sont identiques à ceux utilisés dans le cadre du projet MASSA.

Type de contact	e_n^2	μ	k_n	k_t/k_n
Brique/Support	0.53	0.46	10^5	0.42
Brique/Brique	0.13	0.86	10^5	0.27

Tableau 4.6. Paramètres de la loi de contact (Mollon et al., 2011)

	Briques	Cubes
Masse totale (kg)	31,65	34,1
Densité (kg/m³)	1700	1700
Nombre d'éléments	4841	4907
Volume de chaque élément (mm²)	4096	4096
Dimension de chaque particule (x, y, z) (mm³)	16 x 32 x 8	16 x 16 x 16
Volume total (L)	18,83	20,1
Configuration initiale	Empilée/en vrac	Empilée/en vrac

Tableau 4.7. Caractéristiques des particules de la simulation

	Géométrie de la boîte de départ			
	Briques empilées	Briques en vrac	Cubes empilés	Cubes en vrac
Longueur L_x (m)	0,304	0,56	0,304	0,48
Largeur L_y (m)	0,176	0,176	0,176	0,176
Profondeur L_d (m)	0,352	0,352	0,352	0,352

Tableau 4.8. Caractéristiques de la boîte de départ

Rappelons ici, les questionnements auxquels les analyses des simulations numériques devraient apporter des réponses :

- Que se passe-t-il au niveau de la transition de pente d'un point de vue cinématique ou énergétique?
- L'interaction inter granulaire au sein de la masse rocheuse est elle négligeable au regard des interactions avec la pente?
- La forme des particules à telle une influence sur les mécanismes de dissipation au niveau de la rupture de pente?
- Quel est l'effet de la hauteur de chute (i.e. de l'énergie potentielle et de la vitesse des particules) sur les mécanismes de propagation?

4.3.3. ANALYSE D'UN CAS DE REFERENCE (H=2 MET R=20 CM)

Prenons l'exemple de la propagation d'un ensemble de briques positionnées de façon désordonnée (en vrac) dans la boîte de départ et dont les caractéristiques sont celles présentées dans les *Tableaux 4.7 et 4.8*. La géométrie du cas de référence est : une hauteur H de 2 m (distance mesurée par rapport au pied de la boîte, *Figure 4.19*), un support incliné à 45° et une transition arrondie de rayon de courbure 20 cm. Lorsque la face aval de la boîte est enlevée, les briques se propagent librement sur le plan incliné, passant par la transition arrondie avant de s'arrêter sur la partie horizontale. Une vue schématique de la masse granulaire en mouvement à différents stades de la propagation (départ, propagation, dépôt) est représentée *Figure 4.20*.

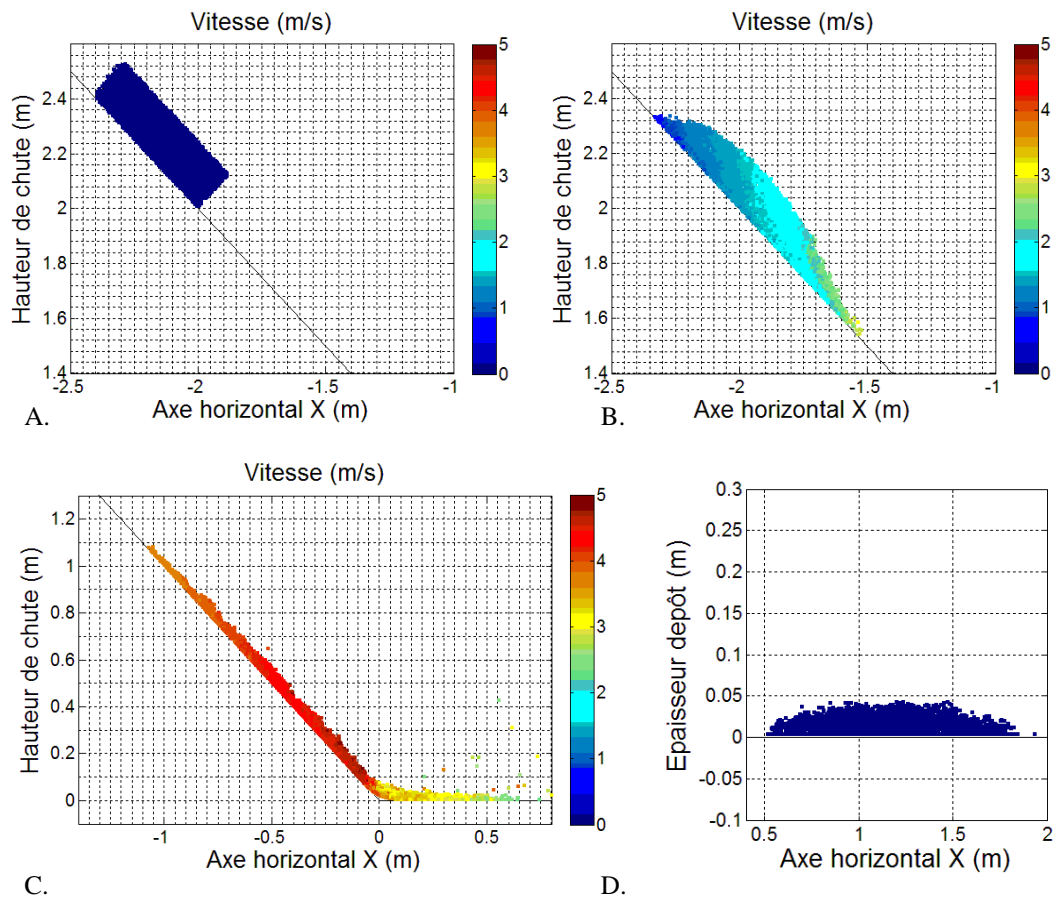


Figure 4.20. Vue schématique de l'état de propagation des particules granulaires à différents instants de la simulation. A. Au repos $t=0$ seconde. B. Propagation sur le plan incliné à $t=0,2$ seconde. C. Passage des blocs entre le plan incliné et le support horizontal pour une transition courbe de 20 cm au $t=0,6$ seconde. D. Dépôt final à $t=2$ secondes

Les principaux résultats obtenus sont la longueur de propagation, la cinématique de l'écoulement (vitesses) et les quantités d'énergies dissipées dans le système soit par chocs soit par frottement. Les énergies dissipées sont définies comme égales au travail (W) par unité de longueur (x) des forces normales (n) et tangentielle (t) à la surface de contact. Le bilan cinématique (position + vitesses des blocs) et le bilan énergétique du système (énergie dissipée sur chacun des segments de la pente et de la zone de transition) sont présentés respectivement sur les *Figures 4.20 et 4.21*.

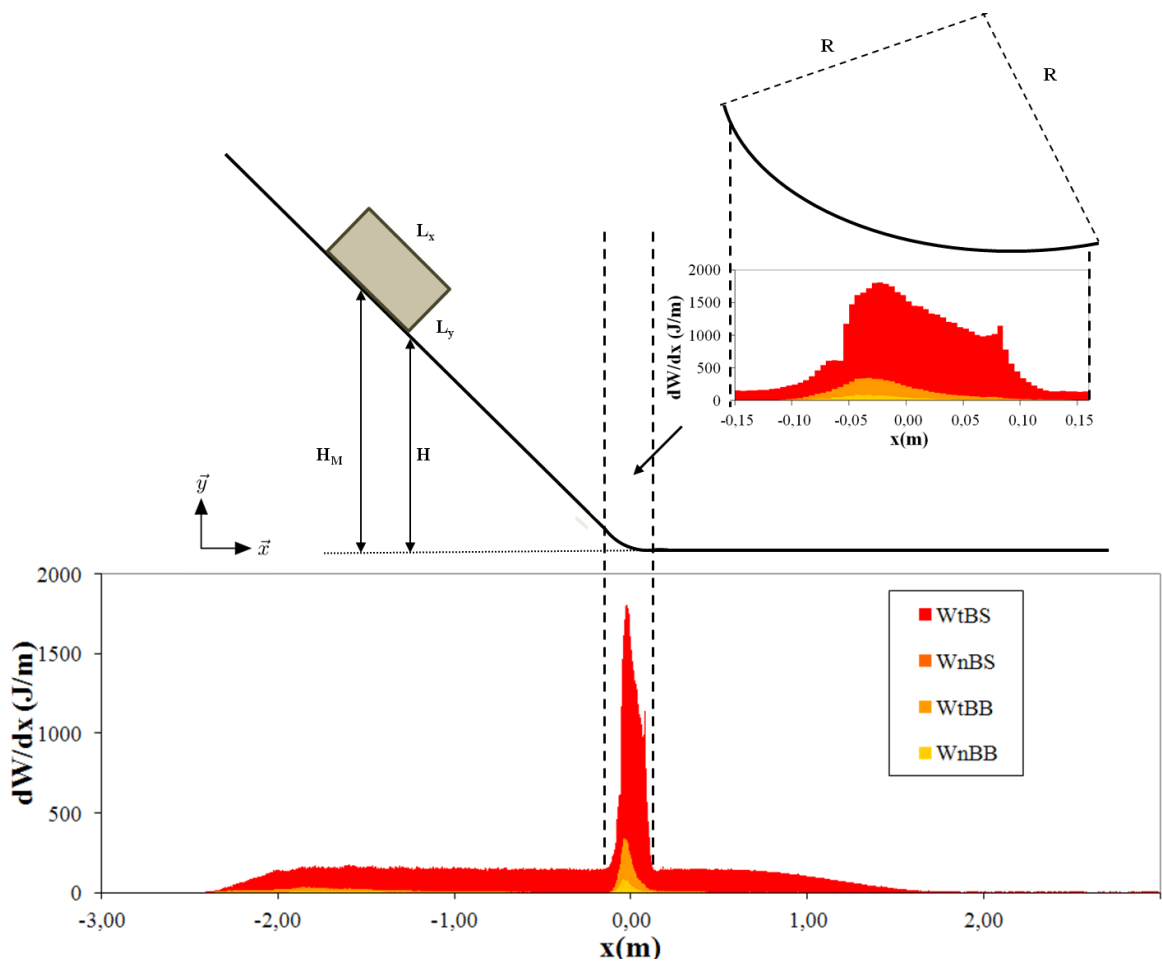


Figure 4.21. Énergie dissipée sur chacun des segments de la zone de propagation pour le cas de référence ($R= 20$ cm et $H=2$ m) - discrétisation en 1200 segments de longueur $dx = 5$ mm

Sur la *Figure 4.21*, nous observons que l'énergie potentielle du système a été principalement dissipée par frottement basal (représenté par W_{tBS} – en rouge), en particulier sur la pente, avec très peu de dissipation par chocs à l'intérieur de la masse (en jaune). En revanche, la dissipation d'énergie est très nettement plus importante dans la zone de transition. Dans cette zone on constate que les phénomènes de dissipation au sein de la masse sont loin d'être négligeables et que l'énergie dissipée par frottement à la base de l'écoulement est multipliée quasiment par 10 au regard de celle dissipée sur la pente.

4.3.3.1. Effet de la géométrie de la rupture de pente

Les bilans énergétiques pour des rayons de courbure de 0 (transition brusque), 5, 10, 20, 40, 60 et 90 cm (transition progressive) sont présentés sur la *Figure 4.22*.

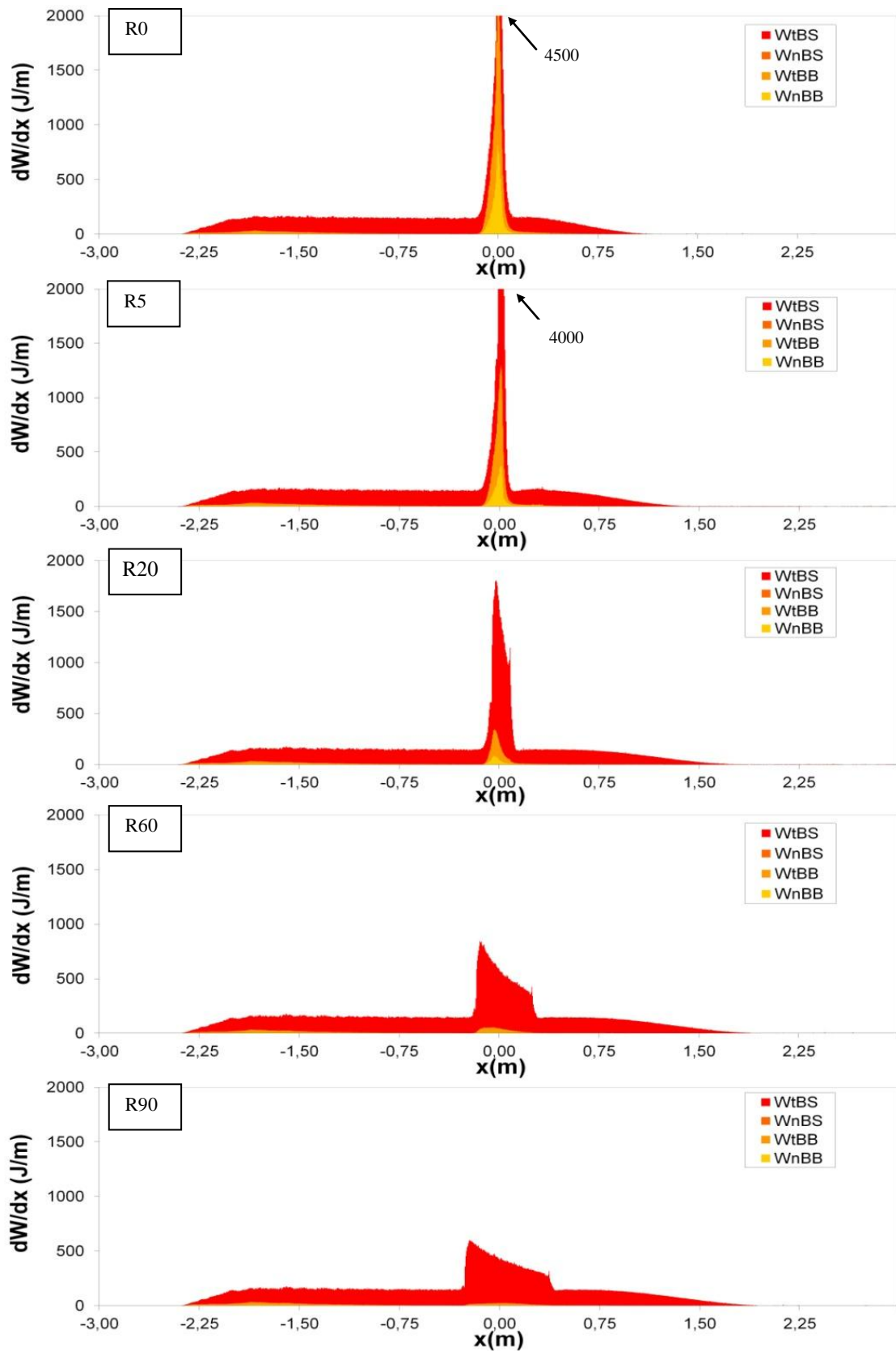


Figure 4.22. Bilan de l'énergie dissipée le long de l'axe de propagation (X) pour différents rayons de courbure (0, 5, 20, 60 et 90 cm). La couleur rouge caractérise l'énergie dissipée par frottement avec le support tandis que la couleur jaune représente l'énergie dissipée par chocs entre les blocs

Sur la *Figure 4.22*, on constate que les modes de dissipations sont très différents en fonction du rayon de courbure : pour les rayons de courbures importants (transition « lisse ») l'énergie est principalement dissipée par frottement basal avec très peu (voire aucune) dissipation dans la masse ; à contrario, pour les transitions brusques la dissipation se fait principalement par chocs entre les blocs. Cependant, une augmentation de dissipation par frottement basal est clairement observée dans la zone de transition de pente du fait de l'accélération centripète au niveau de l'arrondi qui engendre une augmentation des efforts normaux et donc tangentiels.

4.3.3.2. Interprétation physique/discussion des résultats

Les pourcentages d'énergie dissipée au niveau de la rupture de pente en fonction de l'énergie initiale du système sont présentés sur les *Figures 4.23A et 4.23B*. Nous observons que l'énergie totale dissipée par chocs au niveau de la rupture de pente est faible (inférieure à 2%) et qu'elle diminue considérablement quand le rayon de courbure augmente (*Figure. 4.23B*).

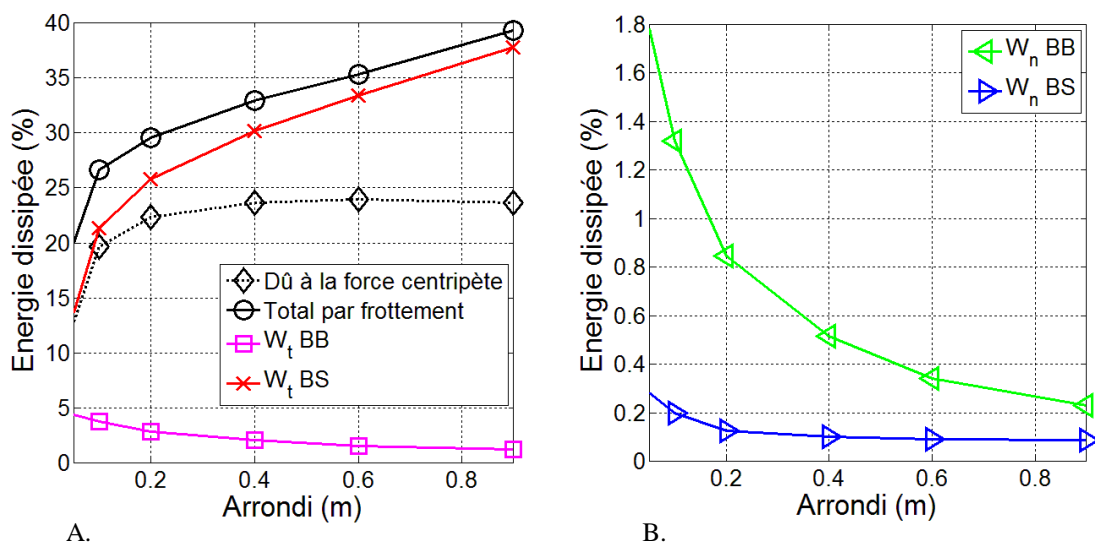


Figure 4.23. A. Pourcentage d'énergie dissipée par frottement au niveau de la rupture de pente pour différentes valeurs de rayon de courbure. B. Pourcentage de l'énergie dissipée par chocs dans l'arrondi pour différentes valeurs du rayon de courbure

Nous constatons sur la *Figure 4.23A* que le frottement entre les blocs au sein de la masse granulaire diminue avec le rayon de courbure de la même façon que les interactions par chocs (*Figure 4.23B*). La faible valeur d'énergie dissipée par frottement entre les blocs (autour de 4% de l'énergie totale) s'explique par un mouvement d'ensemble, d'autant plus régulier que le rayon de courbure est grand, et qui limite fortement le cisaillement au sein de la masse granulaire. Il est compréhensible également que le frottement total (frottement basal lié au poids + frottement lié à l'effet centripète + frottement dans la masse) augmente dans la zone de transition en fonction du rayon de courbure (augmentation de la distance de parcours).

La part de dissipation d'énergie par frottement basal imputable à l'accélération centripète présente un seuil au-delà d'une valeur critique du rayon de courbure. Cette valeur, aux alentours de $R=20$ cm, est liée au fait que les particules ont la possibilité ou non de rester en contact glissant au niveau de l'arrondi et est donc dépendante du rapport entre la taille des grains et le rayon de courbure.

Compte tenu des remarques précédentes sur l'influence du rayon de courbure il paraîtrait logique que la distance de propagation de la masse granulaire atteigne un maximum au delà d'une certaine valeur du rayon de courbure ($R=20$ cm). En fait, si l'on prend en compte la distance de parcours totale, celle-ci diminue avec une augmentation du rayon de courbure, d'où une augmentation apparente de la distance de propagation du front de la masse granulaire avec le rayon de courbure (Figure 4.24).

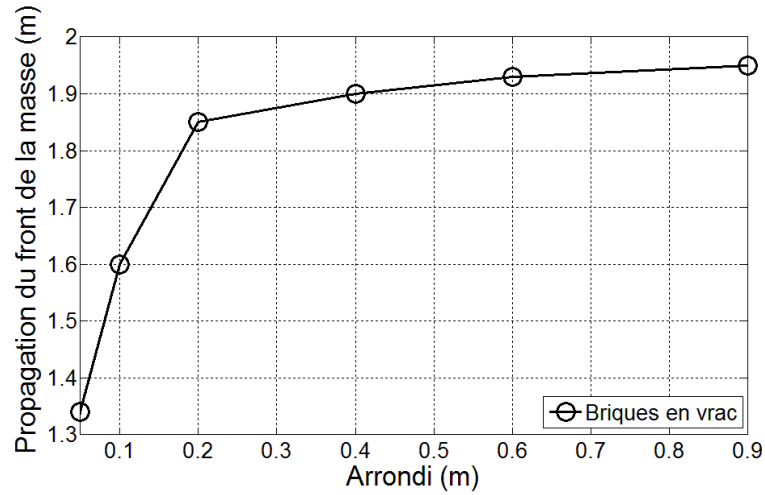


Figure 4.24. Distance de propagation de la masse granulaire en fonction des différentes valeurs de rayon de courbure

Afin d'analyser plus finement les résultats obtenus, nous proposons dans la section suivante de comparer les résultats du modèle numérique à ceux d'une analyse phénoménologique basée sur le mouvement le long d'une pente d'une masse M de matériaux dont les éléments constitutifs n'interagissent pas entre eux ni par chocs ni par frottement.

4.3.4. ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE DU MOUVEMENT D'UNE MASSE GRANULAIRE SUR UNE PENTE

Considérons une masse granulaire qui se déplace en glissant sur un biplan incliné. La zone de transition est supposée courbe comme décrit sur la Figure 4.25.

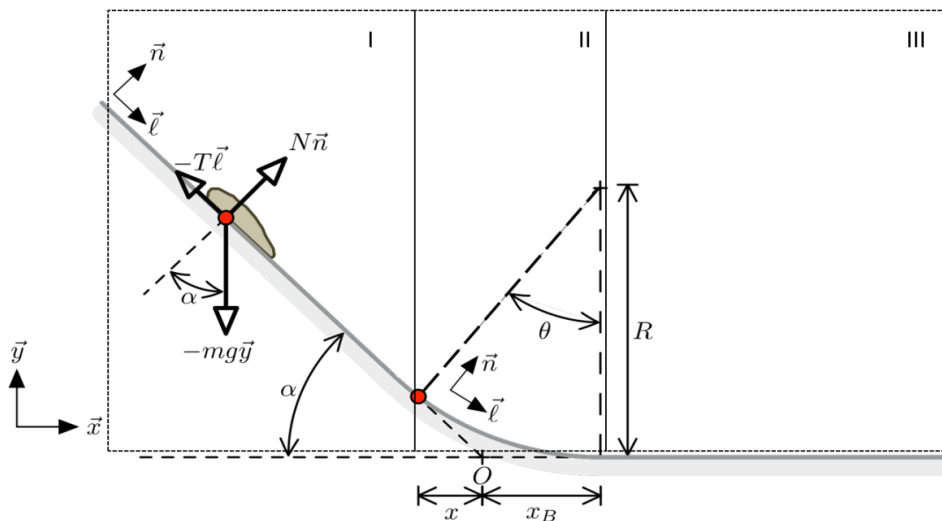


Figure 4.25. Géométrie du problème et définition des forces agissant sur la masse M

On identifie trois régions caractéristiques :

- I. Le plan incliné,
- II. La transition courbe,
- III. Le plan horizontal.

Dans un mouvement vers l'aval, la force résistante T est orientée dans la direction opposée à celle du mouvement de la masse. D'après la loi de Coulomb, la force résistante T est définie par : $T = N \tan \phi$, où ϕ représente l'angle de frottement entre les deux matériaux en présence et N la force normale au contact qui est fonction de la masse de matériau impliquée dans le mouvement et, dans la section courbe, de la force centripète. Cette dernière est inversement proportionnelle au rayon de courbure R et proportionnelle au carré de la vitesse V . En conséquence la force de frottement T s'écrit :

$$T = \begin{cases} -m g \cos \alpha \tan \phi & \text{zones I et III} \\ -m \left(g \cos \theta + \frac{V^2}{R} \right) \tan \phi & \text{zone II (arrondi)} \end{cases} \quad [31]$$

Où g est l'accélération de la gravité et α l'angle du plan avec l'horizontale (égal à zéro pour le plan horizontal). θ est l'angle qui caractérise la position du centre de masse lorsque celle-ci se déplace dans la zone courbe (*Figure 4.25*).

La projection de la seconde loi de Newton dans la direction tangentielle à la pente, conduit à la définition de l'accélération γ de la masse pour chacune des zones caractéristiques. On obtient pour les zones planes I et III :

$$\gamma_{I \text{ ou } III} = g (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) \quad [32]$$

Et pour la zone II :

$$\gamma_{II} = g \sin \theta - \left(g \cos \theta + \frac{V^2}{R} \right) \tan \phi \quad [33]$$

Le travail des forces résistantes T sur une distance élémentaire $d\ell$ (dans la direction du mouvement) correspond à la quantité d'énergie dissipée par frottement ce qui s'écrit : $dW = Td\ell$. Sachant que $d\ell = dx/\cos \alpha$ pour la surface plane et $d\ell = dx/\cos \theta$ pour la transition arrondie, le travail des forces résistives peut être défini de la façon suivante pour chacune des régions caractéristiques :

$$dW = \begin{cases} m g \cos \alpha \tan \phi d\ell = m g \tan \phi dx & \text{zones I et III} \\ m \left(g \cos \theta + \frac{V^2}{R} \right) \tan \phi d\ell = m \left(g + \frac{V^2}{R \cos \theta} \right) \tan \phi dx & \text{zone II (arrondi)} \end{cases} \quad [34]$$

Dans la zone incurvée $\cos \theta$ est fonction de x (*Figure 4.25*) suivant la relation :

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{x_B - x}{R}\right)^2} \quad [35]$$

L'équation [41] peut donc être réécrite sous la forme suivante pour déterminer la quantité d'énergie dissipée par frottement par unité de longueur dx :

$$\frac{dW}{dx} = \begin{cases} m g \tan \phi & \text{zones I et III} \\ m g \tan \phi + \frac{V^2}{\sqrt{R^2 - (x_B - x)^2}} \tan \phi & \text{zone II (arrondi)} \end{cases} \quad [36]$$

L'équation [43] peut alors être utilisée pour obtenir la distribution spatiale des dW / dx le long de la pente et de l'arrondi. Si l'on compare ces résultats (*Figure 4.26*) aux simulations numériques (R60 et R90) on constate une parfaite adéquation entre les résultats des modèles numériques et phénoménologiques. Ceci montre, d'une part que pour des rayons élevés, la dissipation d'énergie est essentiellement liée au frottement basal (pas de dissipation au sein de la masse en mouvement) et que le modèle numérique discret est apte à rendre compte du frottement sur la pente et de l'effet centripète (malgré le mouvement oscillant des particules et malgré le fait que les particules ne soient pas toutes en contact avec la pente).

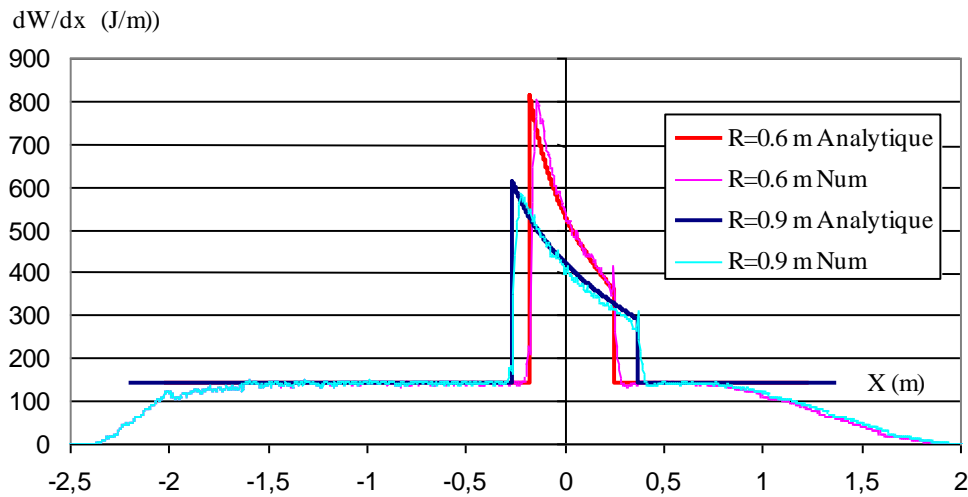


Figure 4.26. Comparaison entre les modèles phénoménologique et numérique de l'évolution de la dissipation d'énergie par frottement avec le support pour des valeurs différentes du rayon de courbure

Au niveau de la courbure, le travail total des forces de frottement liées à la force centripète peut être obtenu après intégration du travail des forces de frottement élémentaires ($dx = R d\theta$). Après simplification, on constate que le travail des efforts élémentaires de frottement liés à la force centripète est indépendant du rayon de courbure R [44].

$$dW_{centripète} = m \frac{V^2}{R \cos\theta} \tan \phi R d\theta = m \frac{V^2}{\cos\theta} \tan \phi d\theta \quad [37]$$

4.3.5. INFLUENCE DE LA VITESSE DES PARTICULES SUR LES MECANISMES DE DISSIPATION D'ENERGIE AU VOISINAGE DE LA RUPTURE DE PENTE

Pour tester l'influence de la vitesse des particules sur les mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage de la rupture de pente, quatre hauteurs de lâcher ($H = 1,5, 2, 2,5$ et 3 m) et sept valeurs du rayon de courbure ($0, 5, 10, 20, 40, 60$ et 90 cm) ont été testées. De façon similaire aux résultats précédents ($H = 2$ m) on peut noter sur la *Figure 4.27* que pour un rayon de courbure supérieur à 20 cm, et ce quelle que soit la hauteur de chute, les quantités d'énergie dissipées au sein de la masse granulaire par frottement ou par chocs (à la base ou dans le flux) ne sont pas dépendantes de la valeur de R . En revanche, au voisinage de la rupture de pente, on constate que l'énergie dissipée par frottement consécutivement à l'effet centripète, est proportionnelle à la hauteur de chute, donc à la vitesse au carré des particules, et ce conformément à l'équation [44]. Dans cette même zone, on constate que pour les petits rayons de courbure, les énergies dissipées par chocs et par frottement au sein de la masse varient en fonction de la hauteur de chute. On en conclut que les mécanismes de chocs et de frottement au sein de la masse sont amplifiés par la vitesse des particules lorsque la rupture de pente est brusque (cinématique de l'écoulement perturbée, rotations et vitesses relatives des particules plus importantes, chocs plus nombreux et plus intenses, etc.). A l'inverse, pour des valeurs du rayon de courbure R supérieure à $0,2$ m, le flux est peu perturbé en termes de vitesse relative des particules et les mécanismes à l'origine de la dissipation d'énergie sont peu dépendants de la vitesse.

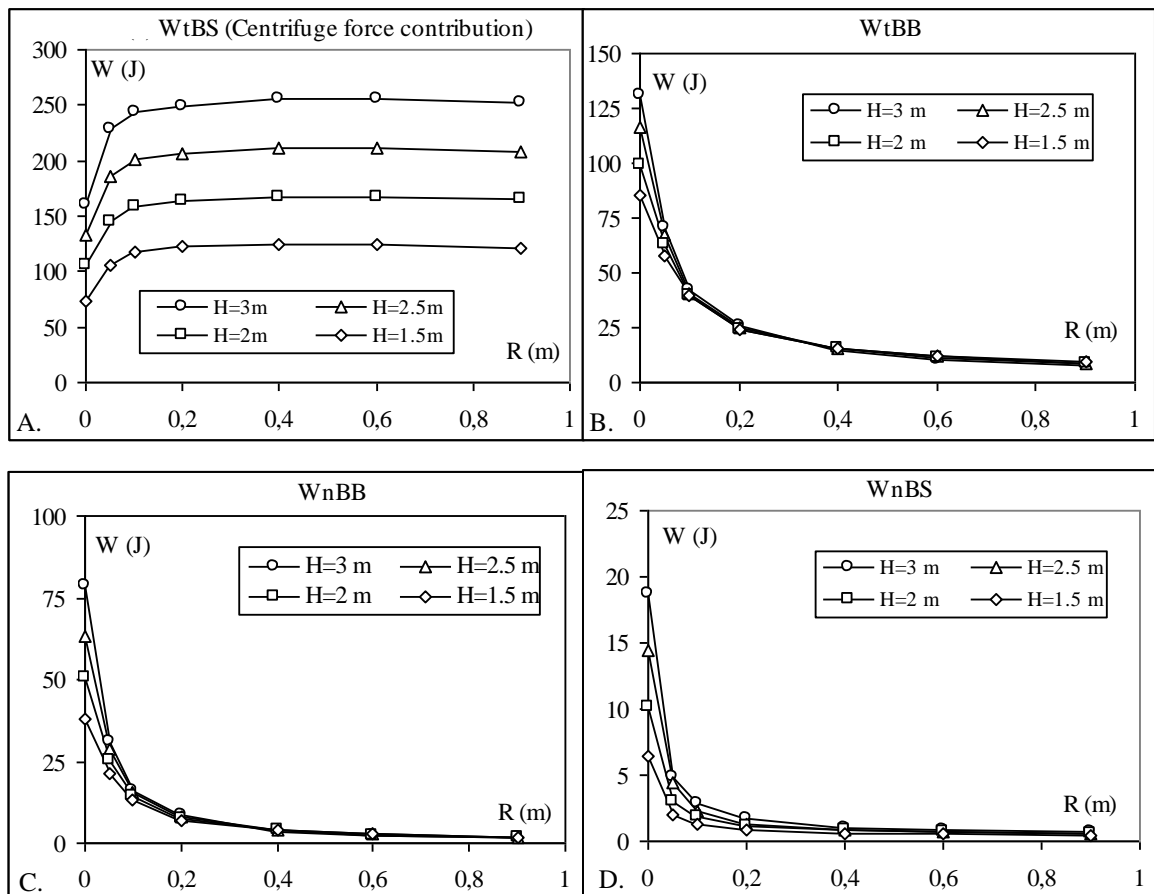


Figure 4.27 Energie dissipée dans la zone de transition entre le plan incliné et le plan horizontal en fonction du rayon de courbure et de la hauteur de chute: A. Energie dissipée par frottement à la base de l'écoulement due à l'accélération centripète; B. Energie dissipée par frottement dans la masse; C. Energie dissipée par chocs entre les briques au sein de la masse granulaire; D. Energie dissipée par chocs entre les briques et le support de propagation

4.3.6. INFLUENCE DE LA FORME DES PARTICULES ET DU MODE D'EMPILEMENT SUR LES MECANISMES DE DISSIPATION D'ENERGIE AU VOISINAGE DE LA RUPTURE DE PENTE

Afin d'appréhender le rôle de la forme et du mode d'empilement initial des particules sur les mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage de la rupture de pente, deux nouvelles séries de simulations numériques ont été réalisées (briques ordonnées et cubes en vrac). Les masses de matériau et les paramètres d'interaction sont similaires à ceux utilisés précédemment. Sept valeurs du rayon de courbure ($R = 0, 5, 10, 20, 40, 60$ et 90 cm) ont été testées. Compte tenu du mode d'empilement des particules (en vrac ou ordonnées), les volumes apparents de matériau et les positions de centre de masse sont différents (le point bas de la boîte de départ étant constant d'une simulation à l'autre). Les quantités d'énergie dissipées sont donc présentées sur la *Figure 4.28* en pourcentage de l'énergie initiale et cette fois ci sur la totalité de l'évènement (plan incliné + transition + plan horizontal).

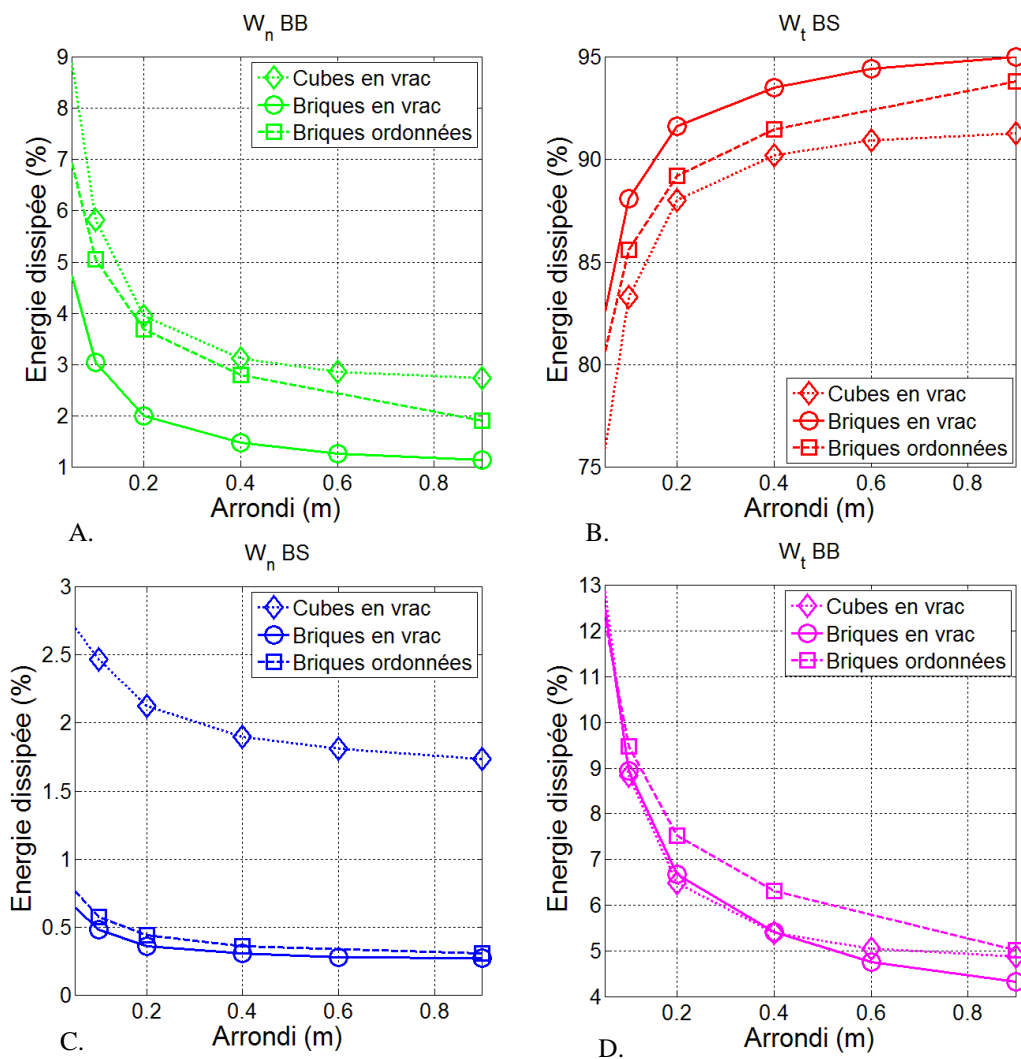


Figure 4.28. Bilan de l'énergie totale dissipée pour chacune des configurations testées en fonction du rayon de courbure ($H=2m$)

Sur ce bilan général, on retrouve les tendances déjà observées pour le cas de référence (W_t BS et W_t BB majoritaires, W_n BS et W_n BB minoritaires). Sur la *Figure 4.28*, on peut observer également que la forme des blocs a une influence significative sur la quantité d'énergie dissipée par chocs (W_n BB et W_n BS). En effet, on constate qu'environ 12% du total de l'énergie est dissipée par

chocs entre les blocs cubiques contre 8% pour les briques rectangulaires. Cette influence est encore plus marquée lorsque l'on considère les chocs avec le support et ce bien que ce mode de dissipation soit très faible dans le processus global (W_{nBS} cube 4 fois supérieur à W_{nBS} brique). On en conclut que les formes de faible élancement ont une cinématique plus chahutée que les blocs de fort élancement ce qui conduit à un nombre de chocs plus important. Si les formes plus élancées favorisent la dissipation par frottement avec le substrat, la dissipation de frottement au sein de la masse n'est pas significativement influencée ni par la forme, ni par l'arrangement initial.

Lorsque l'on s'intéresse plus précisément au bilan énergétique dans la zone de rupture de pente (*Figure 4.29*), on observe que ce sont effectivement les blocs cubiques qui génèrent le plus de dissipation par chocs à l'intérieur de la masse et à la base du flux et que la nature de l'empilement initial joue un rôle très faible sur la dissipation par chocs au niveau de la rupture de pente (celle-ci étant assez éloignée de la zone de départ).

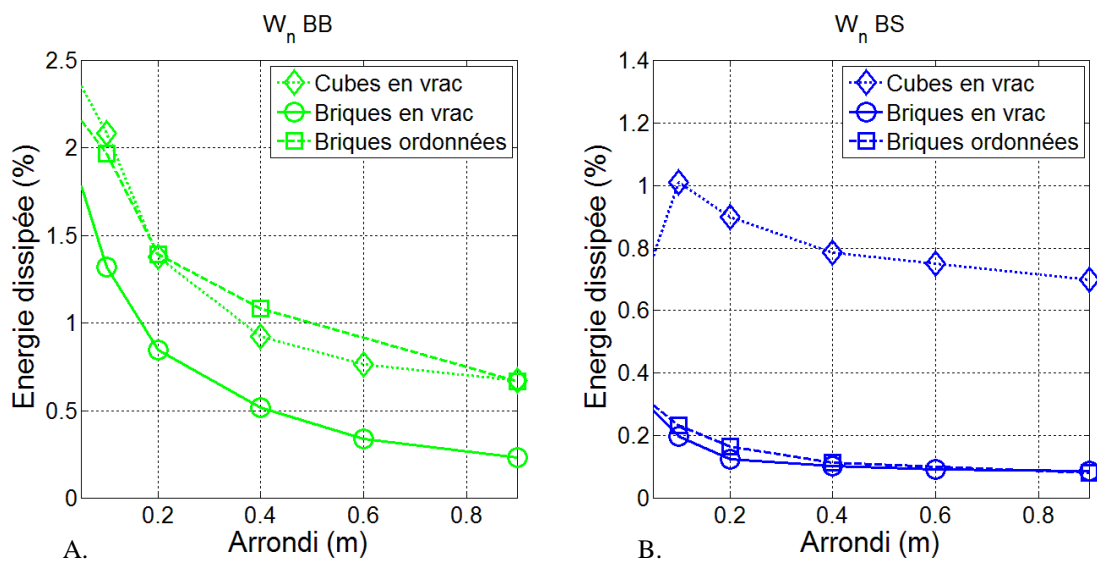


Figure 4.29. Bilan de l'énergie dissipée par chocs entre les blocs dans l'arrondi en fonction de la forme des particules et de l'empilement initial pour des valeurs différentes du rayon de courbure ($H=2m$)

Enfin, la forme des particules n'a pas une influence importante sur le frottement résultant de l'accélération centripète comme en témoigne la *Figure 4.30*. Cependant, la géométrie de l'empilement initial semble avoir une légère influence : les blocs en vrac forment une masse plus hétérogène dont le flux est perturbé et qui dissipent moins d'énergie par frottement basal mais plus par chocs et par frottement au sein de la masse (*Figure 4.30*). Au final, cela se traduit par une distance de propagation plus importante pour les particules initialement empilées (*Figure 4.31*).

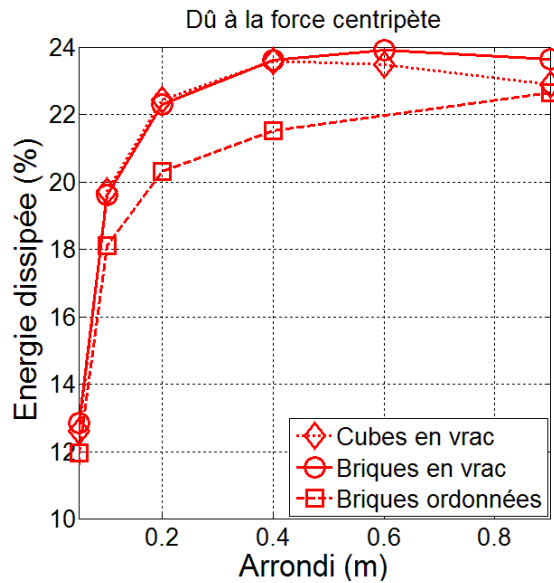


Figure 4.30. A. Bilan de l'énergie dissipée par frottement comme conséquence de l'accélération centripète dans l'arrondi en fonction de la forme et de l'arrangement initial des particules pour des valeurs différentes du rayon de courbure ($H=2m$)

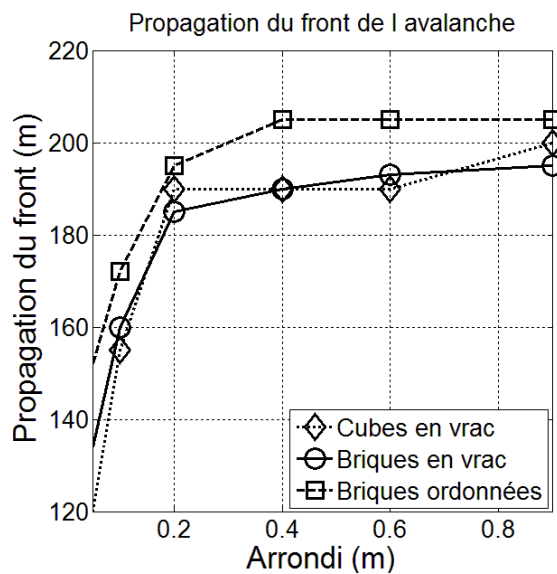


Figure 4.31. Distance de propagation de la masse en fonction de la forme et de l'arrangement initial des particules pour différentes valeurs du rayon de courbure ($H=2m$)

4.3.7. CONCLUSION

Plusieurs configurations d'avalanches rocheuses ont été testées et simulées en faisant varier la nature de la transition entre le plan de propagation et le plan horizontal de dépôt de la masse granulaire. De façon générale, la plupart de l'énergie potentielle du système est dissipée par friction basale dès lors que la rupture de pente est « suffisamment douce » au regard de la dimension des blocs constitutifs de l'avalanche. Les transitions brusques ou faiblement arrondies perturbent la cinématique de la masse en mouvement et accentue les mécanismes de rotations des blocs et de dissipation d'énergie par chocs, réduisant la distance de propagation de la masse. Plus la transition est régulière, plus la part d'énergie dissipée par frottement basal est importante. Dans la zone de

transition, les forces de frottement augmentent en raison de l'action de la force centripète. La part d'énergie dissipée par les forces de frottement liées à la force centripète est indépendante (comme on l'a montré numériquement ou analytiquement) du rayon de courbure à condition qu'il soit suffisamment grand par rapport à la taille des blocs (au moins une fois le plus grand côté d'un bloc). Pour des transitions progressives, la cinématique de la masse est peu perturbée (mouvement d'ensemble) ce qui entraîne de la dissipation d'énergie majoritairement par frottement à la base de l'écoulement. Dans ce cas, les phénomènes de dissipation d'énergie sont indépendants de la vitesse des particules, excepté la part d'énergie dissipée par friction à la base de l'écoulement résultant de la force centripète qui varie linéairement avec la hauteur de chute H et proportionnellement au carré de la vitesse des particules. Enfin, on a montré que, la forme des blocs et la géométrie de l'empilement initial ont une influence sensible sur les modes de dissipation d'énergie, notamment au sein de la masse : les blocs les moins élancés (cubes) interagissant plus par chocs.

CHAPITRE 5: MODELISATION DES EBOULEMENTS REELS EN MASSE : ANALYSE DES MECANISMES DE PROPAGATION ET ETUDES PARAMETRIQUES

5.1. Cas de Millau

5.1.1. INTRODUCTION

Après collecte des données géologiques sur chacun des sites d'études, nous nous sommes orientés vers la modélisation numérique. Pour faciliter la lecture, nous avons décidé de présenter ces résultats d'une façon chronologique. En effet, plusieurs configurations géométriques ont été abordées et étudiées pendant la thèse : on y trouvera des configurations dites « simples » et d'autres plus complexes mais proches de la réalité. Nous nous sommes intéressés notamment aux aspects géométriques compte tenu que l'expérience sur site réel a montré l'importance de ces aspects sur la propagation des masses rocheuses (Medium and Small Size rock fall hazard Assessment Medium and Small Size rock fall hazard Assessment, 2013; France3-Alpes, 2014). Pendant la thèse, et vis-à-vis des pratiques actuelles en bureaux d'études, nous avons trouvé intéressant de commencer à analyser le phénomène de propagation en masse à partir de configurations géométriques simplifiées. En effet dans la pratique, l'ingénieur se voit régulièrement confronté à donner des réponses rapides à partir de données minimalistes. Pour faciliter une telle analyse, nous avons étudié et simulé un éboulement dont la topographie de l'ensemble (falaise+versant) est simple ce qui nous a permis de recréer plusieurs configurations géométriques plus ou moins complexes tout en restant proche du phénomène réel. Chaque configuration a donné lieu à des analyses phénoménologiques qui nous ont permis d'améliorer tant le modèle numérique que les lois d'interaction et ainsi de mieux comprendre le phénomène d'éboulement en masse. Plusieurs études de sensibilité ont été réalisées et seront également présentées au cours de ce chapitre.

5.1.2. CONTEXTE ET METHODOLOGIE

L'éboulement de Millau a consisté à la chute presque verticale d'environ 1000 m³ de roche calcaire qui s'est propagé sur un versant incliné à environ 30° avant de s'arrêter complètement sur un dépôt d'environ 50 m de long (visite de terrain décrite sur le Chapitre 2). Nous avons simulé cet événement en utilisant trois configurations différentes, chacune à l'image des développements réalisés au cours de la thèse :

1. Configuration 1 : Il s'agit de la première simulation numérique de l'éboulement de Millau abordée dans le cadre de cette thèse. Dans cette configuration, le phénomène a été simulé en utilisant des plans pour le versant et la falaise et des formes parallélépipédiques pour les blocs rocheux (*Figure 5.1C*). Cette configuration nous a permis de :
 - Vérifier la pertinence du modèle numérique pour la modélisation des éboulements réels de faible volume par confrontation avec des données expérimentales de terrain. Rappelons que l'événement de Millau a été retenu pour sa simplicité géométrique qui nous a permis de nous rapprocher de la réalité du phénomène tout en conservant une discrétisation minimaliste,
 - Identifier les mécanismes d'interaction spécifiques aux phénomènes de propagation en masse entre les blocs puis déterminer par le biais d'une étude de sensibilité l'influence du nombre de blocs sur les mécanismes de propagation.

2. Configuration 2 : Modélisation du volume de départ en tenant compte des surfaces de discontinuité sur la falaise et de la blocométrie observée sur le terrain (*Figure 5.1B*). Cette simulation concerne les premiers développements relatifs à la création de blocs rocheux de formes complexes que nous avons réalisés grâce à une procédure numérique capable de découper un solide tridimensionnel en sous-blocs de différentes tailles et formes (voir chapitre 3 correspondant à la description du modèle numérique). Nous avons utilisé cette procédure pour intégrer les familles de plans de discontinuités sur la falaise et en déduire les formes caractéristiques des blocs concernés dans le phénomène de propagation. Cette configuration nous a permis de :
- Nous rapprocher de la géométrie du dépôt réel,
 - Adapter et affiner les paramètres de contact grâce à une étude de sensibilité aux paramètres. L'influence des paramètres a été analysée non seulement sur les mécanismes de propagation de la masse mais aussi sur la position des blocs les plus éloignés qui définissent le risque majeur associé à un tel phénomène,
 - Comparer le phénomène de propagation en masse avec les résultats d'une analyse trajectographique. La question de la pertinence d'un modèle trajectographique pour la simulation des éboulements rocheux est souvent posée. Pour mieux comprendre ces deux phénomènes et pour confronter notre modèle à des outils utilisés en bureaux d'études, nous avons mené une analyse numérique de la propagation des blocs isolés, de la même façon que les logiciels trajectographiques le font actuellement mais en négligeant l'aspect probabiliste (ex : logiciel KAYASS3D de la société IMSRN).

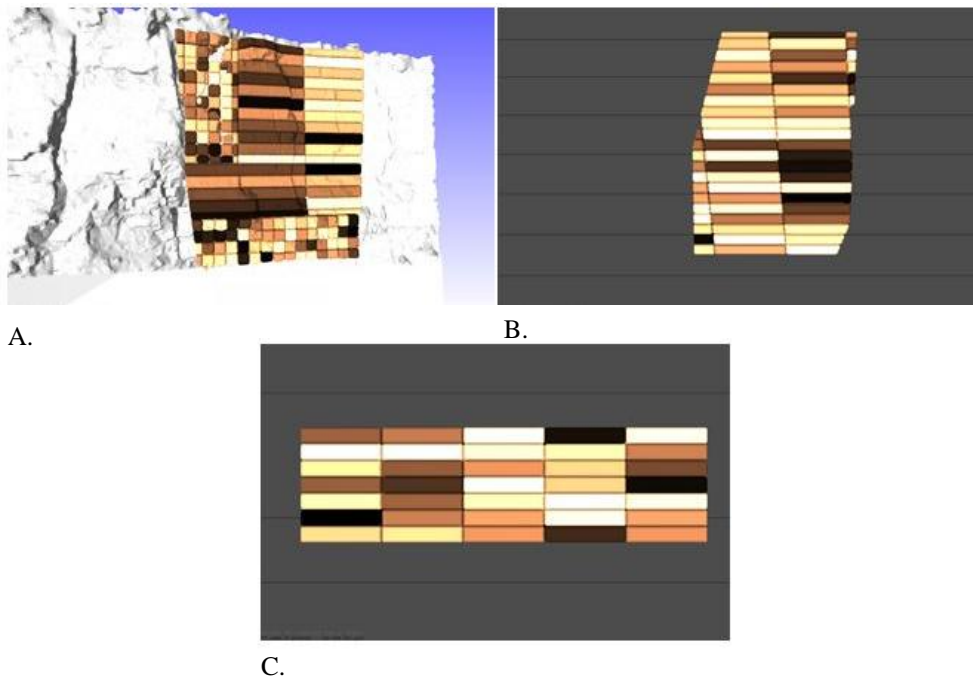


Figure 5.1. Reconstruction numérique du volume de départ de l'éboulement de Millau pour les différentes configurations étudiées pendant la thèse. A. Configuration complexe en utilisant un Modèle Numérique de Terrain réaliste. B. Configuration simplifiée en utilisant des blocs de forme irrégulière. C. Configuration simplifiée en utilisant des blocs parallélépipédiques. A noter que sur cette figure les blocs sont colorés arbitrairement

3. Configuration 3 : modélisation du volume de départ et du versant de propagation en utilisant un Modèle Numérique de Terrain tridimensionnel (MNT) issu des études photogrammétriques (*Figure 5.1A*). Cette simulation peut être vue comme l'état final de nos avancées numériques sur la prise en considération de la géométrie du phénomène d'éboulement (géométrie de la zone de départ, découpage suivant différentes familles de discontinuités et prise en compte de la rugosité de surface du plan de propagation). Vue la proximité de cette configuration avec le phénomène réel, nous avons réalisé plusieurs études de sensibilité sur :
- La stratigraphie,
 - La résolution du maillage et du versant de propagation,
 - La forme, la taille et la position initiale des blocs,
 - Les paramètres de la loi de contact.

5.1.3. MODELISATION DE L'ÉBOULEMENT DE MILLAU : APPROCHE SIMPLIFIÉE EN UTILISANT DES BLOCS PARALLÉLÉPIPÉDIQUES

La première simulation numérique de Millau a consisté à la chute quasi verticale d'un empilement de blocs *parallélépipédiques* positionnés sur une paroi verticale simulant la falaise rocheuse. Les blocs chutent verticalement par effet de la gravité puis se propagent sur un plan incliné à 30° avant de s'arrêter sur une surface horizontale (*Figure 5.4*). Le volume de départ correspondant à celui estimé lors des premières visites de terrain est égal à 1000 m³. Nous avons positionné l'ensemble des blocs à une hauteur proche de celle observée sur le terrain (base du volume de départ à environ 11 m de hauteur du point le plus haut du versant de propagation) avec l'hypothèse que la chute se réalise sans basculement bien qu'une légère inclinaison du pan de falaise à environ 85° par rapport à l'horizontale ait été observée sur le terrain.

Dans cette première étude, les paramètres de contact ont été estimés très grossièrement grâce à des lâchers de blocs sur le terrain naturel. De façon générale, nous avons observé un versant particulièrement dur avec une très petite couche végétale (inférieure à 10 cm) que nous estimons sans influence sur le phénomène de propagation compte tenu de la taille imposante des blocs rocheux concernés par l'évènement. Suite aux lâchers de blocs, nous avons estimé à 0,2 le coefficient de restitution normale pour les interactions bloc-sol (*Figure 5.2*) et à 0,5 le coefficient de restitution normale pour les interactions bloc-bloc (valeurs courantes de la littérature). Le paramètre de frottement bloc-bloc a été fixé à 1,0 suite à des essais de glissement sur site entre deux blocs rocheux (les glissements entre blocs ont été obtenus pour des inclinaisons supérieures à 45°). Une valeur similaire a été retenue pour le frottement sol-bloc compte tenu de la nature rocailleuse du versant de propagation. Il est important de noter que le coefficient de frottement utilisé dans le modèle numérique correspond à un frottement dynamique et non à un frottement statique et qu'il intègre d'autres phénomènes plus complexes que le frottement comme, par exemple, les forces de butée dans le cas d'un impact d'un bloc rocheux avec un sol meuble. Concernant les raideurs de contact entre les blocs, nous avons retenu des valeurs suffisamment élevées pour éviter des interpénétrations trop importantes et assurer la stabilité numérique des simulations.

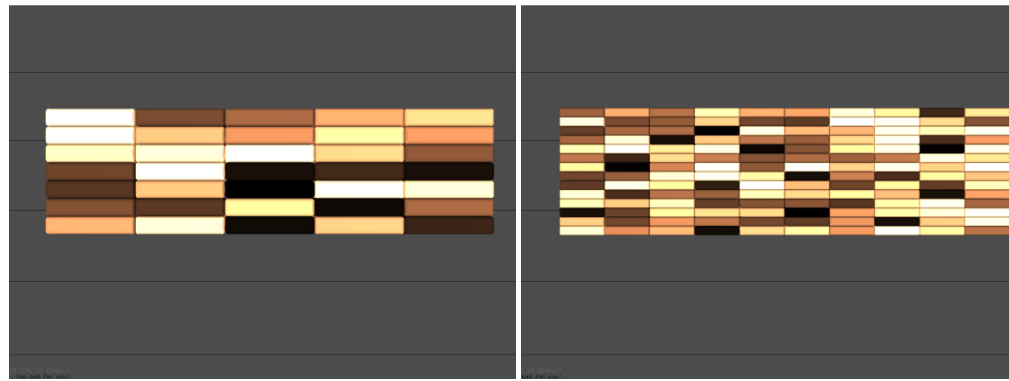
Pour cette première approche, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la propagation des blocs rocheux et à la capacité du modèle à rendre compte de la dynamique du phénomène d'éboulement. Le volume de départ, a été scindé en blocs parallélépipédiques de tailles

proches de celles observées sur le terrain (*Figure 5.3A*) soit 35 blocs parallélépipédiques de 7.5 m x 4 m x 1 m pour un volume total de 1050 m³. Dans un second temps, pour déterminer l'influence du nombre de blocs sur les mécanismes de propagation nous avons effectué de nouvelles simulations numériques en diminuant la taille des blocs à 3.75 m x 2 m x 0.5 m mais en conservant le volume de départ à 1050 m³ soit 280 blocs au lieu de 35 (*Figure 5.3B*).

Les paramètres de contact et les données géométriques des simulations sont résumés sur la *Figure 5.3C*.



Figure 5.2. Exemple de lâcher d'un bloc rocheux sur le sol. Le terrain choisi pour l'expérience contient très peu de végétation pour en négliger l'effet. Le bloc rebondit à une hauteur d'environ 15 à 20 % de sa hauteur initiale (repérée par la flèche noire sur la figure en bas à gauche)



A

B

	Echantillons		Paramètres de contact (littérature)		
	Gros blocs	Petits blocs	Type	Bloc-Bloc	Bloc-Sol
Volume (m³)	28	3,5	e_n^2	0,5	0,2
Dimension (m)	7 x 4 x 1	3,5 x 2 x 0,5	μ	1 (tan 45°)	1
Densité (kg/m³)	1700		k_n (N/m)	1,00E+09	1,00E+09
Masse totale (kg)	1,79E+06		k_t (N/m)	1,00E+09	1,00E+09
Volume total (m³)	1050				

C

Figure 5.3. A. masse de départ scindée en 35 blocs parallélépipédiques de 30 m³. B. masse de départ scindée en 280 blocs parallélépipédiques de 3.5 m³. C. Données géométriques et rhéologiques de la simulation

La *Figure 5.4* présente, pour les deux configurations testées, la cinématique des blocs à différents temps de la simulation. Pour les deux géométries étudiées, les blocs sont colorés en fonction de leur position initiale. Les blocs se situant dans les rangées les plus basses sont colorés en marron foncé tandis que les blocs se trouvant dans les rangées supérieures sont colorés en marron clair. Pour la configuration comportant 35 blocs, nous observons qu'au premier impact la masse dans son ensemble rebondit à une distance assez importante du pied de la falaise. Elle se propage par la suite sur une distance assez courte sur le versant incliné avant de s'arrêter sur le support horizontal. Pour la configuration comportant 280 blocs, nous observons un éclatement de la masse rocheuse dès le premier impact. Par la suite, les blocs se propagent en masse sur la presque totalité du versant avant de s'arrêter complètement.

La *Figure 5.5* présente une vue des dépôts réel (en bleu) et numérique (en rouge) pour les configurations comportant 35 blocs (*Figure 5.5A*) et 280 blocs (*Figure 5.5B*). Nous observons sur l'ensemble de la *Figure 5.4* que les blocs les plus éloignés correspondent à ceux initialement positionnés dans les rangées les plus hautes de l'empilement. De plus on constate qu'augmenter le nombre de blocs augmente le Run-Out des blocs les plus éloignés mais n'augmente pas le Run-Out du front de la masse principale (*Figure 5.5*).

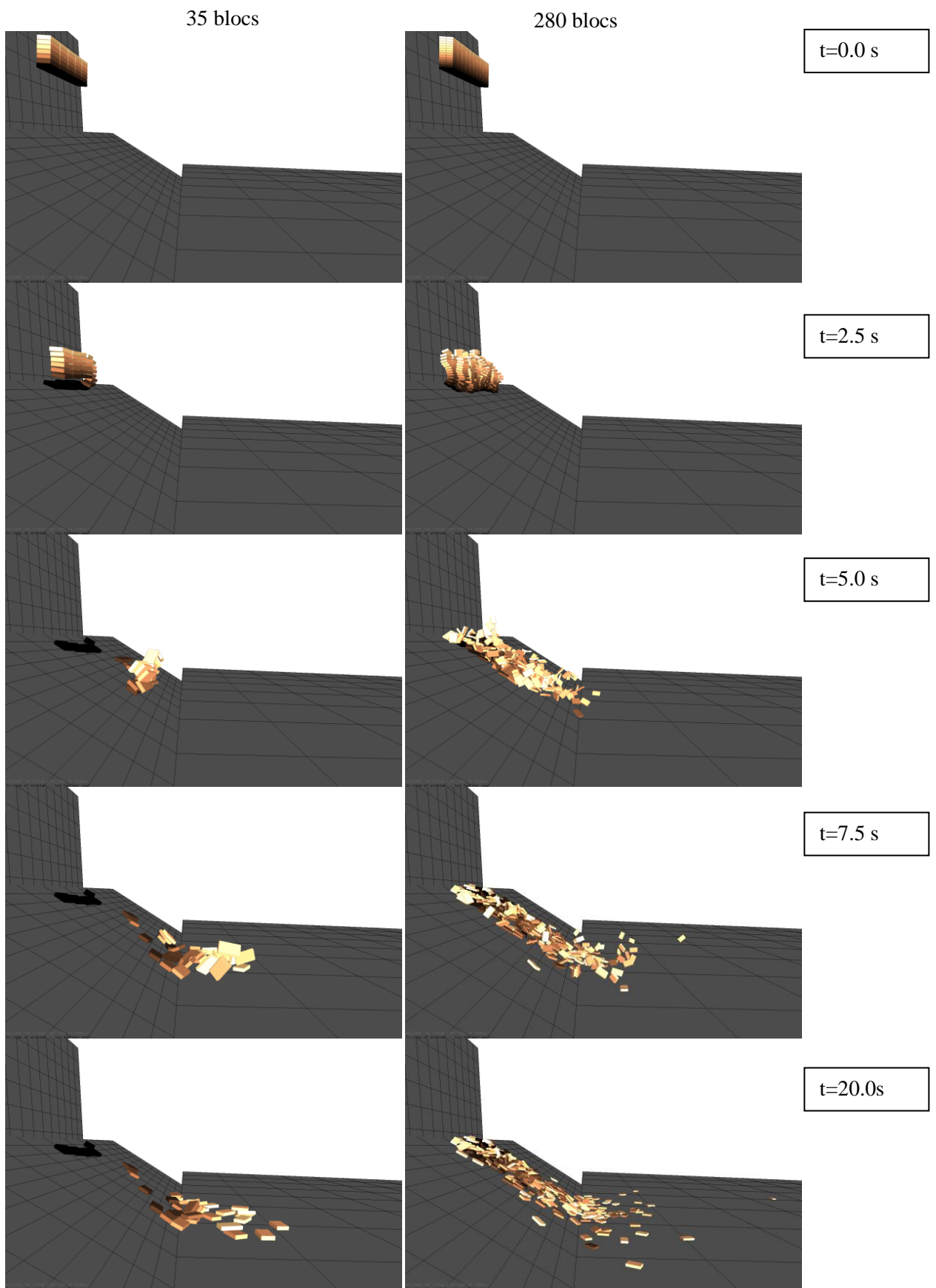


Figure 5.4. Simulations numériques de l'éboulement de Millau comportant 35 blocs (gauche) et 280 blocs (droite)

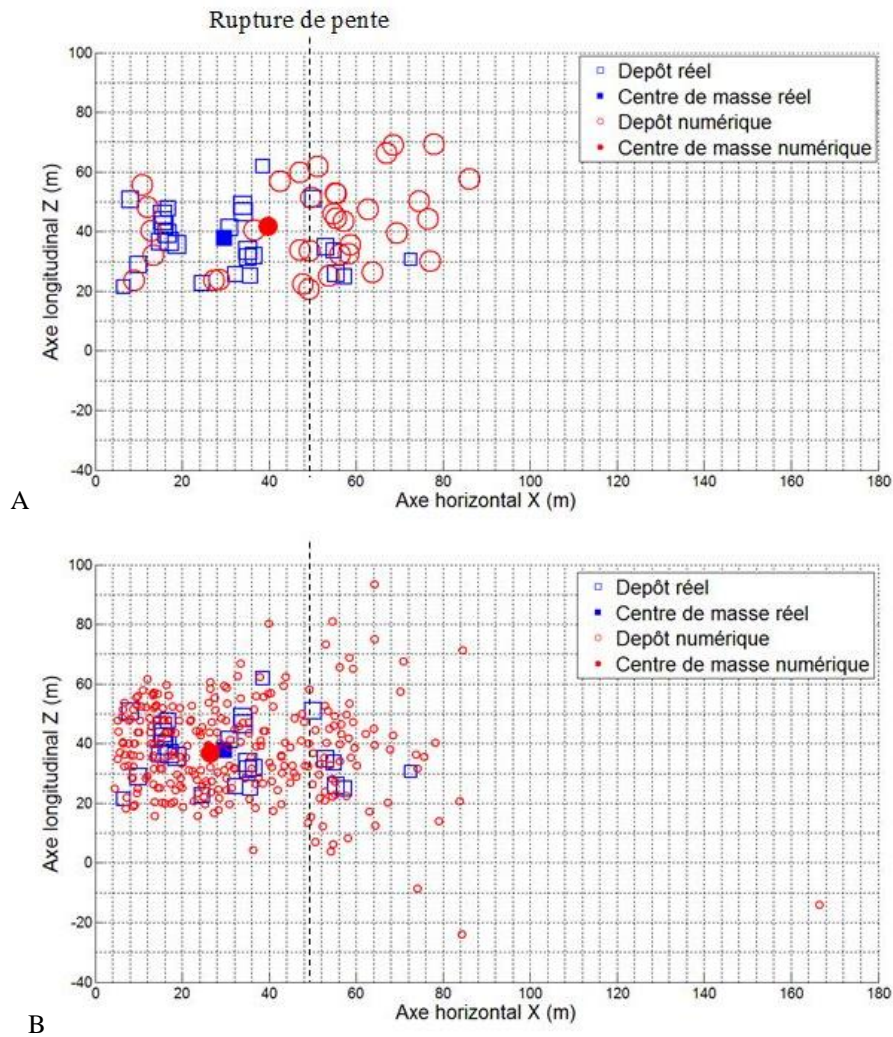


Figure 5.5. Comparaison des dépôts numérique et réel pour la configuration : A. 35 blocs. B. 280 blocs. L'origine des abscisses (axe horizontal) coïncide avec l'origine du versant incliné

Lorsque l'on compare les résultats numériques avec ceux du dépôt réel, nous constatons que la majorité des blocs modélisés se situent dans l'enveloppe générale définie par les blocs observés sur le terrain naturel. Cependant, nous observons que les propagations numériques du front du dépôt principal sont, pour les deux simulations numériques, plus importantes d'environ 15 m par rapport à celle du dépôt réel et ce malgré des positions des centres de masse assez similaires notamment pour la configuration à 280 blocs (*Figure 5.5B*). Si l'on s'intéresse à la propagation des blocs isolés, on constate que les simulations numériques engendrent une dispersion plus importante des blocs. De plus, dans la configuration numérique à 280 blocs, nous observons qu'un bloc se sépare de la masse principale sur une distance assez importante (environ 120 m à partir de la rupture de pente) ce qui n'est pas en adéquation avec le phénomène réel observé.

La simulation numérique nous permet néanmoins d'observer que la propagation des blocs isolés est le résultat d'une interaction multi-bloc qui modifie la cinématique de certains blocs notamment au moment du premier impact. En effet, sur la séquence cinématique des blocs présentée en *Figure 5.4*, on observe que lors du premier impact les blocs à la base de l'empilement transfèrent leur énergie cinétique aux blocs subjacents, de la même façon que ce qui a été observé au chapitre précédant sur des configurations plus simples (*Chapitre 4.1*). C'est ce gain de vitesse au premier impact qui permet à certaines particules de se propager sur des distances très importantes.

La *Figure 5.6* présente les évolutions temporelles des vitesses de translation du centre de masse (courbes bleues) et du bloc le plus éloigné (courbes rouges) pour les configurations à 35 blocs (trait pointillé) et à 280 blocs (trait continu). Nous observons que, pour la configuration à 280 blocs, le bloc ayant parcouru la distance la plus grande acquière une vitesse d'environ 15 m/s au moment du premier impact tandis que la vitesse du centre de masse de l'ensemble des blocs n'est que de 7 m/s environ. Ce gain d'énergie permet à certains blocs de se détacher rapidement de la masse principale et de se propager individuellement sur le support incliné par des rebonds successifs sur une distance plus importante. Ce phénomène semble habituel des phénomènes impliquant plusieurs blocs en interaction et a été déjà observé dans des cas réels. Pour la configuration à 35 blocs, on observe que les blocs sont moins dispersés que pour la configuration à 280 blocs et que la vitesse de propagation sur le versant incliné du bloc le plus éloigné est moins importante (*Figure 5.6*).

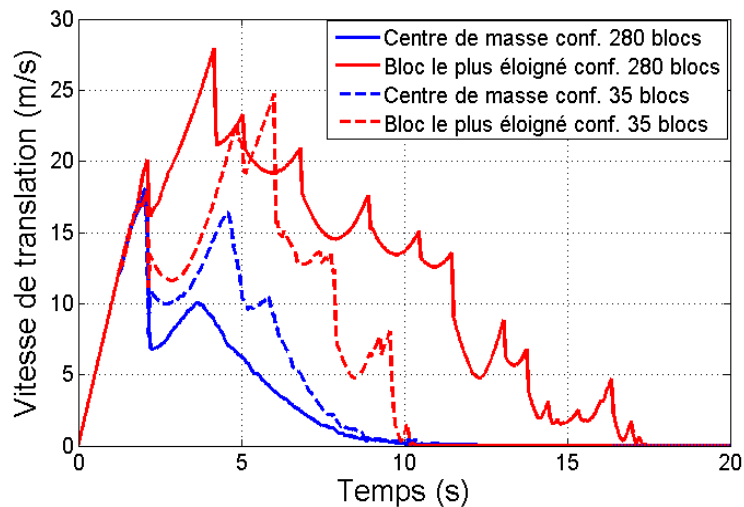
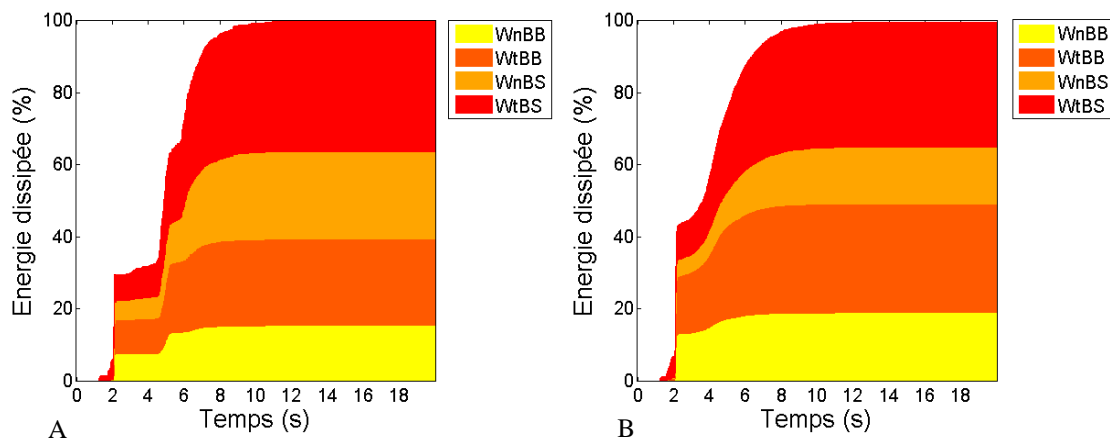


Figure 5.6. Vitesses du centre de masse (bleu) et du bloc le plus éloigné (rouge) pour les configurations à 35 blocs (trait pointillé) et à 280 blocs (trait continu)

La *Figure 5.7* montre l'évolution cumulée dans le temps de la dissipation d'énergie due aux différents types d'interactions possibles (impact Bloc/Bloc – W_nBB , frottement Bloc/Bloc – W_fBB , impact Bloc/Sol – W_nBS et frottement Bloc/Sol – W_fBS , représentés du jaune au rouge respectivement) pour les configurations à 35 blocs (*Figure 5.7A*) et à 280 blocs (*Figure 5.7B*). Le Tableau de la *Figure 5.7C* résume les résultats obtenus en termes d'énergies dissipées au moment du premier impact (pour un temps t allant de 0 à 2,2 secondes) et sur la totalité de l'événement (pour t allant de 0 à 20 secondes) et ce pour chaque type d'interaction (W_nBB , W_fBB , W_nBS , W_fBS).

L'analyse des bilans cinématiques montre que l'évolution de la dissipation d'énergie pour la configuration à 35 blocs, se caractérise par une phase de « vol libre » consécutive au premier rebond, que l'on peut facilement identifier entre $t = 2,2$ s et $t = 4,2$ s par des paliers horizontaux qui montrent qu'aucune interaction n'a lieu pendant cette phase (*Figure 5.7A*). Lorsque l'on augmente le nombre de blocs (*Figure 5.7B*), nous pouvons observer que la dissipation d'énergie se fait de manière progressive et que le phénomène est plus proche d'un écoulement que d'une suite de rebonds libres. En complément à ce que nous avons pu observer lorsque l'on a analysé le rebond de plusieurs blocs parallélépipédiques sur un support horizontal au *Chapitre 4*, nous remarquons avec ces simulations que le phénomène de dissipation est sensible à l'angle d'incidence entre la direction de la chute et la direction de la pente. Au premier impact, par exemple, nous observons que l'augmentation du nombre de blocs engendre une augmentation plus importante de la quantité

d'énergie dissipée par frottement entre les blocs comparativement à la quantité d'énergie dissipée par chocs. Comme on peut le constater dans le tableau de la *Figure 5.7C*, 6,48% de l'énergie totale est dissipée par frottement bloc-bloc au premier impact pour la configuration à 35 blocs contre 15,9% avec la configuration à 280 blocs. La très légère variation de la quantité d'énergie dissipée par chocs entre les blocs pour les deux configurations au premier impact (10,52 et 13,09 % respectivement) est cohérente avec ce que nous avons observé dans le *Chapitre 4* avec l'étude multi-contact où nous avons montré que le fait d'augmenter le nombre de blocs n'augmentait pas nécessairement la quantité d'énergie dissipée (dans la direction normale au contact) au premier impact. Dans le cas plus général de l'évènement de Millau où les mécanismes de frottement et de glissement entre les blocs sont plus importants, la quantité d'énergie totale dissipée au premier impact semble dépendante des caractéristiques géométriques de la surface impactée et du nombre de blocs. Par ailleurs, les taux d'énergie dissipée par frottement basal sont très similaires dans le bilan final pour les deux configurations : 35,93 % pour la configuration à 35 blocs et 34,49 % pour la configuration à 280 blocs.



Energie dissipée au premier impact avec le versant (% de l'énergie totale)					
Configuration	W_nBB	W_tBB	W_nBS	W_tBS	Total
35 blocs	10,52	6,48	5,37	7,06	29,42
280 blocs	13,09	15,90	4,60	9,58	43,18
Energie totale dissipée (% de l'énergie totale)					
35 blocs	15,44	24,04	24,22	35,93	99,64
280 blocs	18,97	30,20	15,83	34,49	99,49

C
Figure 5.7. Bilan énergétique en fonction du temps pour les configurations A. 35 blocs. B. 280 blocs. C. Tableau synthétique des énergies dissipées au premier impact et sur la totalité de l'évènement pour les deux configurations testées

5.1.4. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DU POINT D'IMPACT SUR LA PROPAGATION DE LA MASSE ROCHEUSE

Lorsqu'une masse rocheuse tombe verticalement d'une falaise, celle-ci semble particulièrement sensible aux caractéristiques géométriques et rhéologiques lors du premier impact entre les blocs et le sol. En effet, nous avons vu que les blocs le plus éloignés acquièrent une vitesse importante dans cette zone et que dans le même temps un pourcentage important de l'énergie totale du système est dissipée. Les enjeux de cette zone sur la propagation finale des blocs s'avèrent assez importants. Pour mieux comprendre l'influence de la géométrie de cette zone dans

la propagation des masses rocheuses, nous avons modifié la géométrie du versant de la configuration simplifiée à 35 blocs en y ajoutant un replat de 2 m en pieds la falaise (*Figure 5.8*).

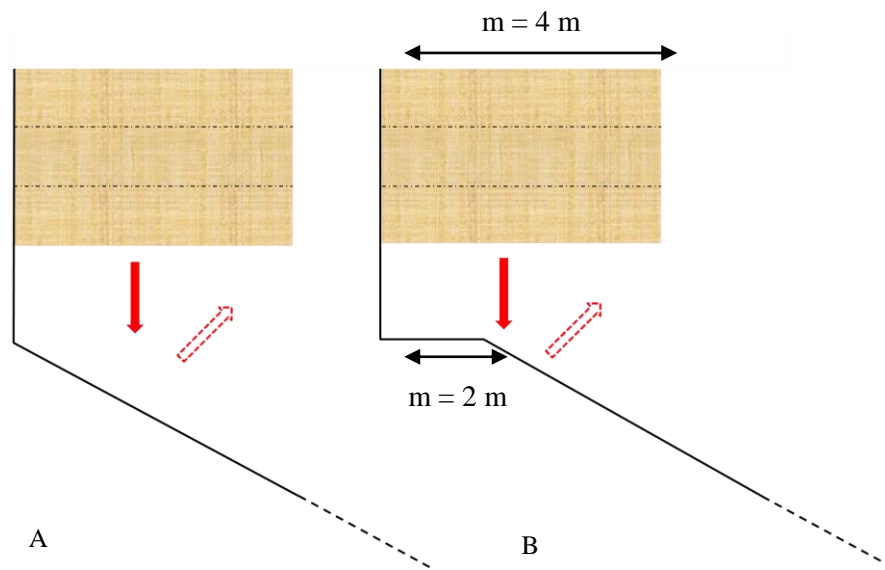


Figure 5.8. Schéma de la zone de premier impact entre la masse rocheuse et le versant incliné. A. Configuration de base. B. Mise en place d'un replat de 2 m en pieds de falaise

Sur la *Figure 5.9* on présente les positions des centres de masse des blocs lors du dépôt final que ce soit numériquement avec le replat (carrés bleus) et sans le replat (cercles rouges) ainsi que l'évolution dans le temps de la position du centre de masse de l'ensemble des blocs pour les deux géométries testées. De manière générale, on observe sur cette figure, que diminuer l'inclinaison de la surface d'impact diminue la distance de propagation de la plupart des blocs, notamment ceux du front de l'éboulement qui passe de 80 m sans replat à 65 m avec le replat. En effet, changer l'inclinaison de la zone d'impact signifie indirectement changer la direction de rebond initial des blocs, ce qui altère le phénomène de propagation et les mécanismes d'interactions au-delà et pour toute la durée de l'événement (*Figure 5.9B*). On observe également une influence significative sur la propagation des blocs les plus éloignés malgré des Run-Out du front de l'avalanche quasi identiques pour les deux configurations : les blocs ont tendance à parcourir des distances plus importantes lorsque l'on augmente l'inclinaison de la zone de transition.

D'un point de vue énergétique, nous avons comme précédemment déterminé la quantité d'énergie dissipée pour chaque type d'interaction en fonction du temps (*Figure 5.10*). La première remarque intéressante concerne le premier impact des blocs avec le versant où l'on observe que la quantité totale d'énergie dissipée reste la même pour les deux configurations testées, soit 30% de l'énergie totale. La perte d'énergie au premier impact semble donc plus sensible au nombre de blocs, qu'à la géométrie du support d'impact. Au-delà du premier impact, les phénomènes de dissipation d'énergie se voient fortement modifiés comme conséquence des différences de comportement obtenues lors du premier rebond qui perturbent par la suite la trajectoire des blocs. Curieusement, on remarque que la quantité d'énergie dissipée par frottement basal semble indépendante d'une configuration à l'autre, des mécanismes développés au premier impact.

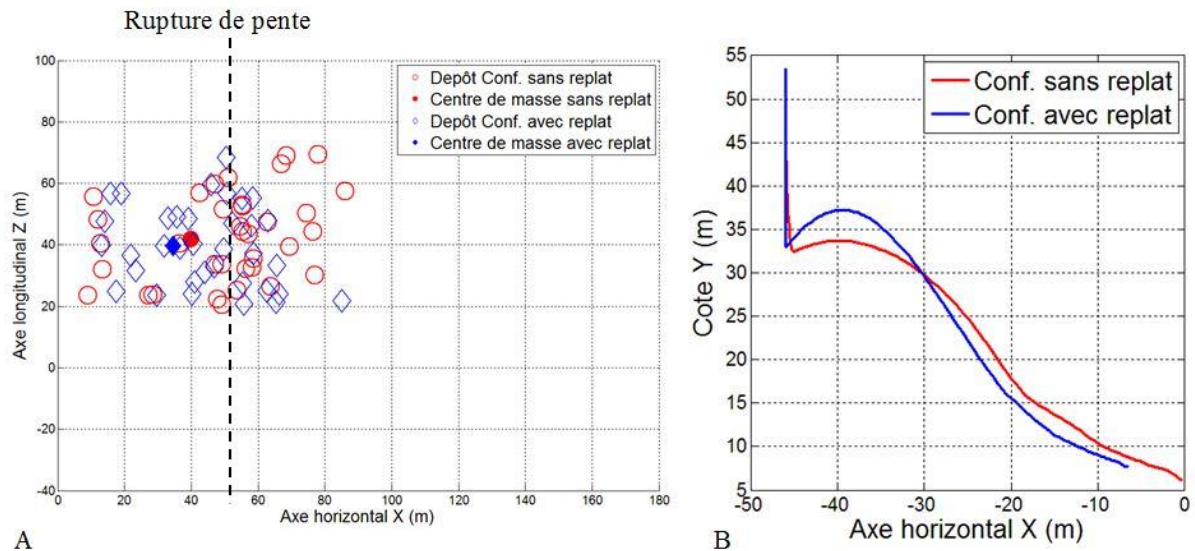
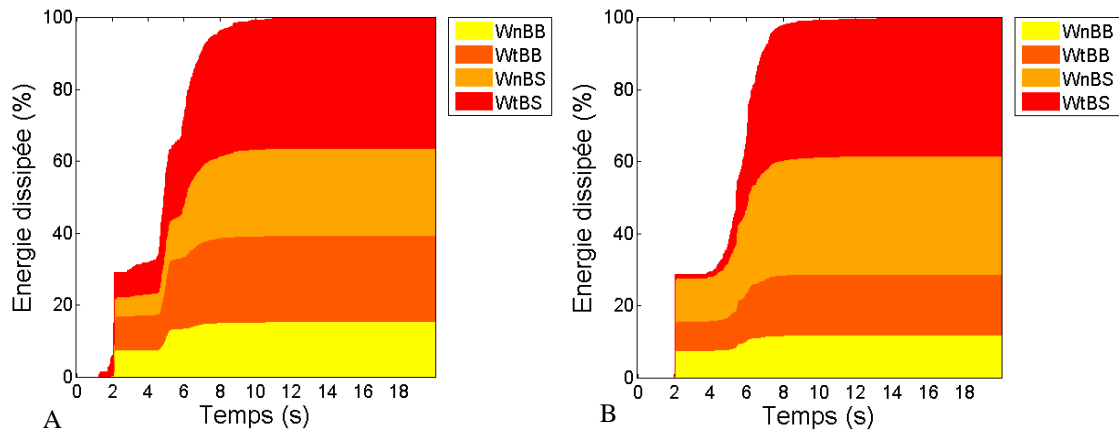


Figure 5.9. A. Dépôt final des blocs avec le replat (carrés bleus) et sans le replat (cercles rouges). B. Evolution dans le temps du centre de masse pour les deux géométries testées

Pour conclure, ces différentes études nous ont montré quelques aspects importants à retenir pour mieux modéliser le phénomène de propagation de masses rocheuses et nous approcher encore plus du dépôt réel observé sur le terrain :

- Pour les éboulements de petits volumes, un nombre de blocs similaire à celui observé sur le terrain doit être considéré, pour approcher au mieux des mécanismes de propagation réels des blocs, notamment celui des blocs éjectés, car ils peuvent avoir une distance de propagation très au delà de celle de la masse. De fait, ces premières simulations nous ont montré qu'augmenter le nombre de blocs dans une simulation augmente la distance de propagation de certains blocs isolés, mais que l'influence est moindre sur la propagation du dépôt principal. Il convient de différencier l'histoire du bloc éjecté de celle de la masse principale, et d'identifier les événements à l'origine de ce détachement. Dans tous les cas et ce qu'il faut retenir est que les trajectoires de ces blocs critiques sont la conséquence d'un comportement multi-blocs qui doit être impérativement pris en compte dans la modélisation.
- Il faut utiliser une géométrie de versant la plus réaliste possible et discrétiser avec attention la zone d'impact entre la masse rocheuse et le versant de propagation car la trajectoire finale des blocs semble sensible à cette géométrie,
- Les propagations les plus critiques sont issues de transferts multi-blocs,
- Sur le versant de propagation, les paramètres les plus influents sont le frottement basal et le coefficient de restitution bloc-sol.



Configuration à 35 blocs - Premier impact					
Configuration	W _n BB	W _t BB	W _n BS	W _t BS	total
Sans marche	7,52	9,48	5,37	7,06	29,42
Avec marche	7,72	8,02	11,91	1,03	28,67
Configuration à 35 blocs - Bilan final					
Sans marche	15,44	24,04	24,22	35,93	99,64
Avec marche	11,90	16,87	32,82	37,91	99,50

C
 Figure 5.10. Bilan énergétique en fonction du temps pour la configuration A. Avec replat. B. Sans replat. C. Tableau synthétique des énergies dissipées au premier impact et sur la totalité de l'événement pour les deux configurations numériques testées

5.1.5. MODELISATION DE L'ÉBOULEMENT DE MILLAU : APPROCHE SIMPLIFIÉE EN UTILISANT DES PARALLELEPIPEDES IRREGULIERS

5.1.5.1. Détail de la campagne numérique

Les simulations précédentes ont montré la dépendance du phénomène de propagation de masses rocheuses aux caractéristiques géométriques du versant et du pan de falaise. Pour étudier l'influence de la géométrie des blocs sur la cinématique de propagation sur le cas de Millau, la masse de départ a été entièrement reconsidérée et assimilée à un volume tridimensionnel fracturé dont la géométrie et la blocométrie ont été définies en accord avec les observations faites sur site (géométrie de la falaise, taille et forme des blocs du dépôt) (Figure 5.11). Par souci de simplicité, nous avons quelque peu modifié la géométrie du pan rocheux au voisinage du dièdre observable sur la falaise, en considérant que la totalité de la masse rocheuse de cette zone n'est pas tombée. Le versant de propagation a été simulé en utilisant comme pour les configurations précédentes des plans, mais avec une géométrie de la zone de transition entre la falaise et le versant de propagation plus adaptée au site réel avec notamment un replat incliné à 60° par rapport à l'horizontale tel qu'observé lors de nos visites de terrain. Pour résumer, deux différences importantes existent par rapport aux configurations antérieures :

- La masse rocheuse initiale a été prédécoupée par des plans horizontaux et verticaux légèrement inclinés, sur la base des observations des réseaux de fracture présents dans le massif, et en fonction des dimensions des plus gros blocs observés sur le dépôt naturel. Au total 122 blocs ont été modélisés dans cette campagne dont 1/3 correspondent à des blocs dont le volume est inférieur à 5 m³ et 2/3 à des blocs de volume important compris entre 5 m³ et 15 m³ (Figure 5.11). En règle générale, tous les blocs modélisés ont une épaisseur de 1 m (dans la direction Y). La Figure 5.12B présente le rapport entre les inerties quadratiques en Z et X afin de

caractériser l'élanement moyen des blocs. De ce fait, nous observons que les blocs les plus petits ont des géométries proches d'un cube (rapport proche de 1 sur la *Figure 5.12B*) tandis que les blocs ayant un volume intermédiaire (entre 5 et 10 m³) présentent des formes parallélépipédiques représentées par des fortes valeurs d'élanement,

- Le pan de falaise est modélisé par un plan incliné à 85° par rapport au plan horizontal et une description plus précise de la zone de transition entre la falaise et le versant de propagation a été faite en ajoutant une replat incliné à 60° tel qu'observé sur le terrain naturel (*Figure 5.13*). Cette modification a été introduite suite aux premiers résultats numériques présentés dans la section précédente (5.1.3) qui ont montré une dépendance forte du phénomène de propagation à la géométrie de la zone de transition. Comme dans les simulations précédentes, nous avons considéré une cohésion nulle entre les blocs car dans le cas d'une chute libre, l'énergie de cohésion libérée lors de l'impact est négligeable devant l'énergie potentielle acquise par le système. L'auteur souligne que ceci n'est valable que pour le cas traité ici. Dans d'autres configurations où le détachement et la propagation se réalisent de façon simultanée (sans chute libre) la cohésion entre les discontinuités peut légèrement modifier les mécanismes de dissipation d'énergie du système et pourrait avoir une influence qui n'est pas abordée ici.

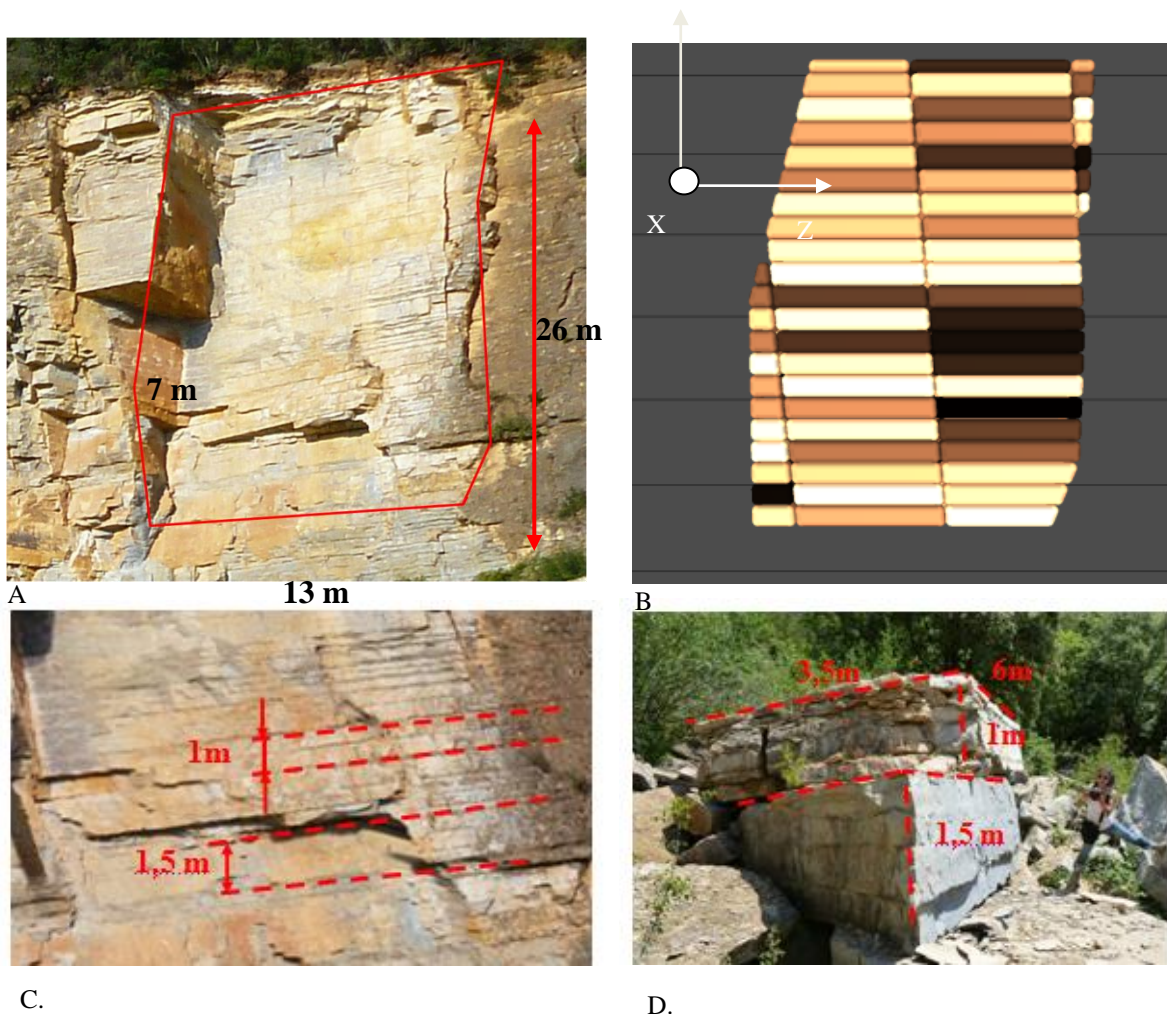


Figure 5.11. A. Géométrie de la falaise rocheuse. B. Géométrie de la zone de départ récréée numériquement. C. Stratigraphie observée sur la falaise rocheuse. D. Taille caractéristique des blocs du dépôt

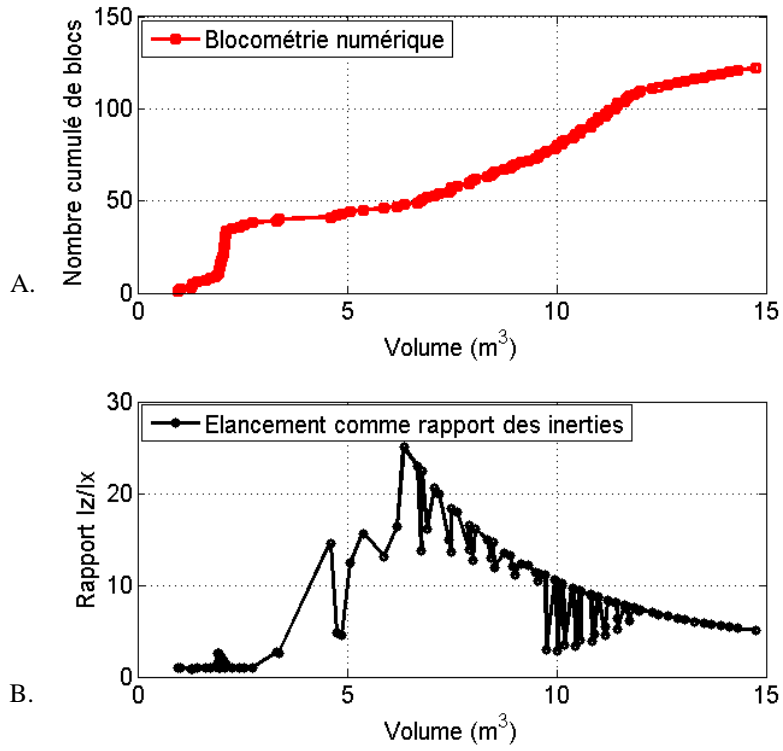


Figure 5.12. A. Granulométrie des blocs modélisés numériquement. B. Elancement calculé comme un rapport des inerties en Z et X respectivement

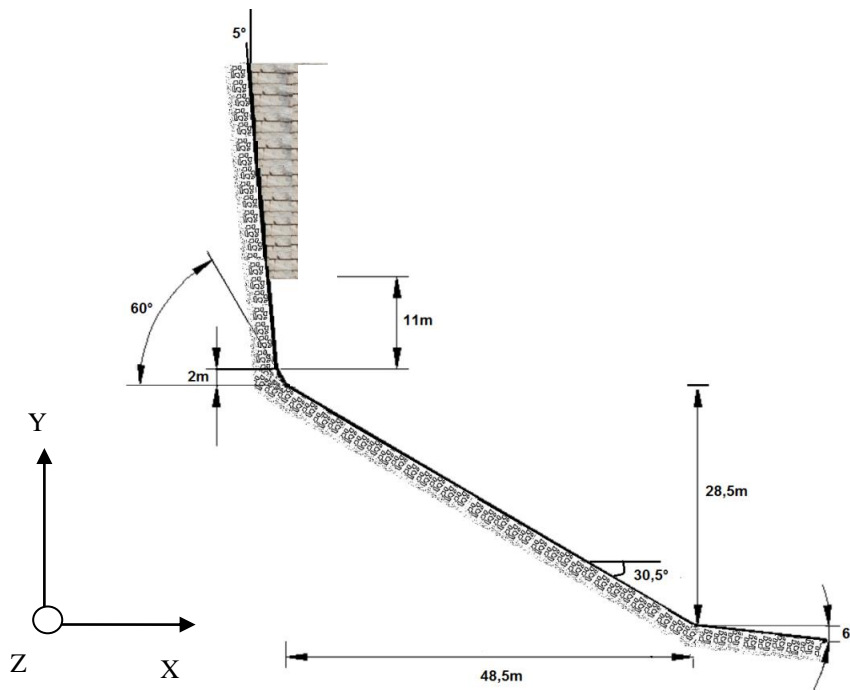


Figure 5.13. Géométrie du versant de propagation

5.1.5.2. Etude de sensibilité aux paramètres de contact

La définition des paramètres de contact reste un élément clé pour prédire avec réalisme la cinématique de propagation des blocs rocheux. Compte tenu des incertitudes importantes liées à la détermination des paramètres de contact, nous avons entrepris une étude de sensibilité pour déterminer le jeu de paramètres le plus adapté pour reproduire l'évènement de Millau.

Vu la complexité du phénomène de propagation en masse et du grand nombre de paramètres de contact (bloc/bloc et bloc/sol), nous avons réalisé cette étude en faisant varier un seul paramètre à la fois pour chacune des interactions possibles, et ce en fixant tous les autres paramètres à une valeur constante.

Nous allons étudier la sensibilité des paramètres de contact sur deux informations caractéristiques couramment utilisées dans la littérature pour décrire ce type d'évènements et facilement mesurables sur le terrain : la distance de propagation finale du centre de masse de l'ensemble des blocs (représentées couramment dans la littérature par l'angle de propagation ou Fahrböschung) et l'étalement longitudinal du dépôt principal. Nous appelons dépôt principal la zone du dépôt contenant au moins 95% des blocs.

5.1.5.2.1. Influence des paramètres de dissipation d'énergie par restitution normale

Nous avons commencé cette étude par une étude de sensibilité aux paramètres de restitution normale e_n^2 . Au total, 64 simulations ont été réalisées en faisant varier les paramètres de restitution pour les contacts Bloc-Bloc et Bloc-Sol entre 0 et 1. Les résultats sont présentés comme l'écart entre les résultats numériques et les données réelles entre les centres de masse (Figure 5.14A) et les étalements (Figure 5.14B). Sur la Figure 5.14, les zones grisées ou noires caractérisent des écarts importants entre la modélisation et l'expérimentation alors que les zones blanches correspondent à des écarts faibles. La zone entourée par un cercle rouge sur la Figure 5.14 définit les coefficients de restitution « optimaux » (erreur inférieure à 5%) permettant de reproduire à la fois la distance de propagation du centre de masse et la longueur de dépôt.

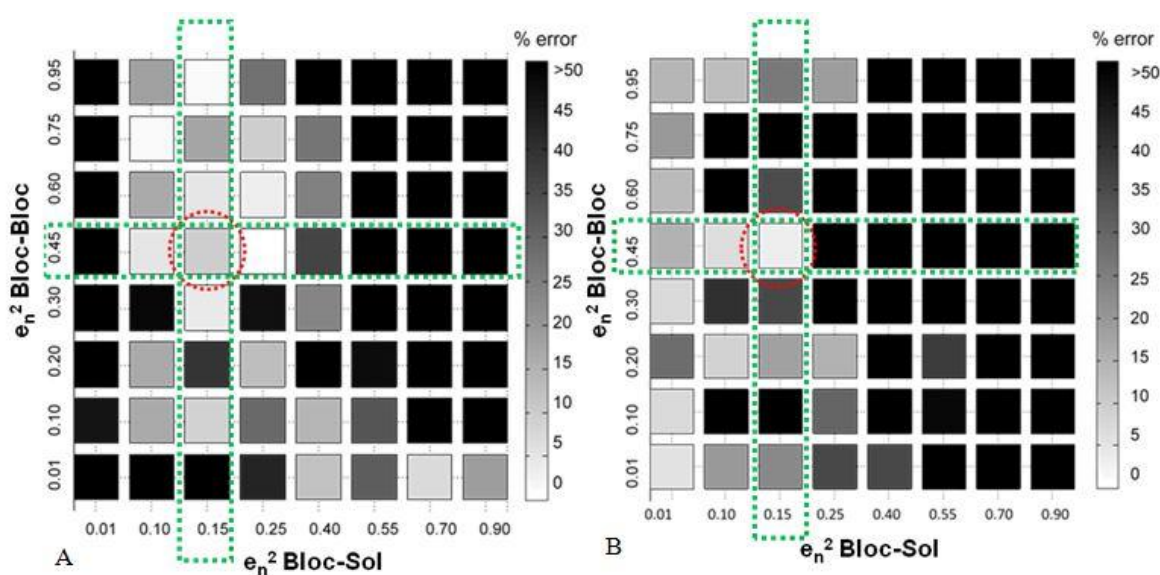


Figure 5.14. Sensibilité de la position du centre de masse (A) et de l'étalement du dépôt (B) aux paramètres de restitution normale

Si l'on se réfère aux essais de caractérisation effectués sur le terrain pour lesquels nous avons déterminé les paramètres de restitution normale à 0.2 et 0.5 pour le sol et les blocs respectivement, on constate au vu de l'étude de sensibilité que ceux si ont été assez bien estimés. En effet, les paramètres optimaux qui reproduisent le mieux le dépôt principal sont voisins de 0.15 pour les impacts avec le sol et de 0.45 pour les impacts entre les blocs. Par ailleurs, nous observons que la position finale du dépôt est moins sensible que l'étalement aux paramètres de restitution normale.

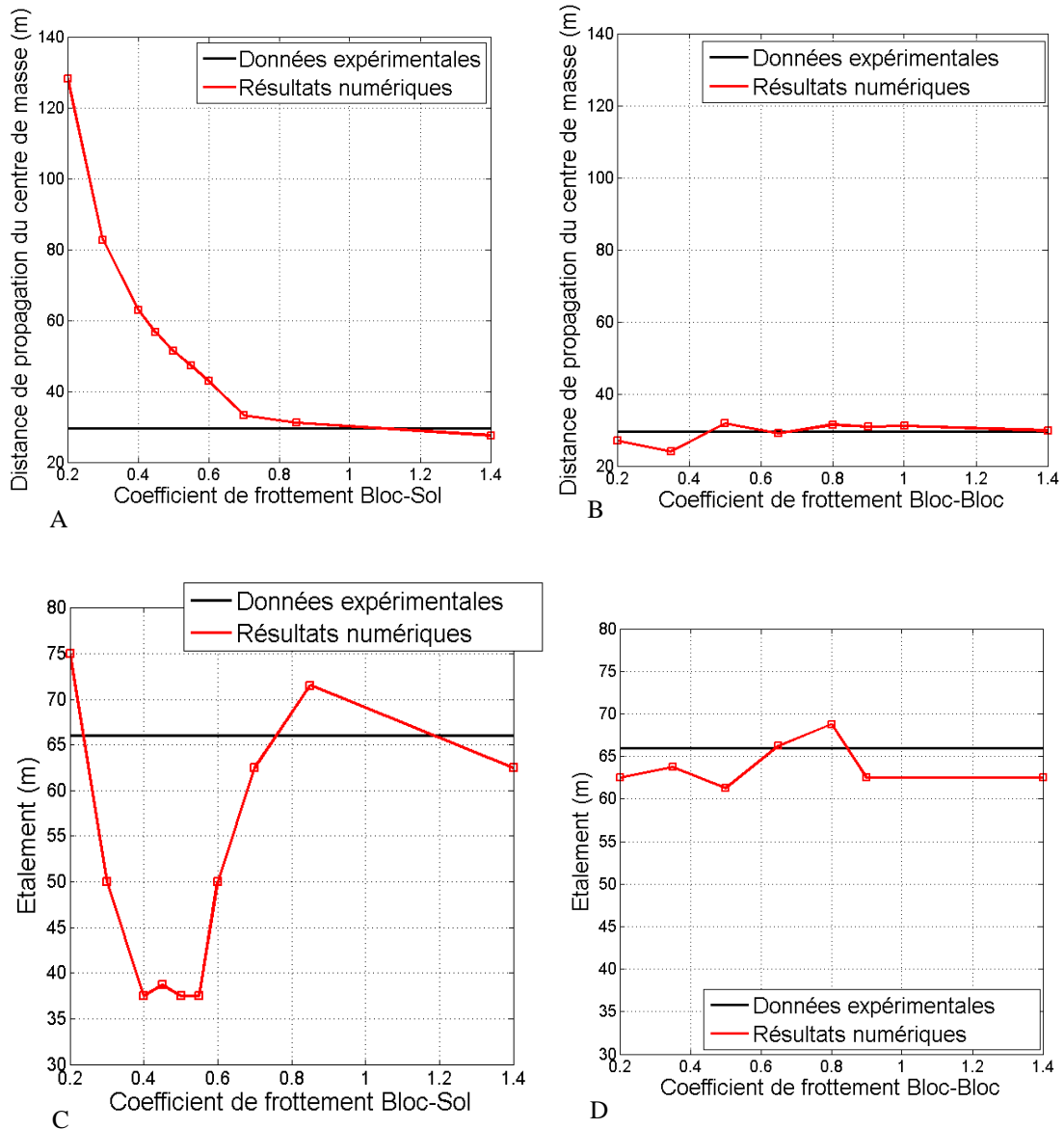


Figure 5.15. Distance de propagation du centre de masse en fonction des coefficients de frottement basal – A - et entre les blocs -B. Etalement du dépôt en fonction des coefficients de frottement basal - C- et entre les blocs D

18 simulations numériques complémentaires ont été réalisées pour étudier successivement l'influence des coefficients de frottement (bloc-support et bloc-bloc) sur la base du jeu de paramètres optimal défini précédemment pour les paramètres de restitution normale (e_n^2). Pour chaque série de simulations numériques, l'un des paramètres de frottement (par exemple le coefficient de frottement bloc-support) a été fixé à 1 alors que le second coefficient de frottement

(par exemple le coefficient de frottement bloc-bloc) varie entre 0.2 et 1.4. Comme précédemment, les résultats sont présentés en termes de distance de propagation du centre de masse et d'étalement du dépôt principal pour différentes valeurs du frottement basal (*Figure 5.15A* et *Figure 5.15C*) et du frottement entre les blocs (*Figure 5.15B* et *Figure 5.15D*).

Sur la *Figure 5.15* on constate que la distance de propagation et l'étalement du dépôt sont fortement influencés par le paramètre de frottement basal Bloc-Sol et très peu par le paramètre de frottement inter-bloc. Sur la *Figure 5.15A*, nous observons que les distances de propagation du centre de masse du dépôt sont, pour des valeurs du paramètre de frottement inférieures à 0.7, dépendantes du frottement basal. Au-delà de cette valeur du frottement basal (valeur supérieure à l'angle de la pente) la distance de propagation est relativement constante. Concernant l'étalement du dépôt (*Figure 5.14C*), nous observons que les valeurs les plus fortes de l'étalement du dépôt sont obtenues pour des valeurs très faibles ou très élevées du coefficient de frottement basal. Au-delà d'une valeur du frottement basal de 0.70 nous constatons que la valeur du coefficient de frottement n'a pas d'influence sur l'étalement du dépôt qui est très proche de l'étalement réel (*Figure 5.14C*).

Il résulte de cette étude que des valeurs des coefficients de restitution de l'ordre de 0.45 entre les blocs et de 0.15 entre les blocs et le sol, et du coefficient de frottement basal supérieur à 0.70 permettent de reproduire au mieux la géométrie du dépôt principal de l'éboulement observé sur le terrain. Cette étude nous montre également que l'étalement du dépôt principal et la distance de propagation du centre de masse sont particulièrement sensibles au paramètre de restitution normale entre les blocs et le sol (*Figure 5.14A* et *Figure 5.14B*) et au coefficient de frottement basal (*Figure 5.15A* et *Figure 5.15C*).

Un élément important à prendre en compte pour la définition des zones à risques est la position des blocs isolés. Nous nous sommes donc intéressés aux distances de propagation du bloc de petite taille (dont le volume est inférieur à 2 m^3) et du bloc de grand volume (celui ayant un volume supérieur à 5 m^3) les plus éloignés du dépôt principal.

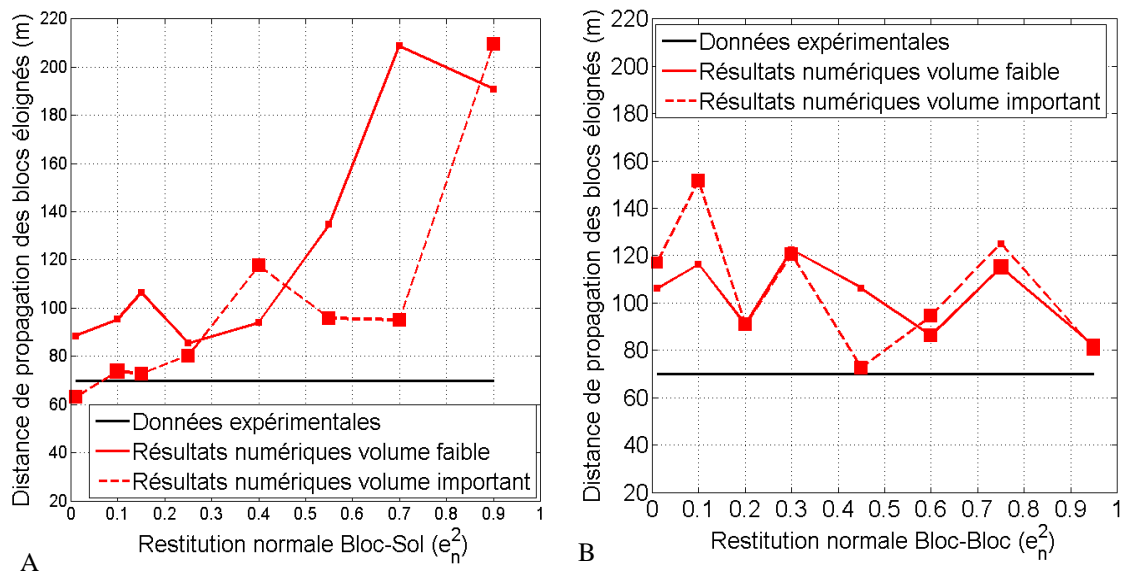


Figure 5.16. Distances de propagation des blocs isolés en fonction des paramètres de restitution entre les blocs et le sol (A) et entre les blocs eux-mêmes (B). La figure présente les distances de propagation des blocs de volume faible (volume $< 2 \text{ m}^3$ – trait plein) et les blocs de taille importante (volume $> 5 \text{ m}^3$ – trait en pointillé)

La *Figure 5.16A* compare les distances de propagation des centres de masses des blocs dits « critiques » de petite taille (trait plein) et de grande taille (trait pointillé) en fonction du paramètre de restitution normale entre les blocs ($e_n^2_{BB}$) pour $e_n^2_{BS}$ égal à 0.15, avec la distance de propagation du bloc le plus éloigné observé sur le terrain naturel (trait noir continu). La *Figure 5.16B* présente les mêmes informations mais avec $e_n^2_{BB} = 0.45$ et $e_n^2_{BS}$ variables.

Pour le jeu de paramètres optimal ($e_n^2_{BB} = 0.45$ et $e_n^2_{BS} = 0.15$), nous observons que la propagation des blocs isolés est particulièrement sensible à la valeur du coefficient de restitution normale entre les blocs et le sol (*Figure 5.16A*) avec une sensibilité moindre au coefficient de restitution entre les blocs eux-mêmes (*Figure 5.16B*). Cependant, nous observons que, pour la plupart des simulations réalisées, ce sont les blocs de faible volume qui parcourent les distances les plus importantes, avec une propagation toujours supérieure à celle observée sur le site réelle. Concernant les blocs isolés de volume important, nous observons des distances de propagation proches de celles observées sur le terrain, avec un écart moyen d'environ 2.3 m.

5.1.5.2.2. Influence du frottement basal et inter blocs

Concernant l'influence des paramètres de frottement sur la propagation des blocs les plus éloignés, nous observons que les contacts par frottement basal (frottement Bloc-Sol) sont également prépondérants par rapport aux interactions par frottement dans la masse. Les valeurs optimales du frottement basal, permettant d'approcher au mieux les données expérimentales, se situent aux alentours de 0.7 (*Figure 5.17*). Nous observons également sur la *Figure 5.17A* qu'imposer un frottement basal élevé peut amplifier les distances de propagation des blocs isolés du fait d'un transfert de l'énergie de rotation (empêchée par une valeur élevée du coefficient de frottement) en énergie de translation.

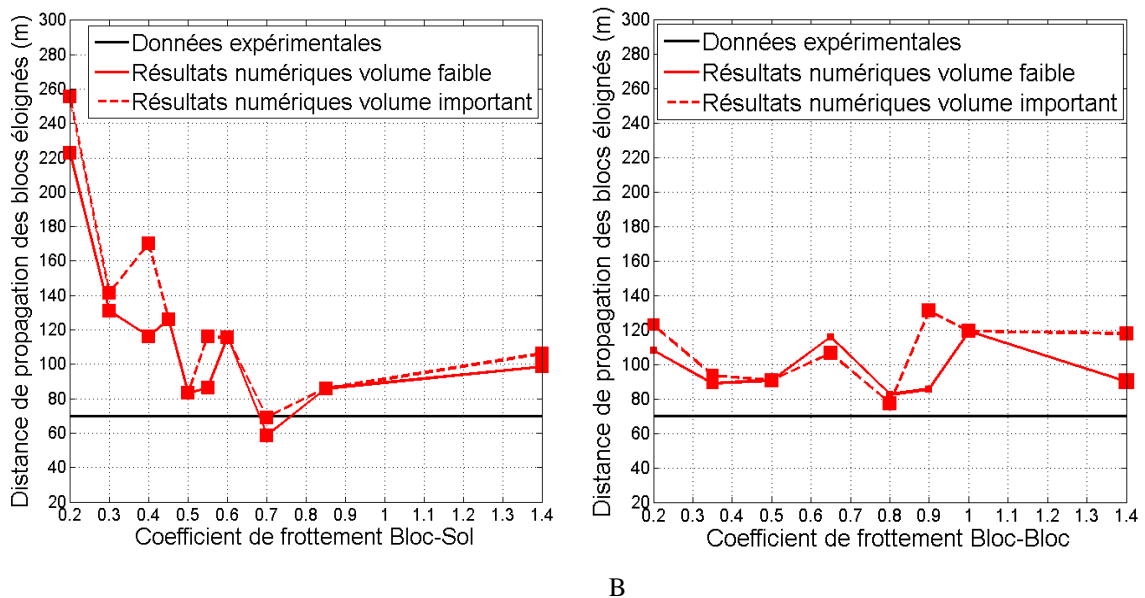


Figure 5.17. Distance de propagation des blocs isolés en fonction du frottement basal (A) et du frottement inter blocs (B). La figure présente les distances de propagation des blocs de petite taille ou de taille intermédiaire (volume $< 2 \text{ m}^3$ – trait plein) et les blocs de taille importante (volume $> 5 \text{ m}^3$ – trait en pointillé)

L'influence des paramètres de contact des blocs les plus éloignés est présentée sur la *Figure 5.18*, en termes de vitesse de rotation maximale des blocs de petites et grandes tailles au cours de chaque simulation.

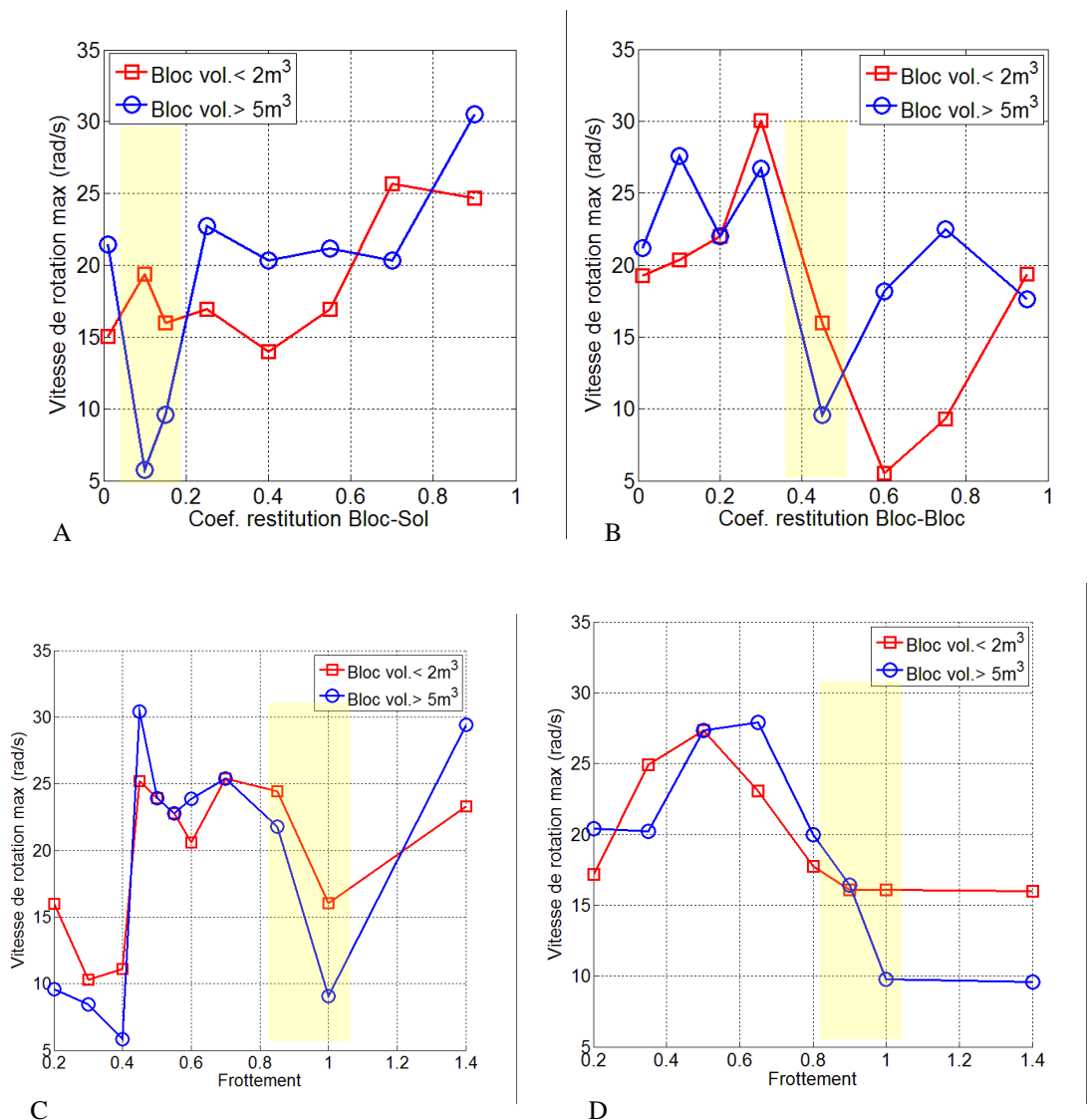


Figure 5.18. Vitesse de rotation maximale observée en fonction de chacun des paramètres testés : A. Restitution normale Bloc-Sol. B. Restitution Bloc-Bloc. C. Frottement Bloc-Sol. D. Frottement Bloc-Bloc. La région jaune représente la zone de définition des paramètres pour laquelle les dépôts numériques se rapprochent le plus des dépôts expérimentaux

De manière générale, nous observons sur la *Figure 5.18* que le phénomène de rotation des blocs est particulièrement sensible aux paramètres de contact, par choc ou par frottement, avec une corrélation difficilement identifiable, sauf pour le paramètre de restitution Bloc-Sol où nous notons que la vitesse de rotation des blocs augmente avec ce coefficient pour des valeurs supérieures à 0.15 et ce quel que soit le volume des blocs (*Figure 5.18A*). De plus, la vitesse de rotation des blocs paraît peu dépendante de la taille des blocs pour des faibles valeurs de frottement basal ou inter-bloc (*Figure 5.18C* et *Figure 5.18D*). La taille des blocs paraît donc avoir une influence significative en présence de frottements élevés (supérieur à 0.80), notamment pour des blocs de volume faible (*Figure 5.18C* et *Figure 5.18D*).

Si l'on considère le jeu de paramètres optimal (régions ombrées sur la *Figure 5.18*) on constate que ce sont les blocs les plus petits, dont l'élanement est le plus faible, qui se propagent le plus loin et qui présentent des vitesses de rotation importantes. Lorsque l'on analyse la variation des vitesses de rotation des blocs les plus éloignés (petits et grands) en fonction de leur position sur l'axe horizontal (*Figure 5.19*) on constate que :

- Les vitesses de rotation des blocs au moment du premier impact semblent assez semblables pour l'ensemble des blocs, et ce quelle que soit leur forme,
- Les blocs ont tendance à gagner en vitesse de rotation à chaque contact avec le support incliné pendant la phase de propagation,
- Les blocs les plus petits de forme cubique ont plus de difficulté à s'arrêter en rotation que les blocs les plus grands qui ont une forme rectangulaire, notamment après la ligne de rupture de pente où les blocs les plus petits nécessitent une distance d'arrêt plus importante.

Ces remarques montrent la corrélation qu'il existe entre la propagation de certains blocs et leur forme : plus les particules sont proches d'une sphère, plus ils vont avoir de mal à diminuer leur vitesse de rotation, ce qui se traduit par des distances de propagation plus importantes. Par ailleurs, pour tous les jeux de paramètres testés, nous observons que la position initiale des blocs les plus éloignés se trouve généralement sur les rangés inférieures.

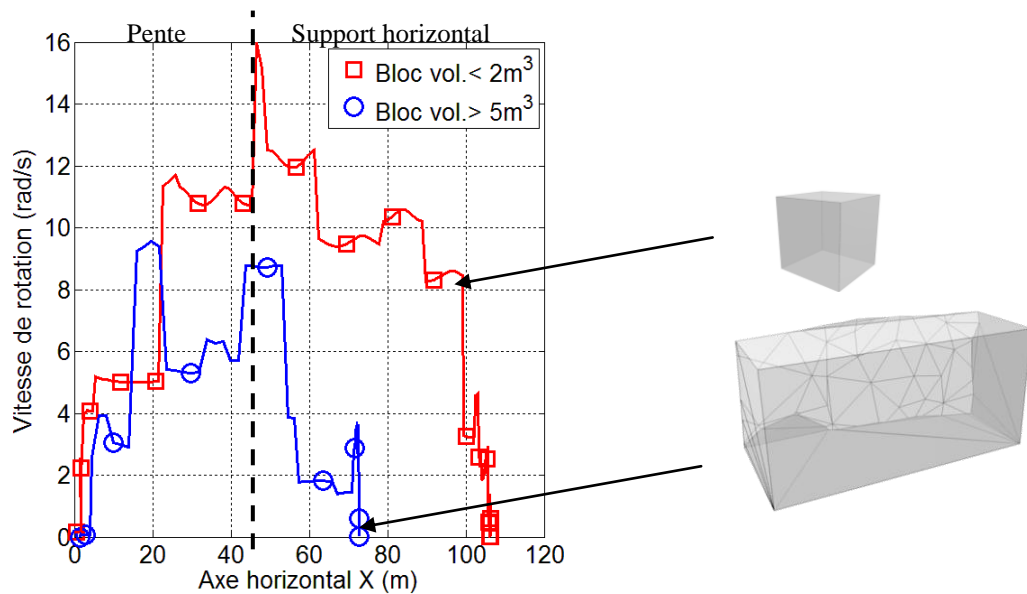


Figure 5.19. Variation des vitesses de rotation sur l'axe de propagation pour les blocs les plus éloignés en fonction de leur forme (jeu de paramètres optimal)

Sur la *Figure 5.20* on présente l'influence des paramètres de contact (restitution normale entre les blocs – *Figure 5.20A*, restitution normale entre les blocs et le sol – *Figure 5.20B*, frottement entre les blocs – *Figure 5.20C*, et frottement basal – *Figure 5.20D*) sur les modes de dissipation d'énergie au cours du phénomène de propagation. Sur ces figures, on constate que, pour la plupart des simulations numériques effectuées, le mécanisme dissipatif prédominant est le frottement, sauf pour des valeurs du coefficient de restitution très faibles qui permettent d'immobiliser la masse dès le premier impact avec le sol (*Figure 5.20A*). On remarque également qu'au moins 50% de l'énergie totale est dissipée par frottement lorsque l'on impose une forte dissipation par chocs au sein de la masse (contact bloc-bloc). Dans ce cas, environ 30% de

l'énergie totale est dissipée par frottement basal et 20 % par frottement dans la masse, ce qui n'est pas du tout négligeable (Figure 5.20A).

Les bilans énergétiques se voient très peu affectés par la variation du frottement entre les blocs (Figure 5.20C) ce qui n'est pas le cas pour le frottement basal (Figure 5.20D) où une forte dépendance est observée. Curieusement, l'augmentation du frottement basal (Figure 5.20D) entraîne une baisse de l'énergie dissipée par frottement le long de la pente. En fait, une forte augmentation du frottement bloc/sol entraîne une rotation des blocs qui s'entrechoquent et interagissent plus facilement les uns avec les autres.

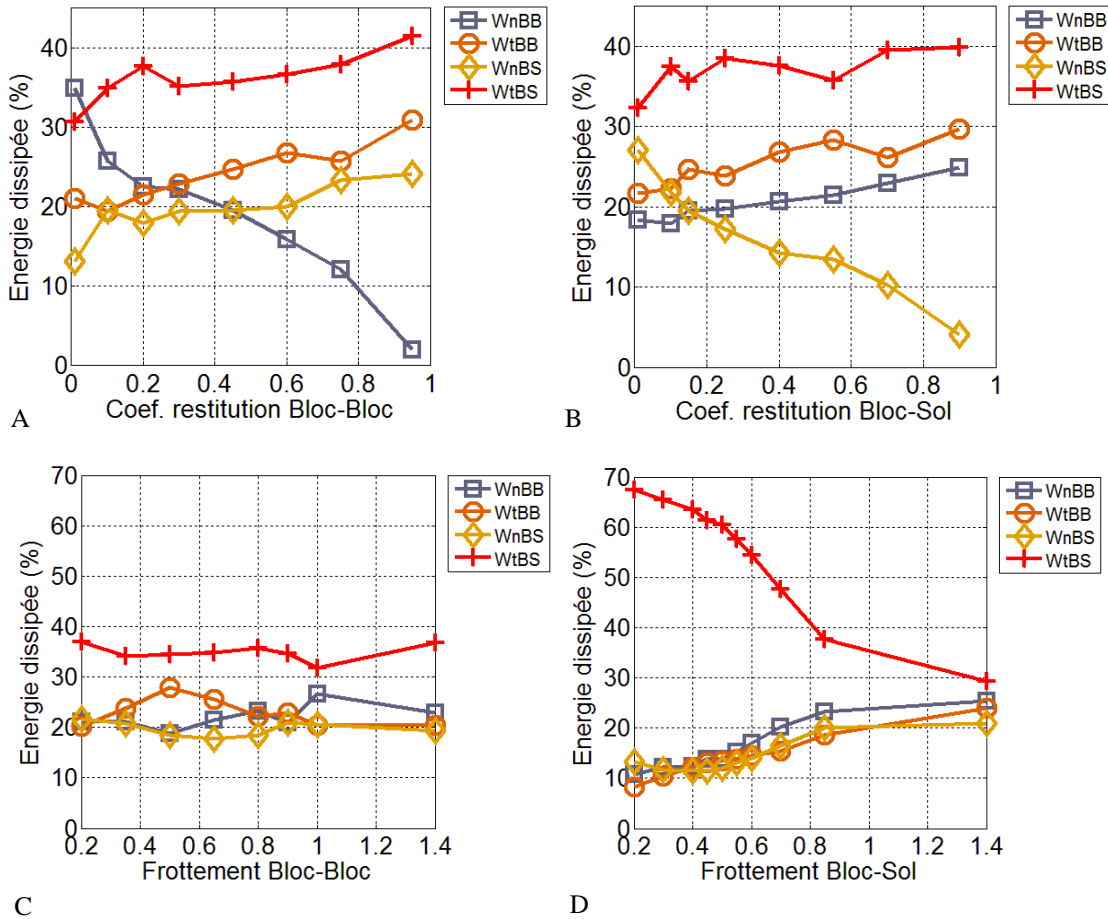


Figure 5.20. Bilan énergétique final pour différentes valeurs des paramètres de contact A. Restitution normale entre les blocs. B Restitution normale entre les blocs et le sol. C. Frottement entre les blocs et D. Frottement basal

Pour conclure l'étude de sensibilité aux paramètres de contact et au vu des résultats présentés il est possible d'établir une plage de paramètres donnant une correspondance acceptable entre les données de terrain et les résultats numériques pour la modélisation de l'éboulement de Millau (Tableau 5.1).

	e_n^2	μ	$k_n(N.m)$	k_n / k_t
Brique/Support	0.15	0.80 - 1.0	10^8	1.0
Brique/Brique	0.40 - 0.50	> 0.80	10^8	1.0

Tableau 5.1. Plage de paramètres les plus adaptés à la modélisation de l'éboulement de Millau

Sur la base de ces résultats nous avons retenu arbitrairement un jeu de paramètres moyens, dits paramètres de référence, pour les modélisations numériques de l'évènement de Millau présentées dans les chapitres suivants. Les valeurs retenues sont données dans le Tableau 5.2.

	e_n^2	μ	$k_n(N.m)$	k_n / k_t
Brique/Support	0.15	1.0	10^8	1.0
Bloc/Bloc	0.45	1.0	10^8	1.0

Tableau 5.2. Paramètres de référence

5.1.5.2.3. Bilan énergétique au voisinage du premier impact de la masse rocheuse avec le versant de propagation

Vu l'importance de la géométrie de cette région dans le phénomène de propagation des blocs rocheux, nous nous sommes intéressés à la quantité et aux modes de dissipation d'énergie dans cette zone de façon plus détaillée.

L'énergie dissipée au premier impact a été calculée en sommant les dissipations d'énergie qui ont eu lieu à moins de 4.5 m de la transition entre la pente et la falaise. La valeur de 4.5 m a été retenue pour considérer une région au moins égale à l'épaisseur du pan de falaise. Les paramètres d'interaction sont les paramètres de références présentés dans le Tableau 5.2. La Figure 5.21 présente le taux d'énergie dissipée au premier impact (par rapport à l'énergie potentielle initiale) pour différents valeurs des coefficients de restitution normale entre les blocs (Figure 5.21A) et entre les blocs et le sol (Figure 5.21B). Sur la Figure 5.21A (influence du coefficient de restitution normale) on constate que :

- La quantité d'énergie dissipée au premier impact par frottement basal est indépendante du paramètre de restitution entre les blocs.
- Pour des faibles dissipations d'énergie par impact entre les blocs, le surcroît d'énergie est dissipé en parties égales par frottement entre les blocs et par impact entre les blocs et le sol.

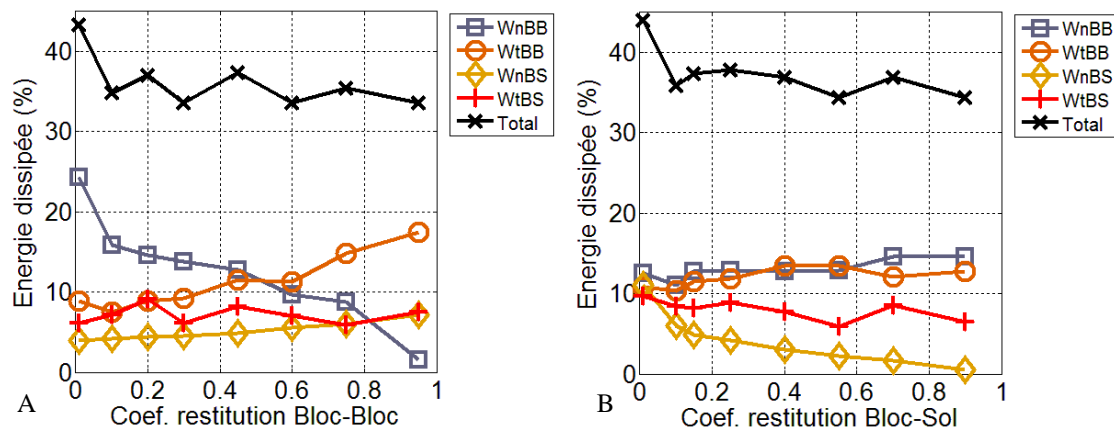


Figure 5.21. Bilan énergétique au premier impact pour différentes valeurs des coefficients : A. de restitution normale entre les blocs. B de restitution normale entre les blocs et le sol

Sur la Figure 5.21B (influence du coefficient de restitution normale entre les blocs et le sol) on constate que la quantité d'énergie dissipée dans la masse au premier impact ($WnBB + WtBB$) est, comme nous l'avons observé sur la configuration simplifiée présentée dans la section

5.1.3 (empilement de blocs simples impacté verticalement), indépendante de la valeur du coefficient de restitution bloc-sol.

De la même façon que nous l'avons fait pour la restitution normale, nous présentons sur la *Figure 5.22* le taux d'énergie dissipée au premier impact pour des valeurs différentes du coefficient de frottement entre les blocs (*Figure 5.22A*) et du frottement basal (*Figure 5.22B*).

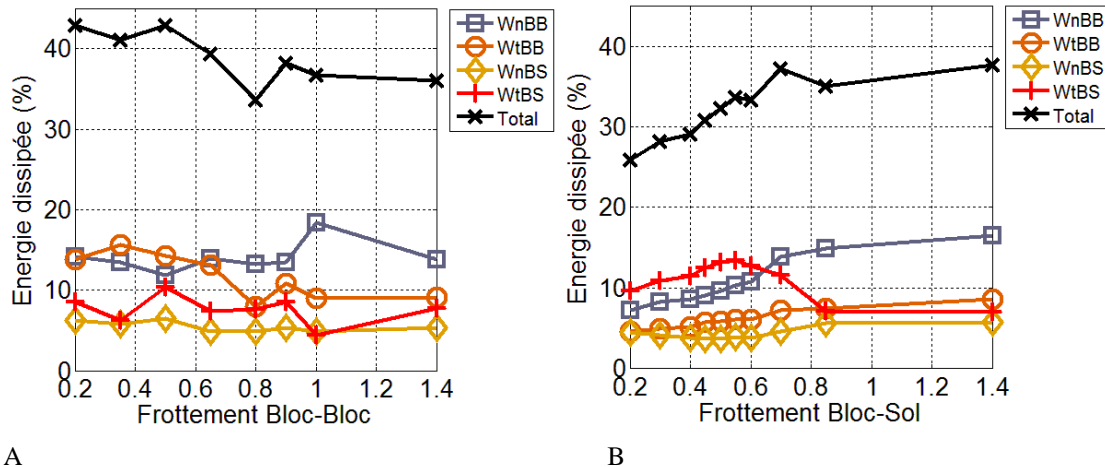


Figure 5.22. Bilan énergétique au premier impact pour différentes valeurs des coefficients : A. de frottement entre les blocs et B. de frottement basal

Sur la *Figure 5.22A* (influence du coefficient de frottement entre les blocs) on constate que la quantité d'énergie dissipée par chocs entre les blocs et le sol est indépendante du paramètre de frottement bloc-bloc. De même sur la *Figure 5.22B* on constate que l'incidence des mécanismes de frottement dans la masse (entre les blocs) a une faible influence sur la quantité d'énergie qui est dissipée entre les blocs et le sol. Par exemple, ce n'est pas parce que l'on diminue la quantité d'énergie dissipée par frottement entre les blocs que l'on augmentera la quantité d'énergie dissipée entre les blocs et le sol. En revanche, nous observons sur la *Figure 5.22B* (influence du coefficient de frottement basal) que tous les modes de dissipation d'énergie sont dépendants du paramètre de frottement basal. Cette dépendance est cependant plus faible lorsque le frottement est élevé (>0.80).

5.1.5.3. Simulations numériques menées avec le jeu de paramètres de référence

Avant d'appréhender la pertinence du jeu de paramètres de référence, nous allons dans ce chapitre comparer plus en détail les résultats expérimentaux et numériques. La *Figure 5.23* présente une vue de dessus des dépôts réel (A) et numérique (B) avec une comparaison qualitative des positions des centres de masses des blocs sur le dépôt (C). Nous observons une forte analogie entre l'enveloppe du dépôt numérique et du dépôt réel avec des blocs éparpillés aléatoirement au sein de ces enveloppes comme conséquence du nombre de blocs utilisés dans cette configuration.

Au final, 96% des blocs rocheux définis numériquement restent dans l'enveloppe du dépôt réel. Les 4% de blocs restants, sont des blocs épars de petite taille qui se sont dispersés le long du parcours. Les caractéristiques principales des dépôts expérimental et numérique sont présentées dans le *Tableau 5.3*. On observe là encore une très bonne correspondance entre les caractéristiques du dépôt numérique et du dépôt in-situ.

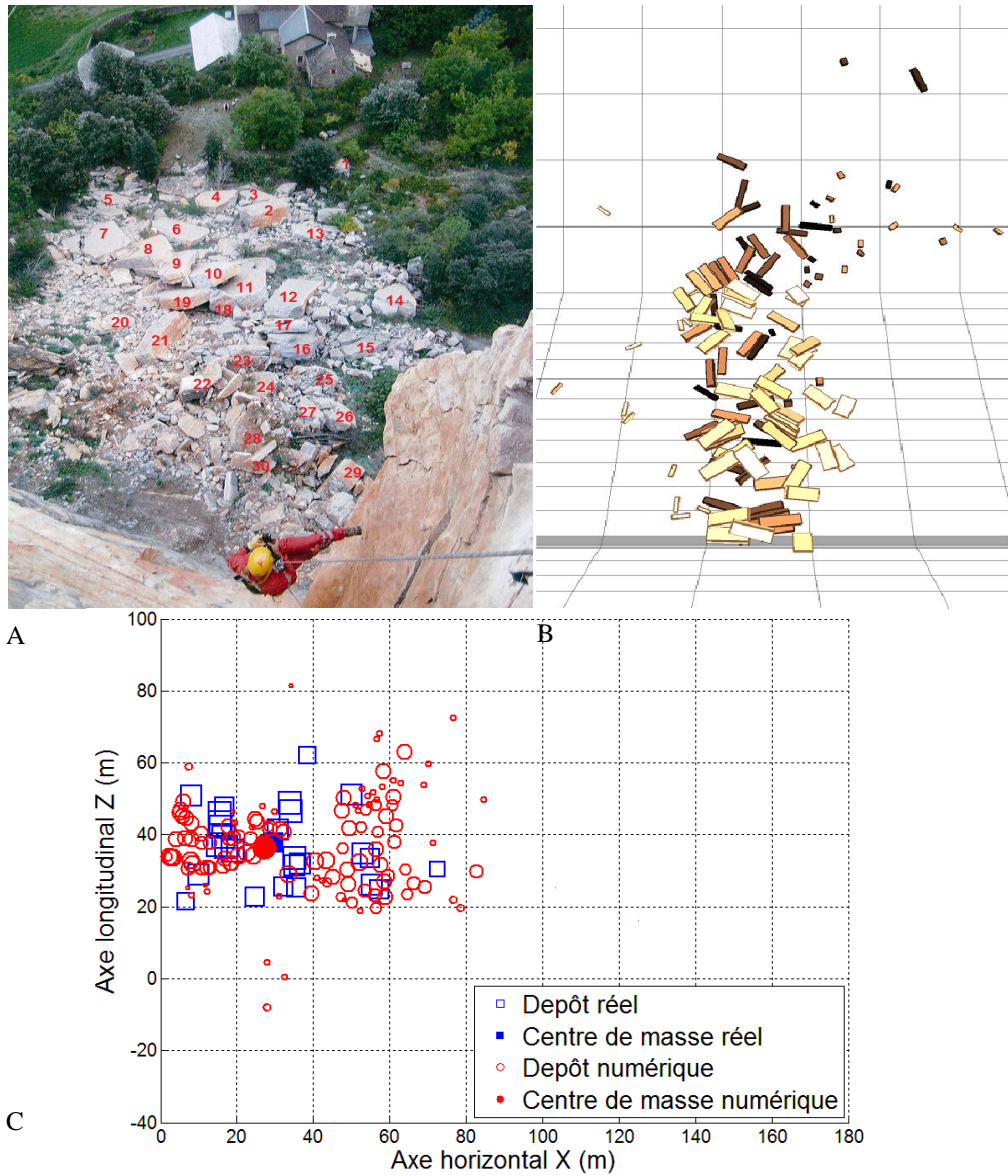


Figure 5.23. Vues de dessus du dépôt réel (A) numérique (B) et comparaison de la position des blocs (C)

	IN-SITU	NUMERIQUE
Largeur du dépôt (m)	40	43.2
Etalement (m)	66	68.5
Longueur de propagation (m)	67	70
Epaisseur max du dépôt (m)	3	3,8
Fahrböschung (°)	42	41
Angle de propagation du centre de masse (°)	45,5	47

Tableau 5.3. Comparaison quantitative des dépôts In-Situ et Numérique

Sur la Figure 5.24 nous avons représenté, pour différentes sections de la pente (de 0 m à 90 m), la répartition des énergies dissipées par chocs et par frottement à la base de l'écoulement et au sein de

la masse granulaire (frottement Bloc/Bloc - W_{tBB} , frottement Bloc/Sol - W_{tBS} , dissipation par chocs entre les blocs - W_{nBB} - et dissipation par chocs entre les blocs et le sol - W_{nBS}). Sur cette figure, on remarque qu'il existe deux zones distinctes. La première correspond à la zone d'impact pour laquelle 37% de l'énergie totale est dissipée (l'étude de sensibilité a montré que, pour la géométrie testée, le taux d'énergie dissipée au premier impact était peu dépendant des paramètres du modèle de contact). Dans cette zone, les dissipations d'énergie interviennent majoritairement au sein de la masse granulaire (36% de dissipation par frottement entre les blocs et 34 % par chocs). La seconde zone caractéristique repérable sur la *Figure 5.24* correspond à la zone de propagation sur la pente. Dans cette zone, l'énergie est principalement dissipée par frottement soit entre les blocs soit à la base de l'écoulement (55%).

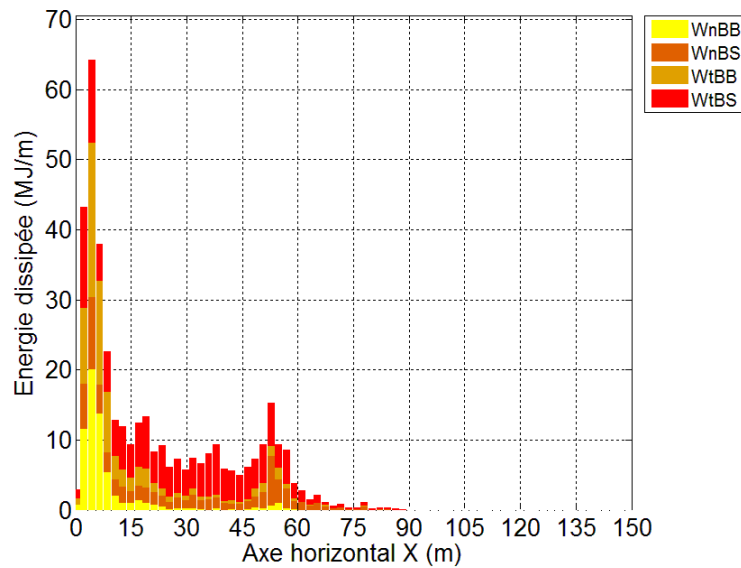


Figure 5.24. Energie dissipée tout-au-long de la trajectoire de l'avalanche rocheuse

5.1.6. APPROCHE TRAJECTOGRAPHIQUE DE L'ÉBOULEMENT DE MILLAU PAR UTILISATION DE DEMBOX

Afin d'appréhender le rôle de l'interaction entre les blocs sur les mécanismes de propagation, les simulations précédentes ont été comparées à des lâchés individuels de chacun des blocs du volume initial tel que présenté sur la *Figure 5.25*. Les paramètres de la modélisation numérique considérés sont les paramètres de référence définis entre les blocs et le sol (*Tableau 5.2*).

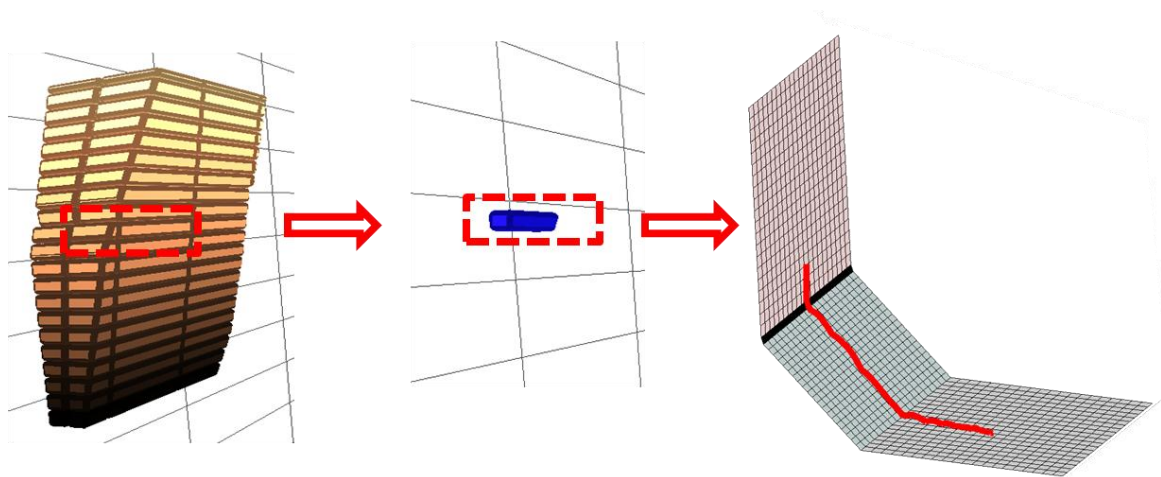


Figure 5.25. Schéma de principe de l'approche trajectographique. Chacun des blocs du volume initial est lâché verticalement et se propage individuellement sur le support incliné

La *Figure 5.26* présente l'ensemble des positions finales des blocs et leur trajectoire. La taille des marqueurs fait référence au volume initial de chacun des blocs. Par souci de simplicité, la forme carré des blocs sur la *Figure 5.26A* est arbitraire et ne représente pas la vraie forme modélisée. Les blocs sont colorés selon leur position initiale dans l'assemblage : les blocs se situant sur les rangées basses sont colorés en marron foncé tandis que les blocs le plus hauts sont colorés en marron clair. Les traits rouges légèrement colorés correspondent aux trajectoires suivies par chaque bloc pendant le phénomène de propagation. Sur la *Figure 5.26B*, la position d'arrêt des blocs est caractérisée par la distribution en nombre de blocs arrêtés en fonction de l'axe de propagation.

Nous observons sur la *Figure 5.26* que la configuration dite « trajectographique » est plus pessimiste, en termes de distance de propagation que la configuration en masse, avec une augmentation d'environ 10 m de la distance de propagation du bloc le plus éloigné, ce qui représente une différence d'environ 20% du total de la distance parcourue. Nous observons sur la *5.26B* que la plupart des blocs isolés (80 environ sur 122) se sont arrêtés sur une distance inférieure ou égale à la position du front d'éboulement observé sur site réel. Il semblerait donc que, l'approche trajectographique, bien que discriminante, permettrait d'estimer les distances de propagation les plus défavorables de cet éboulement.

D'un point de vue cinématique, le comportement des blocs de petite taille (*Figure 5.27A*, *Figure 5.28A* et *Figure 5.29A*) est similaire dans les deux approches, sauf pour le rebond au premier impact qui est fortement perturbé dans l'approche éboulement en masse sans pour autant avoir d'incidence sur la distance de propagation finale des blocs (*Figure 5.27A*). En effet, nous avons observé dans l'approche éboulement en masse que les petits blocs, du fait de leur positionnement dans le volume initial et de par la géométrie de la zone d'impact, se détachent rapidement de la masse et se comportent individuellement dès le début de la simulation. En ce qui concerne les blocs de volume important, nous observons dans la configuration éboulement en masse que, comparativement à une configuration trajectographique, ceux-ci s'arrêtent plus rapidement (*Figure 5.27B*) et acquièrent au premier impact une vitesse de translation plus importante (*Figure 5.28B*) et des vitesses de rotation plus faibles (*Figure 5.29B*).

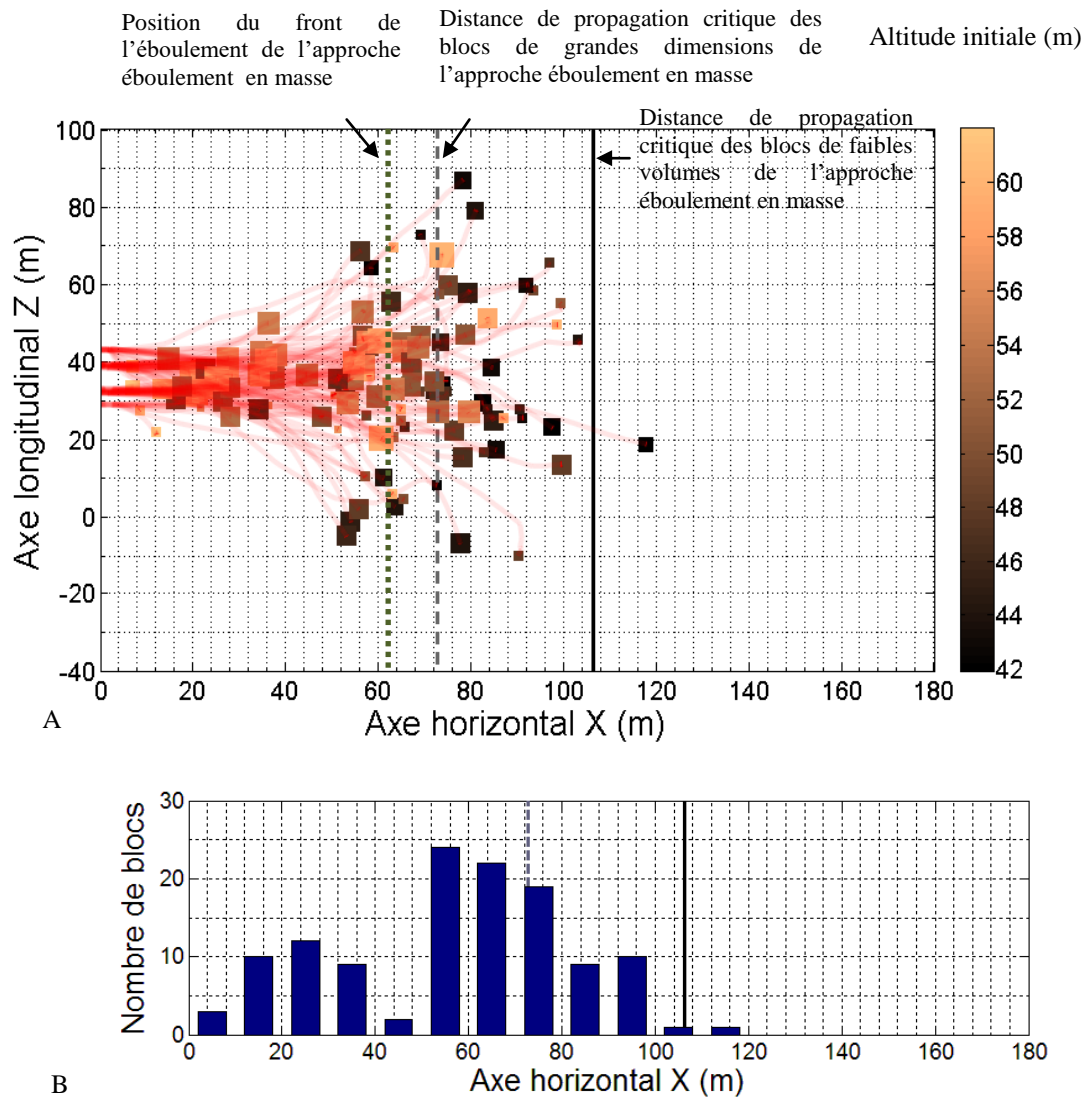


Figure 5.26. Propagation des blocs dans l'approche trajectographique (bloc isolé). La couleur fait référence à la position initiale des blocs sur la falaise avant la chute. Les traits pointillés et continus font référence respectivement aux positions du front du dépôt et des blocs isolés de grandes dimensions et de petites tailles obtenues par l'approche éboulement en masse

Lors de la propagation, les vitesses de rotation des blocs dans l'approche bloc isolé sont plus importantes que les vitesses de rotation des blocs de l'éboulement en masse qui interagissent les uns avec les autres (*Figure 5.29*) et qui sont freinés en rotation. Cela expliquerait pourquoi, dans l'approche trajectographique, les blocs les plus grands, libres de tout mouvement, se déplacent sur des distances très importantes.

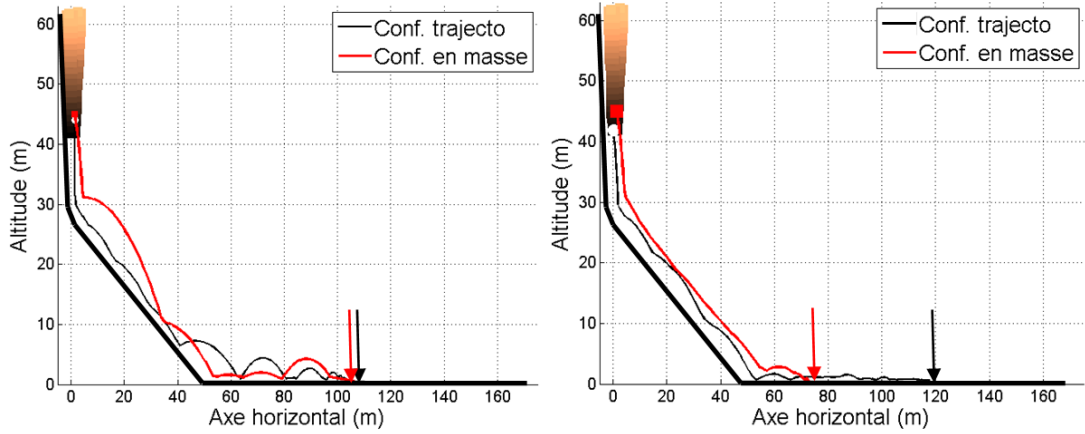


Figure 5.27. Détail sur la propagation du centre de masse des blocs isolés les plus éloignés de petites tailles (A) et de dimensions importantes (B) pour l'approche éboulement en masse (rouge) et pour l'approche trajectographique (bloc isolé) (noir)

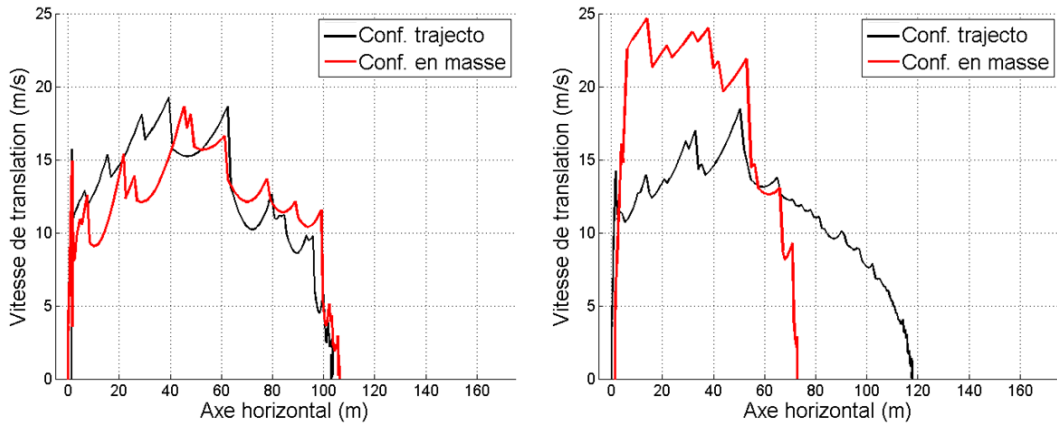


Figure 5.28. Variation de la vitesse de translation du centre de masse des blocs isolés de petites tailles (A) et de dimensions importantes (B) pour l'approche éboulement en masse (rouge) et l'approche trajectographique (bloc isolé) (noir)

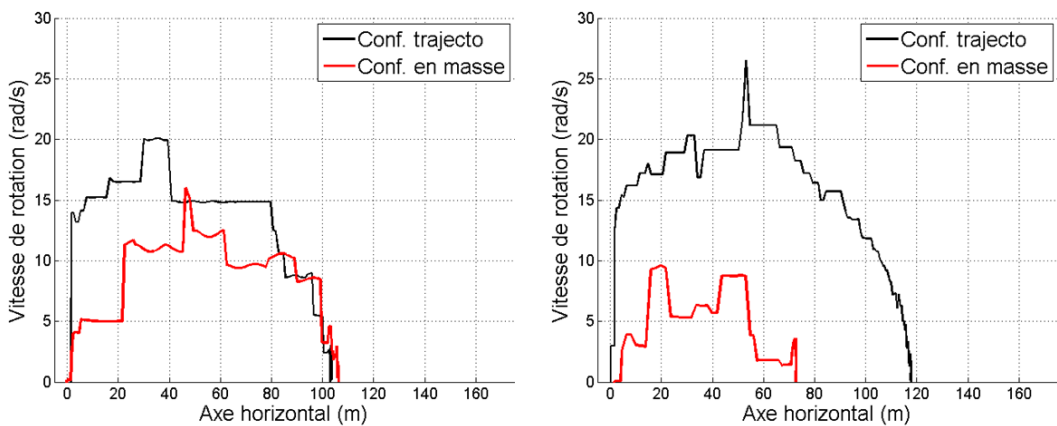


Figure 5.29. Variation de la vitesse de rotation moyenne en fonction de la position du centre de masse des blocs isolés de petites tailles (A) et de grandes dimensions (B) pour l'approche éboulement en masse (rouge) et l'approche trajectographique (bloc isolé) (noir)

5.1.7. MODELISATION DE L'ÉBOULEMENT DE MILLAU : APPROCHE PRENANT EN CONSIDÉRATION UNE TOPOGRAPHIE ET DES GEOMETRIES DE BLOCS REALISTES ISSUES DES DONNEES DE TERRAIN

5.1.7.1. Introduction

La simplicité géométrique du phénomène naturel observé à Millau, nous a permis de faire de grandes simplifications sur la géométrie du versant qui a pu être assimilé à un plan incliné dans nos campagnes numériques précédentes. Cependant, nous sommes conscients que ceci n'est pas toujours possible pour d'autres sites et que le modèle doit également être en mesure d'intégrer des surfaces tridimensionnelles réalistes pour être réellement opérationnel. En effet, et nous avons pu déjà l'observer lors de nos simulations précédentes, la justesse de notre modèle numérique discret et de l'approche déterministe utilisée dépendent en grande partie de la capacité de l'utilisateur à rendre compte des géométries réalistes difficilement reproductibles par l'utilisation d'un coefficient *ad hoc*.

De ce fait, nous avons amélioré pendant la thèse le code de calcul pour le rendre également opérationnel dans des conditions géométriquement complexes. Les développements ont consisté à rendre possible l'utilisation des modèles tridimensionnels de terrains (MNT) issus des méthodes photogrammétriques, par exemple, pour en déduire, de la façon la plus réaliste possible, le volume de départ, la taille et la forme des blocs mis en jeu dans le phénomène de propagation. Nous avons présenté dans le chapitre dédié au code de calcul comment notre modèle a été adapté, d'un point de vue numérique, pour importer des géométries tridimensionnelles maillées (développement de l'extension *stl2DEMBOX*) et découper des solides suivant un (ou plusieurs) plans de rupture prédéfinis (extension *carver*). Nous présenterons dans cette section la méthodologie proposée, d'un point de vue pratique, pour modéliser la complexité géométrique d'un phénomène d'éboulement en masse en utilisant ces outils.

Plusieurs études paramétriques ont été réalisées en utilisant une configuration tridimensionnelle complexe de l'éboulement de Millau et portant sur des caractéristiques de simulation comme:

- La discrétisation temporelle (pas de temps),
- La résolution du maillage de la topographie de terrain,
- Les conditions de contact entre les blocs à l'état initial,

Mais aussi phénoménologiques comme :

- La lithologie,
- La forme des blocs,
- La position des blocs dans le volume de départ.

La méthodologie et les études présentées dans ce chapitre doivent enfin pouvoir servir de base et de référence aux futures applications d'éboulements rocheux géométriquement complexes.

5.1.7.2. Méthodologie

5.1.7.2.1. Traitement de la géométrie du versant de propagation

Notre modèle numérique discret est capable d'importer des surfaces mailles sous format binaire (.*stl*). D'un point de vue pratique, la question la plus importante porte sur la résolution du maillage à utiliser dans la simulation. La résolution d'un modèle tridimensionnel dépend

strictement de la campagne de reconnaissance réalisée : par exemple le Lidar, la photogrammétrie, etc. Pour éviter de sortir du cadre de la thèse, nous nous limiterons à présenter dans ce mémoire les applications réalisées en ignorant la campagne de reconstruction tridimensionnelle qui a également été engagée. Pour plus d'informations sur les techniques de reconstruction tridimensionnelle nous invitons le lecteur à consulter le rapport de synthèse, portant sur l'étude des discontinuités en falaise, rédigé en collaboration avec Viviana Bonilla Sierra et remis à la société IMSRN (Bonilla-Sierra, 2013).

La campagne de reconstruction photogrammétrique a été menée en utilisant des engins aériens non pilotés (drones) développés par la société IMSRN. Là encore, pour plus d'informations sur la méthode, nous recommandons au lecteur de se diriger vers des documents appliqués sur ce sujet (Mouget and Lucet, 2014; Barry and Coakley, 2013). Une fois la campagne de prise d'images finalisée et le post-traitement d'images réalisé, nous avons accès à un modèle tridimensionnel sous la forme d'un nuage de points dont la résolution maximale était de 10 cm pour cette étude (Figure 5.30). *DEMbox* a été adapté pour importer des mailles triangulaires qui décrivent une surface tridimensionnelle. Le nuage de points a été post-traité et converti en mailles triangulaires en utilisant une triangulation de type Delaunay (Lee and Schachter, 1980) (Figure 5.30C) à l'aide du logiciel OpenSource MeshLab (Cignoni et al., 2008).

Dans *DEMbox*, chaque triangle qui compose la surface maillée (Figure 5.30C) est modélisé comme un corps de type sphéro-polyèdre. Cela veut dire que, plus la résolution de surface est fine, plus les triangles sont nombreux et plus le nombre de corps et les temps de calcul sont importants. Il convient donc de choisir une résolution spatiale adéquate, tant d'un point de vue phénoménologique que numérique. L'expérience des modèles trajectographiques capables d'importer des topographies tridimensionnelles (ex. RockyFor3D), laisse à penser qu'une résolution spatiale de 2 m paraît suffisante pour rendre compte du phénomène de propagation sans une altération significative de la propagation par rapport à un modèle avec une résolution plus basse. Nous présentons dans la section 5.1.7.6 une étude de l'influence de cette caractéristique dans la propagation d'éboulements rocheux.

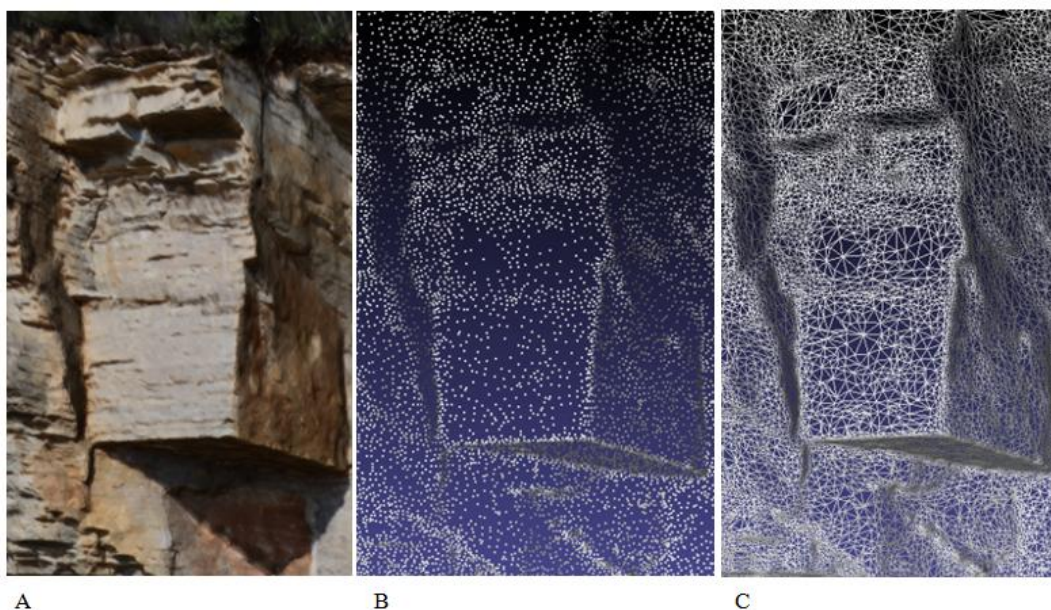


Figure 5.30. A. Photographie d'une partie de falaise. B. Reconstruction de la falaise en nuage de points. C. Maillage par triangulation de Delaunay

5.1.7.2.2. Traitement du volume de départ et de la géométrie des blocs

En termes de propagation, la reconstruction d'une falaise rocheuse passe par des étapes différentes suivant que la campagne d'observations se réalise avant ou après le déclenchement d'un évènement gravitaire. En effet, si la campagne de reconstruction de la falaise se fait après un éboulement, la procédure consistera à la mise en place d'un volume « manquant » sur le vide laissé lors de la chute. Au contraire, si le relevé numérique de terrain est fait avant un éboulement, c'est-à-dire lorsque la zone instable est encore sur place, la démarche s'avère un peu plus complexe parce que, dans cette situation, elle consistera à évaluer le volume potentiellement instable, à l'enlever du modèle numérique de terrain et d'en déduire la géométrie qu'aurait la falaise après l'éboulement. Cette démarche sera présentée dans la section 5.2 de ce chapitre où nous chercherons à prédire la cinématique d'une écaille rocheuse encore en place sur le site de Perrières.

5.1.7.2.3. Relevé numérique de terrain après éboulement : cas de l'éboulement de « Millau »

Un relevé numérique de terrain a été effectué après l'éboulement de Millau avec une technique photogrammétrique telle que nous l'avons présentée au début de ce chapitre. Comme nous l'avons indiqué précédemment, il n'existe très peu d'informations sur la falaise de Millau avant éboulement. Nos premières estimations du volume de départ ont été réalisées par observation de la falaise où nous avons identifié la zone de départ grâce aux contrastes de couleur des interfaces de roche ancienne/fraiche facilement identifiables à l'œil nu. Cependant, et vis-à-vis de la géométrie particulière de la falaise après éboulement, avec notamment la présence d'une partie de roche en forme de dièdre encore observable après éboulement (*Figure 5.31*), nos premières estimations ont été faites en considérant une forme de parallélépipède rectangle dont les dimensions à l'aval et à l'amont ont été légèrement élargies.

Après de nombreuses visites de terrain et après avoir reconnu les falaises adjacentes à la région effondrée près du site Millau, nous constatons que si les directions des talus rocheux peuvent varier très rapidement, le pendage et la géométrie des talus sont localement très similaires (au voisinage de la zone de départ) (*Figure 5.31*).

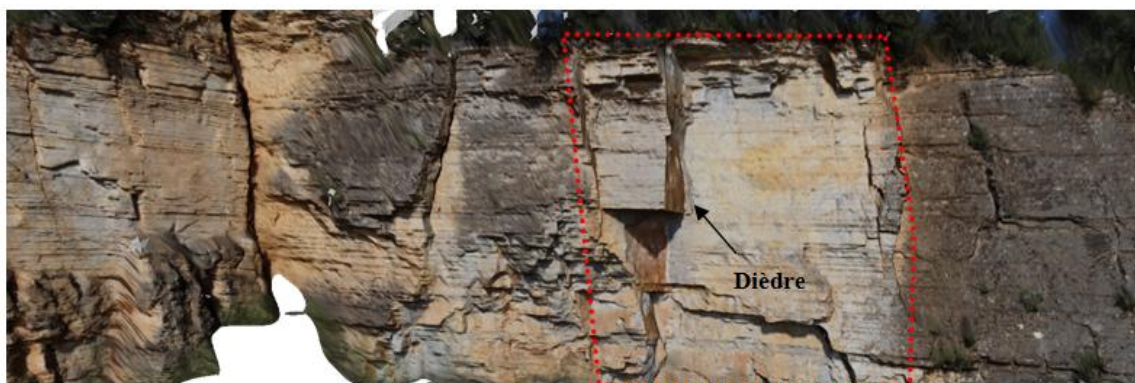


Figure 5.31. Vues adjacentes à la zone de départ

Suite à ces observations, nous avons décidé de reproduire le pan de falaise éboulée par translation des falaises adjacentes et ce pour remplacer au mieux le vide existant. Ces étapes sont résumées sur les *Figures 5.32* et *5.33* respectivement.

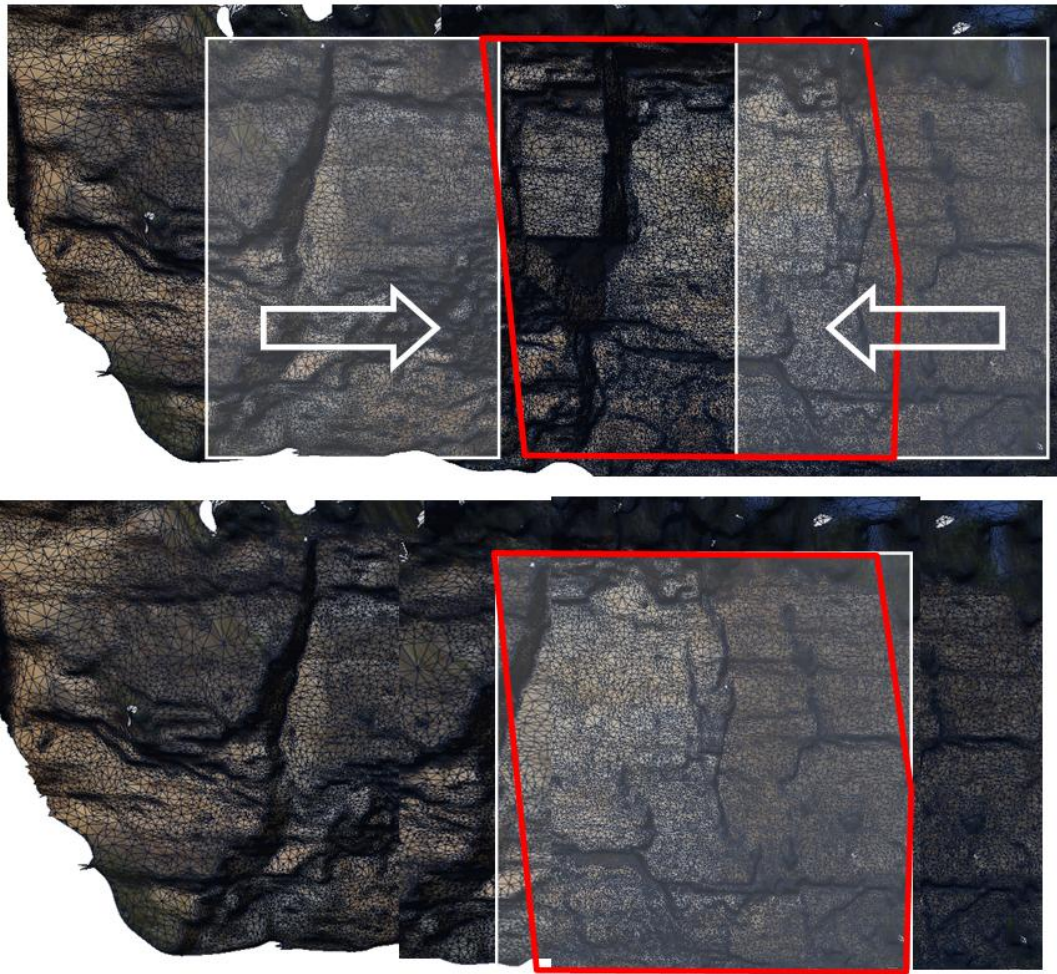


Figure 5.32. Etape 1 : les falaises adjacentes (carrés blancs) sont translâtées sur la zone de falaise manquante (carré rouge)

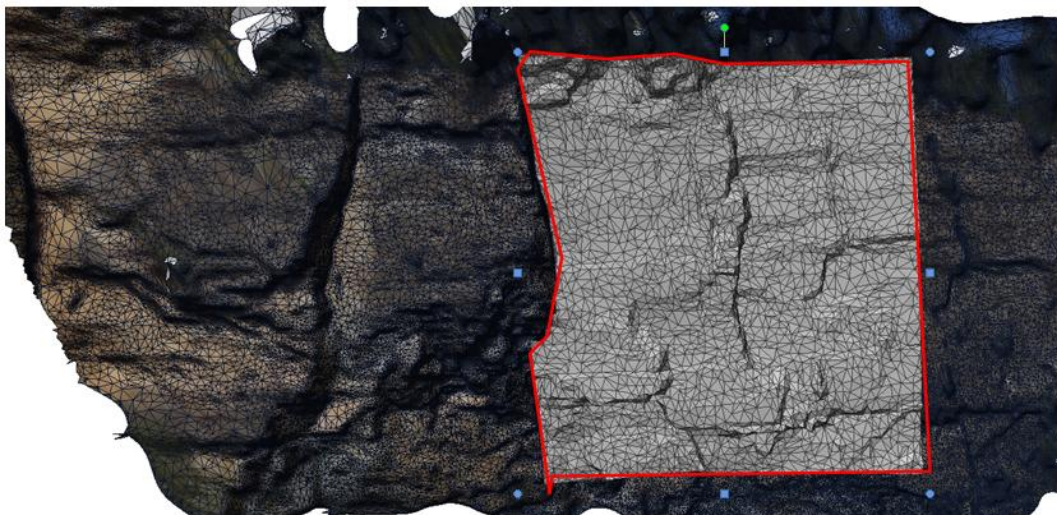


Figure 5.33. Etape 2 : le volume de départ est obtenu par intersection entre les faces aval (falaise translâtée) et amont (falaise après éboulément)

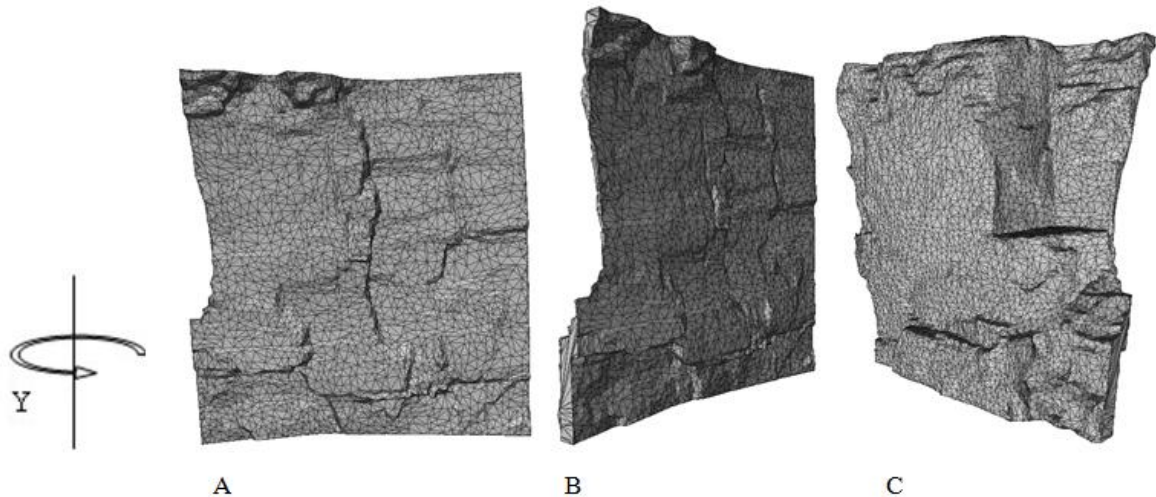


Figure 5.34. Visualisation du volume de départ reconstruit. A. Vue de face de l'échelle rocheuse. B. Rotation de 45° par rapport à l'axe vertical (Y). C. Rotation de 135° par rapport à l'axe vertical (Y)

La définition des intersections entre solides tridimensionnels réalisées dans ces approches nécessitent des opérations complexes de type « *Boolean* », qui ont été réalisées en utilisant l'outil *OpenSource* Blender où des sous-programmes spécifiques ont été également introduits (Blender documentation, 2009). Une notice détaillant ces procédures a été fournie à la société IMSRN.

La Figure 5.34 présente en détail le volume intersecté sous différents angles. On remarquera cette figure que le dièdre encore observable sur la falaise rocheuse est bien extrait du volume.

Comme résultat de cette démarche, nous estimons à 1143 m³ le volume total de l'éboulement de Millau, ce qui s'approche de nos estimations initiales mais qui prend mieux en compte les irrégularités géométriques de la falaise tant à l'aval qu'à l'amont.

5.1.7.2.4. Découpage du volume de l'échelle rocheuse en sous blocs

Une fois le volume de départ défini, l'étape suivante consiste à découper le volume en un ensemble de blocs. Notre expérience sur le terrain naturel nous laisse penser que la majorité du volume de départ se fracture dans les premières secondes de l'évènement gravitaire. Quelques blocs peuvent se fracturer également en phase de propagation, suite à un choc avec un obstacle (arbres ou rocher). De ce fait, et vis-à-vis des sites analysés dans la thèse, notre approche consiste à découper le volume de départ dès le début de la simulation en négligeant l'énergie de fracturation des blocs à l'initiation du phénomène et en phase de propagation.

Comme il a été précisé auparavant, la démarche la plus naturelle consiste à découper les blocs suivant les familles de discontinuités identifiées sur la falaise rocheuse. Cette procédure permet de recréer des blocs extrêmement réalistes avec des géométries parfois très irrégulières. Des études similaires très récentes peuvent être trouvées dans la littérature, notamment dans l'étude de la propagation des blocs isolés, pour lesquelles la taille et les volumes caractéristiques mis en jeu sont estimés statistiquement par intersection des familles de discontinuités (Thoeni, 2013).

La méthode de découpage est explicitée en détails dans le chapitre « *Modèle numérique* ». Pour cette nouvelle campagne numérique, nous avons modélisé un total de 91 blocs qui

représentent un volume de 1143 m^3 , tel qu'il a été défini par la reconstruction tridimensionnelle. Les blocs ont été découpés en fonction de la taille et la géométrie des blocs du dépôt naturel et des familles de discontinuités observées sur la falaise. La blocométrie et les informations relatives à l'élanement des blocs (rapport des longueurs y/z et x/z d'une boîte rectangulaire capable d'entourer chaque bloc) sont présentées sur les *Figures 5.35A* et *5.35B* respectivement.

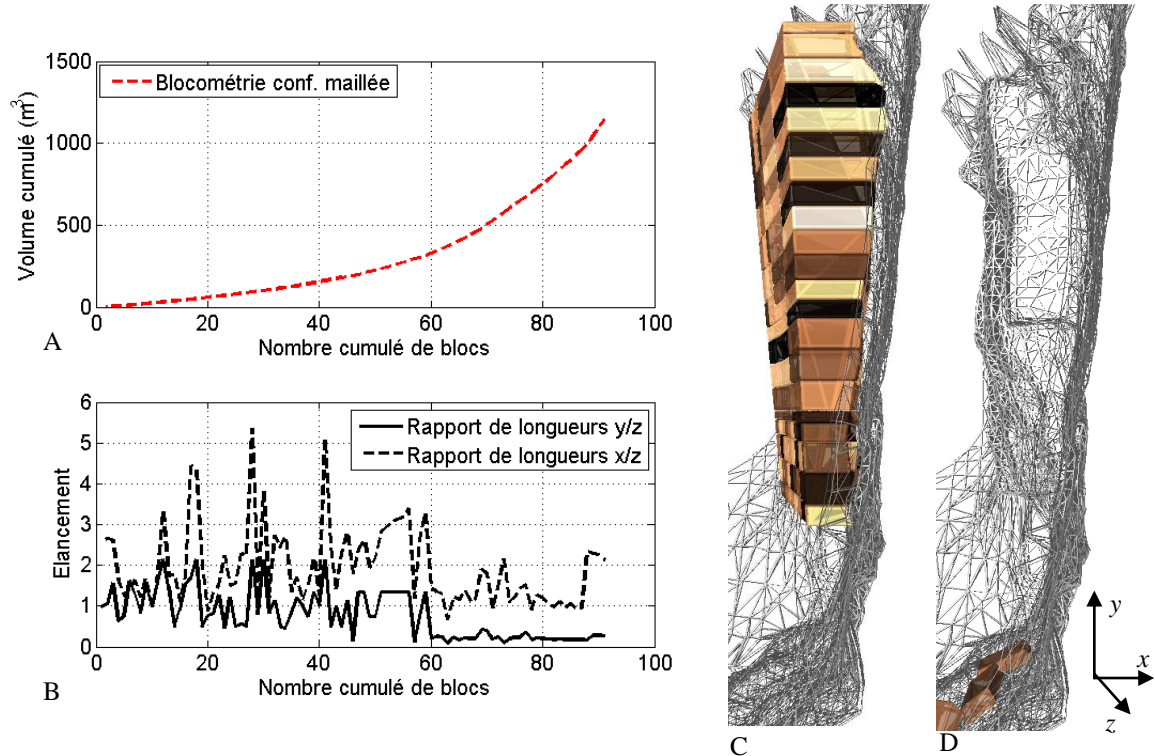


Figure 5.35. A. Blocométrie en fonction du nombre cumulé de blocs. B. Elancement de chacun des blocs du plus petit au plus grand. C. Volume de l'écaïlle rocheuse avant effondrement. D. Géométrie de la falaise après éboulement avec dièdre

Pour cette nouvelle configuration géométrique, et par opposition aux simulations précédentes, nous avons décidé de mieux représenter les pourcentages de petits blocs et de gros blocs. En effet, nous avons voulu garder une proportion de $1/3$ des petits blocs par rapport au volume total soit un volume d'environ 300 m^3 - *Figure 5.35A*), ce qui est plus cohérent avec la blocométrie observée sur site réel. Les blocs les plus petits ont été initialement placés dans les rangées basses du volume de départ et sur la zone proche du dièdre encore en place sur la falaise - *Figure 5.35C* et *5.35D* respectivement). Trois raisons ont motivé ce choix :

- Les photographies de la falaise qui montrent un massif beaucoup plus altéré en partie basse de la falaise.
- L'épaisseur de roche qui recouvrirait le dièdre encore en place n'attendrait que 0.6 m , une forte probabilité existe pourtant pour que cette masse de roche se soit déstructurée en plus petits morceaux.
- Enfin, nos résultats sur configuration simplifiée nous ont montré que la position initiale des blocs de petite taille, dont la distance de propagation était importante, se trouve dans les rangées les plus basses. Il est alors raisonnable de supposer que cette configuration soit l'une des plus critiques vis-à-vis de la propagation de ces blocs.

La configuration retenue, restant arbitraire, nous proposons par la suite d'étudier l'influence du découpage et de la position des petits blocs sur d'autres simulations numériques.

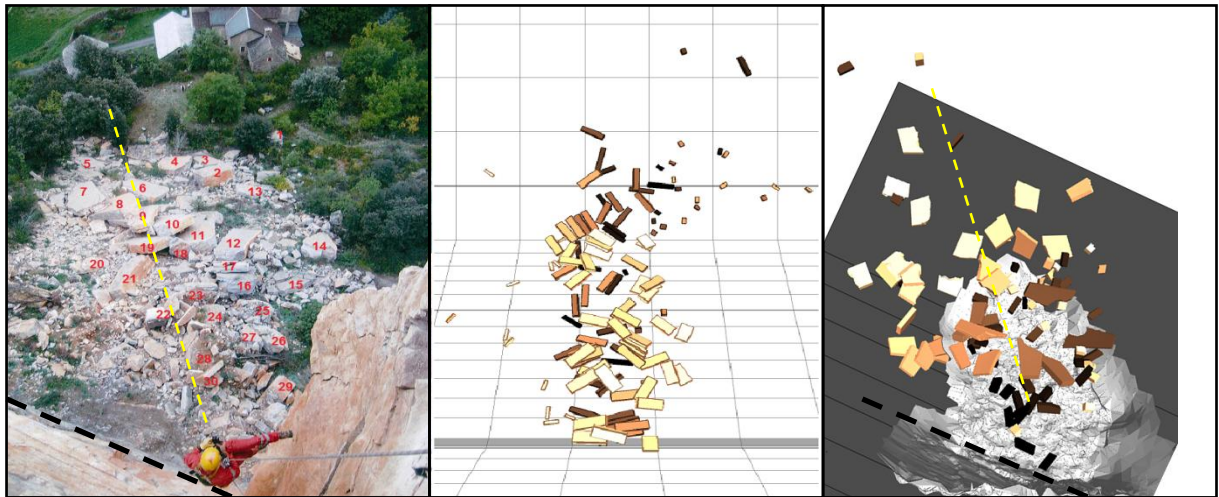
5.1.7.3. Simulation de la propagation en utilisant une configuration tridimensionnelle maillée et comparaison avec la configuration simplifiée

Nous présentons dans cette section les résultats sur la propagation des blocs rocheux obtenus sur une configuration tridimensionnelle complexe. Pour information, la résolution du maillage est de 2 m et le volume de départ est celui présenté sur la *Figure 5.35*. Les paramètres de contact sont ceux du jeu de paramètres de référence donnés dans le *Tableau 5.2*.

La rugosité du versant de propagation résulte du degré de précision du modèle numérique de terrain et de la qualité du traitement numérique. Ainsi le premier modèle obtenu avec les données brutes contenait les blocs restés sur le versant après l'éboulement ce qui était problématique car, d'après nos premières simulations, la géométrie du versant a un rôle majeur dans le phénomène de propagation. C'est pourquoi nous avons décidé de réaliser une procédure de « nettoyage » ou lissage à l'aide de l'outil MeshLab (Cignoni et al., 2008). La procédure a consisté principalement à homogénéiser la surface du versant de propagation en utilisant les photos du site et en supprimant les irrégularités produites par les blocs encore sur place. Ceci n'est qu'une démarche grossière pour rendre compte de la vraie géométrie du support et une attention particulière doit être portée à cet aspect. De même, il ne nous a pas été possible de relever numériquement la totalité du versant, notamment les extrémités latérales qui sont fortement végétalisées. En effet, une des problématiques des méthodes photogrammétriques dans le relevé de terrain porte sur leur insuffisance à rendre compte de la géométrie d'un terrain en présence des fortes végétations. Vu le manque de données, et afin d'éviter que les blocs sortent du modèle, nous avons décidé de compléter latéralement le modèle numérique de terrain par des plans inclinés lisses (*Figure 5.36C*).

La *Figure 5.36* présente différentes vues de dessus du dépôt des blocs le long du versant de propagation : dépôts réels (A), dépôt numérique obtenu avec la configuration simplifiée présentée dans la section précédente (B) et dépôt obtenu avec la configuration tridimensionnelle maillée (C). Avant de rentrer précisément dans la description de ces résultats, nous remarquons que la configuration maillée tient compte de plusieurs caractéristiques géométriques, jusqu'ici négligées comme par exemple la direction de propagation de l'éboulement qui est en réalité légèrement déviée vers la gauche (18° environ), tel qu'il est présenté sur la *Figure 5.36C*.

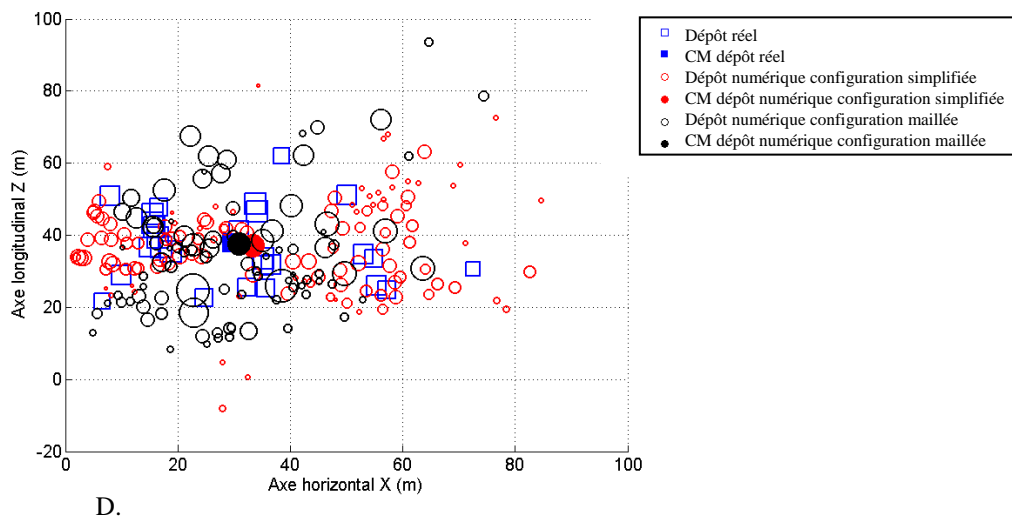
La *Figure 5.36D* montre une très bonne corrélation des dépôts expérimentaux et numériques pour la configuration tridimensionnelle maillée avec quelques blocs allant au-delà des limites observés sur le terrain naturel. Nous obtenons avec la configuration maillée un dépôt principal plus large par rapport aux simulations précédentes qui peut être expliqué en partie comme étant une conséquence de la rugosité de surface qui n'était précédemment pas modélisée. Lorsque l'on s'intéresse à la propagation du dépôt principal, on constate qu'il existe une très bonne analogie avec le dépôt réel (*Figure 5.36D*) avec notamment un front d'éboulement quasiment identique par rapport aux mesures de terrain.



A.

B.

C.



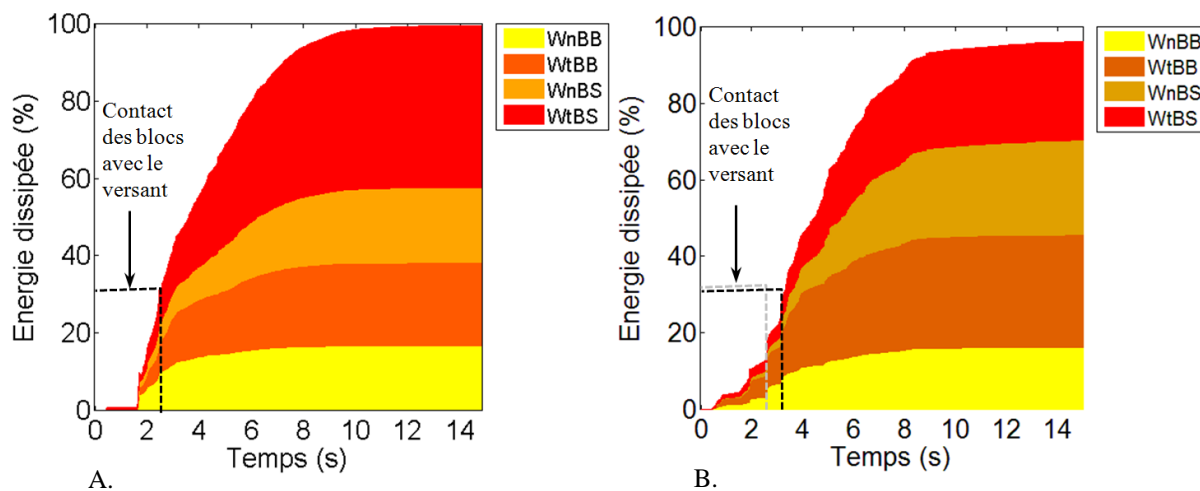
D.

Figure 5.36. Vues de dessus des dépôts : réel (A), numérique sous la configuration simplifiée (B) et numérique sous la configuration tridimensionnelle maillée (C). Les traits noirs et jaunes font référence à l'orientation de la falaise et de la direction de propagation des blocs. D. Comparaison des différents dépôts (numérique et expérimental) dans la direction de la propagation

Nous remarquons également que, à la différence des configurations précédentes, les blocs les plus petits restent sur la pente (du fait de la rugosité de surface) et ce sont les blocs de volume intermédiaire qui arrivent au front de l'éboulement (*Figure 5.36C* – les blocs les plus clairs sont positionnés dans les rangés supérieures de l'empilement et les plus foncés dans les rangés inférieures). Les blocs les plus gros restent également sur le début du plan de propagation ce qui est bien en accord avec nos observations sur site réel. Enfin, et compte tenu de ces résultats, il semblerait que la position des petits et des gros blocs dans l'empilement initial aurait une influence sur la façon dont les blocs se déposent sur le support. Ceci fera l'objet d'une étude spécifique dans les sections suivantes.

Concernant les modes de dissipation d'énergie on constate qu'un versant maillé qui est en général bien plus rugueux qu'un plan lisse augmente l'interaction entre les blocs et de ce fait l'énergie totale dissipée au sein de la masse granulaire, notamment par frottement. En effet, l'énergie totale dissipée par frottement Bloc-Bloc, d'environ 20% dans la configuration simplifiée, augmente à 30% dans une configuration maillée (*Figure 5.37*). De manière générale, nous

observons que la mise en place d'un support de propagation rugueux pénalise la quantité d'énergie dissipée par frottement basal et augmente le frottement inter granulaire principalement. On notera que les 4% de l'énergie manquante sur la *Figure 5.37B* correspondent à l'énergie cinétique de quelques blocs qui ne s'étaient pas complètement arrêtés à la fin de la simulation dans la configuration maillée.



Energie totale dissipée (% de l'énergie totale)					
Configuration	W_{nBB}	W_{tBB}	W_{nBS}	W_{tBS}	Total
Configuration maillée	16,2	29,5	24,6	25,9	96,2
Configuration simplifiée	16,0	20,7	20,1	43,1	99,9
Energie dissipée avant le premier contact avec le versant (% de l'énergie totale)					
Configuration maillée	7,8	13,4	3,6	8,9	33,7
Configuration simplifiée	9,7	5,6	8,8	10,6	34,7

C.

Figure 5.37. Pourcentage de l'énergie totale dissipée en fonction du temps pour la configuration simplifiée (A) et maillée (B). C. Tableau synthétique des énergies dissipées pendant la durée de l'événement et au premier impact des blocs avec le versant

Par ailleurs, le fait de considérer une falaise maillée irrégulière augmente dès le début de la simulation les interactions entre toutes les particules ce qui retarde également le contact des blocs avec le versant. Ce décalage peut être observé sur la *Figure 5.37B* où le premier impact a lieu, pour la configuration maillée, 0.5 seconde plus tard par rapport à la configuration simplifiée. De façon un peu surprenante, nous observons que la quantité d'énergie dissipée au premier contact des blocs avec le versant incliné est quasiment identique entre la configuration maillée et simplifiée (environ 33% de l'énergie totale). De cette façon, et tenant également compte de nos premières analyses sur l'effet de la géométrie de cette région dans la propagation des blocs, présentées au début de ce chapitre, nous pouvons dire que la quantité d'énergie dissipée au premier impact est plus sensible à l'inclinaison du replat qu'à sa rugosité.

Enfin, et pour toutes les configurations testées, l'énergie est principalement dissipée par des phénomènes de frottement Bloc-Bloc ou Bloc-support (entre 50% et 60% de l'énergie totale). La mise en place de surfaces maillées (rugueuses) a une influence plus importante dans les modes d'énergies dissipées par frottement que par chocs.

5.1.7.4. Utilisation d'un critère spécifique d'analyse des dépôts d'éboulement réel

Jusqu'ici, trois informations caractéristiques ont été utilisées pour analyser la propagation des éboulements rocheux : la position du centre de masse, la position des blocs éloignés et l'étalement du dépôt principal (défini comme celui contenant au moins 95% du total des blocs). Nonobstant, les études paramétriques précédentes et les simulations sur versants géométriquement très complexes, nous ont montré qu'il existait une dispersion latérale importante qui n'était pas intégré jusqu'à présent dans notre démarche d'analyse. Pour cette raison, nous avons décidé de compléter l'analyse géométrique du dépôt par un paramètre de « dispersion » (variance statistique). Ce paramètre, noté D , décrit la dispersion, dans toutes les directions, de tous les blocs par rapport au centre de masse du dépôt global C . Ces deux grandeurs (C et D) sont définies mathématiquement par les équations [45] et [46] :

$$\vec{C} = \frac{\sum m_i \times \vec{C}_i}{M} \quad [38]$$

$$\vec{D} = \frac{\sum m_i \times (\vec{C}_i - \vec{C})^2}{M} \quad [39]$$

Avec :

- m_i : masse du bloc i ,
- M : masse totale de tous les blocs,
- \vec{C}_i : centre de masse du bloc i ,
- \vec{C} : centre de masse du dépôt.

Ces critères, de dispersion et de propagation du centre de masse, semblent de par leur définition plus adaptés aux problèmes d'éboulements rocheux dont le nombre de blocs limité rend difficile la définition d'un dépôt principal (*Figure 5.38*).

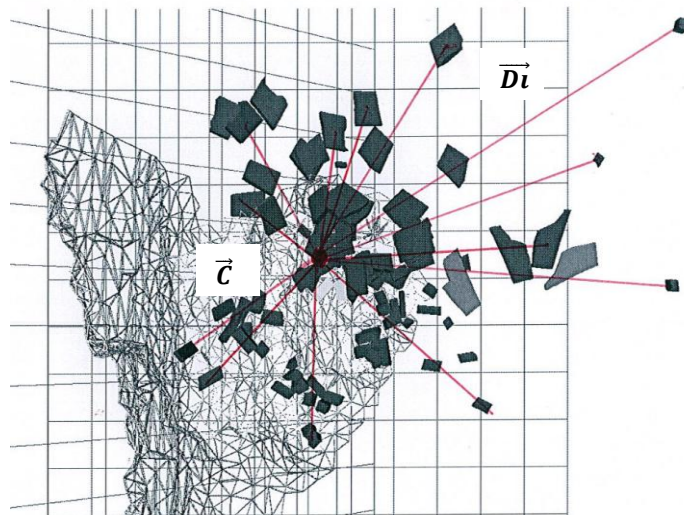


Figure 5.38. Vue de dessous d'un dépôt numérique d'éboulement. Définition de la dispersion des blocs (D) par rapport au centre de masse de l'éboulement (C)

5.1.7.5. Etude sur l'influence du pas de temps dans DEMbox

Le pas de temps est une caractéristique intrinsèque des modèles discrets. La pertinence d'un modèle numérique dans un contexte économique et industriel ne dépend pas seulement de sa capacité à résoudre un problème physique mais également à ce que le modèle soit capable de fournir une réponse dans une durée de temps abordable. Bien que nous ayons focalisé durant la thèse sur des événements intermédiaires, c'est-à-dire, comportant un nombre de blocs en mouvement limité, nous sommes confrontés à des calculs parfois très longs (plusieurs jours sur un ordinateur classique) du fait de la prise en compte des maillages tridimensionnels complexes où chaque triangle du maillage numérique est modélisé comme un corps rigide dans *DEMbox* (voir chapitre modèle numérique).

La validité d'un résultat dans un modèle discret dépend en grande partie du schéma d'intégration utilisé et de la valeur du pas de temps. Cependant définir un pas de temps très faible dans un modèle discret signifie augmenter la durée de la simulation ce qui reste difficilement acceptable dans un bureau d'études.

Il est très important de signaler que la durée d'une simulation ne dépend pas seulement du pas de temps. En effet, la procédure de reconnaissance de voisins (ou des contacts) peut devenir bien plus coûteuse. Nous avons introduit dans le modèle au cours de la thèse une démarche qui permet une reconnaissance plus rapide des voisins par rapport à la méthode existante (voir chapitre modèle numérique) de sorte que nos calculs sont aujourd'hui beaucoup plus rapides que ceux réalisés au début de la thèse (jusqu'à 10 fois plus rapides). Pour vérifier la pertinence des développements numériques proposés, nous avons décidé de réaliser deux simulations numériques en utilisant deux pas de temps différents: $1e^{-5}$ s – valeur correspondant au pas de temps critique d'après les équations de la dynamique (configuration 1) et $1e^{-6}$ s (configuration 2) qui conduit logiquement à des durées de calculs plus importantes. Ces deux valeurs sont théoriquement suffisamment petites pour rendre compte du phénomène de propagation. Concernant les paramètres de contact, nous avons utilisé les paramètres des simulations précédentes définies au *Tableau 5.2*. La position des blocs dans le dépôt principal est présentée sur la *Figure 5.39*.

Sur cette figure, nous constatons que :

- La distance de propagation des blocs critiques (blocs ayant parcouru les distances le plus importantes) est la même pour les deux configurations (trait pointillé rouge sur la *Figure 5.39*),
- La distribution des petits et des gros blocs dans le dépôt est très semblable pour les deux configurations,
- La largeur des dépôts est quasiment identique pour les deux configurations,
- Les positions des blocs diffèrent d'un cas à l'autre. Dans la configuration 1, 5 blocs sont en dehors de l'enveloppe du dépôt principal alors que pour la configuration 2 (contour rouge sur la *Figure 5.39*) on recense par rapport à la limite du dépôt :
 - o Trois blocs de gros volume à une distance maximale de 8 m.
 - o Deux blocs de faible volume à une distance d'environ 15 m.

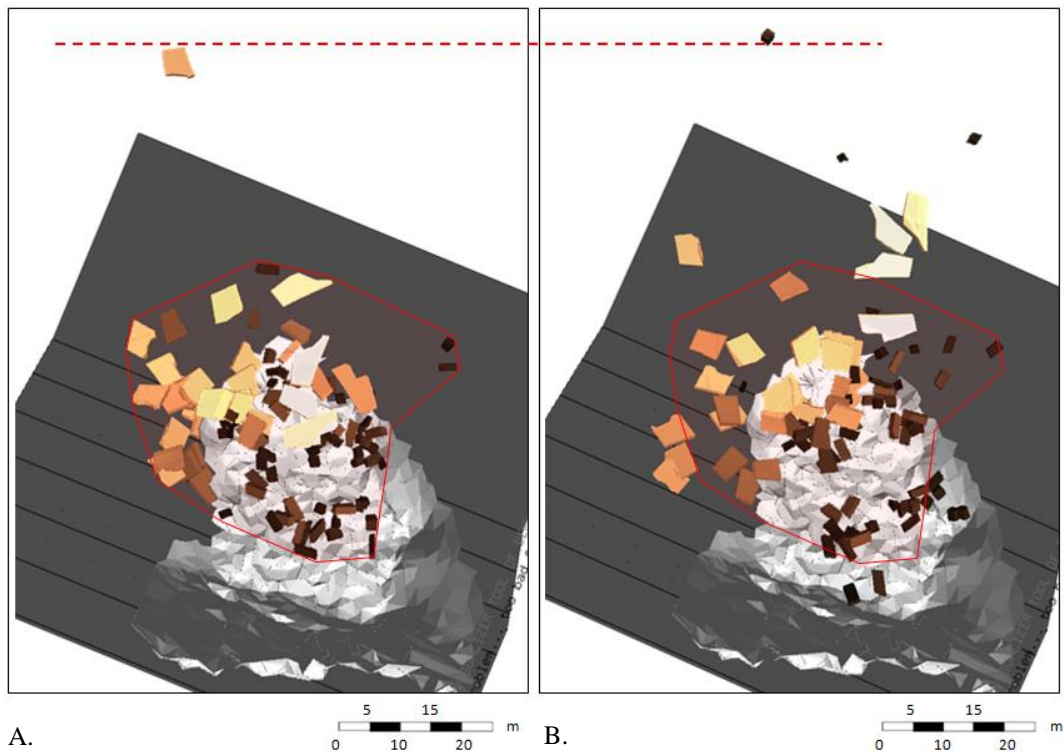


Figure 5.39. Vues de dessus des dépôts numériques (les blocs sont colorés en fonction de leur volume). A. Avec un pas de temps de $1e-5$. B. Avec un pas de temps de $1e-6$

Le pas de temps a une légère influence sur la quantité d'énergie dissipée à chaque rebond (précision liée à la discrétisation temporelle) qui engendre une certaine dispersion de la réponse du modèle numérique à un événement multi impacts. Néanmoins, la similitude des deux dépôts numériques et notamment la répartition des blocs dans le dépôt, nous permet de dire que globalement les mécanismes qui ont donné lieu à ces caractéristiques géométriques ne sont guère influencés par le pas de temps, au moins lorsque celui-ci est suffisamment petit. Un autre point intéressant concerne la distance de propagation du bloc critique qui est la même dans les deux configurations. La distance de propagation de ce bloc est par conséquent statistiquement peu dépendante du pas de temps. Il est donc raisonnable de travailler avec un pas de temps critique (dans cette configuration de $1e^{-5}$ s) sans affecter considérablement la dynamique de propagation des blocs rocheux et les phénomènes qui leurs sont liés.

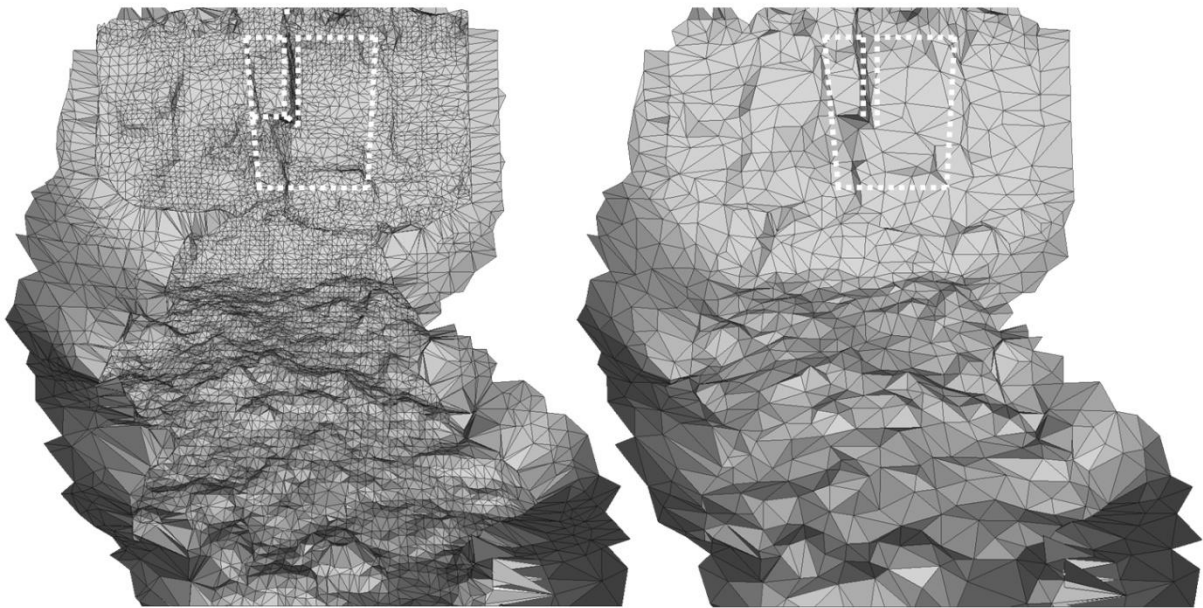
5.1.7.6. Influence de la résolution du maillage dans la propagation de blocs rocheux en masse

Choisir une bonne résolution d'un maillage dans une simulation numérique d'éboulements rocheux doit répondre à deux besoins précis :

- Être capable de représenter de façon correcte les aspects géométriques les plus importants du versant de propagation et des blocs,
- Trouver un bon compromis entre la durée de la simulation et la finesse de résolution du maillage (directement liée au nombre d'éléments).

Nous avons observé précédemment dans nos calculs que la propagation des blocs rocheux (notamment des blocs isolés) est très sensible à la géométrie du support de propagation. Par

exemple, réduire la résolution d'un maillage de 1 m à 5 m engendre des modifications subtiles de la géométrie d'une région qui peuvent altérer très facilement le phénomène de propagation. Pour des pentes raides, pour lesquelles la propagation des blocs est principalement gouvernée par une suite de rebonds, les résolutions grossières (pentes lisses) génèrent des rebonds de plus faibles amplitudes et des vitesses de translation plus petites comparativement à des résolutions élevées, présentant des rugosités de surface importantes, qui accentuent le phénomène de rebond. Pour les pentes moins raides, le mouvement est dominé majoritairement par le roulement et le glissement, et l'effet de la résolution du maillage est inverse : plus la résolution est grossière (pentes lisses), plus la distance de propagation est importante (Wang et al., 2012). Il paraîtrait donc que l'effet de la résolution d'un maillage soit très dépendant des inclinaisons de la pente et des formes des blocs.



A. B.
Figure 5.40. Modèles numériques de terrain pour différentes résolutions de la falaise de Millau. A. 0.50 m. B. 5 m

Pour étudier l'influence de la résolution du MNT, nous avons utilisé deux types de maillages pour la configuration tridimensionnelle de Millau : un maillage avec une résolution fine de 50 cm – configuration 1 (Figure 5.40A) et un maillage grossier de 5 m – configuration 2 (Figure 5.40B). Les paramètres de contact restent inchangés par rapport aux simulations (Tableau 5.2). Les positions des blocs dans le dépôt principal pour les deux maillages analysés sont présentées sur la Figure 5.41. Nous avons représenté la position du centre de masse (Figure 5.42A), la vitesse moyenne des blocs (Figure 5.42B) ainsi que la dispersion des blocs par rapport au centre de masse (Figure 5.42C).

Nous observons plusieurs phénomènes spécifiques :

- La distance de propagation du front de l'éboulement et des blocs les plus éloignés sont assez semblables pour les deux configurations testées mais avec des différences importantes sur la position des blocs dans le dépôt. Des différences importantes sont également observées sur l'étalement latéral du dépôt.
- Diminuer la résolution du maillage (configuration 2) augmente globalement les distances de propagation des blocs notamment ceux de faible volume. L'effet contraire est observé

sur des maillages plus denses où les blocs de volume faible s'arrêtent plus facilement, compte tenu de la rugosité de surface, alors que les blocs de volume important, qui sont moins souvent en contact avec le versant de propagation, parcourent des distances plus importantes comparativement à une configuration moins raffinée.

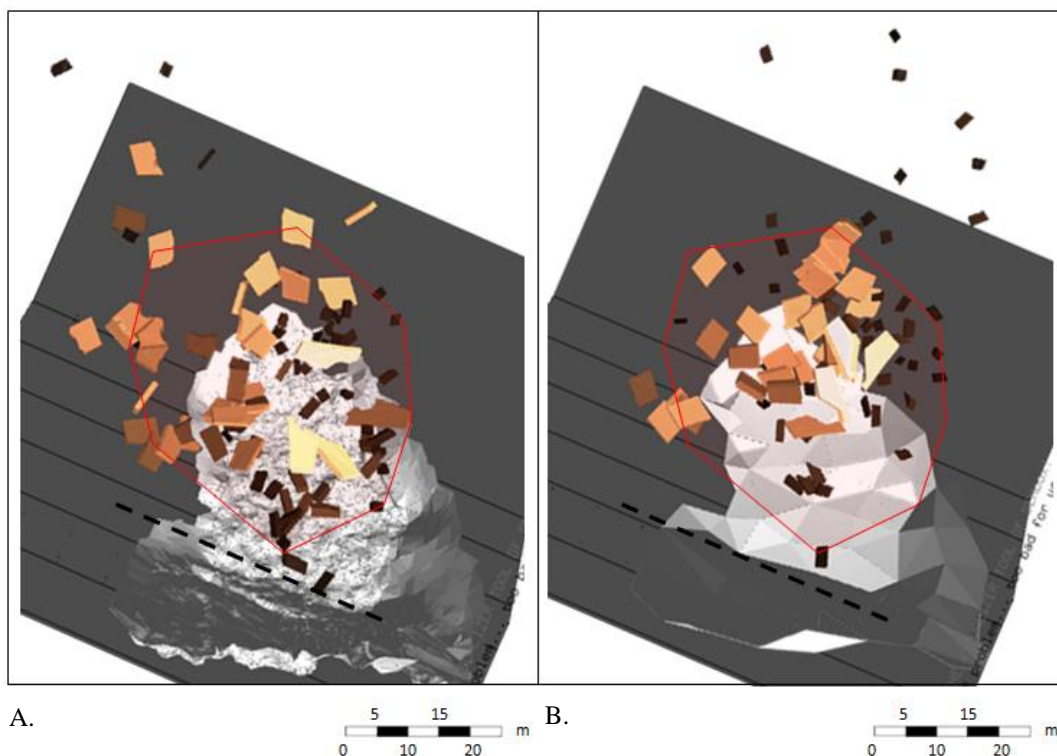


Figure 5.41. Vues de dessus des dépôts numériques. A. 0.50 m. B. 5 m

De plus, un maillage grossier contraint fortement la rugosité de la falaise, ce qui permet à la masse de tomber quasi verticalement (phénomène de chute libre) avant de se propager sur la pente (*Figure 5.42A*) avec une vitesse importante (*Figure 5.42B*). Au contraire, pour la configuration 1 définie par un maillage fin, les blocs interagissent entre eux et avec la falaise dès les premières secondes de la simulation numérique du fait de la rugosité de surface. Les vitesses développées dans ce cas sont alors moins importantes que celles de la configuration 2 définie pour le maillage grossier. Ceci peut expliquer également pourquoi les blocs se propagent sur des distances importantes avec un maillage grossier contrairement à un maillage fin car le gain en vitesse des blocs en chute libre, favorise le développement de rebonds plus importants et donc des distances de propagation plus importantes. Ceci se traduit également par des dispersions bien plus importantes des blocs par rapport au centre de masse (*Figure 5.42C*). Pour cette application spécifique, la résolution du maillage paraît donc avoir une influence plus importante sur la définition de la falaise que sur la définition du versant de propagation, ce dernier étant assez régulier (peu rugueux) en réalité.

Par ailleurs, ces résultats montrent également que plus la définition de maillage est proche de la topographie réelle, plus nos résultats sont en adéquation avec les données de terrain. Par la suite, nous avons réalisé la plupart de nos simulations en utilisant une résolution fine, ceci n'étant pas une contrainte pour nous vis-à-vis des temps de calcul qui restent abordables (de l'ordre de 40 h pour environ 15 000 corps répartis entre les blocs et les triangles du maillage).

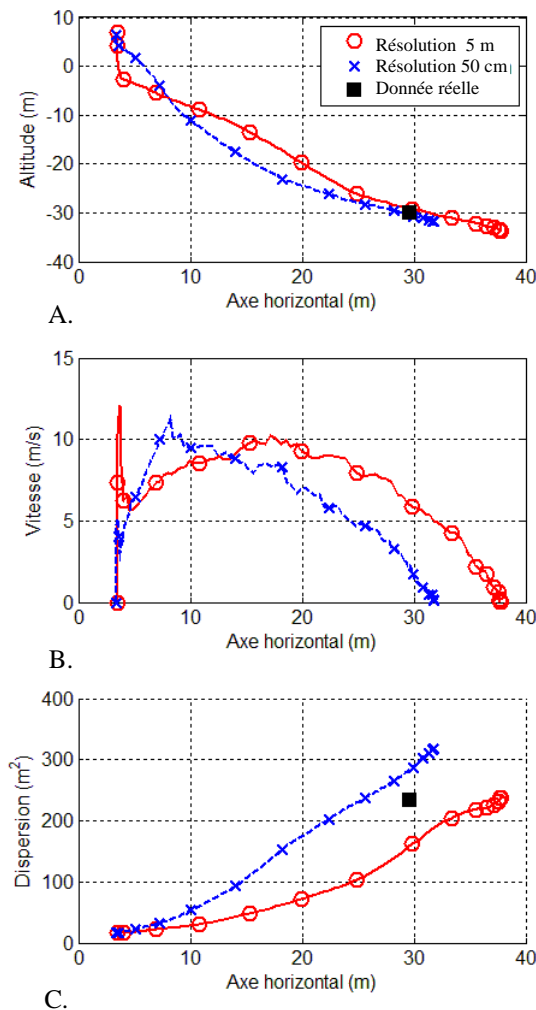


Figure 5.42. Etude sur l'influence de la résolution du maillage. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse

5.1.7.7. Influence de la géométrie et de la blocométrie du volume de départ dans la propagation de blocs rocheux.

5.1.7.7.1. Effet de la position initiale des blocs

Lorsque nous avons réalisé les visites de terrain, nous nous sommes aperçu que dans la plupart des cas il existe des blocs de toutes tailles. A Millau, si la majorité des blocs dans le dépôt principal sont des blocs de tailles importantes, nous avons également remarqué la présence de blocs plus petits dont la géométrie et la forme anguleuse laissent penser qu'ils ne se sont issus d'un mécanisme de fracturation pendant la phase de propagation mais qu'ils sont le résultat d'un phénomène de rupture précis de la falaise rocheuse. Lorsque l'on essaye de reconstituer l'état de la falaise avant éboulement en repositionnant tous les blocs répertoriés dans le dépôt, nous observons que les petits blocs sont les plus difficiles à localiser ou à positionner avec précision sur la falaise sur des critères pertinents. Par exemple, une façon simple consiste à se dire que la roche est plus altérée en haut qu'en bas de la falaise vue la proximité de la couche végétal dans cette zone. Au contraire, nous pouvons également dire que les blocs le plus petits sont le résultat des surfaces de

rupture observables sur les rangées basses du volume. Enfin, et d'un point de vue géologique, ces blocs peuvent être localisés statistiquement un peu partout.

Le but de cette étude est d'étudier le phénomène de propagation des blocs rocheux en positionnant les blocs dont le volume est inférieur à 5 m³ dans des endroits différents, tout en conservant la blocométrie initiale. Ces blocs ont été positionnés en bas (configuration A), au milieu (configuration B) et en haut du volume de départ (configuration C) (*Figure 5.43A, B et C* respectivement).

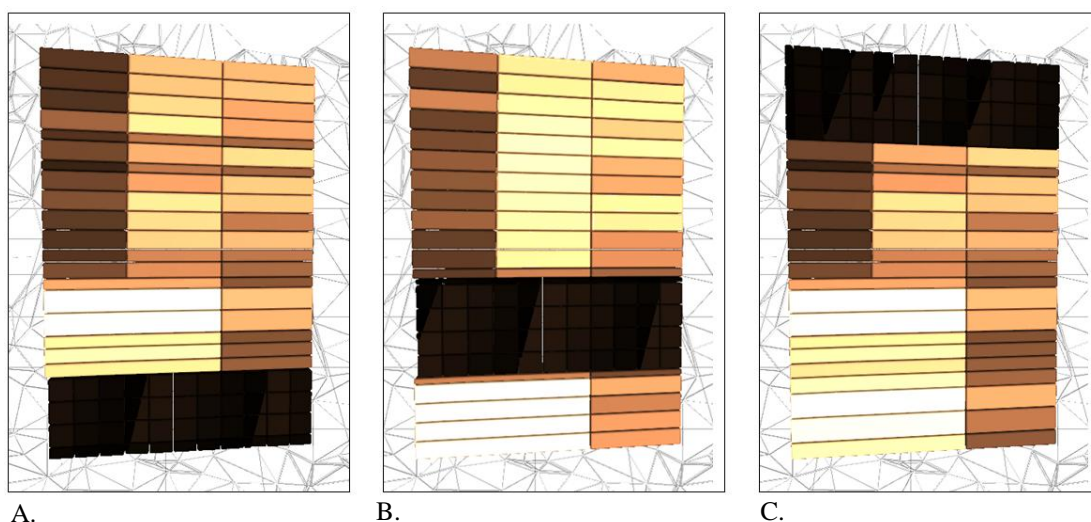


Figure 5.43. Position des petits blocs dans l'empilement initial : A. En bas. B. Au milieu. C. En haut. La couleur des blocs fait référence à leur volume dont les plus petits sont colorés en marron foncé et les plus grands en marron clair

Les paramètres de contact restent inchangés par rapport aux simulations précédentes (*Tableau 5.2*). Les dépôts obtenus pour chaque configuration sont présentés sur la *Figure 5.44* et les caractéristiques du centre de masse sur la *Figure 5.45*.

Sur la *Figure 5.44* nous observons que le positionnement des petits blocs dans l'assemblage initial a une influence importante sur la géométrie du dépôt et la position des blocs. Dans la configuration (C), les blocs les plus petits, situés dans les rangées les plus hautes, se séparent rapidement du volume principal au moment du premier impact (*Figure 5.45A*) suite au transfert d'énergie cinématique des blocs les plus bas vers les plus hauts (tel que nous l'avons présenté au chapitre modèle numérique). Les petits blocs acquièrent des vitesses importantes ce qui engendre des rebonds importants et un nombre d'arrêts des blocs sur le versant incliné très limité (*Figure 5.44C*). Pour la configuration (C), nous observons que les positions des blocs les plus gros sont plus proches de celles des blocs du dépôt réel avec notamment des similitudes importantes sur la répartition en forme de « domino » (*Figure 5.44C*) et des valeurs de dispersion assez semblables (*Figure 5.45C*). Ceci est intéressant car cela nous explique pourquoi nos simulations sur configurations simplifiées, étudiées en début de thèse (qui ne considéraient que des gros blocs) donnaient déjà des résultats très satisfaisants : le mouvement en masse semble concerner majoritairement les blocs de gros volume tandis que les blocs les plus petits se propagent principalement de manière isolé. Il semblerait donc que positionner les blocs en haut du volume de départ permettrait une meilleure approche du dépôt réel observé. Le grand nombre de petits blocs dispersés sur la surface horizontale (*Figure 5.44C*) laisse cependant penser que le nombre de ces blocs a été sur estimé.

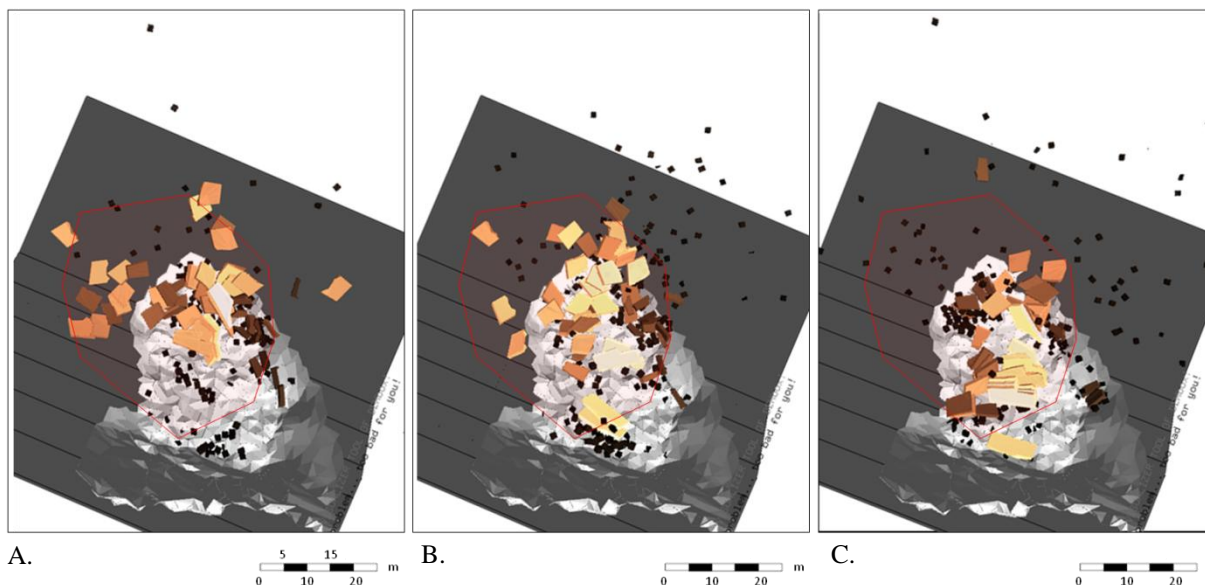


Figure 5.44. Vues de dessus des dépôts numériques pour des différentes positions dans l'empilement initial des petits blocs. A. Positionnés en bas. B. Positionnés au milieu. C. Positionnés en haut

Pour la configuration (A) dont les petits blocs sont positionnés dans les rangées basses du volume de départ, nous observons que la position finale du centre de masse est assez proche de celle de la configuration (C) bien que légèrement augmentée (*Figure 5.45A*). Les vitesses moyennes des blocs sont en revanche moins importantes dans la configuration (A). Ceci peut s'expliquer par le fait que les petits blocs positionnés dans les rangées inférieures ont plus de difficultés à transmettre lors du premier impact leur énergie aux blocs subjacents plus gros (*Figure 5.45B*). Nous observons également sur la *Figure 5.44A* que les distances de propagation des gros blocs de la configuration (A) (qui ont une énergie potentielle plus importante) sont légèrement plus importantes que celles de la configuration (C) ce qui se traduit naturellement par une légère augmentation du centre de masse (environ 7 m) (*Figure 5.45A*).

Pour la configuration (B) pour laquelle les petits blocs sont positionnés au milieu du volume de départ, nous observons un comportement plus proche de ceux de la configuration (A) que ceux de la configuration (C). En effet, la mise en place d'une blocométrie fine au milieu du volume initial perturbe également le transfert d'énergie des blocs les plus bas vers les blocs les plus haut lors du premier impact (*Figure 5.45A*). A noter que cette configuration donne également des résultats comparables aux données réels avec néanmoins un nombre plus important de gros blocs au front du dépôt et une plus grande dispersion des blocs de petite taille.

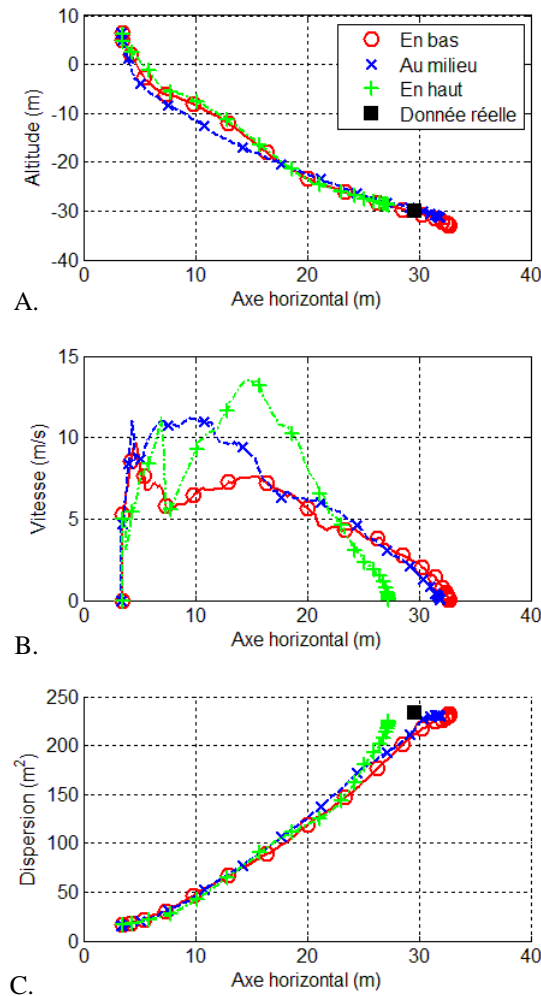


Figure 5.45. Influence de la position initiale des blocs de faible volume. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Variation de la vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse sur l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse.

5.1.7.7.2. Influence de l'espacement entre les blocs

Dans les simulations précédentes les blocs sont légèrement espacés les uns par rapport aux autres pour éviter toute interpénétration intempestive qui générerait un comportement inadéquat en début de simulation. Pour étudier l'influence d'un décalage plus ou moins important entre les blocs sur les mécanismes de propagation, nous avons considéré deux configurations en conservant le même nombre de blocs mais en changeant leurs positions initiales :

- Les blocs sont pratiquement en contact dès le début de la simulation (espacement de 1 mm).
- Les blocs sont espacés de 15 cm les uns par rapport aux autres. La hauteur du volume de départ est augmentée de 3.9 m mais sans modification du centre de masse.

Les paramètres de contact restent inchangés par rapport aux simulations précédentes (Tableau 5.2). Les distances de propagation du centre de masse, les vitesses moyennes des blocs ainsi que la dispersion des blocs par rapport au centre de masse sont présentées sur les Figures 5.46A, B et C respectivement.

Les résultats obtenus montrent une faible dépendance de l'espace initial des blocs sur le phénomène global de propagation. En effet, on constate des positions du centre de masse du dépôt quasiment identiques pour les deux configurations testées (espace 1 mm et espace 15 cm) avec une dispersion des blocs par rapport au centre de masse légèrement plus importante pour la configuration où les blocs sont quasiment en contact (*Figure 5.46C*). Concernant l'évolution de la vitesse, nous observons également un comportement très similaire pour les deux configurations (*Figure 5.46B*). Suite à ces résultats, nous pouvons conclure que l'espace initial des blocs n'est pas pénalisant pour le phénomène de propagation en masse sur le site de Millau.

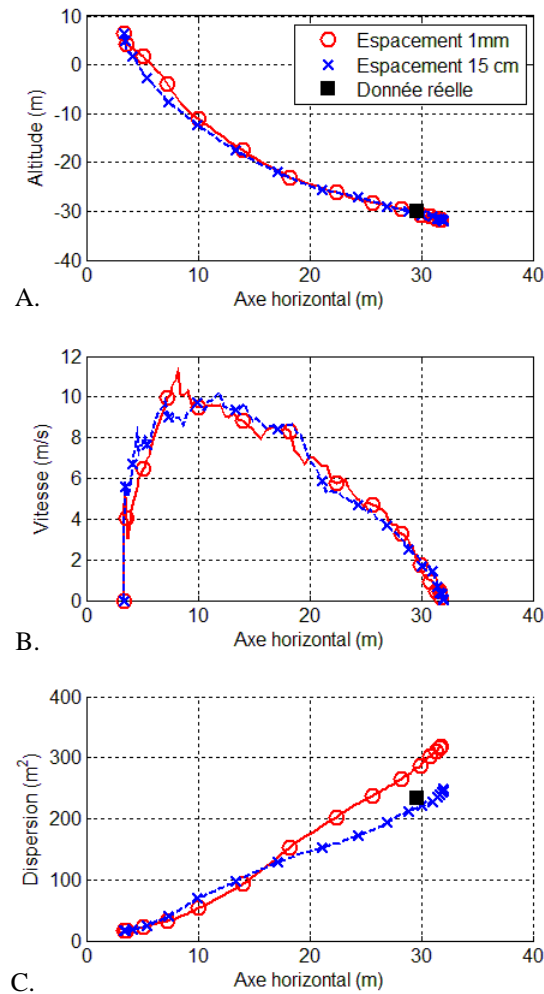


Figure 5.46. Influence de l'espace entre les blocs. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Variation de la vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse sur l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse.

5.1.7.7.3. Influence de la morphologie des blocs

Nos premières simulations nous ont montré que la forme des blocs a une influence considérable dans la cinématique de propagation des blocs rocheux, notamment des blocs isolés. Nous avons également observé que pour les éboulements en masse, une grande partie de l'énergie (environ 40% de l'énergie totale) est dissipée avant même que les blocs commencent à se propager sur le versant incliné. Pour analyser plus en détail l'influence du découpage sur ces mécanismes, nous avons décidé de modifier le pendage des familles de discontinuités répertoriées à Millau ainsi que leur fréquence (espace entre deux surfaces de discontinuités de la même famille). Seul le

plan de stratification horizontal n'a pas été modifié en raison de son orientation claire sur la falaise. Il en résulte de ces variations que les formes obtenues (*Figure 5.47*) sont des parallélépipèdes rectangulaires, des rhomboèdres et des parallélépipèdes rectangles dont les tailles et les orientations sont résumées dans le *Tableau 5.3*.

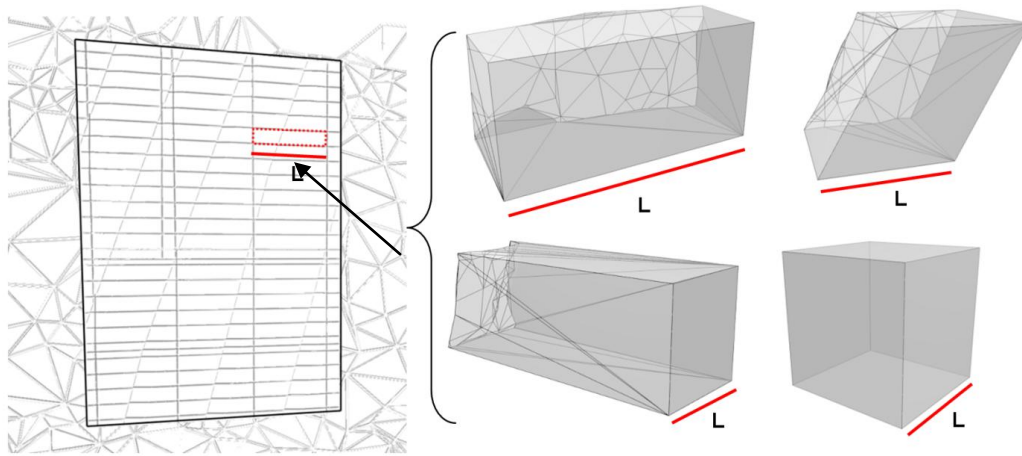


Figure 5.47. Formes caractéristiques des découpes réalisés. Seul le plan de stratification horizontal n'a pas été modifié

Forme caractéristique	Densité de découpage	Orientation
Cuboïde	Tous les 1 m / 3 m	Perpendiculaire et parallèle à la falaise
Rhomboèdre	Tous les 3 m	Inclinaison des faces latérales $-45^\circ / 45^\circ$
Parallélépipède rectangulaire	Tous les 3 m	Perpendiculaire et parallèle à la falaise

Tableau 5.3. Formes caractéristiques obtenues en fonction du découpage

Les paramètres de contact sont inchangés par rapport aux simulations précédentes et correspondent à celles du *Tableau 5.2*. Les positions des blocs du dépôt principal pour les différentes configurations analysées sont présentées sur la *Figure 5.48*. Les *Figures 5.48A* et *5.480B* correspondent aux dépôts des éboulements obtenus en utilisant des cubes de longueur 1 m et 3 m respectivement. Nous remarquons que malgré un nombre de blocs bien plus important pour la configuration avec des cubes de 1 m, le contour du dépôt d'éboulement est quasiment le même que celui de la configuration avec des blocs de 3 m, ce qui n'est plus le cas pour les autres géométries également testées. Ceci dit, comme nous l'avons fait remarquer précédemment, la propagation finale des éboulements en masse de volume intermédiaire semble plus dépendante à la forme des blocs qu'au nombre de blocs considérés.

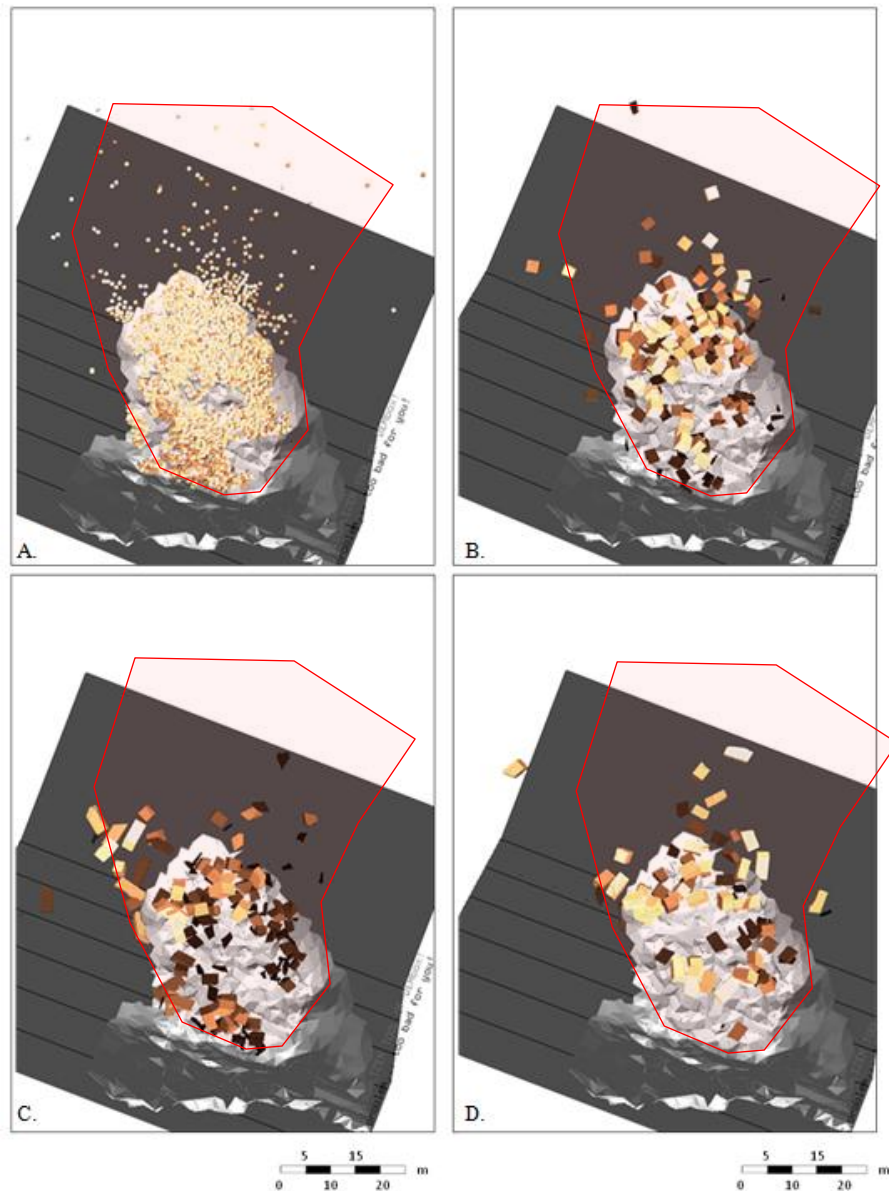


Figure 5.48. Vues de dessus des dépôts numériques pour des différentes directions et densité de découpage. A. Cubes avec une densité de découpage de 1 m. B. Cubes avec une densité de découpage de 3 m. C. Rhomboïdes avec une densité de découpage de 3 m. D. Parallélépipèdes rectangulaires avec une densité de découpage de 3 m. Le contour rouge correspond à l'enveloppe caractéristique du dépôt de la simulation A

Concernant la cinématique de ces blocs, présentée sur la *Figure 5.49*, nous observons un comportement similaire pour les cubes et les parallélépipèdes rectangulaires, ces derniers ayant une géométrie voisine. Pour les rhomboïdes, ayant des formes plus irrégulières, nous observons des vitesses de propagation légèrement inférieures aux autres formes testées avec des dispersions également plus importantes, notamment sur l'étalement latéral (*Figure 5.49C*).

Lorsque l'on compare ces résultats avec les données réelles, nous observons que c'est la simulation avec les parallélépipèdes qui se rapproche le plus du phénomène réel observé, ce qui confirme le choix réalisé et la pertinence de relier les formes des blocs à des caractéristiques physiques tel que la fracturation de la falaise par exemple.

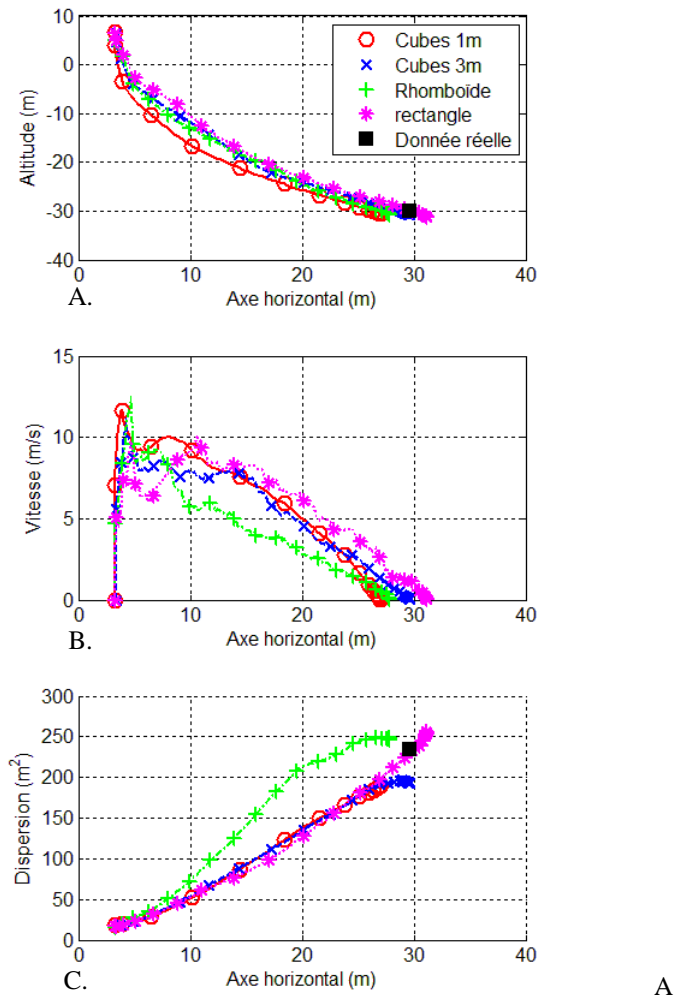


Figure 5.49. Influence de la morphologie des blocs. A. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse

5.1.7.8. Influence du comportement mécanique des matériaux des discontinuités sur le phénomène de propagation des blocs rocheux

Sur le site de Millau, la roche calcaire est fractionnée suivant des plans de stratification horizontaux et verticaux qui rendent la roche perméable. Lors de nos visites sur site, nous avons constaté la présence de matériaux de remplissage (liés à l'érosion et à l'altération de la matrice rocheuse) entre les joints rocheux (10 à 50 cm d'épaisseur) qui pourraient avoir un rôle éventuel sur les mécanismes de propagation de la masse rocheuse.

Pour étudier ces phénomènes, nous avons pris en compte dans la modélisation, trois bandes de discontinuité horizontales réparties suivant une fréquence de 2 m et dont la rhéologie est différente de celle de la matrice rocheuse (Figure 5.50A). La position des bandes et leur épaisseur ont été retenues suite aux observations faites sur le terrain. L'objectif des nouvelles simulations numériques est de tester l'influence des caractéristiques du matériau de remplissage en modifiant les valeurs des coefficients de restitution normaux dans ces zones. Les paramètres rhéologiques retenus pour caractériser le matériau de remplissage sont répertoriés dans le Tableau 5.4. Concernant les paramètres de contact des blocs en dehors des bandes de discontinuité, ils sont résumés dans le Tableau 5.5.

Type de matériau de remplissage (représenté via le coefficient de restitution normal)	e_n^2
	0.001
	0.05
	0.3

Tableau 5.4. Paramètres rhéologiques du matériau de remplissage des discontinuités

	e_n^2	μ	k_n	k_n / k_t
Brique/Support	0.10	1.0	10^8	1.0
Bloc/Bloc	0.05	1.0	10^8	1.0

Tableau 5.5. Paramètres de contact utilisés pour les blocs situés en dehors des bandes de discontinuités

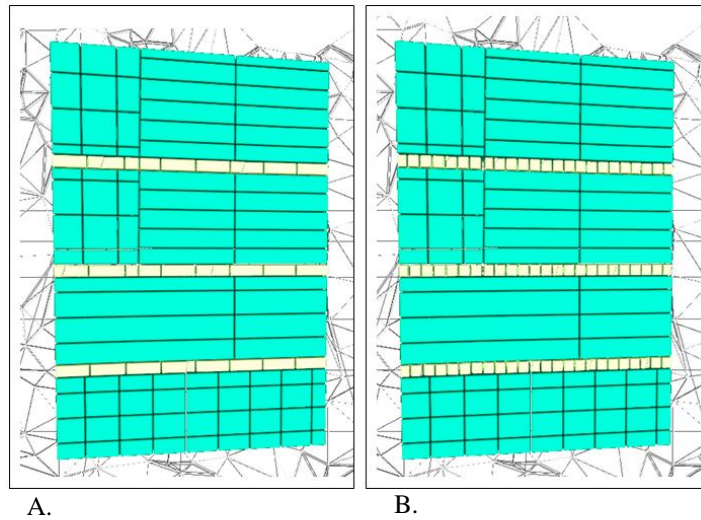


Figure 5.50. Configurations testées. A. Position des bandes horizontales pour l'étude de l'influence de la rhéologie des discontinuités. B. Variation de la fracturation des matériaux à l'intérieur des surfaces de discontinuités

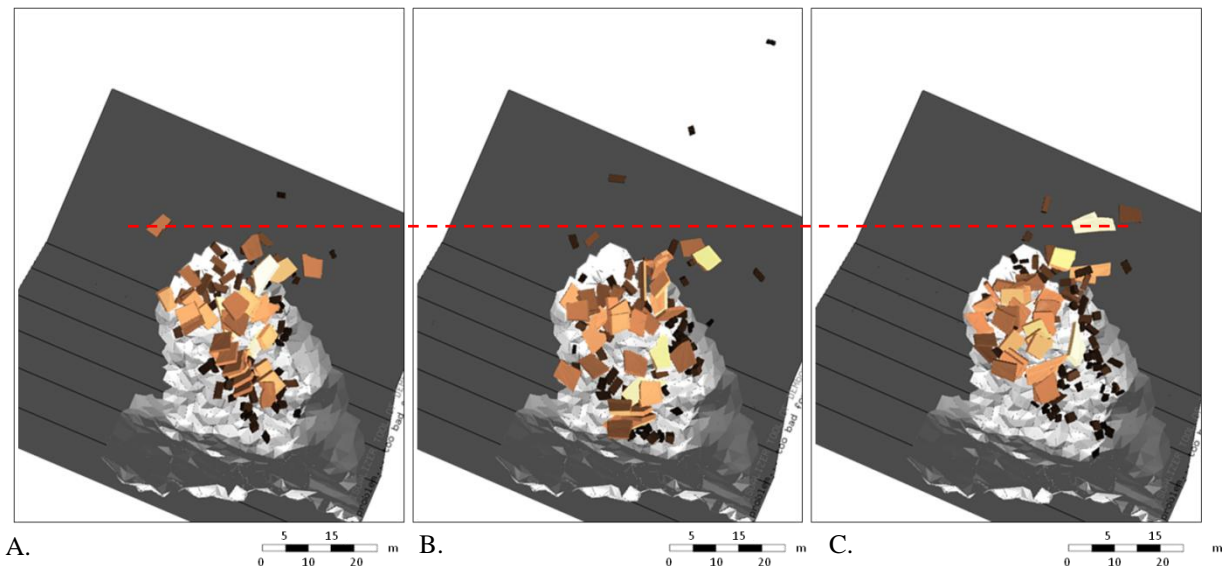


Figure 5.51. Vues de dessus des dépôts numériques. A. $e_n^2 = 0.05$. B. $e_n^2 = 0.001$. C. $e_n^2 = 0.30$

Les positions des blocs dans le dépôt principal pour les trois rhéologies analysées sont présentées sur la *Figure 5.51*. Pour les paramètres sélectionnés, nous constatons que la forme des

dépôts et la position du centre de masse sont peu dépendantes du type de matériau de remplissage et ce pour les trois configurations testées (*Figure 5.53A*). D'un point de vue cinématique, nous obtenons également des bilans très similaires avec des écarts de vitesses relativement faibles (en translation et en rotation) (*Figure 5.53B* et *5.53C*). Il paraîtrait donc que la rhéologie de ces matériaux (au moins celle décrite par le coefficient de restitution normale) ait un rôle mineur dans le phénomène de propagation des blocs rocheux lorsque la taille des blocs mis en mouvement est relativement grande par rapport aux bandes de discontinuités.

Cependant, parler de l'altération d'un matériau de remplissage suppose également, en termes de propagation, parler de blocométries différentes. En effet, une bande très altérée va se déstructurer rapidement en nombreux morceaux au cours de la propagation tandis qu'une bande moins exposée aux phénomènes de dégradation (comme l'érosion par exemple) pourrait se voir moins affectée pendant la fracturation. Pour mieux comprendre le rôle du niveau de fracturation à l'intérieur des bandes de discontinuité, nous avons considéré deux configurations différentes : très fracturée (autrement dit très altérée) (*Figure 5.50B*) et peu fracturée (qui correspond à la configuration définie sur la *Figure 5.50A*). Le paramètre de contact e_n^2 pour les blocs des discontinuités est de 0.05, les autres paramètres restent inchangés (*Tableau 5.5*).

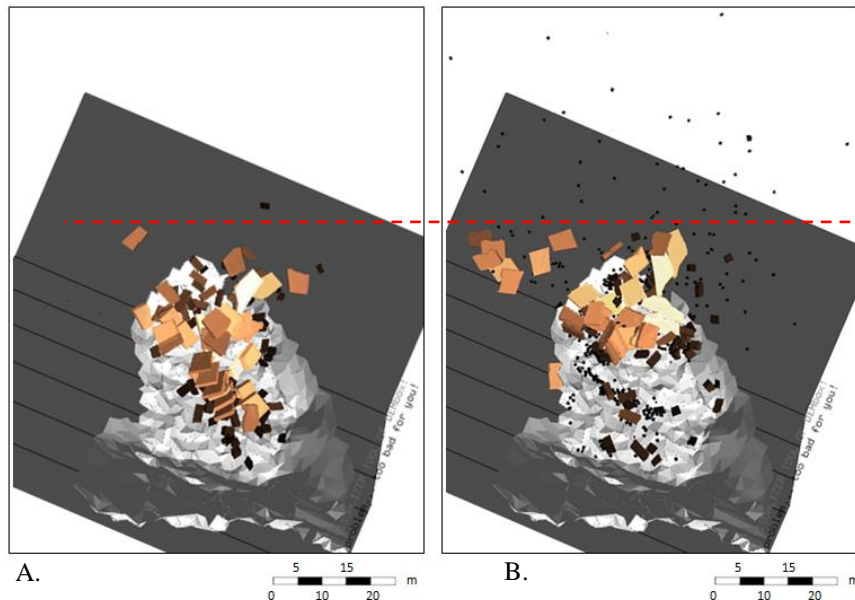


Figure 5.52 Vues de dessus des dépôts numériques. A. Matériau de remplissage peu fracturé. B. Matériau de remplissage très fracturé

Les positions des blocs dans le dépôt final pour ces deux configurations sont présentées sur la *Figure 5.52*. En ce qui concerne la position du dépôt, nous observons que, de façon générale, la granularité du matériau de remplissage a une faible influence sur la distance de propagation du front de l'avalanche rocheuse (trait rouge dans la *Figure 5.52*). En revanche, nous observons que la fréquence du découpage influence fortement sur la position des blocs sur le versant de propagation (*Figure 5.52 B*). Concernant la cinématique des blocs, nous observons que les vitesses sont assez proches pendant les premières secondes du phénomène, puis divergent fortement lorsque les petits blocs qui se détachent de la masse principale (comme montré précédemment) se propagent de manière isolée. Il en résulte des distances d'arrêt plus importantes et une augmentation de la dispersion du dépôt final (*Figure 5.53F*).

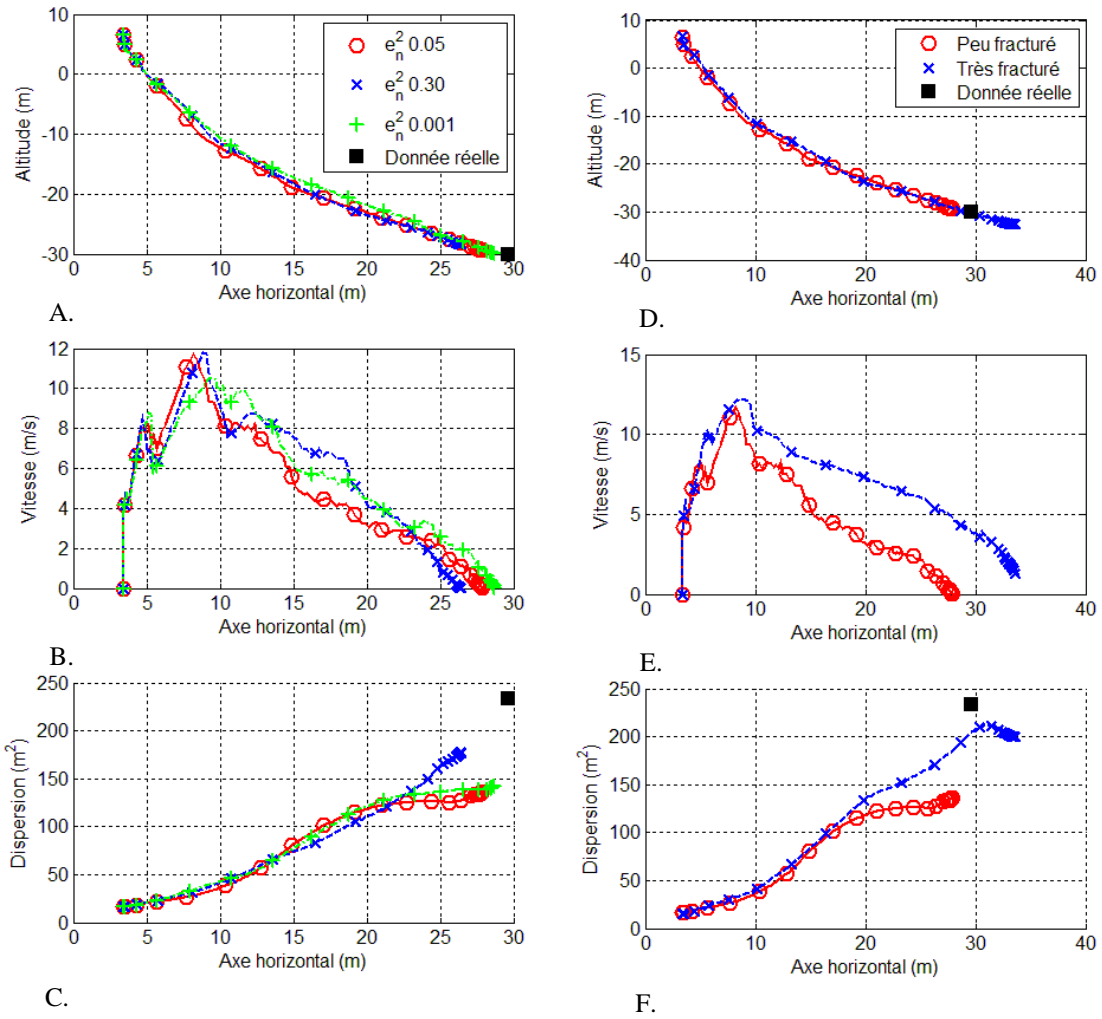


Figure 5.53. Influence de la nature du matériau de remplissage des discontinuités sur la propagation des blocs rocheux. A. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse. Influence du niveau de fracturation du matériau de remplissage des discontinuités sur la propagation des blocs rocheux. D. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. E. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. F. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse

5.1.8. CONCLUSION GENERALE SUR LA MODELISATION DE L'ÉBOULEMENT DE MILLAU ET LES DIFFÉRENTES ÉTUDES PARAMÉTRIQUES

Le *Tableau 5.6* présente de façon synthétique et qualitative les études paramétriques présentées dans ce chapitre. L'objectif en est de mieux identifier les caractéristiques et/ou paramètres les plus prépondérants en fonction des enjeux recherchés dans une simulation. Nous avons défini trois types de sensibilité pour la plupart des caractéristiques analysées ici :

- Très sensible : donnée indispensable pour la simulation,
- Sensible : donnée importante mais pour laquelle une légère variation (méconnaissance) peut être acceptée,
- Négligeable : aucune dépendance n'a été observée.

Concernant les paramètres de contact le *Tableau 5.6* montre, par exemple, que le frottement dans la masse est négligeable si l'on s'intéresse à la propagation et à la géométrie de la masse principale mais qu'il a une influence importante dans l'étude de la propagation des blocs isolés. On y trouve également que le paramètre de restitution est sans doute le paramètre le plus sensible avec une influence tant pour la cinématique de la masse principale que pour la cinématique des blocs isolés.

Nous avons également trouvé que le nombre de blocs impliqués dans un phénomène d'éboulement a une influence très importante dans la propagation des blocs isolés mais une influence faible dans la propagation du dépôt principal. En règle générale, plus il y a des blocs plus il est probable d'avoir de la dispersion et des distances de propagation importantes. Cependant, les aspects géométriques du versant de propagation (caractérisés numériquement par la résolution des mailles tridimensionnelles) et la forme des blocs ont une énorme influence sur le phénomène de propagation et de dissipation d'énergie.

Concernant les surfaces des discontinuités et le matériau de remplissage, nous avons observé que le type de matériau de la discontinuité, en termes de capacité à dissiper de l'énergie, à une faible influence sur le phénomène de propagation en masse.

D'un point de vue de performance numérique, nous avons observé qu'il est possible d'utiliser le pas de temps critique classique de la DEM dans la modélisation des éboulements dans DEMbox sans avoir de modifications significatives du phénomène de propagation par rapport à des simulations avec des pas de temps plus petits.

Enfin, concernant les bilans d'énergie au niveau du premier impact entre le sol et la masse (zone très sensible vis-à-vis des pourcentages d'énergie dissipée) nous trouvons que les paramètres de contact ont une influence plus importante dans la façon dont l'énergie est dissipée que sur la quantité d'énergie dissipée.

Paramètre	Gamme optimale	Sensibilité sur :				
		Distance de propagation du dépôt principal	Étalement du dépôt principal	Distance de propagation des blocs isolés	Rotation des blocs	Quantité d'énergie dissipée au premier impact masse/sol
$e_n^2_{BB}$	0.40 - 0.50	Sensible	Très sensible	Sensible	Très sensible	Les paramètres de contact ont une influence plus importante dans la façon dont l'énergie est dissipée que sur la quantité d'énergie dissipée dans cette zone. Autour de 35% de l'énergie totale dissipée au premier impact dans cette zone
$e_n^2_{BS}$	0.1 - 0.20	Sensible	Très sensible	Très sensible	Très sensible	
μ_{BB}	> 0.80	Négligeable pour $\mu_{BB} > 0.80$	Négligeable	Sensible	Très sensible	
μ_{BS}	0.80 - 1.0	Très sensible	Négligeable pour $\mu_{BS} > 0.80$	Très sensible	Très sensible	
Nombre de blocs		Négligeable	Sensible	Très sensible	Très sensible	Très sensible, avec des variations sur le total d'énergie dissipée
Géométrie au premier impact		Très sensible	Très sensible	Sensible		
Forme de blocs		Très sensible	Sensible	Très sensible		
Résolution du maillage		Sensible	sensible	Très sensible		
Matériaux de remplissage des discontinuités		Négligeable	Négligeable	Sensible		
Niveau de fracturation du matériau de remplissage des discontinuités		Négligeable	Sensible	Sensible (influence faible sur les plus gros blocs de l'éboulement)		
Pas de temps		Négligeable (pour des pas de temps > au pas de temps critique de la DEM)				

Tableau 5.6. Synthèse des études paramétriques

5.2. Propagation des éboulements rocheux et interaction avec des ouvrages de protection : cas de Perrières

5.2.1. INTRODUCTION

Nous avons abordé jusqu'ici différents cas d'éboulements en masse où nous nous sommes intéressés au phénomène de propagation des blocs rocheux sur des versants inclinés. Cependant, parler de propagation peut rapidement devenir inapproprié dans certaines configurations. C'est par exemple le cas des effondrements de falaises qui décrivent essentiellement un détachement puis une chute quasi verticale d'un pan rocheux. La forme du dépôt qui en résulte est généralement conique compte tenu de la verticalité de la chute et de l'horizontalité des surfaces impactées. Ces phénomènes peuvent survenir à proximité des infrastructures ou des zones à forte activité humaine (ex : carrières, déblais autoroutier, etc) ce qui augmente considérablement le risque et nécessite de la mise en œuvre de solutions de protection. Des questions sensibles sont alors posées sur le dimensionnement des ouvrages de protection qui sont sollicités par des interactions très complexes et rapides sur un rayon d'action limité.

Pour tester la performance de notre modèle à rendre compte de ces phénomènes très particuliers, nous avons étudié pendant la thèse le comportement dynamique d'un effondrement de falaise, aujourd'hui instable mais encore en place, pour lequel un merlon de protection a été mis en œuvre. Nous nous sommes intéressés en particulier aux interactions des blocs rocheux avec l'ouvrage de protection et à la trajectoire des blocs ayant franchis l'ouvrage.

Notre étude comporte différents développements portant sur:

- La définition d'un volume potentiellement instable à partir des modèles tridimensionnels avant éboulement.
- L'estimation de la blocométrie de l'évènement.
- L'étude de la cinématique des blocs et de la formation du dépôt.
- L'identification des points critiques dans l'ouvrage soumis à des impacts successifs.

Pour faciliter la compréhension de ce phénomène vis-à-vis des pratiques actuelles en bureau d'études, nous avons également abordé ce problème par une approche trajectographique où la capacité de l'ouvrage a été analysée en considérant l'action de blocs isolés. Des comparaisons en termes de cinématique entre le phénomène d'éboulement en masse et les impacts des blocs isolés ont été effectuées.

5.2.2. DEFINITION DU VOLUME POTENTIELLEMENT INSTABLE

La différence essentielle entre cet événement hypothétique et ceux analysés dans les sections précédentes est bien évidemment le manque d'information sur la forme du pan rocheux instable ou la géométrie qu'aurait la falaise après éboulement. Des hypothèses fortes sont donc nécessaires pour générer le volume potentiellement instable sur la base de certains critères géologiques tels que l'état de fracturation du massif rocheux.

Notre démarche consiste à utiliser toutes les discontinuités qui ont été identifiées dans les études structurales et géologiques, présentées dans le Chapitre 2 et d'en déduire un volume instable par intersection de ces plans. Les surfaces de rupture peuvent être continues ou discontinues dans la roche, selon la nature de la matrice rocheuse. De nombreux travaux existent actuellement sur ce sujet donnant des informations précieuses sur les mécanismes de propagation des réseaux de fissures à l'intérieur d'un massif rocheux dans la définition d'un volume instable (Bonilla-Sierra, 2013; Duriez, 2009; Scholtès and Donzé, 2012). Nous considérons dans cette analyse, vis-à-vis des observations et analyses géologiques sur ce site, que les surfaces de discontinuités se propagent à l'intérieur du massif rocheux sur une épaisseur de 10 m minimum. Pour notre étude, le volume de départ instable est donc obtenu par intersection des familles de discontinuités présentant un déplacement relatif important (*Figure 5.54*).

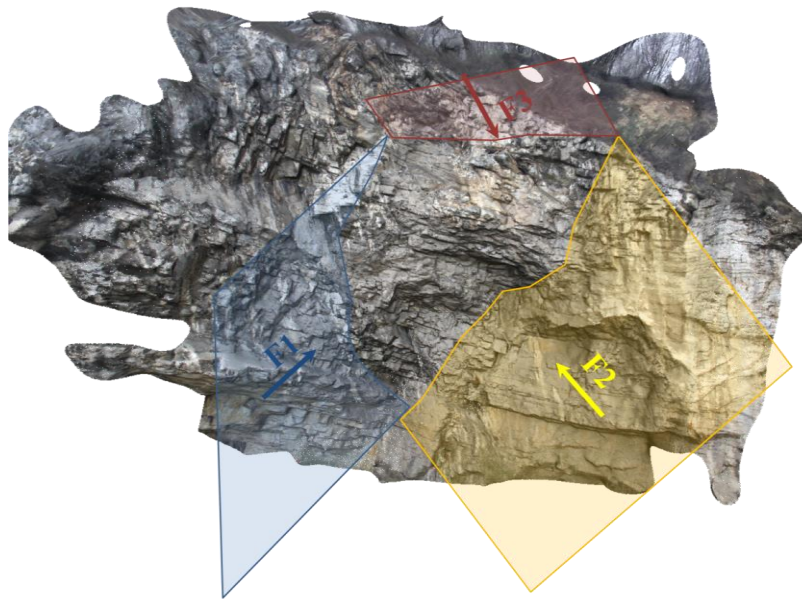


Figure 5.54. Aspect naturel de la falaise avec les surfaces de discontinuités identifiées via l'étude structurale

La falaise a été reconstruite numériquement par des approches photogrammétriques, tel que nous l'avons fait pour les autres sites, avec une résolution de 5 cm qui a été ensuite réduite à 25 cm pour faciliter la modélisation numérique très dépendante en termes de temps de calcul à la résolution du maillage (*Figure 5.55*).

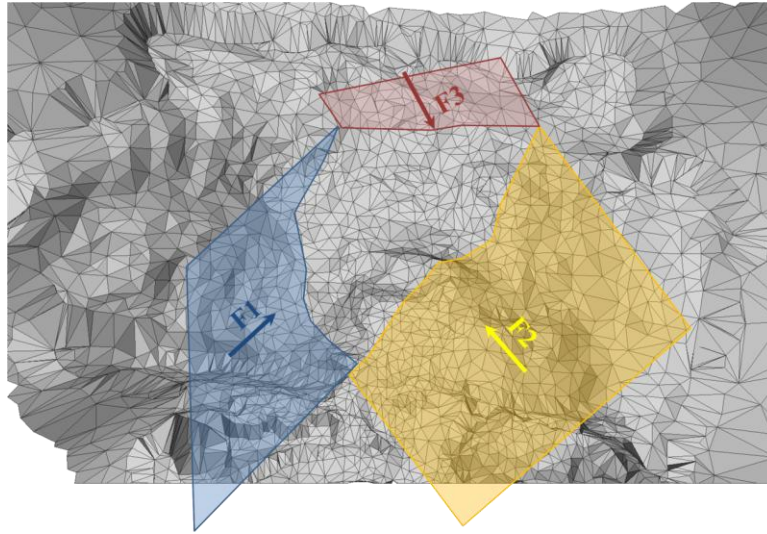


Figure 5.55. Modèle numérique de la falaise avec une résolution de 2 m, associé aux surfaces de discontinuités identifiées via l'étude structurale

Les surfaces de discontinuités sont ensuite prolongées à l'intérieur de la falaise rocheuse jusqu'à ce que les trois familles de discontinuités se rejoignent, tel que présenté sur la *Figure 5.56*.

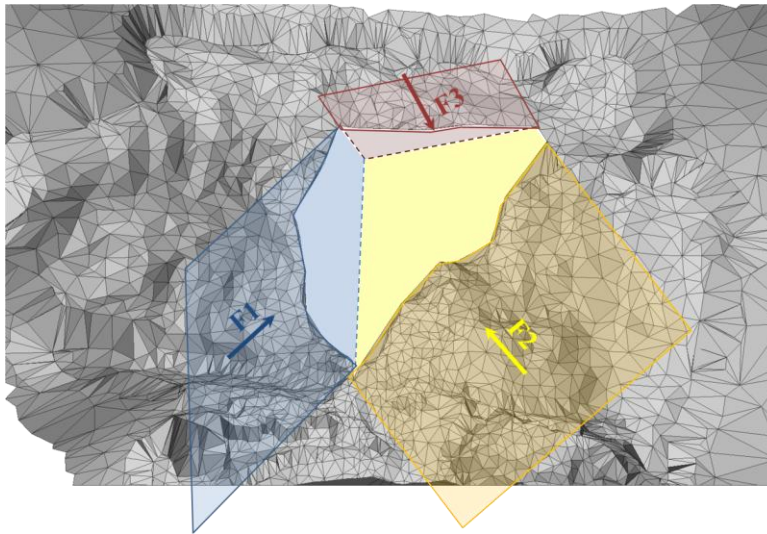
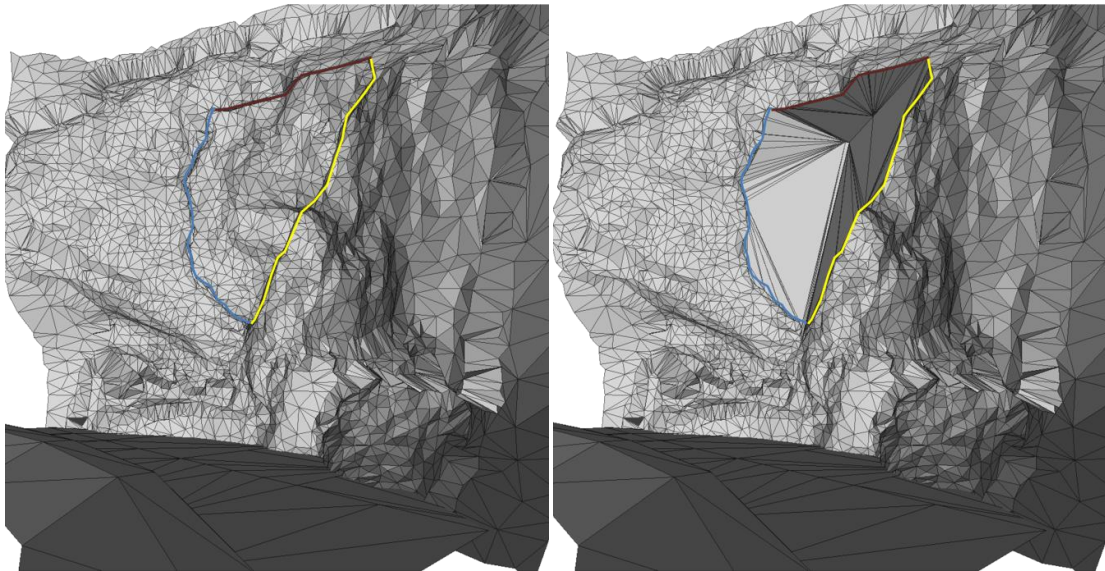


Figure 5.56. Détail sur l'intersection des surfaces de discontinuités et identification du dièdre rocheux potentiellement instable

La dernière étape consiste à recréer le volume de départ par intersection des trois familles de discontinuités avec la falaise (*Figure 5.57A*). Dans le cas présent, l'écaille rocheuse correspond à un dièdre dont le volume total est de 2600 m³. La géométrie de la falaise après suppression de l'écaille rocheuse est présentée sur la *Figure 5.57B*. Les opérations « Booléennes » nécessaires pour ce type de traitement ont été introduites dans l'outil OpenSource Blender (Blender documentation, 2009).



A. B.
 Figure 5.57. A. Identification du volume de départ par intersection des familles de discontinuités avec la falaise. B. Modèle numérique du pan de falaise après suppression de l'écaille rocheuse

5.2.3. ESTIMATION DE LA BLOCOMETRIE DE L'EVENEMENT

Il est difficile avec les informations recueillies sur le terrain de déduire la blocométrie potentielle du dépôt d'éboulement car même si les discontinuités principales ont été identifiées, d'autres discontinuités secondaires peuvent se développer et influencer les formes et tailles des blocs impliqués dans le phénomène d'effondrement. Pour cette raison, nous avons décidé de considérer pour l'étude numérique plusieurs scénarios impliquant des blocométries différentes mais, malgré tout, en accord avec le phénomène de stabilité observé.

Comme il a été présenté au Chapitre 2, nous avons, à proximité du site de Perrière, pu observer plusieurs dépôts d'éboulements anciens (100 m^3) localisés autour d'un périmètre de 30 m de la zone probable de départ. Nous avons constaté que les blocs rencontrés sont relativement homogènes en taille avec des formes plus ou moins cubiques et des dimensions variant de 1 à 2 m pour les plus gros.

Pour rendre compte de ces observations et mesures, nous avons découpé le volume de départ (Figure 5.58A) suivant des familles de plans orthogonaux avec une fréquence de découpage en lien direct avec les épaisseurs des blocs repérés sur le terrain. Deux blocométries ont été retenues : entre 1.5 et 2 m (Figure 5.58B) – noté par la suite configuration 1 - et entre 1 et 1.5 m (Figure 5.58C) –noté configuration 2.

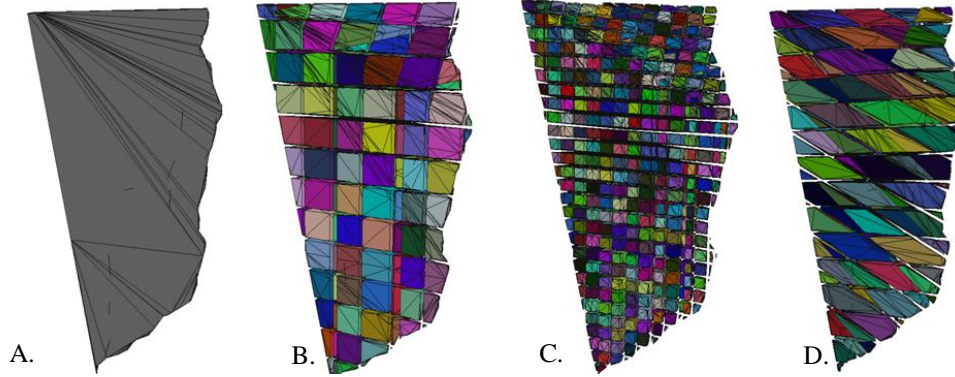


Figure 5.58. Vue dans le plan X-Y du volume de départ estimé. B. Découpage orthogonal avec une fréquence de découpage de 2 m – Configuration 1. C. Découpage orthogonal avec une fréquence de 1 m – Configuration 2. D. Découpage orthogonal avec un plan à 45° par rapport à la direction du glissement – Configuration 3

Enfin, pour compléter cette étude, il est fort probable que l'une des blocométries les plus défavorables pour l'ouvrage de protection se présente lorsque les blocs glissent dans une direction proche de celle de l'intersection des familles F1 et F2 (*Figure 5.56*). En effet, si les blocs se déplacent dans cette direction, ils risquent de parcourir des distances horizontales (perpendiculaire à la falaise) plus importantes et de basculer plus facilement au-dessus de l'ouvrage. De plus, une telle configuration pourrait engendrer des énergies d'impact sur l'ouvrage de protection plus importantes du fait de l'incidence et de la vitesse des blocs qui seraient moins affectées par les interactions bloc/bloc au début du phénomène.

Pour ces raisons, nous avons également découpé le volume de départ par des plans dont les orientations sont similaires à celles des familles F1 et F2, en respectant également les dimensions des blocs retrouvés à proximité du site (*Figure 5.58D*). Cette configuration sera noté par la suite « configuration 3 ».

5.2.4. ETUDE DE LA PROPAGATION DES BLOCS ET DU DEPOT

5.2.4.1. Définition des paramètres d'interaction

Une fois le volume de départ et la géométrie de la falaise définis, les modèles numériques de terrain ont été introduits dans DEMbox. La démarche suivie pour la détermination des paramètres est une démarche pragmatique similaire à celle utilisée précédemment pour le site de Millau. Le frottement dans la masse (frottement bloc/bloc) a été estimé à partir des angles des pentes des dépôts anciens observés à proximité du site. Le frottement basal, ayant une influence moindre que lors de nos études précédentes (les distances de propagation sont courtes), il a été supposé égal à l'angle de frottement défini entre les blocs.

En ce qui concerne les interactions entre les blocs et l'ouvrage de protection, nous avons utilisé des paramètres de restitution normaux très faibles à l'impact (dissipation par chocs très importante) et un coefficient de frottement blocs-ouvrage similaire à celui défini dans la masse. S'agissant d'une étude portant sur la cinématique des blocs, nous négligerons la déformabilité de l'ouvrage qui est

supposé infiniment rigide. Les paramètres de contact utilisés pour cette étude numérique sont résumés dans le *Tableau 5.7*.

	e_n^2	μ	$k_n (N.m)$	k_n / k_s
Block/Soil	0.10	1.1	2.10^{10}	1.0
Block/Block	0.10	1.1	2.10^{10}	1.0
Block/Wall	0.01	1.1	2.10^{10}	1.0

Tableau 5.7. Paramètres de contact des simulations numériques

5.2.4.2. Bilan cinématique des simulations

L'ensemble du système est soumis à la gravité ce qui initie la mise en mouvement des blocs. La durée totale du mouvement est d'environ 15 secondes (jusqu'à l'arrêt complet des blocs) avec un temps de calcul d'environ 6 jours pour la configuration 1 et de 13 jours pour la configuration 2 sur un ordinateur DELL PRECISION T3600. Le temps de calcul assez conséquent est dû notamment à la résolution du maillage utilisée dans le modèle et au nombre et irrégularité des blocs considérés (338 blocs pour la configuration 1 et 1889 blocs pour la configuration 2). Différentes vues de la cinématique de propagation de la masse sont présentées sur la *Figure 5.59* pour les configurations 1 et 2. La *Figure 5.59* nous permet déjà de déduire quelques informations intéressantes :

- La capacité de l'ouvrage de protection est insuffisante pour arrêter la totalité des blocs pour les configurations 1 et 2 qui sont les plus probables compte tenu de l'étude structurale.
- En termes de propagation, nous observons que le fait de découper le volume de départ en blocs de plus petite taille diminue le risque de franchissement de l'ouvrage. En effet, la prise en compte de ces blocs de petite taille permettrait une répartition plus homogène des blocs sur le support horizontal (moins de vides à la base du dépôt) qui se traduirait à la fois par un dépôt plus dense mais moins épais. Au final, nous comptons 8 blocs sur 338 qui dépassent l'ouvrage dans la configuration 1 (avec des blocs de 2 m) et seulement 3 blocs sur 1889 pour la configuration 2 (avec des blocs de 1 m).
- Les zones d'influence de l'éboulement (dépôt principal) sont quasiment identiques pour les deux configurations testées. L'augmentation du nombre de blocs a une faible influence sur l'étalement latéral du dépôt principal qui est d'environ 71 m pour les deux configurations. Il est important de rappeler que la longueur latérale maximale du volume instable sur la falaise était de 30 m. Les blocs s'étaient de cette façon sur une distance latérale d'environ 2.5 fois la longueur initiale.

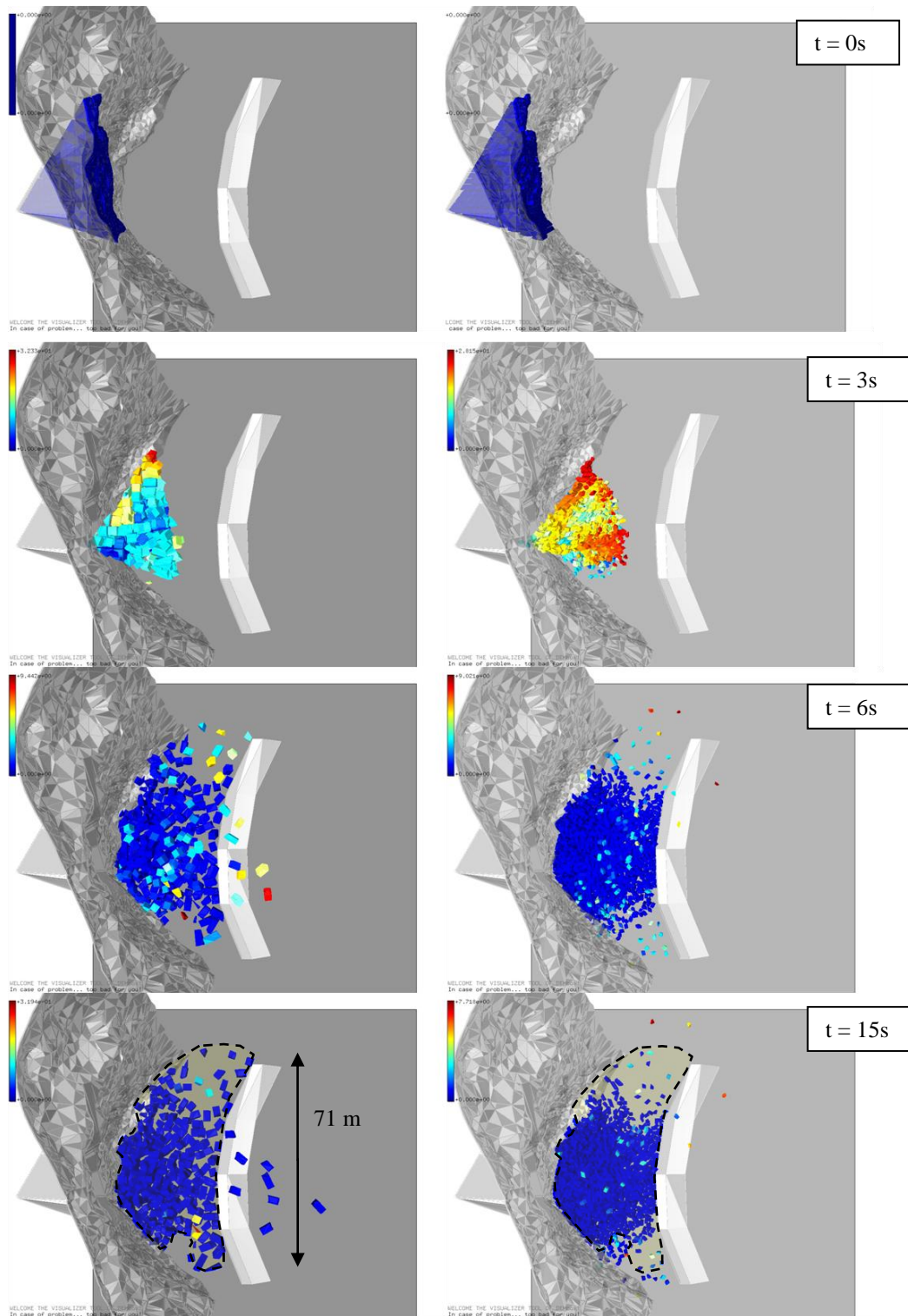


Figure 5.59. Vue en plan de l'état de la propagation des blocs rocheux pour la configuration 1 (gauche) et 2 (droite) à différents temps de la simulation. La couleur fait référence à la vitesse des blocs

La cinématique de l'évènement est étudiée via la position et les vitesses (de translation et de rotation) du centre de masse du volume en mouvement, du bloc le plus éloigné (ayant franchi

l'ouvrage) et du bloc impactant en premier le merlon de protection, ces derniers ayant actuellement une importance essentielle dans la définition du risque et pour le dimensionnement des ouvrages de protection. Ces informations sont présentées pour les configurations 1 et 2 sur la *Figure 5.60*.

Concernant la trajectoire des blocs, nous observons que le centre de masse se propage sur une distance plus importante dans la configuration 1 - environ 15 m depuis la falaise (*Figure 5.60A*) que pour la configuration 2 où le centre de masse se propage finalement sur une distance de 10 m par rapport à la falaise (*Figure 5.60D*) et ce bien que les vitesses moyennes soient très similaires pour les deux configurations (*Figure 5.60B et 5.60E*). Il existerait donc une relation entre la taille des blocs et la distance de propagation du centre de masse compte tenu du fait que les blocs de plus petite taille interagissent plus facilement entre eux et dissipent plus d'énergie.

Concernant la cinématique de propagation du bloc le plus éloigné, il est intéressant de noter que pour les deux configurations testées la trajectoire de ce bloc n'a pas une forme balistique contrairement aux pratiques actuelles en ingénierie de chute de blocs. Pour la configuration 1, la cinématique de propagation du bloc le plus éloigné est le résultat d'un mouvement « de masse » où les blocs les plus hauts se voient tout simplement transportés par la masse des blocs les plus bas qui se déplacent avec une vitesse de translation relativement constante (*Figure 5.60B – trait bleu*). L'épaisseur apparente de la masse en mouvement étant plus importante que la hauteur du merlon de protection dans la configuration 1, le bloc finit par franchir l'ouvrage puis se propage de façon isolé. Un aspect intéressant dans cette configuration est la faible vitesse de rotation acquise par les blocs qui se propagent majoritairement par translation (*Figure 5.60C*).

Pour la configuration 2, la propagation du bloc le plus éloigné est un peu plus complexe du fait qu'elle est le résultat d'un comportement singulier. En effet sur les *Figures 5.60E et 5.60F* on observe que les vitesses de translation et de rotation de ce bloc sont fortement modifiées dès lors que le bloc impacte l'un des coins de l'ouvrage. L'angle d'impact sur ce point, l'inertie du bloc et le caractère indéformable de l'ouvrage (aspect très important dans cette simulation) lui permettent de réaliser un rebond d'environ 15 m et d'atteindre une vitesse de rotation importante (passage de 4 rad/s à 11 rad/s à l'impact) du fait d'un transfert d'énergie de translation en énergie de rotation. Bien que la distance parcourue par ce bloc dans cette configuration soit moins importante par rapport à la distance de propagation du même bloc pour la configuration 1, le phénomène observé reste singulier par rapport à la réalité où la rupture et la déformation de l'angle de l'ouvrage serait privilégiée.

Concernant le bloc impactant l'ouvrage en premier, nous observons pour les deux configurations testées une vitesse d'impact aux alentours de 23 m/s et une valeur pic à 25m/s pour la configuration 2 (*Figures 5.60B et 5.60E*) qui est également la plus grande observée pour les deux configurations. Nous remarquons également la présence de vitesses de rotation assez importantes dans la configuration 2 avec des valeurs de l'ordre de 12 rad/s ce qui, d'après la littérature, peut, compte tenu des vitesses de translation assez élevés à l'impact, être une valeur suffisante pour déstructurer l'ouvrage. Il est intéressant de noter que les blocs qui impactent l'ouvrage en premier et ceux qui franchissent l'ouvrage sont situés initialement dans les couches supérieures de l'assemblage de départ. Les blocs les plus bas forment un « matelas » qui, dans certains cas, favorisent l'éjection des blocs avec des vitesses parfois très élevées, comme nous l'avons vu pour la configuration 1 pour les blocs les plus éloignés. Suite à ces analyses, quelques informations sont à retenir :

- La propagation des blocs dans ces configurations ne peut pas se comprendre sans tenir compte du comportement en masse qui peut, tel que nous l'avons observé dans cette étude, augmenter le risque de franchissement de l'ouvrage et de propagation des blocs.
- Une combinaison entre des fortes vitesses de rotation, des formes anguleuses et un obstacle rigide peut donner lieu à des vitesses de rotation et de translation très importantes qui impacte fortement la cinématique des blocs isolés.

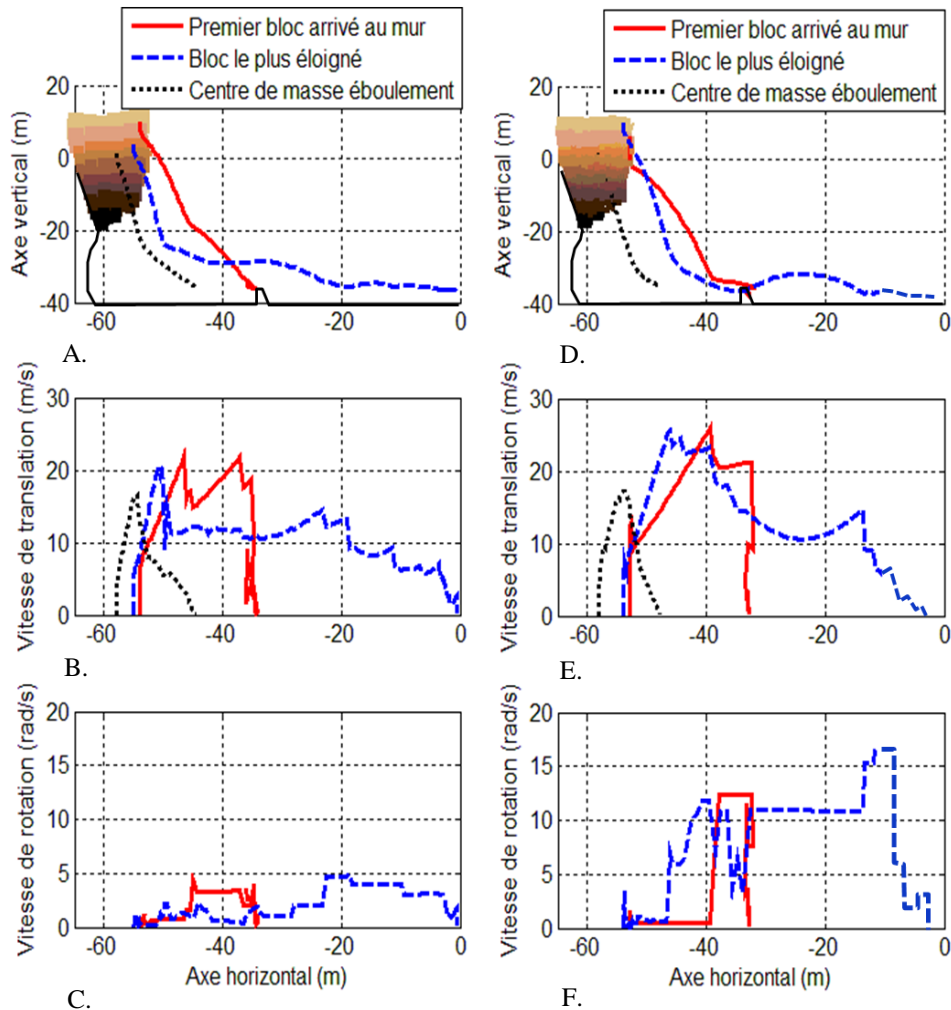


Figure 5.60. Bilans cinématiques de l'effondrement rocheux par rapport à l'axe perpendiculaire à la falaise (dénomé Axe horizontal) A. Position, B. Vitesse de translation et C. Vitesse de rotation pour la configuration 1. Les mêmes informations sont présentées pour la configuration 2 respectivement sur les figures D, E et F.

Le volume initial a également été découpé suivant un plan de direction proche de la direction de glissement dans la falaise (*Figure 5.58D*). Au total, 285 blocs très anguleux sont modélisés dans cette nouvelle configuration. Un état de la cinématique de la masse rocheuse et la géométrie du dépôt sont présentés sur les *Figures 5.61* et *5.62* respectivement pour les configurations 1 (de base) et 3 (découpage anguleux).

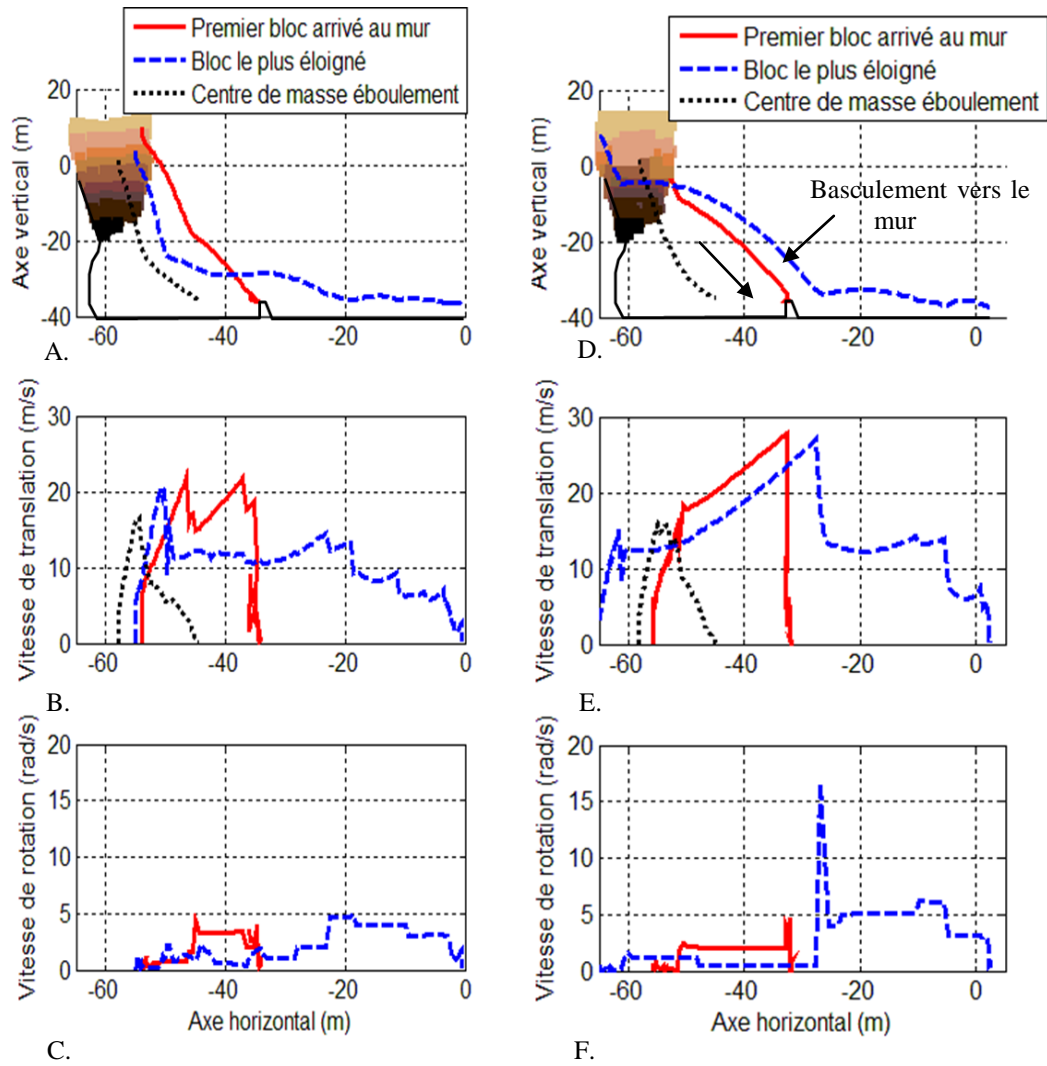


Figure 5.61. Bilans cinématiques A. Position, B. Vitesse de translation et C. Vitesse de rotation pour la configuration 1. Les mêmes informations sont présentées pour la configuration 3 respectivement sur D, E, F

Si l'on compte un nombre moins important de blocs ayant franchi l'ouvrage dans la configuration 3 (*Figure 5.62B*) par rapport à la configuration 1 (*Figure 5.62A*), les vitesses de translation des blocs sont bien plus importantes dans cette configuration (*Figure 5.61E*). En effet, la vitesse du premier bloc heurtant l'ouvrage pour la configuration 3) est d'environ 28 m/s soit une augmentation de 33% par rapport à la vitesse du même bloc dans la configuration 1. Avec un certain étonnement, on constate que les dépôts sont assez similaires pour les deux configurations mais avec un centre de masse plus proche de la falaise de 4 m dans la configuration 3 par rapport à la configuration 1 (*Figures 5.61 A et D*). D'après la *Figure 5.63*, il semblerait que lorsque la masse rocheuse touche le sol dans la configuration 3, celle-ci recule de quelques mètres en raison notamment de l'angle d'incidence de l'impact qui n'est pas suffisamment important pour que les blocs basculent dans la direction du mur.

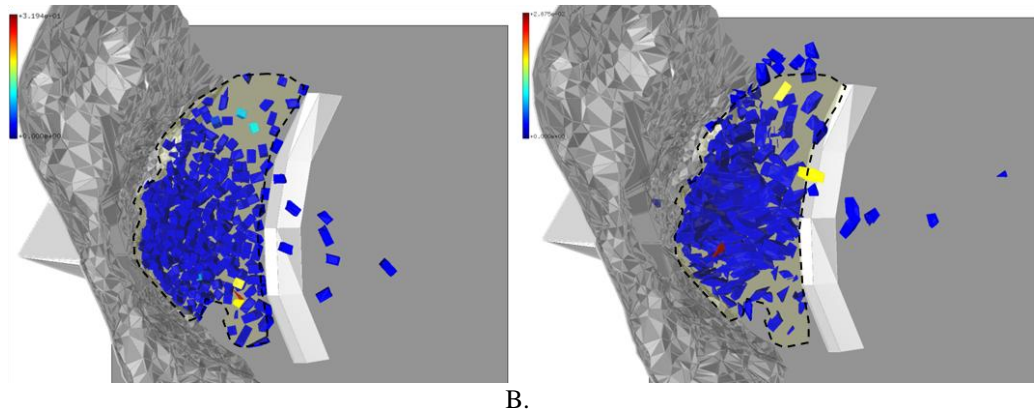


Figure 5.62. Vue en plan de la géométrie du dépôt pour : A. La configuration 1. B. La configuration 3

La configuration 3 a été choisie dans l'idée qu'elle représenterait une des situations les plus défavorables vis-à-vis de la capacité de l'ouvrage protection. D'après nos résultats on constate effectivement que découper le volume de départ un utilisant un plan proche du glissement dans la masse favorise le basculement d'une partie importante de blocs (notamment ceux situés sur les rangées supérieures) et que les vitesses d'impact sur l'ouvrage sont plus importantes du fait que l'on favorise le mouvement de la masse en direction du mur de protection.

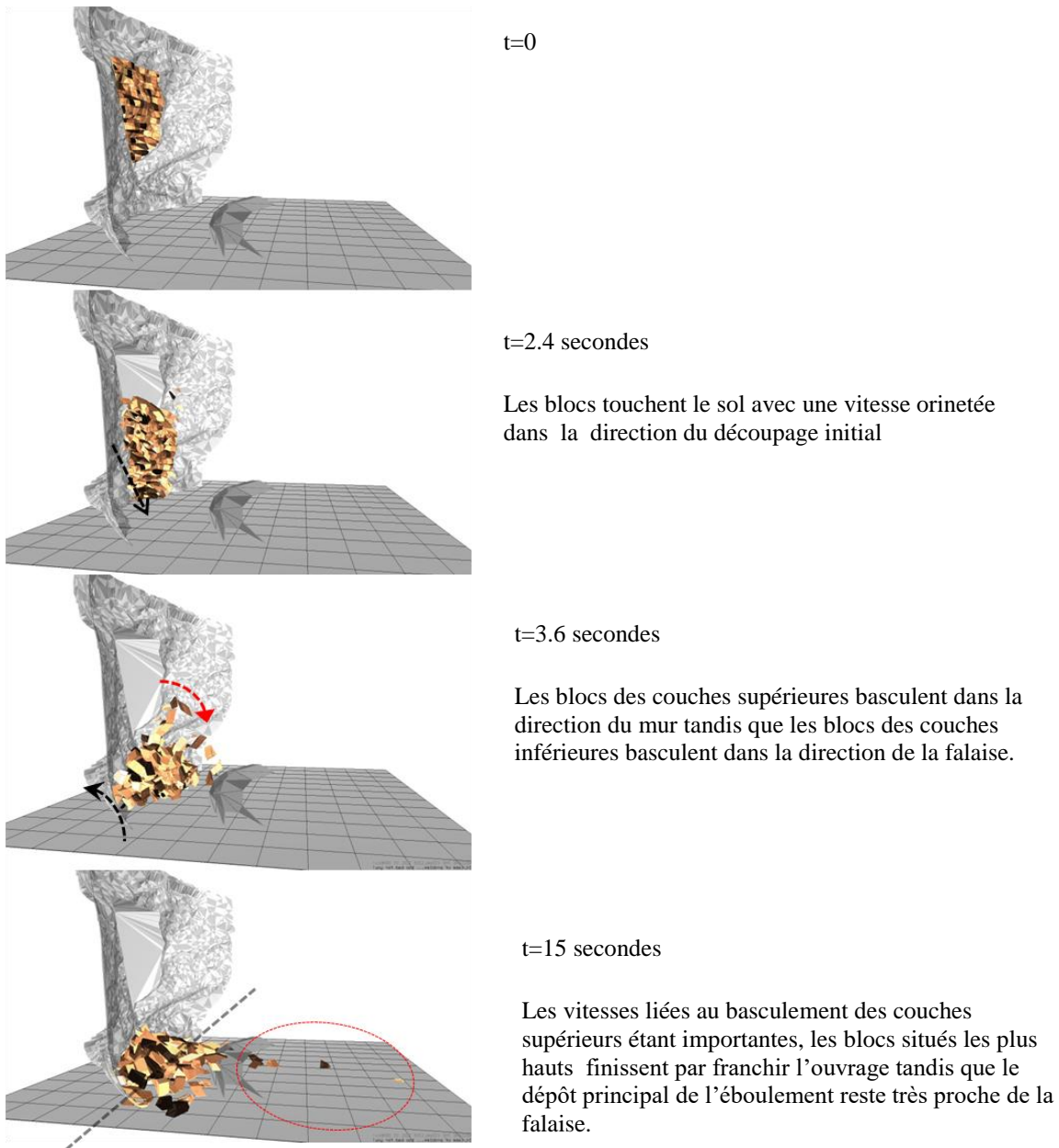


Figure 5.63. Descriptif de la cinématique des blocs pour différents temps de la simulation pour la configuration 3. La couleur des blocs est arbitraire

5.2.5. INFLUENCE DU MERLON DE PROTECTION SUR LA PROPAGATION DES BLOCS

Afin d'avoir une idée plus précise sur l'utilité de l'ouvrage de protection et à sa réelle capacité à contenir un mouvement en masse, nous avons également réalisé des simulations en supprimant le mur de protection de la configuration 1 (*Figure 5.64*). Comme attendu, nous obtenons un dépôt plus étalé avec des blocs isolés parcourant des distances bien plus importantes par rapport à la configuration avec merlon ; soit 8 blocs ayant franchi l'ouvrage (*Figure 5.64A*) pour la configuration 1 à plus de 20 blocs ayant traversé la même région dans une configuration sans merlon (*Figure 5.64B*). Le positionnement du mur actuel a été défini par une analyse de type « ligne d'énergie » (voir chapitre 1)

sur la base des données de terrain obtenues sur le site à proximité de l'ouvrage (chutes de blocs isolés ou dépôts d'éboulement ancien). La *Figure 5.64* nous montre que, bien que simple, la méthode de la ligne d'énergie peut s'avérer performante pour ce type de phénomènes puisque nous observons que la position du mur actuel correspond plus ou moins à la position du front du dépôt principal de l'éboulement obtenu sans mur de protection (dépôt contenant plus de 90% des blocs). Cependant, et c'est l'un des avantages du modèle numérique, la méthode de la ligne d'énergie ne tient pas compte des blocs qui se détachent de la masse principale et qui sont issus de phénomènes cinématiques particuliers, comme il a été observé, et qui ont sans nul doute une influence sur le risque résiduel de l'ouvrage dans ce cas.

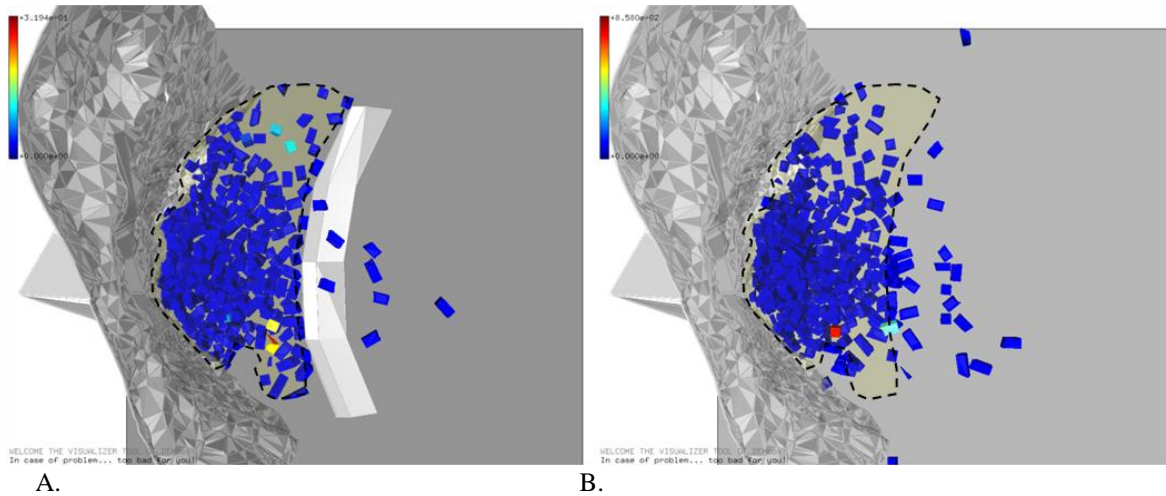


Figure 5.64. Vue en plan de la forme du dépôt des blocs pour la configuration 1. A. Avec merlon. B. Sans merlon

5.2.6. ETUDE DE LA PROPAGATION DES BLOCS ISOLES PAR UNE APPROCHE TRAJECTOGRAPHIQUE

Pour comprendre la complexité du phénomène de propagation en masse par rapport aux méthodes conventionnelles d'analyse de la trajectoire des blocs (approches trajectographiques), nous avons menés des simulations complémentaires pour étudier les trajectoires et la cinématique des blocs isolés. De façon similaire à la simulation du site de Millau, nous avons isolé chaque bloc de la masse et avons analysé sa trajectoire de façon indépendante sans aucune interaction avec d'autres blocs. Les simulations numériques ont été réalisées avec la configuration 1. Les paramètres de contact et géométriques comme les formes et orientations des blocs n'ont pas été modifiés.

Sur la *Figure 5.65A*, on constate que les blocs isolés effectuent souvent des rebonds verticaux généralement sans aucun risque pour l'ouvrage ce qui contraste singulièrement avec les résultats précédents. En effet, nous avons observé dans nos analyses précédentes que la trajectoire de la plupart des blocs ayant franchi l'ouvrage résultaient d'un mouvement en masse pour lequel les blocs les plus bas ont transporté les blocs les plus hauts dans la direction du mur ce qui leur a permis de se déplacer sur des distances horizontales importantes. Pour les blocs isolés, ce comportement est impossible et des rebonds verticaux, sans risque pour l'ouvrage, sont souvent observés à proximité de la falaise. Comme le montrent les modélisations numériques, la chute isolée des blocs peut être vue comme un phénomène présentant un risque mineur pour ce site pour lequel l'ouvrage joue bien son rôle de protection avec un seul bloc de 3 m³ ayant franchi l'ouvrage (*Figure 5.65A* et *5.65B*).

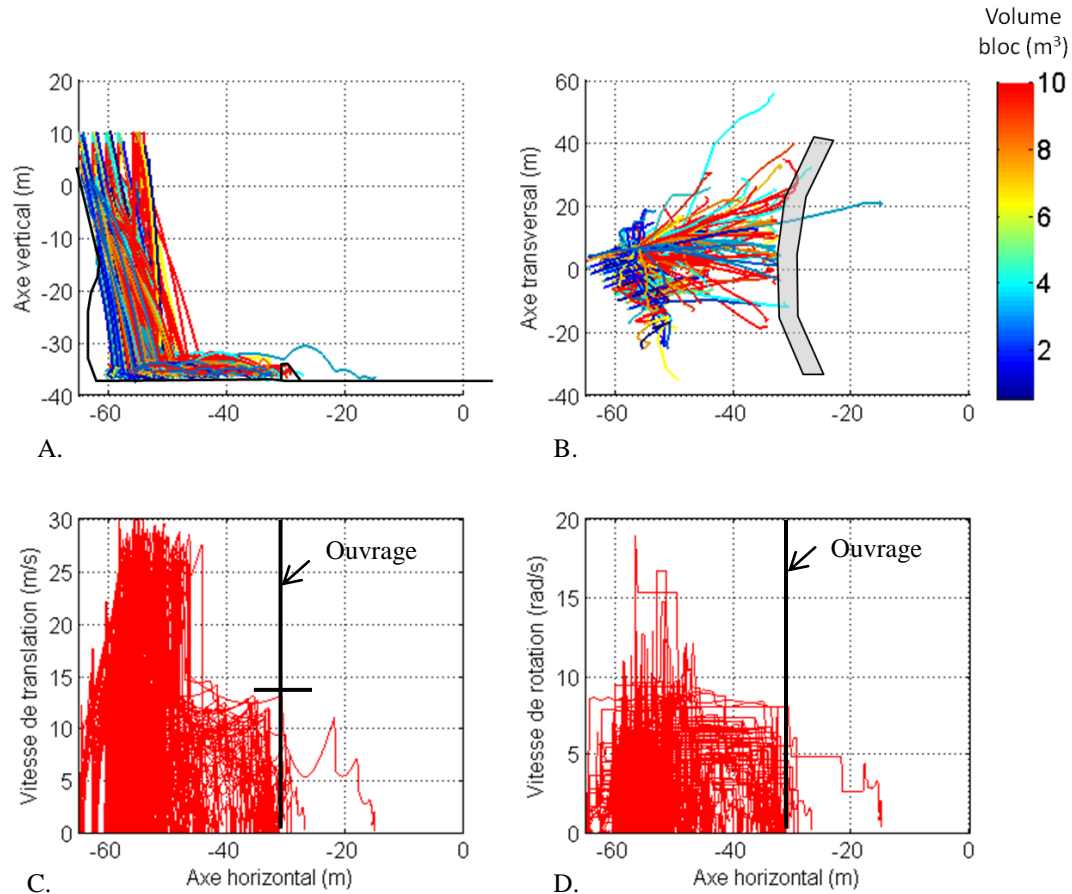


Figure 5.65. Bilan cinématique des blocs isolés. A. Trajectoires des blocs dans le plan XY. La couleur des traits fait référence aux volumes des blocs. B. Trajectoires des blocs dans le plan XZ. La couleur des traits fait référence aux volumes des blocs. C. Vitesses de translation D. Vitesses de rotation

Nous observons néanmoins que certains blocs impactent l'ouvrage suite à des rebonds qui se font dans la direction du mur. La vitesse d'impact la plus élevée observée pour les blocs isolés est de 13 m/s (contre 23 m/s dans la configuration en masse) avec une vitesse de rotation maximale d'environ 8 rad/s à proximité du mur (contre 4 rad/s dans la configuration en masse). Concernant l'étalement latéral des blocs, nous observons également que la plupart d'entre eux se sont arrêtés sur un rayon d'action plus faible (sur environ 50 m) par rapport à l'éboulement en masse (71 m) (Figure 5.65D).

Suite à ces résultats, nous pouvons considérer qu'un comportement en masse est bien plus défavorable, en termes cinématique, qu'un phénomène qui comprend des chutes successives de blocs isolés.

Dans cette étude, nous n'avons pas considéré le mécanisme de remplissage du bassin car nous considérons que l'accumulation successive des blocs contribue à augmenter les mécanismes d'amortissement des blocs, ce qui se traduit par une réduction des rebonds (comme démontré lors des études d'impact multi blocs dans le Chapitre 4). Une telle configuration aurait, néanmoins, un intérêt plus important en présence de blocs moins anguleux (comparativement à ceux observés sur ce site) où

les rotations développées pendant l'impact sur le dépôt, peuvent donner lieu à des phénomènes tels que le franchissement de l'ouvrage par rotation des blocs, bien connus dans la littérature (Plassiard and Plotto, 2006), (Domaas, 2015).

5.2.7. IDENTIFICATION DES ZONES D'IMPACT CRITIQUES LORS D'UN EBOULEMENT EN MASSE

Nous avons analysé jusqu'ici le phénomène de propagation de blocs rocheux pour plusieurs géométries du découpage initial. Si nos analyses ont porté dans un premier temps sur la propagation et l'arrêt des blocs, l'intérêt de cette étude porte sur la possibilité d'évaluer les sollicitations sur l'ouvrage suite à un phénomène d'éboulement en masse. Comme il a été évoqué auparavant, nous supposons dans cette étude que l'ouvrage est rigide, indéformable et fortement dissipatif.

Les données d'entrée les plus pertinentes et les couramment utilisées dans les modèles de dimensionnement des ouvrages de protection de type merlon sont les énergies cinétiques de translation et de rotation avant impact. Pour des configurations géométriques proches de celle de Perrières, les modèles trajectographiques s'avèrent rapidement inappropriés, notamment par l'impossibilité de décrire correctement l'effondrement vertical du pan de falaise et les cinématiques des blocs consécutivement au comportement en masse.

Pour mieux comprendre ce phénomène d'impact, nous avons positionné devant la face amont de l'ouvrage une grille rectangulaire constituée de cellules carrées où sont stockées les informations principales définissant les cinématiques d'impacts entre les blocs et la structure de protection. Il est alors possible, à chaque fois qu'un bloc traverse la grille, d'enregistrer dans la cellule concernée des informations telles que les vitesses de rotation et de translation, la masse des blocs, et les angles d'impacts et ce à chaque instant de la modélisation (*Figure 5.66*). On peut en déduire, entre autre, les énergies cinétiques au cours du temps des blocs ayant impactés l'ouvrage et notamment l'énergie cinétique du bloc (ou groupe de blocs) ayant percuté le plus violemment l'ouvrage (énergie maximale d'impact).

Lors d'impacts multiples dans une cellule on a adopté les règles suivantes :

- Dans le cas où plusieurs impacts ont lieu simultanément sur une même cellule mais sur des points différents de la cellule, la vitesse maximale de ces impacts est retenue.
- Dans le cas où un bloc se voit impacté par un bloc voisin pendant la phase d'impact (*Figure 5.66B*), la vitesse moyenne résultante au point d'impact (qui peut être plus grande que la vitesse du premier bloc en raison d'un transfert d'énergie du bloc voisin) est retenue.

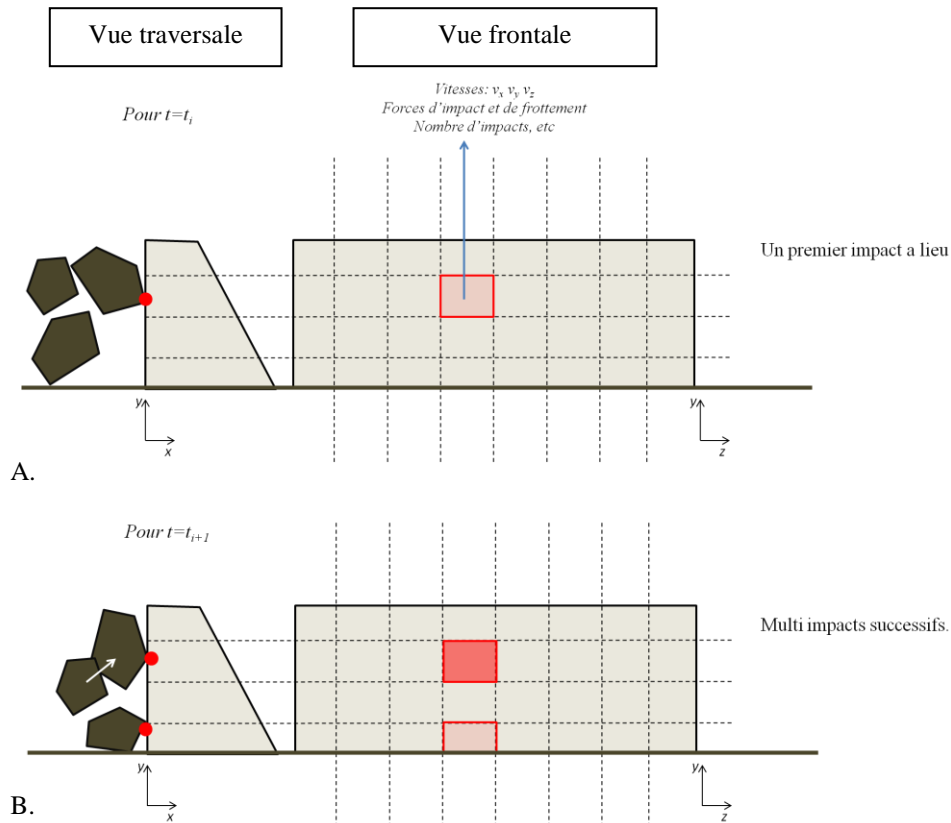


Figure 5.66. Vues transversale (gauche) et frontale (droite) de la discrétisation de la grille de mesures sur l'ouvrage de protection. A. Impact d'un bloc en un point. B. Impacts successifs sur plusieurs ou un même point. La vitesse résultante est mesurée au point d'impact du premier bloc avec l'ouvrage

Rappelons que, dans l'approche trajectographique, seuls quelques blocs isolés (sur la totalité des blocs considérés) dont la forme et l'angle d'incidence lors de l'impact permettent un transfert d'énergie cinétique verticale en énergie de translation horizontale, impactent le merlon de protection. Dans une approche trajectographique de type « lumped mass » par exemple (pour laquelle les blocs sont assimilés à des points matériels), il serait quasiment impossible, pour une configuration géométrique similaire à celle de Perrières, de déterminer convenablement les énergies d'impact compte tenu des directions de rebond restituées qui ne tiennent pas compte de la forme des blocs. De plus, par effet de masse, on a montré que les trajectoires des blocs sont canalisées dans un flux continu orienté vers l'ouvrage de protection. Ainsi, l'approche éboulement en masse permet d'identifier des comportements critiques dans l'ouvrage, en termes d'énergie d'impact, lorsque plusieurs blocs impactent simultanément la structure. La *Figure 5.67* présente les valeurs des vitesses d'impact maximales enregistrées sur chaque cellule pour les différentes configurations d'éboulement en masse analysées. Nous observons que l'énergie maximale d'impact est très sensible à la blocométrie définie (donc de la masse) avec des vitesses d'impact qui paraissent reposer sur les caractéristiques globales du volume de départ (masse totale et hauteur de chute, par exemple).

En effet, nous observons que les vitesses d'impact varient principalement en fonction de la taille des blocs : pour la configuration 2 pour laquelle les blocs sont les plus petits (*Figure 5.67B*) nous constatons que les vitesses d'impact les plus importantes peuvent être observées en partie basse de l'ouvrage tandis que pour les configurations ayant des blocs de volumes plus importants, elles ont

surtout lieu dans les parties hautes de l'ouvrage, principalement pour la configuration 3 (Figure 5.67C).

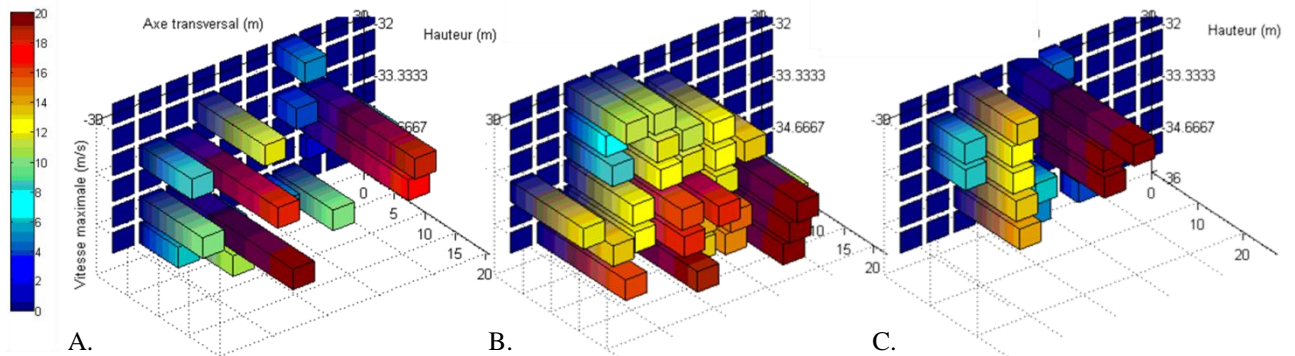


Figure 5.67. Vitesses d'impact maximales enregistrées sur chaque cellule. A Configuration 1. B. Configuration 2. C. Configuration 3. Notation : bleu : vitesse faible ; rouge : vitesse élevée

La proximité de ces valeurs de vitesses critiques avec les vitesses identifiées dans les sections précédentes pour les premiers blocs impactant l'ouvrage, nous permet de dire que, au moins en ce qui concerne l'évènement de Perrières, les phénomènes de poussée entre les blocs ont eu une influence secondaire, en termes énergétiques, sur la définition de la capacité maximale de l'ouvrage. Dans le cas, de Perrières, l'intérêt de modéliser le comportement multi bloc se porte essentiellement sur la capacité du modèle à rendre compte des aspects dynamiques au moment du déclenchement plus que de l'interaction entre les blocs au voisinage de l'ouvrage.

5.2.8. CONCLUSION

Nous avons souhaité dans cette partie étudier et prédire les mécanismes de propagation d'une masse rocheuse instable principalement pour évaluer la capacité d'un ouvrage de protection existant sur le site. Nous avons mis en place une méthodologie numérique robuste qui permet d'identifier et de discrétiser un volume potentiellement instable et ce à partir d'un MNT et d'un réseau de fractures précis. Ceci vient en complément des développements déjà réalisés sur la base de MNT relevés après éboulement, qui ont été utilisés dans nos simulations précédentes.

Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été faites. Par exemple, l'ouvrage de protection a été considéré indéformable vis-à-vis des impacts. De même, par manque d'informations précises sur la continuité ou la discontinuité des réseaux de fracture à l'intérieur du massif rocheux, nous avons considéré plusieurs scénarios de départ en faisant varier la blocométrie du volume de roches instables. Nos simulations numériques montrent que la capacité de l'ouvrage de protection est fortement dépendante des caractéristiques des surfaces de rupture de la falaise, principalement du pendage des surfaces de discontinuités qui sont orientées majoritairement dans la direction perpendiculaire à la falaise et qui sont les seules à avoir un rôle prépondérant sur la vitesse d'impact des blocs avec l'ouvrage de protection.

Concernant la sensibilité au nombre de blocs sur le cinématique, nous avons observé les vitesses d'impact des blocs sur l'ouvrage diminuent avec le nombre de blocs. Nous avons également

démontré que, pour ce type de phénomènes, les modèles trajectographiques sous-estiment les vitesses des blocs à l'impact dû notamment à l'incapacité de ces modèles à décrire les trajectoires issues d'un comportement en masse qui ont un rôle majeur dans le phénomène observé. Enfin, nous avons développé plusieurs procédures qui nous permettent aujourd'hui d'identifier des zones critiques sur l'ouvrage. Par exemple nous avons montré que la position des vitesses critiques sur l'ouvrage varie principalement avec la taille des blocs : en présence de blocs de petit volume les efforts maximaux ont tendance à se développer sur la partie basse de l'ouvrage tandis que pour des volumes plus importants les zones critiques se trouveraient sur les rangées hautes

Enfin, notre modèle numérique montre que le dimensionnement d'un ouvrage reste une tâche fortement dépendante de la blocométrie initiale d'où l'intérêt de trouver un bon compromis entre les surfaces de rupture et leur fréquence sur la falaise rocheuse à l'état initial des simulations numériques.

5.3. Cas de l'éboulement de Saint Pancrasse

5.3.1. CONTEXTE

L'éboulement dit de « Saint Pancrasse », qui a eu lieu dans le massif de la Chartreuse en 2012 est, par rapport à la date d'occurrence, l'événement le plus récent analysé pendant la thèse. D'un point de vue cinématique, cet événement s'est caractérisé par la présence d'un versant de propagation très raide mais suffisamment meuble pour permettre aux blocs de s'encastrent dans le sol et de limiter considérablement les distances de propagation.

D'un point de vue numérique, modéliser un tel comportement s'avère très complexe car les forces d'impact développées sur les blocs par le versant sont complexes et dépendent de nombreux facteurs dont la profondeur d'impact par exemple. L'expérience acquise au regard de plusieurs purges de blocs rocheux sur sites réels nous a montré que la propagation des blocs sur ce type de versant s'accomplit principalement par glissement, les blocs ayant des difficultés à rouler ou à rebondir en raison des profondeurs d'encastrement souvent importantes.

Nous avons montré au chapitre 4 que le modèle numérique de base, utilisé au début de la thèse, permettait de simuler grâce à la prise en compte d'un paramètre d'amortissement local (e_n^2) l'impact et le rebond d'un bloc rocheux sur un versant de propagation décrit par un ensemble de plans en faisant abstraction de sa nature granulaire ou discrète (section 4.1 du chapitre 4). Cependant, dans ce modèle de base, les blocs peuvent, en présence de pentes très raides, se propager par roulement, comme conséquence d'un moment dû au poids propre des blocs, et ce même si des paramètres fortement dissipatifs sont introduits au niveau du rebond ou du frottement.

De ce fait, et afin de rendre compte numériquement du phénomène observé à Saint Pancrasse, nous avons décidé d'ajouter un paramètre de résistance au roulement dans la loi d'interaction entre le versant de propagation et les blocs. La section 4.2 du Chapitre 4 a permis de mieux comprendre les principes fondamentaux régissant cette loi par l'analyse de la propagation de blocs de différentes formes sur un support fortement incliné.

L'objectif de ce chapitre est de confronter cette nouvelle formulation de la loi d'interaction dans la propagation d'un éboulement rocheux en masse à l'échelle réelle en s'appuyant sur les résultats obtenus dans la section 4.2 du Chapitre 4. L'effet de la loi de résistance au roulement sur ce type de phénomènes sera présenté en analysant plusieurs aspects :

- La propagation des blocs isolés et du dépôt d'éboulement.
- Les vitesses (rotation + translation) des blocs.

Enfin, la pertinence et les limites de cette loi d'interaction pour la modélisation des éboulements réels en masse seront abordées.

5.3.2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MODELISATION NUMERIQUE

La campagne numérique consiste à modéliser l'événement de Saint Pancrasse (visite de terrain présentée au Chapitre 2) en définissant plusieurs scénarios :

- Aucune résistance au roulement n'est appliquée. La loi classique frottement + rebond est utilisée.
- Mise en place d'une résistance au roulement.

Les paramètres rhéologiques des simulations sont présentés dans le *Tableau 5.8*. Le versant réel étant particulièrement meuble, nous avons retenu des paramètres de frottement et de rebond très dissipatifs. Une première simulation a été réalisée avec ces paramètres sans faire appel aux paramètres de résistance au roulement. Dans un deuxième temps, des simulations complémentaires ont été engagées en intégrant la loi de résistance au roulement. Dans ce cas, les paramètres de contact sont choisis dans les plages identifiées comme aptes à arrêter les blocs d'après l'étude paramétrique de la section 4.2 du Chapitre 4. La valeur C_0 , par exemple, a été fixée à $1.7 \cdot 10^5$ N.m, ce qui correspond au C_0 calculé pour le bloc le plus grand modélisé. Deux autres valeurs de C_0 , une plus grande et une autre plus faible à la valeur de référence, ont été également testées (*Tableau 5.8*). Des valeurs de μ_R comprises entre 0.5 et 0.8 ont été retenues suite aux études paramétriques réalisées dans la section 4.2.

La raideur des contacts blocs-sol, qui conditionne en quelque sorte la déformation du sol au niveau de l'impact, a été limitée de sorte que l'interpénétration maximale possible au contact bloc-sol soit inférieure au rayon de Minkowski des éléments sphère-polyèdre, tel que décrit dans l'annexe C. Nous rappelons que la loi de résistance au roulement agit seulement lors d'un contact bloc-sol (versant). Pour les contacts bloc-bloc ou les contacts blocs-falaise rocheuse, la loi de résistance au roulement a été désactivée.

Paramètre	<i>Bloc-Bloc</i>	<i>Bloc-sol</i>
e_n^2	0.1	0.001
μ	1.2	1.2
k_n	$5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$
k_n / k_s	1.0	1.0
μ_R	-	[0 ; 0.5 ; 0.8]
k_R		$5 \cdot 10^{10}$
C_0		[0 ; $1.7 \cdot 10^4$; $1.7 \cdot 10^5$; $1.7 \cdot 10^6$]

Tableau 5.8. Paramètres rhéologiques de la loi d'interaction

5.3.3. DEFINITION DE LA GEOMETRIE DE LA FALAISE ET DU VERSANT DE PROPAGATION

La falaise et le versant de propagation ont été définis grâce à une campagne de reconnaissance par drone réalisée après éboulement en 2012. Un MNT d'une résolution finale de 10 cm a été obtenu en utilisant les procédures déjà décrites pour nos études antérieures sur site réel (*Figure 5.68*).

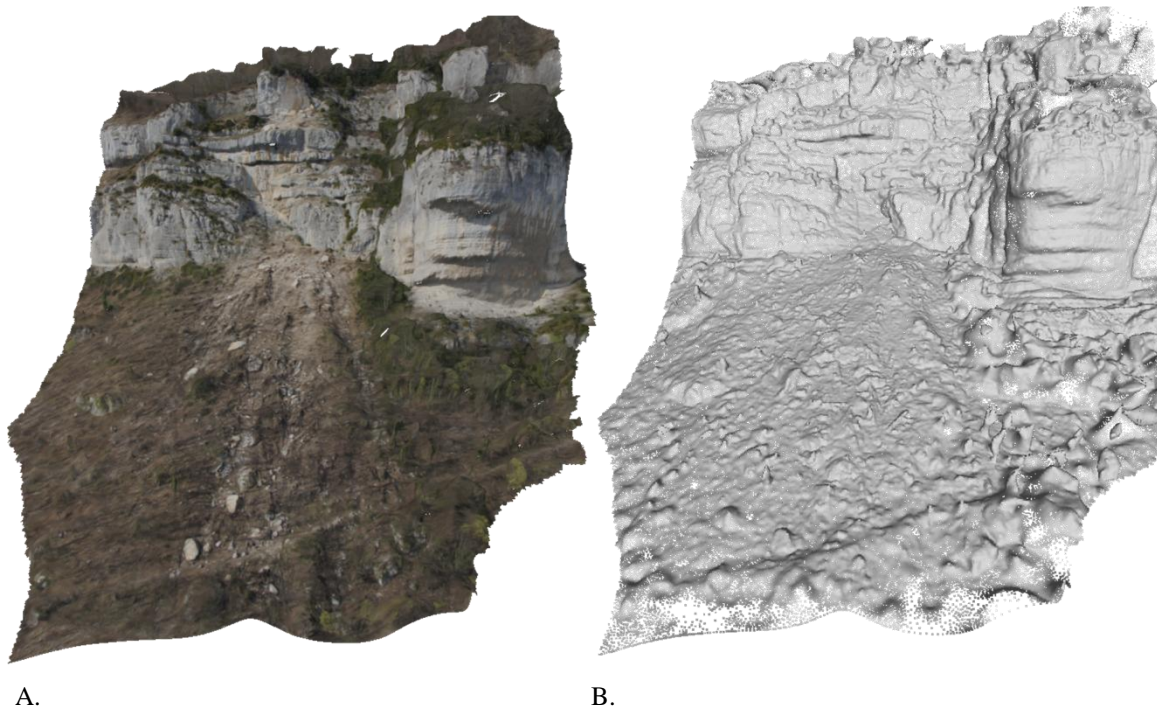


Figure 5.68. A. Vue – Orthophoto - de la zone d'éboulement. B. MNT de la zone d'éboulement, résolution 10 cm

Lors de la visite de terrain, nous avons constaté un versant très irrégulier comme conséquence du phénomène d'éboulement qui a détruit une partie importante de la végétation du site et généré la mise en dépôt de blocs de différentes tailles. Pour réduire l'effet de ces singularités dans les simulations numériques et définir un MNT réaliste qui correspond à la topographie du site avant éboulement, nous avons légèrement modifiée la géométrie du versant de propagation en enlevant certaines irrégularités géométriques observées dans le modèle. Cette procédure a été réalisée en comparant le modèle numérique avec les nombreuses photos du site publiées dans les revues d'escalade.

Concernant le dépôt de l'événement, il est difficile d'identifier une zone de dépôt unique compte tenu de l'étalement important des blocs sur le versant de propagation (*Figure 5.69*). Néanmoins, la nature meuble du sol permet d'identifier facilement trois régions caractéristiques du dépôt grâce, en partie, aux traces laissées par les blocs sur la pente : une première zone d'accumulation localisée seulement à quelques mètres de la paroi rocheuse (noté I sur la *Figure 2*) et deux couloirs de propagations, II et III, localisés sur chaque côté du versant de propagation pour lesquels on constate un nombre important de blocs arrêtés en partie basse de la pente. Ces trois zones caractéristiques seront utilisées comme référence dans l'analyse des résultats des simulations numériques.

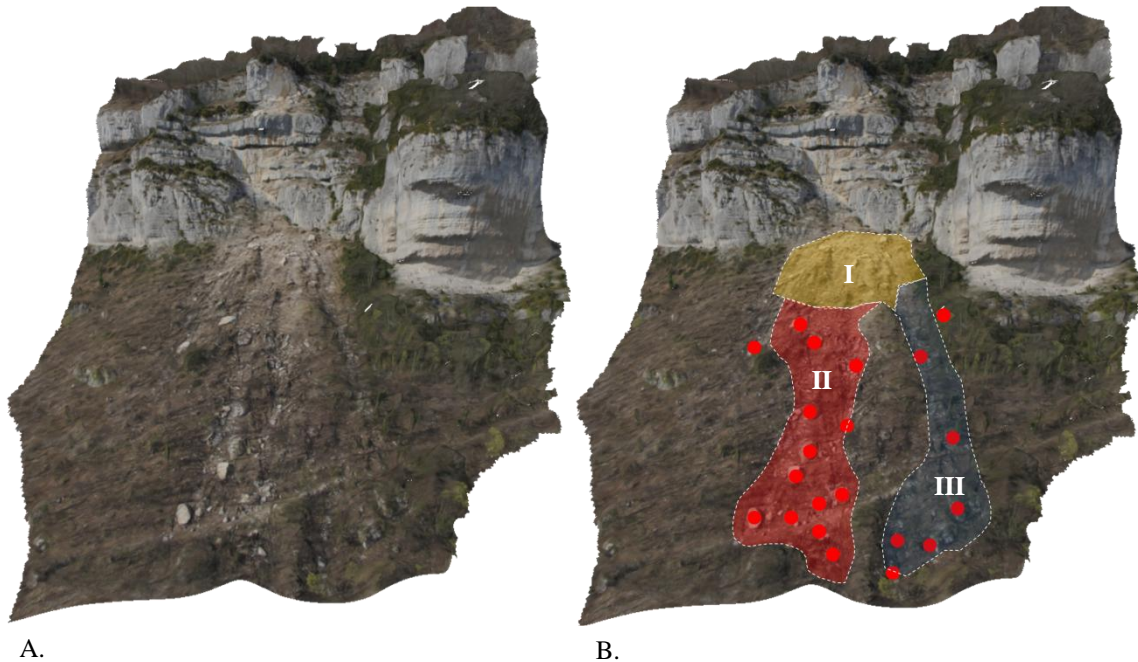


Figure 5.69. A. Vue – Orthophoto - de la zone d'éboulement et du dépôt. B. Description du dépôt de référence

Nous remarquons également qu'une dense végétation recouvrait le site avant éboulement, avec des arbres d'un diamètre moyen de 10 cm au voisinage de l'éboulement. Bien que cette forêt ait pu avoir une influence dans la propagation des blocs, la présence importante de blocs encastrés dans le sol nous laisse imaginer que la nature meuble du sol était prédominante sur ce site. La forêt n'a donc pas été prise en compte dans nos simulations numériques.

5.3.4. VOLUME INITIAL DE LA PARTIE INSTABLE ET FORMES DES BLOCS

Comme nous l'avons déjà présenté dans nos simulations précédentes, nous avons développé au cours de cette thèse une procédure numérique qui permet de définir un volume tridimensionnel complexe par intersection de volumes ou/et de modèles numériques de terrain. La cicatrice observée après éboulement et les différentes photos présentées dans des revues de montagne avant éboulement, nous ont permis de définir avec une bonne précision la zone de départ. Le volume de la zone instable a été ensuite estimé, par intersection d'un solide tridimensionnel avec le MNT de sorte à combler le vide, à environ 220 m³ (Figure 5.70).

En ce qui concerne la forme des blocs, nous avons également développée une démarche numérique qui permet de découper un volume tridimensionnel suivant plusieurs familles de discontinuités. Cette démarche est présentée numériquement au Chapitre 3. Nos études paramétriques sur le site de Millau nous ont montré que les blocs dont la forme se rapproche d'un cuboïde ont tendance à se propager sur des distances plus importantes et à développer des vitesses de rotation plus importantes du fait de sa proximité à une sphère. Le dépôt d'éboulement rencontré à Saint Pancrasse étant composé de blocs dont la forme est relativement proche d'un cube, nous avons décidé de découper le volume de départ par des plans orthogonaux (Figure 5.71) de telle sorte que le volume des blocs varie entre 0.8 et 4.8 m³ avec un volume moyen compris entre 1.5 et 2 m³.

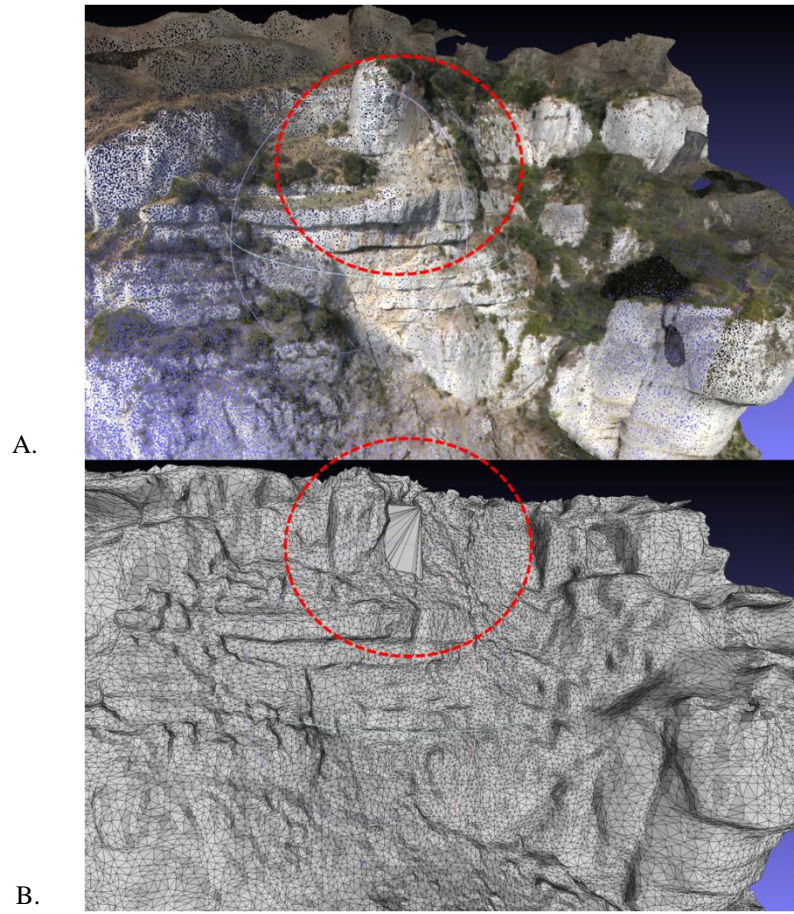


Figure 5.70. A. Vue de la zone de départ après éboulement. B. reconstruction numérique de la zone de départ – géométrie supposée avant éboulement

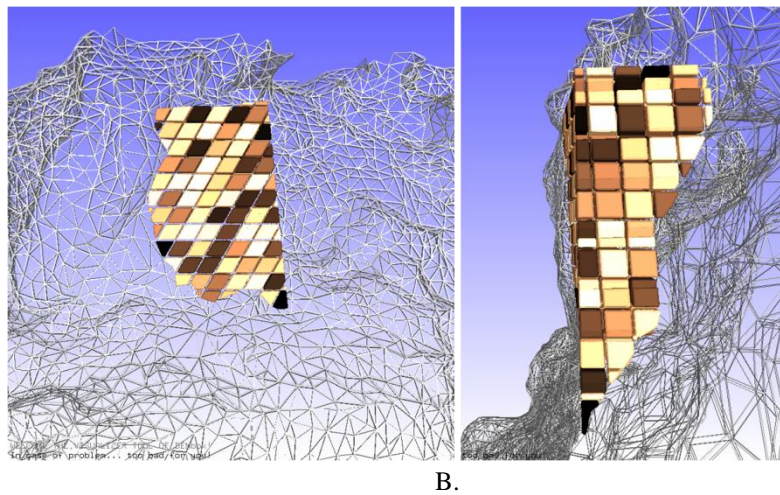


Figure 5.71. Découpage du volume de départ

5.3.5. ANALYSE DE LA PROPAGATION ET DE LA CINEMATIQUE DES BLOCS DE L'ÉBOULEMENT

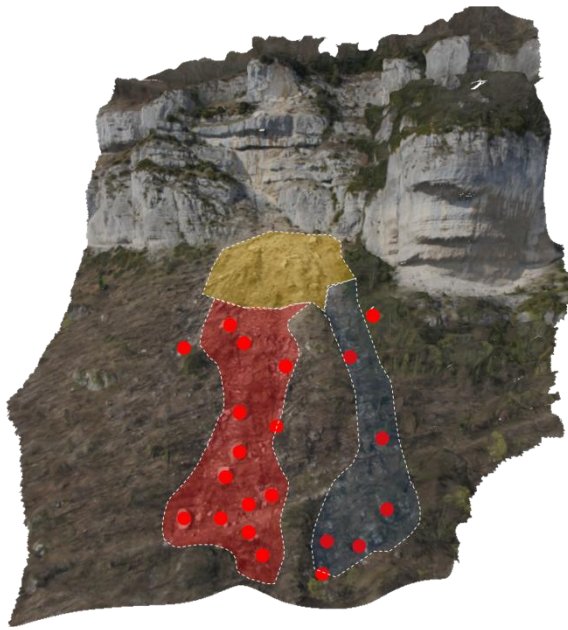
Dans un premier temps, nous cherchons à analyser le comportement de l'éboulement rocheux lorsqu'aucune résistance au roulement au contact bloc-sol n'est considérée. Dans ces conditions, et pour un temps de simulation de $t = 20$ s, nous constatons que 45 des 86 blocs modélisés sortent des limites géométriques du MNT, tandis que les autres blocs continuent à se déplacer sur le versant de propagation avec une vitesse de translation moyenne dans la direction de la pente d'environ 9.1 m/s (*Figure 5.72B*). Ceci laisse supposer que pour un temps plus important de la simulation, la totalité des blocs sort complètement des limites du modèle numérique de terrain.

μ_R	0	0.5	0.8	
Blocs restés sur le versant à $t = 20$ s	45/86	75/86	82/86	
Vitesse de translation moyenne à $t = 20$ s (m/s)	9,1	0.25	0.13	
$C_0 (N.m)$	0	$1.7 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^6$
Blocs restés sur le versant à $t = 20$ s	45/86	71/86	75/86	78/86
Vitesse de translation moyenne à $T = 20$ s (m/s)	9,1	0.02	0.001	0.02

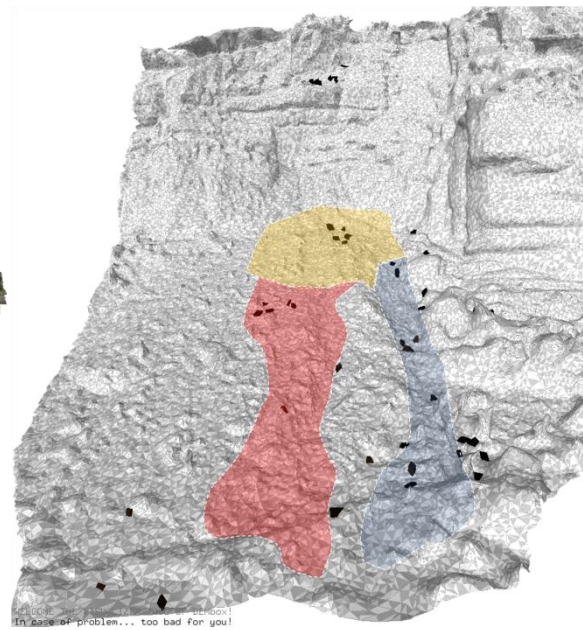
Tableau 5.9. Nombre de blocs immobilisés sur le versant de propagation pour chaque simulation

Pour les configurations faisant appel aux paramètres de résistance au roulement (noté μ_R sur la *Figure 5.72*) nous constatons que, pour la même durée des simulations, le nombre de blocs sur le versant de propagation est beaucoup plus important sans néanmoins atteindre la totalité des blocs modélisés (*Tableau 5.9*). De même, nous remarquons que la quasi-totalité de ces blocs se sont arrêtés sur le versant comme on peut le constater via la position du centre de masse et les bilans cinématiques en translation et en rotation des blocs présentés respectivement sur les *Figures 5.73A* et *5.73B* et les *Figures 5.74A* et *5.74B* pour l'ensemble des simulations effectuées. En ce qui concerne la position des blocs sur le versant, nous observons sur les *Figures 5.72C* et *5.72D*, que pour les configurations où la valeur de μ_R est importante, la position de la plupart des blocs est cohérente avec les observations sur site. Ceci s'explique aisément compte tenu du fait que plus la valeur de μ_R est grande plus le moment de résistance au roulement est important (comme précisé au chapitre 4) ce qui se traduit par l'arrêt des blocs dans la région I et ce quel que soit la valeur du paramètre C_0 .

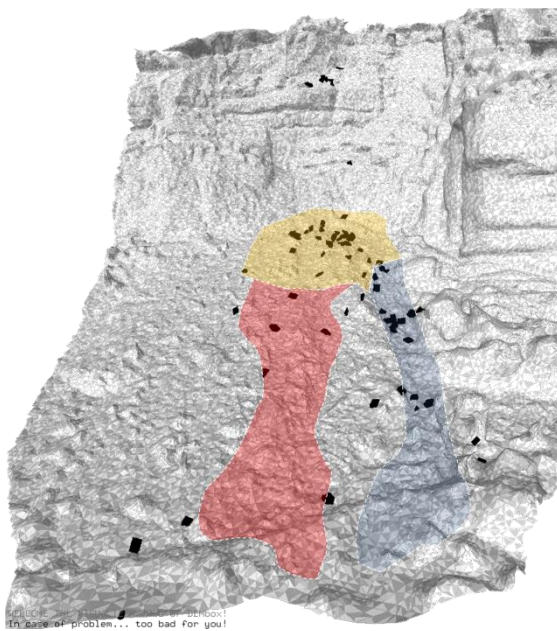
Un autre aspect intéressant porte sur la position d'arrêt de certains blocs dans le dépôt, notamment ceux de volume faible. En effet, la valeur de C_0 a été estimée en utilisant la masse du bloc le plus grand de sorte que l'on aurait pu penser que les distances de propagation des blocs de faible volume soit plus faibles compte tenu que le moment minimal de résistance au roulement de ces blocs (C_0) est être très élevé par rapport à leur masse. Nonobstant, nous constatons que le front de l'éboulement est composé de blocs de toutes tailles ce qui montrerait que la trajectoire critique de certains blocs ne dépend pas uniquement que de la résistance au roulement. Cette affirmation se base également sur les résultats présentés dans le *Tableau 5.9* où l'on observe que des blocs sortent des limites du modèle même lorsque l'on impose des valeurs importantes aux paramètres de roulement. De fait, environ 6% des blocs modélisés sortent des limites du MNT pour la configuration la plus dissipative.



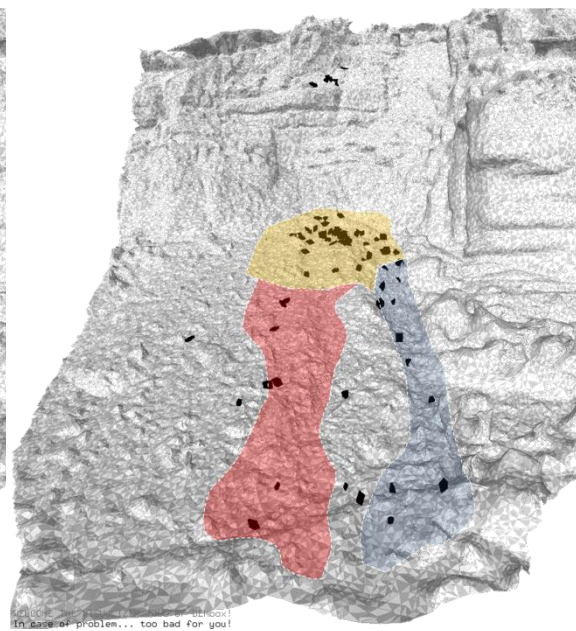
Orthophoto



Sans résistance au roulement

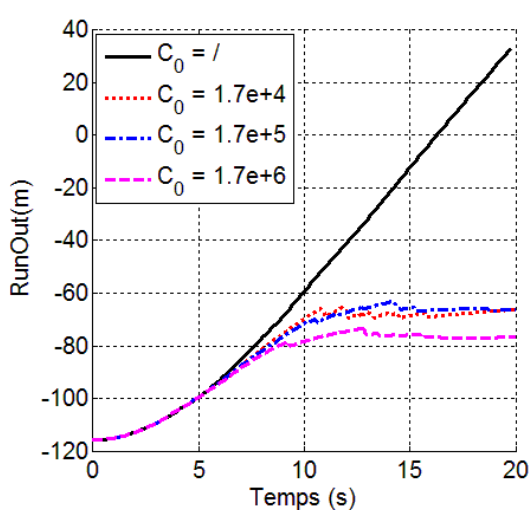


$\mu_R = 0.5$ et $C_0 = 1.7 \cdot 10^6$

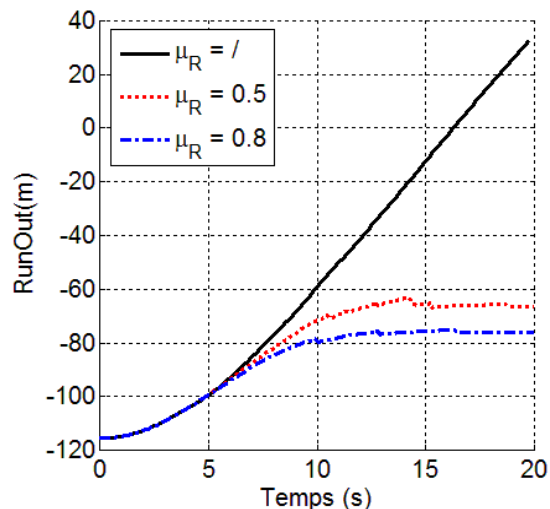


$\mu_R = 0.8$ et $C_0 = 1.7 \cdot 10^5$

Figure 5.72. A. Photo du site avec le dépôt de référence. B. Dépôt numérique sans résistance au roulement. Position des blocs au temps $t = 20$ s. C. Dépôt numérique avec $\mu_R = 0.5$. Position des blocs au temps $t = 20$ s. D. Dépôt numérique avec $\mu_R = 0.8$. Position des blocs au temps $t = 20$ s

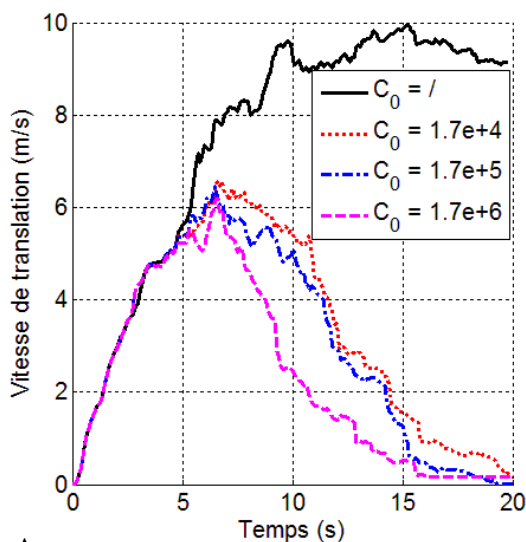


A.

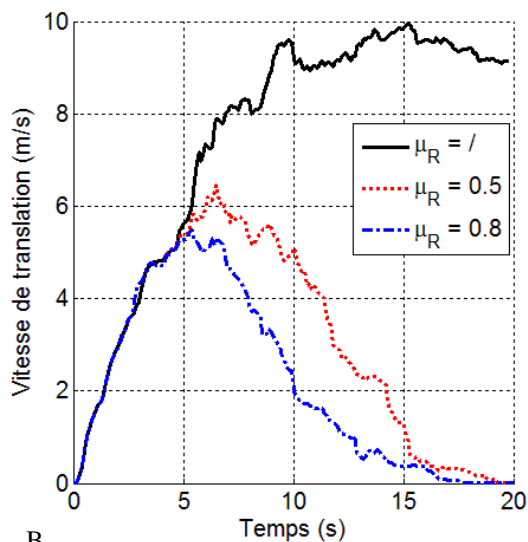


B.

Figure 5.73. Propagation dans la direction X du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différents valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)



A.



B.

Figure 5.74. Vitesse de translations dans la direction X du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)

Pour essayer de comprendre comment agit la loi de résistance au roulement sur la propagation d'un bloc isolé nous avons décidé de suivre la trajectoire dans le plan X-Y du premier bloc qui impacte le versant de propagation (Figure 5.76). Nous remarquons sur cette figure que l'influence des paramètres de la loi de résistance au roulement s'observe très nettement à partir du 2^{ème} rebond. En fait, lors du premier rebond le bloc isolé n'est pas animé d'une vitesse de rotation et donc est très peu influencé par les paramètres de la loi de résistance au roulement. Ceci n'est plus vrai au second rebond d'où les écarts significatifs constatés. On notera également que pour des valeurs importantes des paramètres de la loi de résistance au roulement, le bloc est parfois immobilisé sur la pente.

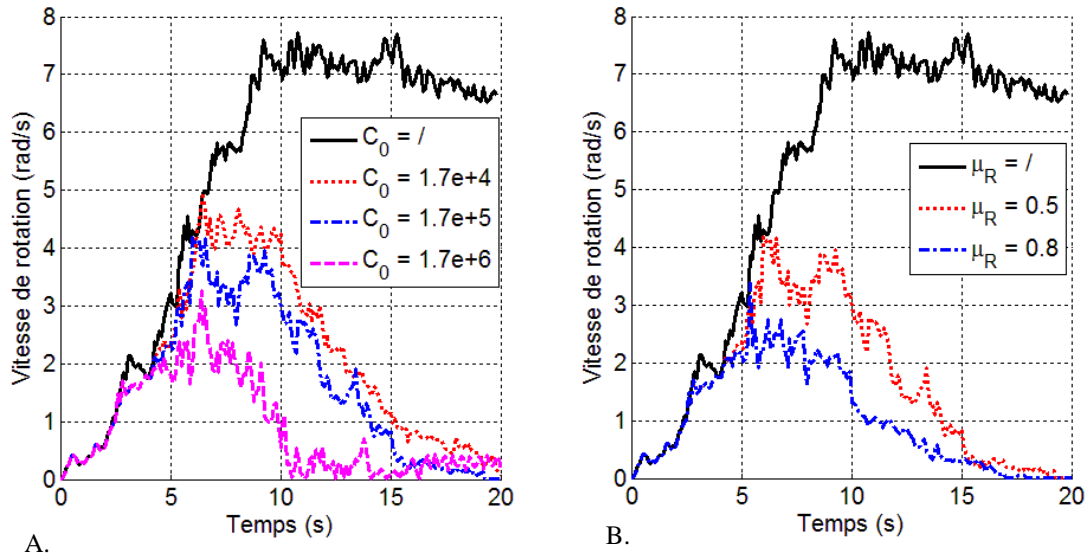


Figure 5.75. Vitesse de rotation du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)

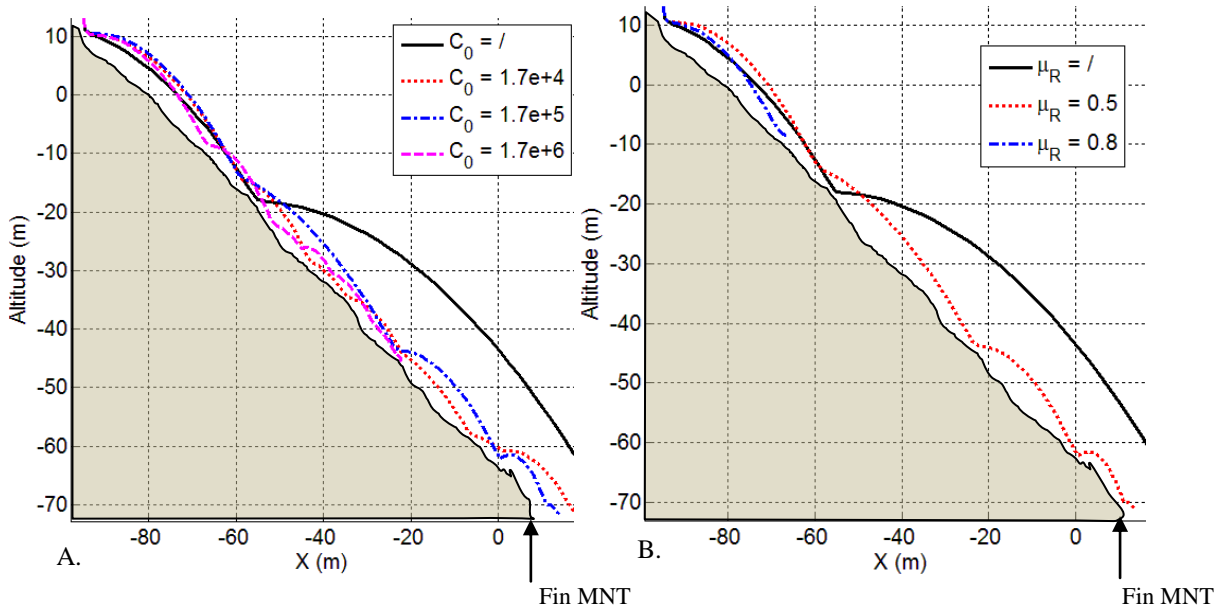


Figure 5.76 Trajectoire du centre de masse du premier bloc impactant le versant de propagation A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)

CONCLUSION

Sur l'étude paramétrique

Pour réduire le moment en rotation des blocs et permettre leur immobilisation sur la pente en présence de fortes pentes, nous proposons une loi de résistance au roulement basée sur deux paramètres rhéologiques (μ_R et C_0). Sur site réel, cette composante en rotation est souvent restituée par le sol lorsque celui est meuble, les blocs pouvant s'encastrent facilement dans ce type de supports.

Une première étude paramétrique de la loi de résistance au roulement appliquée à un événement réel a été présentée dans cette section. Les résultats obtenus montrent que la mise en place d'une loi de résistance au roulement peut suffire pour décrire la propagation de la plupart des blocs dans des sols très meubles sans avoir besoin de décrire de façon exhaustive la géologie des matériaux au sous-sol. Cependant, nous avons observé que des blocs isolés ayant des formes cubiques peuvent se propager sur des distances bien plus importantes que celles observées sur site réel, même lorsque l'on utilise des paramètres fortement dissipatifs.

Sur la loi de résistance au roulement

Nous avons consacré une partie importante de cette thèse à la définition physique de cette loi rhéologique et à son intégration dans le modèle numérique. Nous ne présentons ici que l'une des différentes définitions physiques que nous avons imaginées pour rendre compte de ce phénomène, celle-ci donnant les résultats les plus intéressants vis-à-vis du phénomène observé à Saint Pancrasse. La principale conclusion de cette étude est qu'il est en effet possible de rendre compte de la propagation d'un éboulement en masse sur un sol meuble par le biais d'un coefficient dissipatif en rotation. Néanmoins, ces premières simulations doivent motiver la réalisation d'études complémentaires pour conforter les premiers résultats obtenus en prenant en compte d'autres types de sols ou d'autres géométries du MNT. On peut penser également que la prise en compte de la végétation pourrait avoir un rôle non négligeable sur la propagation des blocs pour des configurations géométriques proches de celle de Saint Pancrasse.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse peut être vue comme une continuation des avancées réalisées dans le cadre du projet européen MASSA entre 2008 et 2012 dans la modélisation discrète des avalanches et des éboulements rocheux en masse, avec une application à des cas réels. Un cahier des charges précis a été défini en début de thèse et comportait principalement 4 objectifs principaux :

1. Etendre la méthodologie adoptée pour les essais de laboratoire à des événements réels.
2. Enrichir le modèle numérique pour prendre en compte des géométries des blocs et de versant rocheux réalistes mais aussi l'éventuelle interpénétration des blocs avec le versant de propagation en présence de matériaux meubles et les mécanismes dissipatifs qui en résultent.
3. Améliorer le caractère prédictif du modèle numérique notamment par la définition des zones impactées.
4. Estimer les interactions (forces et énergies d'impact) sur les structures de protection pour en permettre le dimensionnement (merlon de protection, tas freineurs ou tournes).

Pour faire un bilan clair des travaux engagés et des résultats obtenus, cette conclusion est divisée en quatre parties : la première vise à présenter la méthodologie utilisée pour répondre aux objectifs fixés avec un intérêt particulier sur les aspects nouveaux issus de cette thèse. La deuxième partie abordera les conclusions phénoménologiques auxquelles nous sommes arrivés, la troisième portera sur les enseignements tirés sur la modélisation des éboulements réels et une dernière quatrième partie visera à faire le point sur les limitations de l'approche utilisée et des perspectives possibles.

Sur la méthodologie utilisée

La finalité de ces travaux étant d'appliquer le modèle numérique à des cas réels nous avons dans un premier temps recherché des sites faciles d'accès, de géométrie simple, et pour lesquels il était possible d'obtenir suffisamment d'informations pertinentes pour envisager une modélisation numérique. Au préalable, des études paramétriques ont été menées pour tester les capacités du modèle numérique à rendre compte des mécanismes de propagation et afin de définir quelles étaient les données essentielles à recueillir sur le terrain. Un total de 5 sites caractéristiques de phénomènes très différents d'éboulement en masse ont été visités tout au long de la thèse et trois ont été modélisés numériquement (repérés par *) :

- Chaîne de la Chartreuse - Mont Néron
- Massif du Vercors - Mont Ruchières
- *Massif Central – Millau
- *Massif de la Chartreuse – Saint Pancrasse
- *Massif du Vercors - Perrières

Une fois les sites définis, plusieurs sorties techniques de terrain ont été réalisées ayant comme objectif la prise de données pour la campagne numérique. En ce qui concerne les moyens matériels, nous avons utilisé des drones pour les prises d'images aériennes. A ce propos et d'après notre

expérience, nous considérons que les drones offrent des très bons résultats avec de très bonnes résolutions de terrain de l'ordre du centimètre avec une prise en main de l'engin assez rapide. Cependant, il a été observé que la méthode s'avère très peu adaptée en présence de falaises très végétalisées et des améliorations dans la méthode sont encore nécessaires. De ce fait, pour les sites de Saint Pancrasse et Perrières, ayant une très faible végétalisation du versant, nous avons récupéré des maillages assez précis sur toute la surface de propagation. Pour Millau, la présence de quelques arbustes sur le versant ont rendu difficile l'acquisition d'un Modèle Numérique de Terrain qui a nécessité des procédures de lissage pour améliorer les informations tridimensionnelles sur certaines parties du versant. Il a également été nécessaire d'enlever les blocs de l'éboulement en suivant un protocole spécifique afin de reproduire au mieux la possible morphologie du versant avant éboulement. Pour ce faire, nous avons utilisé les codes OpenSource MeshLab et Blender et avons testé également le logiciel commercial « Sketchup » qui s'est avéré moins efficace dans les manipulations tridimensionnelles, notamment dans la création des solides tridimensionnels complexes et dans les procédures d'intersection de type « Booleans », déjà intégrés dans l'outil Blender par exemple. Suite à ces travaux, nous avons élaboré une procédure de traitement de falaises tridimensionnelles et de création de solides complexes issus d'un maillage photogrammétrique qui est aujourd'hui opérationnelle. Une notice de fonctionnement de ces outils a été spécialement élaborée pour faciliter leur utilisation et interaction avec DEMbox dans des applications aux risques rocheux.

Des mesures de type GPS des positions des blocs sur les dépôts d'éboulements (pour les sites dont l'éboulement avait déjà eu lieu) ont également été réalisées ce qui nous a permis de créer une base de données précise et bien documentée pouvant être utilisée par ailleurs.

Sur la rhéologie et les conditions initiales

Nous avons consacré une partie importante de notre travail de thèse au développement de l'outil numérique afin d'introduire une rhéologie de contact adéquate et pour prendre en considération des formes de blocs réalistes. La loi rhéologique utilisée se veut minimaliste pour en définir aisément les paramètres et comporte principalement :

- Un paramètre de restitution normale, qui agit dans la direction normale au contact,
- Un paramètre de frottement, qui agit dans la direction tangentielle au contact.

Nous avons ajouté un paramètre supplémentaire au cours de ce travail :

- Un paramètre de résistance au roulement qui agit lors d'un contact entre le bloc rocheux et le versant de propagation et qui crée un moment résistant dans la direction contraire à la rotation des blocs et ce notamment pour décrire le comportement d'un bloc lorsque celui-ci impacte un sol meuble.

Le modèle rhéologique de contact a été testé dans des cas simples comme la chute verticale d'un ou plusieurs blocs sur un support horizontal, ou la propagation d'un bloc anguleux sur un support très raide. Suite à ces études, nous avons observé que :

- Un modèle multi blocs, bien que proche en termes de bilan énergétique d'un modèle monobloc, peut influencer considérablement la nature des rebonds du fait d'un transfert d'énergie cinétique entre les blocs qui permettrait à certains d'entre eux d'avoir des rebonds plus importants. Il est par ailleurs très complexe (voire inapproprié) de modéliser le comportement multi blocs avec une approche monobloc.
- Il est recommandé de modéliser le substratum comme une condition aux limites (dont les paramètres d'interaction garantissent un taux de dissipation d'énergie à chaque impact constant et bien maîtrisé plutôt que de modéliser le substratum comme un milieu granulaire (constitué de sphères par exemple) ou la maîtrise de l'énergie à l'impact s'avère beaucoup plus complexe (avec notamment une partie de l'énergie qui peut être stockée par le sol et qui peut influencer le phénomène de propagation de blocs rocheux). D'un point de vue pragmatique, modéliser le substratum est également une pratique qui peut être couteuse en temps de calcul compte tenu d'un nombre de blocs important à considérer, et de ce fait incompatible avec les exigences d'un bureau d'études par exemple.
- Les mécanismes de dissipation d'énergie par frottement sont particulièrement dépendants des caractéristiques géométriques des éléments en interaction, notamment de la rugosité du versant de propagation et des blocs. En règle générale, plus les surfaces sont régulières (ou lisses) plus la part d'énergie dissipée par frottement basal est importante. Les transitions brusques ou faiblement arrondies, par exemple, perturbent la cinématique des blocs et accentuent les mécanismes de rotations des blocs et de dissipation d'énergie par chocs, réduisant la distance de propagation des blocs. A ce propos, des informations précises sur les quantités d'énergie dissipées au sein de la masse rocheuse lors d'une transition brusque ont été obtenues pouvant contribuer à l'amélioration des modèles de type continu qui sont à l'heure actuelle incapables de décrire certains comportements (notamment en présence des changements brusques de la topographie) compte tenu de leurs rhéologies très simplifiées qui concentrent les dissipations à l'interface sol/écoulement.
- On a constaté lors des visites de terrain que les distances de propagation des blocs rocheux dépendent de la géométrie des blocs mais également du type d'interaction entre le versant de propagation et le bloc rocheux notamment lorsque le sol est meuble et se déforme beaucoup lors de l'impact. Lorsqu'un ensemble de blocs se propagent sur une pente rigide, peu rugueuse et de forte pente selon leur forme, les blocs peuvent s'accélérer au cours de la propagation par l'existence d'un moment dû au poids propre, et ce même si l'on introduit des fortes dissipations par frottement. En revanche, en présence d'un versant de propagation très meuble, le bloc s'encastre dans le sol et va l'immobiliser sur de très courtes distances de propagation, tel qu'il a été observé sur le site de Saint Pancrasse. Nous avons montré dans cette thèse qu'il était possible de modéliser ce phénomène par le biais d'un coefficient de résistance au roulement qui agit d'une façon similaire à la loi de frottement mais en rotation. Les résultats obtenus pendant la thèse montrent que cette nouvelle loi est suffisante pour rendre compte de ce phénomène d'arrêt en présence de sols meubles bien que cette loi reste très dépendante de la forme du bloc et de la durée des contacts avec le substrat. En effet, nous avons montré qu'il était, par exemple plus facile d'arrêter en rotation une forme ronde plutôt qu'une forme

anguleuse du fait que le contact est persistant sur la première tandis que pour la deuxième le contact est souvent perdu à chaque rotation.

Ces premières conclusions nous ont permis de mieux définir le cadre des simulations sur site réel, comme notamment:

- Choisir une résolution du maillage cohérente avec la géométrie du versant observé sur site réel,
- Définir des formes de blocs réalistes pour lesquelles l'expérience et la pratique nous ont montré qu'il existerait une corrélation directe entre les formes des blocs et le réseau de fractures initial de la falaise,
- Appliquer une loi de résistance au roulement de façon maîtrisée pour les sites comportant des sols très meubles sur la pente.

Sur la modélisation des éboulements réels et des ouvrages de protection de type merlon

Nous avons modélisé numériquement trois cas réels d'éboulements en masse pour lesquels nous avons réalisé plusieurs études phénoménologiques qui nous ont permis de comprendre que :

Par rapport aux paramètres de contact :

- Le paramètre de restitution e_n^2 est le paramètre le plus sensible avec une influence tant sur la cinématique de la masse principale que sur la cinématique des blocs isolés. En ce qui concerne les paramètres de frottement, nous avons observé que le frottement dans la masse (entre les blocs) est négligeable si l'on s'intéresse à la propagation et à la géométrie de la masse principale mais a une influence importante dans l'étude de la propagation des blocs isolés.
- En présence de sols très meubles, nous avons observé qu'il était possible d'arrêter en rotation un grand nombre de blocs via la loi de résistance au roulement avec une certaine maîtrise des paramètres acquises suite aux études paramétriques réalisées sur des configurations simplifiées. A ce propos, nous avons également observé que cette loi est particulièrement sensible aux effets de forme des blocs : plus les blocs sont anguleux, plus il est difficile de les arrêter, ce qui demande une analyse plus approfondie de ce phénomène dans les travaux à suivre.

Par rapport à la granulométrie de l'événement :

- Il a été observé que le nombre de blocs impliqués dans un phénomène d'éboulement a une influence très importante sur les distances de propagation des blocs isolés mais une influence faible dans la propagation du dépôt principal d'éboulement en raison des transferts d'énergie d'un bloc à un autre. En règle générale, plus il y a de blocs plus il est probable d'avoir de la dispersion et des distances de propagation des blocs isolés importantes. Cependant, les aspects géométriques des blocs ont également une énorme influence dans le phénomène de propagation et de dissipation d'énergie.

- Notre expérience sur site réel nous a montré que, dans la plupart des cas, les discontinuités de la falaise instable définissent les formes des blocs. Autrement dit, la géométrie initiale, la persistance et la fréquence des surfaces de discontinuités ont un rôle majeur dans la définition de la forme des blocs propagés et de ce fait sur le phénomène de propagation. Cependant, et après avoir testé plusieurs configurations, nous avons observé que le type de matériau de remplissage des discontinuités a une faible influence sur la genèse du phénomène de propagation des éboulements rocheux. En revanche, le degré de fracturation du massif rocheux qui a une incidence sur la granulométrie de l'éboulement et le nombre de blocs est de première importance.

Par rapport au versant de propagation :

- Nous avons observé que les aspects géométriques du versant de propagation (caractérisés numériquement par la résolution des mailles tridimensionnelles) ont une grande influence dans le phénomène de propagation des blocs et sur les modes de dissipation d'énergie. Par rapport à la possibilité d'optimiser un calcul en réduisant la résolution d'un maillage, nous avons observé que changer la résolution d'un maillage tridimensionnel peut signifier, dans certaines situations, un changement significatif dans la géométrie de surface et la rugosité d'un terrain, qui sont des caractéristiques dont la propagation s'avère particulièrement dépendante. Cependant, et pour rester objectif, nous ne pouvons pas donner une résolution optimale du versant de propagation pour la modélisation des éboulements en masse. Nous pensons que la résolution à considérer varie d'un site à l'autre, en fonction des irrégularités présentes sur chaque site. Notre recommandation aujourd'hui est de choisir une résolution qui tienne compte des aspects géométriques les plus importants sans exagérer la finesse du maillage qui conduirait à des temps de calcul prohibitifs ni dans une simplification extrême qui serait préjudiciable au caractère prédictif du modèle.

Par rapport à l'interaction ouvrage/éboulement :

- Nous avons conçu un modèle numérique capable de générer facilement un ouvrage de protection de type merlon pour lequel nous pouvons déterminer les énergies et les positions d'impacts pendant toute la durée de la simulation. En termes de hauteur de passage, nous avons observé que la performance des ouvrages de protection est particulièrement sensible à la granulométrie des blocs. En effet, et pour un même volume effondré, un ouvrage de protection s'avère plus performant en présence de blocs de petite taille que de blocs de plus grande taille qui sont plus sujets à avoir des rebonds importants. Par rapport à l'impact, nous avons observé que les blocs de volume faible possèdent en moyenne des vitesses d'impact plus importantes que les blocs de volume important. La méthode développée est opérationnelle et d'autres configurations sont à analyser avec attention pour mieux comprendre l'apport de ce type d'ouvrage dans le phénomène d'arrêt des blocs rocheux en masse.

Par rapport aux paramètres de simulation :

- D'un point de vue de performance numérique, nous avons observé qu'il était possible d'utiliser le pas de temps critique classique de la DEM (tel qu'il est présenté dans l'annexe C) dans la modélisation des éboulements rocheux dans DEMbox sans avoir de modifications

significatives dans le phénomène de propagation comparativement à des simulations avec des pas de temps plus faibles. Les autres paramètres de simulation tels que le rayon de voisinage, la méthode d'intégration, sont des paramètres déjà bien maîtrisés.

Enfin, ces simulations nous ont permis d'avoir accès à des informations très intéressantes comme la dissipation d'énergie ou nous avons observé que les paramètres de contact ont une influence plus importante dans la façon dont l'énergie est dissipée (par frottement/contact) plutôt que sur la quantité d'énergie totale dissipée. Par exemple dans la zone de premier impact entre les blocs et le versant de propagation, environ 40% de l'énergie totale est dissipée, et quelque soit la valeur des paramètres de contact et la géométrie des blocs.

Limitation du modèle et perspectives

Les principaux problèmes rencontrés lorsque l'on utilise un modèle numérique portent sur la difficulté de décrire une certaine réalité physique. Pour cela, et dans le sujet qui nous concerne, nous faisons appel à des lois rhéologiques simplifiées qui nous permettent de reproduire grossièrement ce qui se passe réellement dans la nature. Bien que notre modèle semble moins sensible aux paramètres de contact qu'un logiciel trajectographique par exemple (ou il est avéré qu'une très petite variation du coefficient de restitution ou de la valeur de l'angle d'incidence à l'impact change complètement la trajectoire des blocs) il nécessite une expertise dans son utilisation et dans la définition de ses paramètres. Il est clair qu'une des limitations du code de calcul porte sur la difficulté de choisir et de mesurer les paramètres de contact et sur l'existence d'un nombre réduit de sites retro-analysés à la date d'aujourd'hui.

D'un point de vue pragmatique, bien que les temps de calcul soient aujourd'hui moins importants qu'au début de la thèse, nous sommes conscients qu'ils s'avèrent encore importants dans une pratique courante en bureau d'études. A titre d'exemple, une simulation comportant 1 000 blocs rocheux anguleux et un maillage tridimensionnel de Modèle Numérique de Terrain avec plus de 50 000 triangles peut prendre de l'ordre d'une semaine de calcul. Dans une telle situation, il est indispensable de bien maîtriser le code et de s'assurer du besoin d'un calcul aussi complexe.

Au cours de cette thèse, nous avons principalement travaillé sur trois sites très différents mais représentatifs des principaux événements d'éboulement rocheux en masse (propagation ou effondrement d'un pan rocheux) comportant des formes de blocs très complexes, des versants de propagation très rugueux, des sols meubles et des pans de falaises très fracturés. Nous sommes arrivés à développer un outil très puissant en termes de capacité à reproduire la réalité avec le développement d'outils permettant l'importation de géométries complexes avec la possibilité de discrétiser des blocs en respectant la géométrie de la masse rocheuse instable.

D'un point de vue rhéologique, nous avons validé la loi d'interaction initialement proposée par (Banton, 2009b) et avons introduit un nouveau paramètre de résistance au roulement qui s'avère très prometteur. A ce stade des recherches il convient de poursuivre les travaux engagés et de les étendre à d'autres sites pour accroître la fiabilité et le caractère prédictif du code de calcul développé. L'objectif à long terme serait d'utiliser le logiciel de la même façon qu'un code trajectographique avec une parfaite maîtrise de la rhéologie des matériaux et une expertise plus élargie de la part des utilisateurs.

Nos résultats ont montré que pour la plupart des cas d'avalanche rocheuse on observe une masse compacte où les blocs interagissent fortement les uns avec les autres et un ensemble de blocs isolés qui interagissent sporadiquement avec le versant de propagation. Une des perspectives de ce travail porterait sur la possibilité de créer un code hybride éléments discrets/ trajectographique afin de modéliser la partie en masse avec la méthode discrète puis d'utiliser une démarche « trajectographique » voire stochastique pour les blocs isolés. Cette démarche permettrait d'introduire les mécanismes de transfert d'énergie d'un bloc à l'autre résultant d'un comportement collectif dans la propagation des blocs isolés ainsi qu'un comportement stochastique de ces blocs ce qui pourrait contribuer à améliorer la définition du risque associé à ces phénomènes.

Il serait également intéressant de prendre en considération dans la modélisation les dépôts de blocs préexistants et précédents. En effet, nous avons observé dans la nature plusieurs cas d'accumulation de blocs sur des talus qui deviennent instables avec le temps suite à des chutes répétées de blocs. L'objectif d'une telle analyse porterait sur la possibilité de prédire le mouvement et l'entraînement de ces dépôts lorsqu'un phénomène gravitaire rocheux nouveau se présente. De plus, des actions préventives telles que les purges mécaniques ou le minage d'écaillés rocheuses pourraient également être analysés avec notre code.

Ces travaux collaboratifs vont être étendus et se poursuivre dans un avenir proche, très probablement avec une nouvelle thèse, dans le cadre du projet national C2ROP.

ANNEXE A

Valeurs usuelles des coefficients de restitution rencontrés dans la littérature

Les valeurs des coefficients de restitution présentées dans cette annexe sont issues de la bibliographie. Elles ont été obtenues suite à des expérimentations de laboratoire (le plus souvent sur plan incliné) ou à des mesures in situ (purges ou expérimentations spécifiques). Par simplicité, de nombreux auteurs ont décidé de réaliser ces expériences en utilisant des géométries de blocs simples (généralement des cubes ou des sphères).

Les paramètres de restitutions sont définis de façon multiple mais le plus souvent par les équations [6, 7, 8], présentées dans le Chapitre 1. De fait, les vitesses avant et après impact sont généralement prises en compte, et dans certains cas, l'inertie du corps pour les paramètres de résistance au roulement.

Les vitesses d'impact, l'inclinaison du versant de propagation, l'angle d'impact, la hauteur de chute sont très variables d'un essai à l'autre si bien qu'il a été démontré que pour un même sol le ou les coefficients de restitution peuvent prendre des valeurs très différentes.

Référence	Rn	Rt	RTE	Remarques	
Habib (1977)	0,75-0,80			Essais en Italie	Laboratoire
	0,5-0,6			Essais en Norvège	
Piteau et Clayton (1977)	0,8-0,9	0,65-0,75		Roche	
	0,5-0,8	0,45-0,65		Eboulis et gros blocs	
	0,4-0,5	0,35-0,45		Eboulis et petits blocs	
	0,2-0,4	0,2-0,3		Terrain meuble	
Wu (1985)	0,2-0,8	0,5-0,75		Roche	
Bozzolo et Pamini (1986)			0,7	Roche	
			0,55	Eboulis	
Hoek (1987)	0,53	0,99		Roche mère	
	0,4	0,9		Asphalte	
	0,35	0,85		Affleurements rocheux et gros blocs	
	0,32	0,82		Eboulis	
	0,32	0,8		Eboulis végétalisé	
	0,3	0,8		Terrain meuble végétalisé	
Urciuoh (1988)	0,05-0,35	0,5-0,1		Calcaire	
	0	0,24		Eboulis lâche	
Pfeiffer et Bowen	0,37-0,42	0,87-0,82		Surfaces dures - roche route	

(1989)	0,33-0,37	0,83-0,87		Blocs
	0,30-0,33	0,83-0,87		Eboulis
	0,30-0,33	0,80-0,83		Eboulis avec végétation
	0,28-0,32	0,80-0,83		Terrain meuble
	0,28-0,32	0,78-0,82		Terrain meuble avec végétation
Giani (1992)	0,5	0,95		Roche
	0,35	0,85		Affleurements rocheux et gros blocs
	0,3	0,7		Eboulis uniforme
	0,25	0,55		Terrain meuble avec végétation
Evans et Hungr (1993)	0,9	0,9		Petits blocs sur roche mère
	0,7	0,8		Gros blocs sur éboulis
Azzoni et de Freitas (1995)			0,75-0,9	Calcaire
			0,55-0,6	Eboulis et compact
			0,35-0,45	Eboulis et lâche
			0,45-0,50	Eboulis et blocs
			0,4-0,5	Eboulis et arbres couchés
			0,55-0,70	Eboulis grossier
			0,5-0,6	Terrain meuble avec végétation
			<0,20	Fossé
			0,5-0,65	Sol compacté
		0,75	Route	
Gerber (1995)	0,17-0,43	0,45-0,88		Calcaire
Kamijo et al, (2000)	0,1-0,35			Surface dure (impactant 220Kg)
	0,1			Surface dure (impactant 800Kg)
Ushuro et al, (2000)	0,1-0,40	0,71		Pas d'info
Jones et al, (2000)	0,60-1,0	0,9-1,0		Surface dure
	0,15-0,30	0,75-0,95		Roche et blocs
	0,12-0,20	0,65-0,95		Eboulis
	0,1-0,2	0,5-0,8		Terrain meuble
Budetta et Santo (1994)	0,2	0,53		Roche
Laboiuse and Heidenreich 2009	0,003-0,257	0,07-1		Block 100 - 1000 Kg
P. Asteriou	0,5-0,88	0,83-1,26	0,63-	marbre

et al. 2011. Site réel			0,84		
	0,69-0,77	0,93-1,10	0,74-0,91	grès	
	0,25-0,88	0,74-1,63	0,53-0,77	Marl	
	0,07-3,09	0,70-0,99		In situ - Pendelikon, Grèce	
Spadari et al. (2012). Site réel	0,38-1,98	0,37-0,94		Basalt	IN SITU
	0,68-1,79	0,54-0,93		Quartz	
	0,43-1,85	0,54-0,96		grès	

ANNEXE B

Méthodes d'identification des surfaces de discontinuités, méthodes d'investigation sur site et vocabulaire pour l'ingénieur

L'objectif de cette section est de présenter brièvement les moyens d'analyse sur site liés à la mécanique de la rupture (notamment les informations qu'il faut recueillir sur le terrain, et comment les interpréter), et d'introduire le lecteur/ingénieur expert dans l'étude de la propagation mais non de la rupture, au vocabulaire utilisé dans la mécanique de la rupture des massifs rocheux.

VOCABULAIRE LIE A LA MECANIQUE DE LA RUPTURE UTILISE DANS L'ANALYSE DE PROPAGATION:

Nous avons regroupé dans cette session, les terminologies les plus importantes couramment utilisées dans le domaine des risques gravitaires :

- Massifs rocheux (*Figure B.1*) : Milieu discontinu (présence de failles), hétérogène (présence de différentes lithologies ou types de matériaux), anisotrope (comportement différent dans toutes les directions) et présentant une matrice de nature rocheuse (selon la définition de roche par les Eurocodes7 (Schuppener and Scarpelli, 2006): roches sédimentaire, volcanique et métamorphique intacte).
- Talus : surfaces inclinées d'origine naturelle (ex. érosion) ou anthropique (remblais, déblais) qui sont exposés à des processus d'instabilité. L'échelle d'étude est très importante dans la définition d'un talus. En ce qui concerne ce travail de thèse, nos analyses seront réalisées à une échelle plutôt locale (à l'échelle d'un seul talus) et non régional (ou plusieurs talus sont concernés par un même mécanisme de rupture).
- Talus rocheux : surfaces inclinées d'origine naturelle ou anthropique sur un massif rocheux.
- Diaclases : ce sont des fractures sur un massif rocheux qui ne font pas apparaître de déplacements relatifs entre les blocs situés de part et d'autre de la fissure. La stratigraphie peut entrer dans cette définition à la différence qu'elle traduit également un changement lithologique (*Figure B.2A*).
- Plans d'exfoliation : ce sont des plans qui se forment entre les roches métamorphiques et qui donnent lieu à des plans de laminage : Ex. Schistes (*Figure B.2B*)
- Failles : ce sont des fractures dans un massif rocheux pour lesquelles on observe des déplacements relatifs entre les blocs qui les séparent (*Figure B.2C*). En général, ces surfaces délimitent le volume de roche potentiellement instable à considérer dans la phase de propagation.
- Pendage et direction de pendage : Orientation des réseaux de fractures.

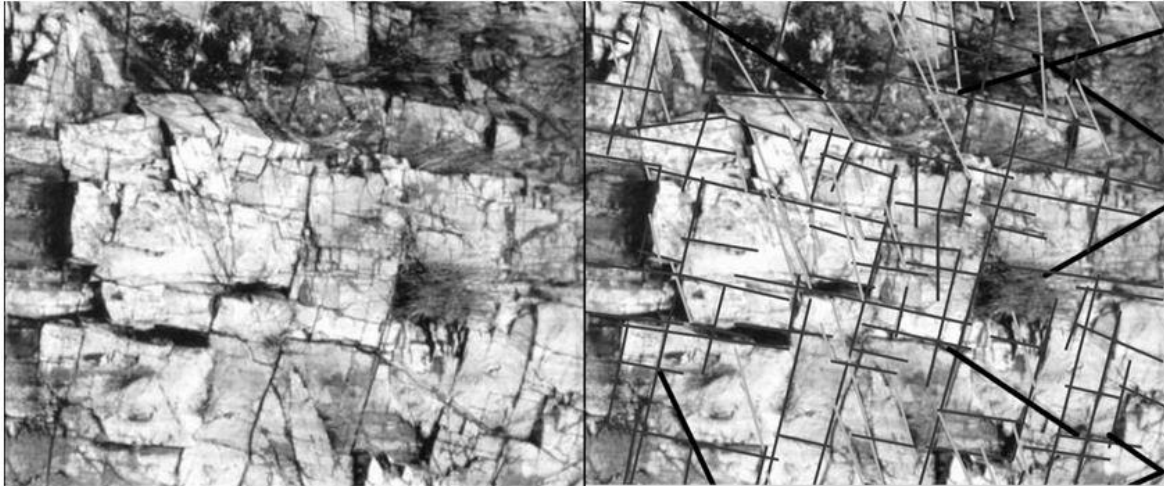


Figure B.1. Définition d'un massif rocheux avec son système de discontinuités. Adaptation du modèle proposé par (Monge and Oyanguren, 2004)

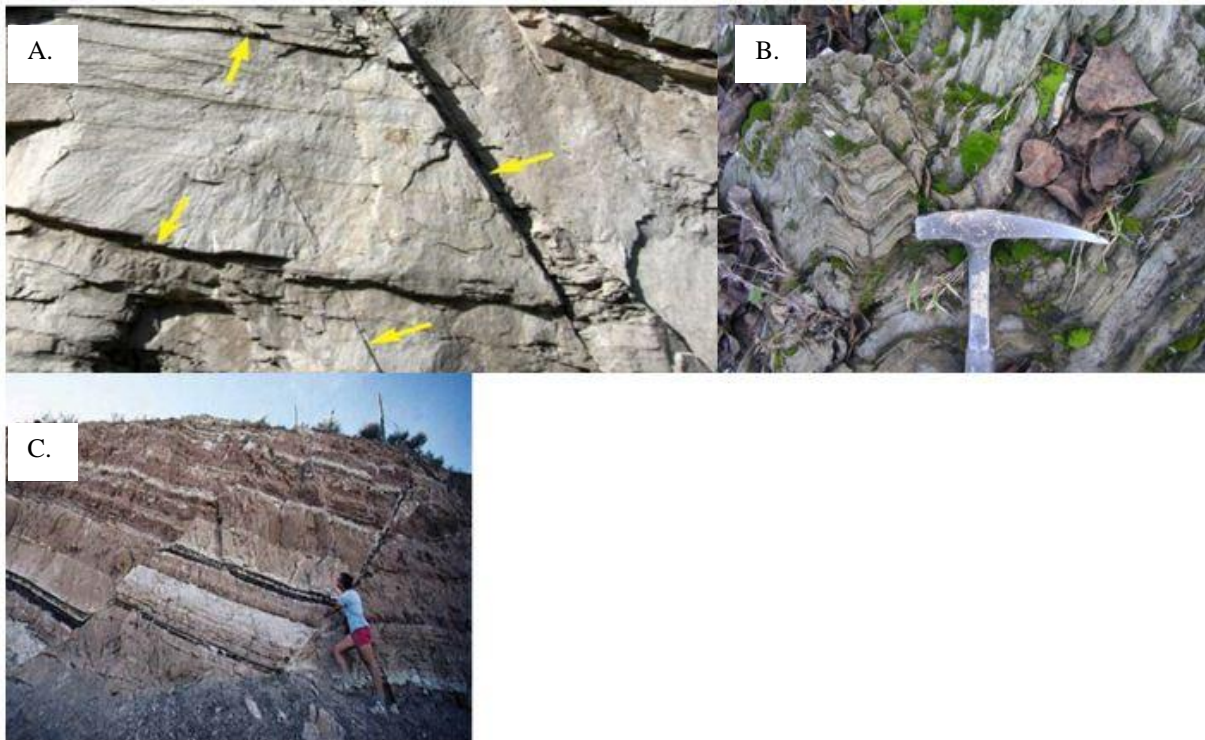


Figure B.21. A. Diaclases. B. Plans d'exfoliation. C. Failles (Geolnet 2014)

IMPORTANCE DE LA STABILITE DES TALUS ROCHEUX SUR LA PROPAGATION

Les contraintes naturelles et artificielles imposées aux talus rocheux sont faibles (par rapport à la résistance de la roche) et provoquent rarement la rupture de la roche intacte. Les ruptures se produisent donc essentiellement par ouverture des discontinuités préexistantes ou par glissement relatif des familles de discontinuités de la matrice rocheuse. Comme on peut le constater sur la *Figure B.3*,

l'ensemble des surfaces de discontinuités vont conditionner le volume rocheux concerné par le phénomène de propagation et la façon dont le mouvement va être initié. L'analyse des conditions de stabilité est basée sur la description et la représentation des surfaces de discontinuité et sur la détermination des volumes et dimensions des blocs rocheux qui résultent de l'intersection des familles de ruptures.



Figure B.32. Evolution de la fracturation d'un massif rocheux suivant les discontinuités de la roche (Monge and Oyanguren, 2004)

Il existe deux paramètres couramment utilisés dans la littérature pour évaluer la stabilité d'un talus rocheux :

- RMR (Rock Mass Rating) pour qualifier la qualité du massif rocheux,
- SMR (Slope Mass Rating) pour évaluer sa stabilité.

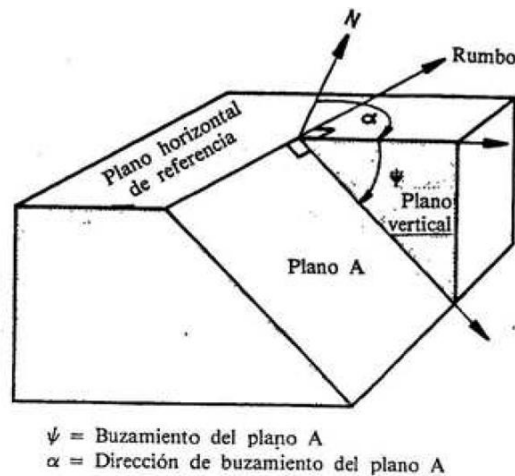


Figure B.43. Pendage « ψ » et direction de pendage « α » d'un plan A. Geolnet 2014

Ces deux paramètres sont fonction du nombre de familles de discontinuités et de leurs caractéristiques géométriques (Figure B.4) comme l'inclinaison (pendage), la direction du pendage, le type de matériaux rocheux en place et le mode de réalisation (naturel, excavation, minage, pelle mécanique, etc.).

Plusieurs autres approches existent avec une application très large dans le secteur minier (Pantelidis, 2009) :

- Méthodes de reconnaissance de l'environnement rocheux dans une perspective d'analyse des mécanismes de propagation,
- Une reconnaissance de terrain pour l'analyse de l'état de fracturation d'un massif rocheux, doit comprendre :
 - La description du matériau (matrice rocheuse),
 - La division de la zone d'étude en zones homogènes en fonction des lithologies concernées,
 - La description de chacune des zones, de leurs propriétés mécaniques et de leurs géométriques, et notamment leur état de fracturation,
 - L'identification des affluents d'eau, le degré de végétation et l'environnement sismique,
 - Le repérage des infrastructures et de tout autre élément à proximité,
 - Description de la matrice rocheuse,
 - Connaître le type de roche donne un indice sur sa résistance et sa capacité à se fracturer ou à dissiper plus ou moins d'énergie pendant la phase de propagation. Ces informations doivent cependant être dans la plupart des cas corroborées par des essais mécaniques tel que, par exemple, l'essai triaxial.

Medida del espaciado

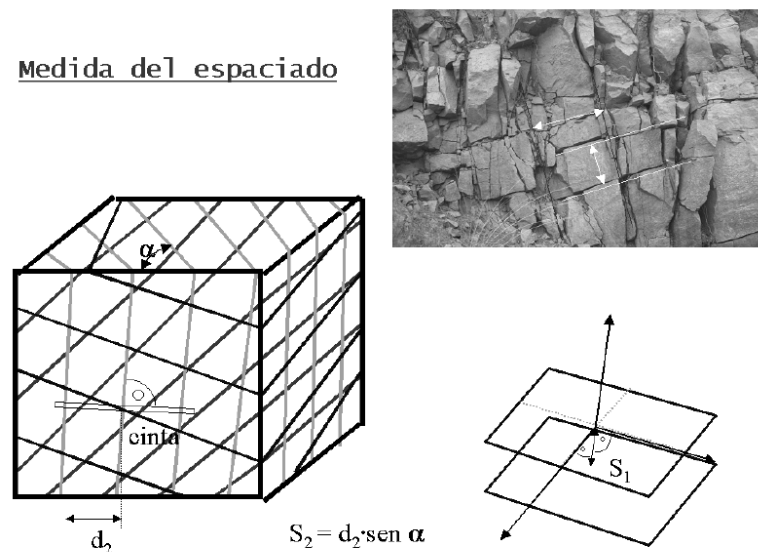


Figure B.54. Représentation graphique de la position et l'espacement entre discontinuités. (Monge and Oyanguren, 2004)

Par manque de campagne de reconnaissance géologique approfondie, il est également recommandé d'étudier la composition minéralogique du matériau sur le terrain, notamment la taille des grains à l'aide d'une loupe et de classer la roche suivant la nomenclature internationale proposée par la Société Internationale de Mécanique des Roches - ISRM.

Des caractéristiques physiques, comme la couleur de la roche, sont aussi des indices très importants qui peuvent aider à répertorier une masse rocheuse. Il faut néanmoins faire très attention car la couleur peut être liée à des processus d'érosion et de météorisation qu'il faudrait aussi décrire car ces dernières affectent la résistance de la roche. Par ailleurs, des essais simples, comme le scléromètre semblent, vis-à-vis de l'analyse de la propagation, suffisamment pertinent pour estimer la résistance d'une roche.

Une discontinuité est généralement caractérisée par :

- L'orientation et le pendage : les discontinuités sont assimilées à des plans dont leur orientation est précisée suivant un pendage ψ et un azimut α (Figure B.4). En effet, pour définir un plan, les géologues considèrent la ligne de plus grande pente orientée vers le bas, désignée par α qui représente l'angle que fait avec le nord magnétique la projection horizontale orientée de cette droite. Le pendage ψ est donné par l'angle que fait la ligne de plus grande pente avec le plan horizontal. On insiste sur l'importance qu'il faut accorder à la caractérisation du réseau de fracture, car une grande partie de la physique d'un événement de propagation dépend de cette caractérisation et de la qualité des données obtenues.
- La position et l'espacement : La position absolue d'une discontinuité a moins d'importance que sa position relative par rapport aux discontinuités voisines. Pour chaque famille de fracture, on définit généralement un espacement moyen égal à la moyenne des espacements entre fractures. Cette caractéristique est très importante car elle permet de définir la taille des blocs qui vont être impliqués dans le phénomène de propagation. En effet, plus l'espacement est petit, plus important sera le nombre de blocs de petites tailles impliqué dans la phase de propagation (Figure B.5).
- L'ouverture de la discontinuité : C'est la distance qui sépare deux surfaces de discontinuités. Pour les falaises rocheuses stables elle est rarement supérieure à 1 m. Il faut souligner que le degré d'ouverture de la discontinuité est généralement un très bon indice de l'imminence d'un mouvement gravitaire. D'un point de vue de la propagation, la possibilité que la discontinuité puisse être remplie par un matériau autre que la matrice rocheuse peut altérer la dynamique des blocs rocheux de par la présence d'éléments de petite taille et de caractéristiques mécaniques faibles.
- Remplissage des discontinuités (matériau à l'intérieur de la discontinuité) : Il faut identifier le type de matériau, l'épaisseur, la résistance, l'humidité et la perméabilité. La résistance de la discontinuité à des efforts de traction est généralement très faible voire nulle. Si elle est non nulle, cette force de traction est forcément liée soit à l'existence des ponts de matière ou à une cohésion induite par le matériau de remplissage (Figure B.6).
- La rugosité : L'irrégularité de surface de la discontinuité influe principalement sur la résistance au cisaillement (Figure B.7) et sur la quantité d'énergie dissipée lors du déclenchement de l'avalanche. Elle peut avoir également une influence sur la géométrie des blocs et sur leurs caractéristiques de contact.

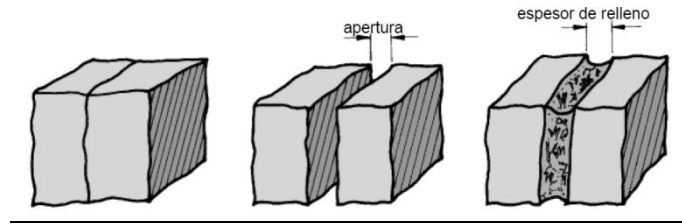


Figure B.6. Mode d'ouverture et de remplissage d'une discontinuité par un matériau altéré (Monge and Oyanguren, 2004)

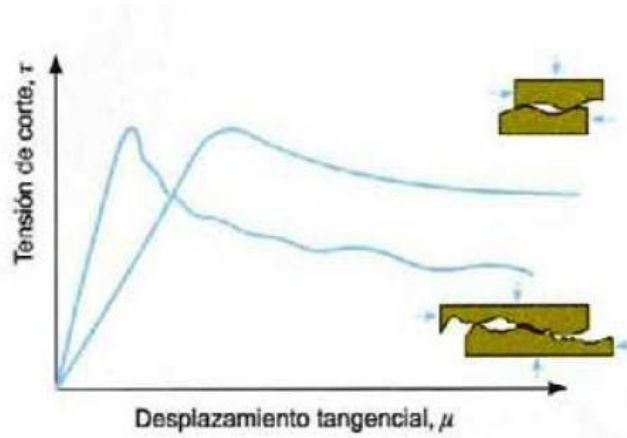


Figure B.75. Efforts de cisaillement en fonction du déplacement tangencial de deux surfaces en fonction de leur rugosité, GeolNet 2014.

Pour résumer, les propriétés mécaniques des discontinuités les plus importantes sont celles qui résultent de leur comportement au cisaillement comme par exemple: l'angle de frottement, la cohésion, la dilatance et la rugosité (Asroun and Durville, 2005).

ANNEXE C

Méthodes de calcul des paramètres numériques dans DEMbox (raideur, pas de temps, paramètres de voisinage)

Ces paramètres sont les sources d'erreur numérique les plus courantes car elles décrivent l'activité dynamique du système. Il faut un pas de temps pas très grand mais juste, pareil pour la raideur. Les paramètres décrivant le *voisinage de Verlet* sont des paramètres très performants mais très délicats du fait qu'un mauvais choix peut entraîner des erreurs fortes dans la modélisation. Cependant, ces paramètres restent assez ouverts... il faut juste choisir un bon jeu !

Raideur Minimal (k_p)

Il ne faut pas oublier que l'hypothèse la plus importante de la méthode discrète utilisée considère qu'il n'existe pas d'interpénétration entre les éléments (ou bien une interpénétration très petite par rapport à la taille de éléments). On est donc sur la théorie des corps rigides.

Pour assurer que l'hypothèse est respectée tout au long de la simulation, il devient nécessaire d'estimer un ordre de grandeur pour la force d'impact la plus importante qui aura lieu au cours de l'évènement. Lorsqu'il s'agit de la chute libre d'un corps, cette force se trouve par exemple au moment du premier impact avec le support de base. On peut définir cette force comme :

$$F_{impact} = K \times x \quad [A]$$

Où « K » décrit la raideur de l'élément et « x » l'interpénétration exprimée en unité de longueur. Au moment de l'impact et selon le théorème de la conservation de l'énergie, l'énergie initial du système est égal au travail des forces de contact au temps de l'impact « t ». Dans le cas d'une chute libre d'un élément, l'énergie potentielle est égale au travail de l'énergie d'impact :

$$E_i = m \times g \times h = W_{F_{impact}} = F_{impact} \times x \quad [B]$$

Où « E_i » : énergie initiale (énergie potentielle dans le cas d'une chute libre). « H » : la hauteur de chute et « W » est le travail de la force d'impact. De [A] et [B] on en déduit « K » :

$$K \geq \frac{m \times g \times h}{x^2} \quad [C]$$

avec m : masse de l'élément et « g » la force de gravité du système.

Pas de temps (dt)

Le pas de temps de la simulation est défini de la façon suivante (Rockfall Engineering, Stéphane Lambert et al 2012) :

$$dt \leq \frac{\sqrt{\frac{mi}{K}}}{f} \quad [D]$$

Où « mi » correspond à la masse de l'élément, « K » à la raideur et « f » à un facteur de sécurité pour éviter problèmes de résonance dans le système. Il est recommandé d'utiliser des valeurs de $f > 50$. Ce paramètre reste néanmoins responsabilité de celui qui modélise.

Voisinage de Verlet

Le code de calcul DEMBOX utilise 4 paramètres pour définir un voisinage préférentiel qui contiendra les possibles éléments avec lesquels un élément interagira au prochain pas de temps « $t_o + dt$ » de façon à ne pas considérer des éléments indésirables et réduire de cette façon le temps de calcul. Ils sont présentés ci-après :

1. nver : ce paramètre répond à la question suivante : tous les combien pas de temps « dt » la liste de contacts entre les micro-éléments (cylindres, sphères, faces, plans) peut être mise à jour.
2. nver2 : ce paramètre répond à la question suivante : tous les combien pas de temps « dt » la liste de contacts des macroéléments (master body) peut être mise à jour.
3. dver : rayon de voisinage pour les micro-éléments (sphéro-polyedra) exprimé en unité de longueur.
4. dver2: rayon de voisinage pour les macroéléments (master body) exprimé en unité de longueur.

Recommandations pour le calcul de 4 paramètres de voisinage :

nver : au moins dix fois plus petit que nver2. La mise à jour des éléments conformant le macroélément doit être effectuée plus régulièrement.

dver \geq à 2*rayon de « Minskosi » (un diamètre). (rayon DEMBOX)

dver2 \geq à la dimension (côté) la plus grande du macroélément le plus grand.

nver2 $\leq \frac{ti}{dt}$ où $ti = \frac{dver2}{V_{max}}$; V_{max} : hypothèse sur la vitesse la plus importante qui peut avoir l'élément le plus rapide.

Exemple : Pour le cas de Millau :

Raideur Minimal (kn)

$$F_{impact} = K \times x \quad \text{de l'éq. [A]}$$

Où K c'est la raideur et x (la distance d'interpénétration). Au moment de l'impact :

$$Ei = m \times g \times h = W_{F_{impact}=F_{impact} \times x} \quad \text{de l'éq. [B]}$$

Où E_i : énergie initiale (énergie potentielle). H est la hauteur de chute et W est le travail de la force d'impact. De [A] et [B], on a K :

$$K = \frac{m \times g \times h}{x^2} \quad \text{de l'éq. [C]}$$

Nos hypothèses :

$m = 26 \times m_i = 26 \times 47600 = 1237600 \text{ kg}$; Où m_i correspond à la masse d'une brique. Il y a 26 briques dans la direction « y ».

$h \equiv 11m$; D'après la figure 10.

$x = \frac{\text{rayon}}{2} = \frac{0.25}{2} = 0.125m$; Rayon des sphère-polyèdres DEMBOX

$$K \equiv 4e^9 N/m$$

Pas de temps (dt)

Le pas de temps est défini de la façon suivante (Rockfall Engineering, Stéphane Lambert et al) :

$$dt \equiv \frac{\sqrt{\frac{m_i}{K}}}{f}$$

$$dt = 3.5 \times 10^{-5} s$$

On propose un pas de temps de $1 \times 10^{-5} s$.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbatucci, C. (2001). Catastrophes en Savoie - Document historique. Retrieved May 26, 2014, from <http://memoiresdescatastrophes.org/pdf/aqw4reuveue/afficherDoc>
- Al-Kafaji, I. K. . (2013). *Formulation of a Dynamic Material Point Method (MPM) for Geomechanical Problems. Thesis*, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.
- Amato, J. D', Guerin, A., Hantz, D., & Rossetti, J. (2013). Terrestrial Laser Scanner study of rockfall frequency and failure configurations. In *JAG2013*.
- Arosio, D., Longoni, L., Papini, M., Scaioni, M., Zanzi, L., & Alba, M. (2009). Towards rockfall forecasting through observing deformations and listening to microseismic emissions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1119–11, 1119–1131. Retrieved from www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1119/2009/
- Asroun, A., & Durville, J.-L. (2005). Stabilité des massifs rocheux fissurés. *Revue Française de Geotechnique*. N112 3e Trimestre 2005.
- Asteriou, P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2012). Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103–113. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.05.029>
- Banton, J. (2009a). *Reconnaissances géophysiques d'un dépôt d'éboulement et modélisations numériques de la propagation des avalanches rocheuses. Thesis*, Université de Grenoble & Politecnico de Torino.
- Banton, J., P. Villard, D. Jongmans, C. Scavia (2009b). Two-dimensional discrete element models of debris avalanches: parameterization, the reproducibility of experimental results, *Journal of Geophysical Research*, 114, F04013, doi: 10.1029/2008JF001161.
- Banton, J. (2009c). *Reconnaissances géophysiques d'un dépôt d'éboulement et modélisations numériques de la propagation des avalanches rocheuses - Résumé*. Grenoble.
- Baron, B. (2007). La Pierre hachée dans les Abîmes de Myans. <http://doi.org/VO05/05/2008>
- Barry, P., & Coakley, R. (2013). *Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS*. Cork - Ireland.
- Basson, F., & Humphreys, R. (2013). Coefficient of restitution for rigid body dynamics modelling from onsite experimental data. In *Slope Stability 2013*.
- Basson, F. R. P. (2012). Rigid body dynamics for rock fall trajectory simulation. In *ARMA 12-267*. American rock mechanics association.
- Bauwens, J. (2013). Three workers killed in rockfall at Thai limestone quarry. Retrieved February 12, 2014, from <http://sciencythoughts.blogspot.fr/2013/06/three-workers-killed-in-rockfall-at.html>
- Berger, F., Martin, R., Auber, B., & Mathy, A. (2011). *Etude comparative , en utilisant l'événement du 28 décembre 2008 à Saint Paul de Varces , du zonage de l'aléa chute de pierre avec différents outils de simulation trajectographique et différentes matrices d'aléa*. Grenoble.
- Berthet-Rambaud, P., Limam, A., Baroudi, D., Thibert, E., Taillandier, J. (2008). Characterization of avalanche loading on impacted structures: a new approach based on inverse analysis. *Journal of Glaciology*, 54(185) :324–332.

- Berthet-Rambaud, P., Limam, A., Roenelle, P., Rapin, F., Tacnet, J., Mazars, J. (2007). Avalanche action on rigid structures : Back-analysis of Taconnaz deflective walls' collapse in February 1999. *Cold regions science, technology*, 47(1-2) :16–31.
- Bertrand, D., Nicot, F., Gattel, P., Lambert, S. (2006). Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. *Computers, Geotechnics*, 32: 564–577.
- Bigot, C. (2014). *Kinematic of decomposition and protective role of dead wood against rockfall : the case of slash Cinématique de décomposition et rôle de protection pare-pierres du bois mort : le cas des rémanents. Université de Grenoble. Thesis*, Université de Grenoble.
- Blender documentation. (2009). Retrieved April 20, 2014, from <http://www.blender.org/documentation>.
- Bonilla-Sierra, V. (2013). *The use of photogrammetry and 3D discrete element models to better assess rock slope stability*. Gre: Laboratoire 3SR.
- Bottelin, P., Jongmans, D., Daudon, D., Mathy, A., Helmstetter, A., Bonilla-Sierra, V., Donzé, F. (2014). Seismic and mechanical studies of the artificially triggered rockfall at the Mount Néron (French Alps, December 2011). *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(2), 1505–1557. <http://doi.org/10.5194/nhessd-2-1505-2014>
- Bourrelie, P. H. (2000). Les catastrophes naturelles : le grand cafouillage. *OES*, 257.
- Bourrier, F. (2008). *Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel. Université de Grenoble. Thesis*, Université de Grenoble.
- Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Nicot, F., Berger, F., Darve, (2009). Toward objective rockfall trajectory modelling using a stochastic rebound algorithm, *Geomorphology* 110: 68-79.
- Bourrier F., Berger F Tardif P Dorren L Hungr O (2012) Rockfall rebound: comparison of detailed field experiments, alternative modelling approaches. *Earth Surface Processes, L,formsDOI: 10.1002/esp.3202*
- Bourrier, F., Dorren, L., & Hungr, O. (2013). The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 435–440. <http://doi.org/10.1002/esp.3372>
- Bozzano, F., Martino, S., Montagna, A., & Prestininzi, A. (2012). Back analysis of a rock landslide to infer rheological parameters. *Engineering Geology*, 131-132, 45–56. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.003>
- Breugnot, A. (2011). *Approche numérique couplée discret-continu appliquée aux ouvrages cellulaires impactés. Thesis*, Université de Grenoble.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 71–81. <http://doi.org/10.1684-9981/nhess/2004-4-71>
- Budetta, P. (2010). Rockfall-induced impact force causing a debris flow on a volcanoclastic soil slope: a case study in southern Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(9), 1995–2006. <http://doi.org/10.5194/nhess-10-1995-2010>
- Calvetti, F., G. B. Crosta, , M. Tatarella (2000). Numerical simulation of dry granular flows: from the reproduction of small-scale experiments to the prediction of rock avalanches, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2, 21-38
- Carbonnell, M. (1968). *Introduction a l'application de la photogrammetrie aux edifices et aux ensembles monumentaux anciens*. Paris. Retrieved from http://www.international.icomos.org/monumentum/vol4/vol4_1.pdf

- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., & Ranzuglia, G. (2008). MeshLab: an open-source mesh processing tool. In: Scarano V, De Chiara R, Erra U, editors. In *Proceedings of EG It 2008—Eurographics Italian chapter conference. Salerno, Italy, 2–4 July 2008: The Eurographics Association* (pp. p. 129–136).
- Chanut, B., Faug, T., Naaim, M. (2010). Time-varying force from dense granular avalanches on a wall. *Physical Review E*, 82(4):041302.
- Chang K.J. Taboada (2009). A. Discrete element simulation of the Jiufengershan rock-, -soil avalanche triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of geophysical research*, 114, F03003, doi:10.1029/2008JF001075, 2009
- Cleary, P. W., M. Prakash (2004). Discrete-element modelling , smoothed particle hydrodynamics: potential in the environmental sciences, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical , Engineering Sciences*, 362, 2003-2030.
- Clouet, N., Berger, F., & Liévois, J. (2012). Rockfall modelling and risk zoning. In *12th Congress INTERPRAEVENT 2012* (pp. 479–486). Grenoble. Retrieved from <http://www.interpraevent.at>
- Cloutier, C. (2014). *Évaluation du comportement cinétique et du risque associé aux glissements de terrain rocheux actifs à l ' aide de mesures de surveillance*. Thesis, Université LAVAL.
- Corominas, J., & García Yagüe. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. In *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Vol. 3: 1051-1072*. Granada.
- Cross, R. (2010). Enhancing the Bounce of a Ball. *The Physics Teacher*. Sidney. <http://doi.org/10.1119/1.3488187>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Landslides. Investigation and Mitigation . Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C. Pp. 36-75, (247)*.
- Cuervo, S., Daudon, D., Richefeu, V., Villard, P., & Lorentz, J. (2014a). Discrete element modeling of a rockfall in the south of the “ Massif Central ”, France. In *IAEG2014* (pp. 1–6). Turin.
- Cuervo, S., Daudon, D., Richefeu, V., Villard, P., & Lorentz, J. (2014b). Discrete element modeling of a rockfall in the south of the “ Massif Central ”, France. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*, 2(1), 1657–1661.
- Cundall, P., & Strack, O. D. (1979). A Discrete Numerical-Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29 (1), 47–65.
- C2ROP 204 : Dossier de montage du Projet National. Chute de blocs, Risques rocheux, Ouvrages de protection
- Daudon, D., Villard, P., Richefeu, V., & Mollon, G. (2014). Influence of the morphology of slope and blocks on the energy dissipations in a rock avalanche. *Comptes Rendus Mécanique*, 1, 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.crme.2014.11.003>
- Davies, T. R., M. J. McSaveney (1999). Runout of dry granular avalanches, *Can. Geotech. J.*, 36, 313-320.
- De Cervantes-Saavadra, M. (1827). *Le Don Quichotte - Tome I*. (par H. B. D. . (Traduction nouvelle, Ed.). Londres. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=n3YfnQEACAAJ>
- Denlinger, R. P., R. M. Iverson (2004). Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: Theory, computation, *Journal of Geophysical Research*, 109

- Descoedres, F., Zimmermann, T. (1987). Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. *Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics - Montreal*, pages 337–342, Rotterdam. Balkema.
- Domaas, U. (2015). *Key-note: Looking back on 35 years predicting natural hazards using both expert opinion and models*. Innsbruck.
- Donzé, F. V., V. Richefeu, S.A. Magnier (2009). Advances in Discrete Element Method applied to Soil, Rock , Concrete Mechanics, in: State of the art of geotechnical engineering, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*
- Donzé, F. V, & Richefeu, V. (2010). Advances in Discrete Element Method Applied to Soil , Rock and Concrete Mechanics. *EJGE, Bouquet08*.
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics, modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27,1 : 69–87.
- Dorren, L. K. A. (2002). *GIS modelling of rockfall and protection forest structure*. Thesis, Universiteit van Amsterdam.
- Dorren, L. K. A. (2005). Modéliser les chutes de pierres avec ou sans forêt à Hohenstein. Grenoble: Cemagref.
- Dubois, F., Jean, M., Renouf, M., Mozul, R., Martin, A., & Bagneris, M. (2011). LMGC90 DEM software. In *CSMA2011* (pp. 1–8). Presqu'île de Giens (Var): CSMA2011.
- Duriez, J. (2009). *Stabilité des massifs rocheux : Une approche mécanique*. Thesis, Université de Grenoble.
- Duriez J, Darve F., Donze F. (2011). A discrete modelling-based constitutive relation for infilled rock joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol: 48, pp: 458-468 2011
- Ebeltoft, R., & Larsen, J. O. (2006). Intrumentation of buried flexible culvert subjected to rockfall loading. In *Joint international Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering* (pp. 95–103). Montréal.
- Evans, S. G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geotech. J.*, 30, 620–636.
- Fafournoux, L., & Vautier, F. (2011). La photogrammétrie stéréoscopique appliquée à la mesure de la hauteur de la végétation en zone alluviale : exemple de la réserve naturelle du Val- d'Allier (03). Paris: GALE&T.
- Faug, T., Beguin, R, Chanut, B. (2009). Mean steady granular force on a wall over-flowed by free-surface gravity-driven dense flows. *Physical Review E*, 80(2):021305.
- Favier, L., Daudon, D., Donzé, F., Mazars, J. (2009). Predicting the drag coefficient of a granular flow using the discrete element method. *Journal of Statistical Mechanics : Theory , Experiment*, 2009 :P06012.
- Favier, L. (2009). *Approche numérique par éléments discrets 3D de la sollicitation d ' un écoulement granulaire sur un obstacle*. Thesis, Université de Grenoble.
- Favier, L., Daudon, D., Donzé, F.-V., Mazars, J., Nakagawa, M., & Luding, S. (2009). Validation of a DEM granular flow model aimed at forecasting snow avalanche pressure. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 617, pp. 617–620). Aip. <http://doi.org/10.1063/1.3180002>
- Fityus, S. G., Giacomini, A., & Buzzi, O. (2013). The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks. *Engineering Geology*, 162, 43–52. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.007>
- France3-Alpes. (2014). Test à Vaujany. Retrieved October 2, 2014, from <http://france3-regions.francetvinfo.fr/alpes/isere/vaujany-en-isere-des-chercheurs-etudiant-les-chutes-de-blocs->

- Friedmann, S. J., N. Taberlet, W. Losert (2006). Rock-avalanche dynamics: insights from granular physics experiments, *Int. J. Earth Sci.*, 95, 911-919.
- Giacomini, A., Thoeni, K., Lambert, C., Booth, S., & Sloan, S. W. (2012). Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 171–181. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.030>
- Gill, D. E., Leite, M. E., & Corthésy, R. (2002). *Les instabilités structurales: guide d'analyse par stéréographie et de calcul des ancrages*. EPM-RT-2002-05. Ecole Polytechnique de Montréal. Montréal.
- Goujon, C., B. Dalloz-Dubrujeaud, N. Thomas (2007). Bidisperse granular avalanches on inclined planes: A rich variety of behaviors, *Eur. Phys. J. E*, 23, 199-215.
- Gracia, F. (2014). *Enrichment of continuous constitutive laws with discrete model responses for the modeling of rock avalanches*. Thesis 2014-2017, Université de Grenoble.
- Guangcheng, Z. (2014). Open question : Whether is it at the same time of the zero velocity, max acceleration and max dynamic force? LinkedIn group : Rockfall Specialist Network: LinkedIn group : Rockfall Specialist Network. Retrieved from LinkedIn group : Rockfall Specialist Network
- Guzzetti, F.; Crosta, G.; Detti, R.; Agliardi F. (2002). STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computer & Geosciences* 28: 1079-1093.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Wieczorek, G. F., & Survey, G. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley , California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 491–503.
- Haneberg, W. C. (2008). *Digital Outcrop Modeling and Structural Mapping, I-90 Snoqualmie Pass East, Hyak to Keechelus Dam, Washington*. Seattle.
- Hantz, D. (2011). Quantitative assessment of diffuse rock fall hazard along a cliff foot. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(5), 1303–1309. <http://doi.org/10.5194/nhess-11-1303-2011>
- Hantz, D., & Rossetti, J.-P. (2014). Vers la quantification de l'aléa rocheux. In *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014*. Beauvais.
- Hartmeyer, I., Keuschnig, M., & Schrott, L. (2013). Implementing a long-term monitoring site focusing on permafrost and rockfall interaction at the Kitzsteinhorn (3.203 m), Hohe Tauern Range , Austria – A status report from the MOREXPRT project . In *5th Symposium for Research in Protected Areas* (Vol. 5, pp. 269–274). Mittersill.
- Heidenreich, B. (2004). *Small- and half scale experimental studies of rock- fall impacts on sandy slopes*. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
- Heim, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Bieblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich. *Landslides and Human Lives* (N. Skermer, Translator), 77, 1–217.
- Hicham, H. (2005). *Gestion des risques naturels : Une approche fondée sur l'intégration des données*. Thesis, INSA Lyon.
- Hungr, O., Evans, S. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, pages 685–690, Lausanne.
- Hungr, O. (1995). A Model for the Runout Analysis of Rapid Flow Slides, Debris Flows, Avalanches,. *Can. Geotech. J.*, 32 (4), 610-623.

- Hungr, O., & Evans, G. (2001). A review of the Classification of Landslides of the Flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, VII(3), 221–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <http://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutchinson, J. N. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In *Proceedings 5th International Conference on Landslides* (pp. 3–35). Lausanne.
- Hutter, K., T. Koch, C. Pluss, S. B. Savage (1995). The Dynamics of Avalanches of Granular-Materials from Initiation to Runout, *Acta Mech.*, 109, 127-165.
- Imre, B., S. Rabsamen, S.M. Springman (2008). A coefficient of restitution of rock materials, *Computers & Geosciences*, 34, 339–350.
- Institutional - IDB. (2011). Measuring disaster risk. Retrieved March 9, 2013, from <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35372031>
- Iverson, R. M., M. Logan, R. P. Denlinger (2004). Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests, *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 109.
- Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 819–828. <http://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011>
- Jauvert, S., Peyroux, R., & Richefeu, V. (2013). A mechanical model for cell motility and tissue morphogenesis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 16, 13–14.
- Keaton, J. R. (2012). *Rockfall characterisation and control. Rockfall characterisation and control*. Environmental & Engineering Geoscience.
- Kozicki, J. , Donze, F. V. (2008). A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197:4429–4443.
- Labiouse V., Descoeurdes F., Montani S., Schmidhalter C.-A.(1994). “Étude expérimentale de la chute de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants”, *Revue Française de Géotechnique No 69, 4e trimestre 1994, pp. 41-62*
- Labiouse, V., & Heidenreich, B. (2009). Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(6), 1981–1993. <http://doi.org/10.5194/nhess-9-1981-2009>
- Lambert S., Gottel, P., Bertr, D., Nicot F. (2007). Comportement dynamique de géo-cellules sous impact – application aux ouvrages pare-blocs. *Revue Française de Géotechnique, Vol. 119, pp. 51-63*.
- Lambert S., Nicot F (2010). Géomécanique des instabilités rocheuses - Du déclenchement à l'ouvrage, Editeur : Hermes Science Publications Collection : Mécanique Ingénierie matériau ISBN : 978-2-7462-2990-7 EAN : 9782746229907
- Lambert, S., Bourrier, F., & Toe, D. (2013). Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60(1365), 26–36. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.029>
- Lambert, S., & Nicot, F. (2011). *Rockfall Engineering*. (F. Nicot & S. Lambert, Eds.). Grenoble: Wiley.
- Lanier J., Jean M., (2000). Experiments, numerical simulations with 2D disks assembly, *Powder Technology*, vol. 109, p. 206–221, 2000.
- Lanzi, L. (2009). *La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences*

forensiques. Thesis, Université de Lausanne.

- Lee, D. T., & Schachter, B. J. (1980). Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 9(3), 219–242. <http://doi.org/10.1007/BF00977785>
- Leine, R. I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., & Gerber, W. (2013). *Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape*. *Multibody System Dynamics* (Vol. 32). <http://doi.org/10.1007/s11044-013-9393-4>
- Les inondations restent le principal risque naturel en France. (2011). Retrieved April 16, 2013, from <http://www.actu-environnement.com/ae/news/iondations-risque-principal-france-ubyrisk-consultants-12479.php4>
- Lisjak, A., & Grasselli, G. (2010). Rock impact modelling using FEM/DEM. In *In Proceedings of the 5th International Conference on Discrete Element Methods*. London.
- Lisjak, A., & Grasselli, G. (2011). Combined finite-discrete element analysis of rock slope stability under dynamic loading. In *Pan-Am Canadian Geotechnical Society Geotechnical Conference*. Toronto.
- Lo, C.M., Lin, M.L., Tang, C.L., & Hu, J.C. (2011). A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit. *Engineering Geology*, 123(1-2), 22–39. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.002>
- Lorentz, J. (2012). Réduction du risque de chute de blocs de blocs dans les gorges de la Bourne. In *CFMR*. Paris: Présentation CFMR 18-10-2012.
- Lorentz J., F.V. Donzé, P. Perrotin, (2010). Ouvrages de protection multicouche avec parement rigide, in: *Géomécanique des instabilités rocheuse, du déclenchement à l’ouvrage*, Traité MIM, Lavoisier-Hermes, Chapter 12.
- Lorentz, J., & Muquet, L. (2010). Nouvelle approche de dimensionnement d’un merlon: Protection d’un bâtiment à Val d’Isère. In *JNGG*. Grenoble.
- Louis, S. (2012). *Prévenir et gérer les risques naturels au niveau local pour le développement durable des territoires - Guide à l’usage des élus*.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110.
- Luding, S. (2006). *Particulate solids modeling with discrete element methods*. Delft. Retrieved from s.ludding@tudelft.nl
- LeDauphine (2012). Important éboulement sous le plateau des Petites Roches. *Le Dauphine.com*, p. 1. Crolles. Retrieved from <http://www.ledauphine.com/isere-sud/2012/11/29/important-eboulement-sous-le-plateau-des-petites-roches>
- Mahabadi, O. K., & Lisjak, A. (2014). Application of FEMDEM to analyze fractured rock masses. In *DFNE 2014 - 148* (pp. 2–8). Vancouver.
- Mangeney-Castelnau, A., Vilotte, J. P., Bristeau, M. O., Perthame, B., Bouchut, F., Simeoni, C., Yernini, (2003). Numerical modelling of avalanches based on Saint-Venant equations using a kinetic scheme, *Journal Geophys. Res.*, 108(B11), 2527.
- Manzella, I., V. Labiouse (2008). Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows, *Rock Mech. Rock Eng.*, 41, 133-151.
- Manzella, I. (2011). Influence of initial block packing on rock avalanche flow and emplacement mechanisms

- through FEM / DEM simulations Influence of initial block packing on rock avalanche flow and emplacement mechanisms through FEM / DEM simulations. *Pan-Am Canadian Geotechnical Society Geotechnical Conference. 2011.*
- Manzella, I., Pirulli, M., & Labiouse, V. (2008). *Numerical modelling of a rock avalanche laboratory experiment in the framework of the “ ‘ ‘ RockslideteC ’ ’ alpine project.* (Chen, Ed.) *Landslides and Engineering Slopes.* London: Taylor & Francis Group.
- Masuya H., Kajikawa Y. (1991). Numerical analysis of the collision between a falling rock , a cushion by distinct element method, in Beer et al. (eds.), *Computer Methods , Advances in Geomechanics, Balkema, pp. 493-498*
- Mckinnon, M., Hungr, O., & Mcdougall, S. (2008). Dynamic analysis of canadian landslides. In *In Proceedings of the Fourth Canadian Conference on GeoHazards: From Causes to Management* (pp. 20–24).
- MASSA (2013) ; Projet *Interreg* ALCOTRA MASSA. Medium and Small Size rockfall hazard Assessment. Projet simple n°065. Janvier 2010 – Janvier 2013.
- Mejia, L., Quadros, R., Vargas, E., & Figueiredo, R. (2010). Aplicación del Método de Elementos Discretos (DEM) en el Modelamiento de la Propagación y Coalescencia de Fracturas en Taludes de Gran altura. In *PERUMIN - 30 convencion minera.* Lima.
- 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, 117*(F2), F02036. <http://doi.org/10.1029/2011JF002202>
- Mollon, G., Richefeu, V., Villard, P., Umr, C., & F-, G. (2011). Assessment of Discrete Element parameters for rock mass propagation Modelling. In *Proceedings of the Second World Landslide Forum* (pp. 1–6). Rome.
- Monge, L. A., & Oyanguren, P. R. (2004). *Mecánica de Rocas : Fundamentos e Ingeniería de Taludes.*
- Montani Stoffel S., Labiouse V., Descoedres F. , (2004). Impatti di blocchi rocciosi su un modello di galleria di protezione caduta massi.
- Mouget, a., & Lucet, G. (2014). Photogrammetric Archaeological Survey with UAV. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. II–5, pp. 251–258). <http://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-251-2014>
- Muller, P., & Pöschel, T. (2010). Three Balls Problem Revisited – On the Limitations of Event-Driven Modeling. *arXiv Preprint arXiv:1009.6153*, 1–10.
- Nemcok, A., Pasek, J., & Ryber, J. (1972). Classification of landslides and other mass movements. *Rock Mechanics, 4*, 71–78.
- Nicot, F., & Lambert, S. (2011). *Rockfall Engineering.* (F. Nicot & S. Lambert, Eds.). Grenoble: Wiley.
- Nicot, G. (2001). *Sortie du 30 avril 2012 Saint Pancrasse avec Claude Kerckhove.* Meythet.
- Novoski, R. (2011). Russie : nombre record de catastrophes naturelles en 2010. Retrieved February 10, 2011, from http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2702_Russie_catastrophes_naturelles.php
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology, 58*(58(2000)), 109–124.
- Olofsson, I., & Fredriksson, A. (2005). *R-05-43 Strategy for a numerical Rock Mechanics Site Descriptive Model.* SKB. Retrieved from <http://www.skb.se>

- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315–325. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003>
- Paronuzzi, P. (2008). Field Evidence and Kinematical Back-Analysis of Block Rebounds: The Lavone Rockfall, Northern Italy. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(5), 783–813. <http://doi.org/10.1007/s00603-008-0021-1>
- Petje, U. (2005). Computer simulation of stone Falls and rockfalls. *Acta Geographica Slovenica*, 45 -2, 93–120.
- Photos amateur St Pancrasse. (2012). Retrieved February 5, 2014, from <http://bernard-trekking.blogspot.fr/2012/12/eboulement-au-chemin-du-facteur.html>
- Pierre-Olivier, C. (2003). *Formulation d'un code éléments discrets: SDEC. Thesis*, INSA Lyon - GMC / IMSRN.
- Pirulli, M. (2005). *Numerical modelling of landslide runout: A continuum mechanics approach. Thesis*, Politecnico di Torino.
- Pirulli, M., & Mangeney, a. (2007). Results of Back-Analysis of the Propagation of Rock Avalanches as a Function of the Assumed Rheology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(1), 59–84. <http://doi.org/10.1007/s00603-007-0143-x>
- Pirulli, M., A. Mangeney (2008). Results of back-analysis of the propagation of rock avalanches as a function of the assumed rheology, *Rock Mech. Rock Eng.*, 41(1), 59-84.
- Plassiard, J., & Plotto, P. (2006). Modélisation par la méthode des éléments discrets d'impacts rocheux sur une structure de protection de type merlon. In *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur* (pp. 137–144). Lyon.
- Plassiard, J.P., F.V. Donzé (2010), Optimizing the design of rockfall embankments with a discrete element method, *Engineering Structures*, 32(11), pp. 3817-3826.
- Platon. (1992). *Platon. Dialogos VI. Filebo, Timeo, Critias*. (F. Lisi, Ed.).
- Pouliquen, O., Y. Forterre (2002). Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane, *J. Fluid Mech.*, 453, 133-151.
- Pouliquen, O. (2009). Granular Flows. In *Séminaire Poincaré XIII* (pp. 69–100). Paris: Ecole polytechnique.
- Radjai, F., & Richefeu, V. (2007). *Contact dynamics method*. Montpellier.
- Radjai, F., Dubois, F. (2011). Discrete-element modelling of granular materials, *ISTE Ltd, John Wiley & Sons*.
- Richefeu, V., Mollon, G., Daudon, D., & Villard, P. (2012). Dissipative contacts and realistic block shapes for modeling rock avalanches. *Engineering Geology*, 149-150, 78–92.
- Ruiz, R. (2013). *Caracteritzacio de la fragmentacio en els desprendiments rocosos. Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. (1990). Calcul des Avalanches : Une méthode pour le praticien avec des exemples. *IFENA*, 47:38.
- Sassa, K. (1989). Geotechnical classificati on of landslides. *Landslide News*, 3, 21–24.
- Savage, S. B., K. Hutter (1989). The Motion of a Finite Mass of Granular Material Down a Rough Incline, *J. Fluid Mech.*, 199, 177-215.

- Scavia, C., Vincent, L., Marina, P., & Gabriele, P. (2010). Numerical modelling with a continuum mechanics approach. Lausanne: Interreg IVC Alcotra 2007-2013.
- Schoeneich, P., Hantz, D., Deline, P., & Amelot, F. (2006). A new data base of alpine rockfalls and rock avalanches
- Schoeneich, P., Hantz, D., Deline, P., & Amelot, F. (2008). A new database of alpine rockfalls and rock avalanches. In *INTERPRAEVENT 2008 - Conference proceedings* (Vol. 2, pp. 243–250). Dornbirn.
- Scholtès, L., & Donzé, F.-V. (2012). Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 18–30. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009>
- Schreyer, D. (1996). Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 4(139), 1–4.
- Schuppener, B., & Scarpelli, G. (2006). *Eurocode 7: Geotechnical Design* (European C). Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://doi.org/10.2788/3398>
- Sharpe, C. F. (1938). *Landslides and related phenomena* (Pageant Bo). New Jersey.
- Shen, J., & Karakus, M. (2014). Three-dimensional numerical analysis for rock slope stability using shear strength reduction method, 172(November 2013), 164–172.
- SIROVISION Internet. (2014). SiroVision. Retrieved June 6, 2013, from <http://sirovision.dataminesoftware.com/>
- Šmilauer, V., Catalano, E., Chareyre, B., Duriez, J., Gladky, A., Kozicki, J., ... Thoeni, K. (2011). *Yade Reference Documentation*. Grenoble.
- Sosio, R., G. B. Crosta, O. Hungr (2008). Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps), *Eng. Geol.*, 100, 11-26.
- Sosio, R., Crosta, G. B., Chen, J. H., & Hungr, O. (2012). Modelling rock avalanche propagation onto glaciers. *Quaternary Science Reviews*, 47, 23–40. <http://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.05.010>
- Sovilla, B., Kern, M., Schaer, M. (2010). Slow drag in wet-snow avalanche flow. *Journal of Glaciology*, 56(198):587–592.
- Sovilla, B., Schaer, M., Kern, M., Bartelt, P. (2008). Impact pressures, flow regimes in dense snow avalanches observed at the vallée de la sionne test site. *J.Geophys. Res*, 113(1).
- Spadari, M., Giacomini, A., Buzzi, O., Fityus, S., & Giani, G. P. (2012). In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 84–93. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.11.013>
- Spadari, M., Kardani, M., De Carteret, R., Giacomini, a., Buzzi, O., Fityus, S., & Sloan, S. W. (2013). Statistical evaluation of rockfall energy ranges for different geological settings of New South Wales, Australia. *Engineering Geology*, 158, 57–65. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.007>
- Staron, L. (2008). Mobility of long-runout rock flows: a discrete numerical investigation, *Geophys. J. Int.*, 172, 455-463.
- Stock, G. M., Luco, N., Collins, B. D., Harp, E. L., Reichenbach, P., Frankel, K. L., ... Park, M. (2012). *Quantitative rock-fall hazard and risk assessment for Yosemite Valley, Yosemite National Park, California*. California.

- Taboada, A., N. Estrada (2009), Rock-,soil avalanches: Theory, simulation, *Journal of Geophysical Research*, 114, F03004, doi:10.1029/2008JF001072
- Teufelsbauer, H., Wang, Y., Chiou, M., Wu, W. (2009). Flow–obstacle interaction in rapid granular avalanches : Dem simulation , comparison with experiment, *Granular Matter*, 11(4) , 209–220
- Teufelsbauer, H., Wang, Y., Pudasaini, S. P., Borja, R. I., & Wu, W. (2011). DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures. *Acta Geotechnica*, 6(3), 119–133. <http://doi.org/10.1007/s11440-011-0140-9>
- Thibert, E., Baroudi, D., Limam, A., Berthet-Rambaud, P. (2008). Avalanche impact pressure on an instrumented structure. *Cold Regions Science, Technology*,54(3), 206–215.
- Thoeni, K. (2012). An integrated approach for rockfall analysis with drapery systems. *Slope Stability 2013. Abstracts 95*, 1–11.
- Thoeni, K. (2013). An integrated approach for rockfall analysis with drapery systems. In *Slope Stability 2013. Abstracts 95*.
- Thoeni, K., Giacomini, A., Lambert, C., Sloan, S. W., & Carter, J. P. (2014). A 3D discrete element modelling approach for rockfall analysis with drapery systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, 107–119. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.02.008>
- Thoeni, K., Lambert, C., Giacomini, A., & Sloan, S. W. (2013). Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model. *Computers and Geotechnics*, 49, 158–169. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.10.014>
- Tommasi, P., Campedel, P., Consorti, C., & Ribacchi, R. (2008). A Discontinuous Approach to the Numerical Modelling of Rock Avalanches. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(1), 37–58. <http://doi.org/10.1007/s00603-007-0133-z>
- Transisere (2009). Plaquete TransIsère du site Le Luisset. Saint Pancrasse
- Valentino, R., G. Barla, L. Montrasio (2008). Experimental analysis, micromechanical modelling of dry granular flow , impacts in laboratory flume tests, *Rock Mech. Rock Eng.*, 41, 153-177.
- Varnes, D. (1978). *Slope movement types and processes* (Vol. 176). Transportation Research Board Special Report.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ... Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2617–2651. <http://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
- Wang, X., Frattini, P., Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2012). The influence of slope profile extraction techniques and DEM resolution on 2D rockfall simulation. *Geophysical Research Abstracts*, 14(1), 11251.
- Wieczorek, G. F., Snyder, J. B., Waitt, R. B., Morrissey, M. M., Uhrhammer, R. A., Harp, E. L., & Finewood, L. G. (1996). Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California. *Geological Society of America Bulletin*, (112(1)), 75–85.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2014). *Rock fall Engineering*. CRC Press.
- Zhang, L. (2015). *Local field modelling of the interaction between a soil body and a falling boulder. Thesis*, Université de Grenoble.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1.	Bases de données présentées par (Hantz 2011)	27
Tableau 1.2.	Coefficients de restitution moyens pour des sols rigides.....	43
Tableau 1.3.	Coefficients de restitution moyens pour des sols meubles	43
Tableau 1.4.	Liste des logiciels trajectographiques existants jusqu'en 2012 présentée par (Volkwein et al. 2011).....	45
Tableau 2.1.	Position et volume des blocs repérés sur le terrain.....	64
Tableau 2.2.	Informations sur les principales familles de discontinuités de la falaise (précision d'environ $\pm 10\%$).....	66
Tableau 2.3.	Géométrie du site sur les trois profils étudiés.....	69
Tableau 2.4.	Caractéristiques des failles identifiées sur la falaise.....	70
Tableau 4.1.	Paramètres géométriques (gauche) et rhéologiques (droite) des simulations numériques	93
Tableau 4.2.	Paramètres géométriques (gauche) et rhéologiques (droite) des simulations numériques d'un lâché de bloc sur un sol multicouche	99
Tableau 4.3.	Paramètres physiques et géométriques de la simulation numérique.....	105
Tableau 4.4.	Paramètres de contact et grandeurs caractéristiques des simulations numériques	106
Tableau 4.5.	Paramètres de contact et grandeurs caractéristiques des simulations numériques	110
Tableau 4.6.	Paramètres de la loi de contact (Mollon et al. 2011)	116
Tableau 4.7.	Caractéristiques des particules de la simulation	117
Tableau 4.8.	Caractéristiques de la boîte de départ.....	117
Tableau 5.1.	Plage de paramètres les plus adaptés à la modélisation de l'éboulement de Millau	150
Tableau 5.2.	Paramètres de référence.....	151
Tableau 5.3.	Comparaison quantitative des dépôts In-Situ et Numérique.....	153
Tableau 5.3.	Formes caractéristiques obtenues en fonction du découpage	177
Tableau 5.4.	Paramètres rhéologiques du matériau de remplissage des discontinuités	180
Tableau 5.5.	Paramètres de contact utilisés pour les blocs situés en dehors des bandes de discontinuités.....	180
Tableau 5.7.	Paramètres de contact des simulations numériques.....	190
Tableau 5.8.	Paramètres rhéologiques de la loi d'interaction.....	204
Tableau 5.9.	Nombre de blocs immobilisés sur le versant de propagation pour chaque simulation.....	208

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Représentation graphique d'un risque naturel en montagne (Bigot 2014)	17
Figure 1.2.	Evolution du coût moyen en millions de dollars des risques de glissements de terrain, d'avalanches, et de séismes en Amérique latine entre 1900 en 2010 (Institutional - IDB 2011).....	18
Figure 1.3.	Répartition des catastrophes naturelles en France entre 2001 et 2010 (Anon 2011)	18
Figure 1.4.	Classification des mouvements gravitaires rocheux proposée par (Varnes 1978).....	20
Figure 1.5.	Mécanismes de rupture et mouvements associés. Adaptation du modèle présenté par (Corominas & García Yagüe 1997).....	21
Figure 1.6.	Classification des mouvements gravitaires proposée par (Hungre et al. 2013).....	22
Figure 1.7.	Phénomènes naturels et artificiels qui donnent lieu à des risques gravitaires rocheux (Volkwein et al. 2011)	23
Figure 1.8.	A. Eboulement rocheux de 1200 m ³ proche de la ville de Nice en janvier 2014. B. Impact d'un bloc rocheux sur un train touristique à Digne-les-Bains en février 2014. Sources Nicematin.fr et BFMTV	24
Figure 1.9.	A. Mont Granier en fond d'image et au premier plan la roche dite « Pierre hachée » de 1000 m ³ faisant partie du dépôt de l'éboulement. B. Zone affectée par l'éboulement estimée à 23 km ² (Baron 2007)	25
Figure 1.10.	Nombre d'éboulements gravitaires répertoriés dans les régions alpines (Hantz 2011).....	25
Figure 1.11.	Nombre d'éboulements gravitaires répertoriés dans les régions alpines (Schoeneich et al. 2008)	26
Figure 1.12.	Description d'un phénomène d'éboulement rocheux. Cas de l'éboulement de Termento en Italie le 21-01-2014. Photos tirées de la vidéo de la compagnie Drones Tareom.....	29
Figure 1.13.	Description des mécanismes de propagation (Basson 2012).....	30
Figure 1.14.	Mécanismes de rupture courants et projections stratigraphiques associées (Monge & Oyanguren 2004)	33
Figure 1.15.	Identification des surfaces de rupture sous différentes conditions de chargement en utilisant un modèle numérique continu (Shen & Karakus 2014).....	33
Figure 1.16.	Vue latérale du volume instable déduit d'un calcul discret en présence de discontinuités non persistantes (Bonilla-Sierra 2013)	33
Figure 1.17.	Famille de discontinuités dans un massif rocheux très fracturé et estimation stochastique des tailles et formes caractéristiques des blocs issus du système fracturé (Thoeni et al. 2014).....	34
Figure 1.18.	A. Représentation dans l'espace des différents angles de propagation. B. Définition de la projection horizontale développée du chemin de propagation (L2) et projection horizontale en ligne droite du chemin de propagation (L1).....	37
Figure 1.19.	Notion de ligne d'énergie, illustrée ici dans le cas d'un glissement. β : angle d'énergie (égal au Fahrböschung), V : vitesse du bloc, m : masse et g : la gravité. Axe des ordonnées à gauche : altitude. Axe des ordonnées à droite : énergie potentielle (Hantz & ROSSETTI 2014).....	38

Figure 1.20.	Représentation de l'impact dans le code trajectographique RAMMS (Leine et al. 2013).....	39
Figure 1.21.	Représentation schématique du rebond d'un bloc rocheux (Wyllie & Mah 2014).....	40
Figure 1.22.	Effet de la forêt sur la propagation de blocs rocheux A. prise en compte de la totalité de la forêt B. surface de forêt réduite de 50% C. calcul sans prise en compte de la forêt. (Dorren 2002)	46
Figure 1.23.	Illustration du concept de milieu continu équivalent A. Avalanche rocheuse B. Fluide homogène équivalent (Banton 2009a)	47
Figure 1.24.	Représentation schématique de l'approche MPM : Les particules lagrangiennes se déplacent à travers une grille eulérienne fixe (Al-Kafaji 2013).....	48
Figure 1.25.	Etude de la propagation d'une masse rocheuse en utilisant la méthode MPM Adapté de (Gracia 2014)	49
Figure 1.26.	Représentation du contact «chevauchement» dans la méthode des éléments discrets. (Mejia et al. 2010)	49
Figure 1.27.	A. discrétisation par un assemblage de sphères (Thoeni et al. 2014). B. Discrétisation par sphéro-polyèdres : solides constitués de volumes élémentaires tels que sphères (pour les coins), cylindres (pour les côtés) et plans (pour les faces) (Mollon et al. 2012; Cuervo et al. 2014b).....	50
Figure 1.28.	Modélisation de la propagation d'une masse granulaire dont les particules sont des solides de type sphéro-polyèdre avec le code DEMbox (Mollon et al. 2012).....	51
Figure 1.29.	Eboulement de Varcès 2008. A : vue d'ensemble et trajectoires de certains blocs volumineux. B : visualisation du bloc le plus éloigné (Bourrier et al. 2013).....	52
Figure 1.30.	Modélisation de la propagation d'une masse rocheuse suivant un plan de rupture prédéfini (Lisjak & Grasselli 2011)	53
Figure 1.31.	Minage de 2500 m3 de roche au mont Néron en France en décembre 2011	54
Figure 1.32.	Utilisation du logiciel trajectographique KAYASS pour l'étude de la propagation d'un bloc rocheux avec définition de l'aléa en fonction du pourcentage des blocs passants (Lorentz 2012).....	55
Figure 1.33.	Exemple de modélisation discrète de coulées de boues (debris flows) présenté sur le site internet du projet Mumolade.....	56
Figure 2.1.	Vue de la zone de départ avant et après éboulement (Anon 2009b) (Anon 2012).....	59
Figure 2.2.	Coupe géologique de la région de la Dent de Crolles. Modifié de (Nicot 2001).....	60
Figure 2.3.	Profil type du site de Saint Pancrasse	60
Figure 2.4.	A. Falaise rocheuse instable avec faille vertical active à Saint Pancrasse. B. Nature du Versant de propagation de Saint Pancrasse avec blocs rocheux encastrés dans le sol	61
Figure 2.5.	A. Vue depuis un drone des zones de départ et de propagation de l'éboulement de Saint Pancrasse. Les traits rouges représentent les deux directions principales de propagation observées sur le terrain. B. Forme caractéristique des blocs du dépôt	61
Figure 2.6.	A. zone effondrée (en rouge) et géométrie de la falaise. B. dépôt final avec les principaux blocs repérés sur le terrain en Avril 2012 (en rouge)	62
Figure 2.7.	A. versant de propagation. B. Géométrie du site de Millau.....	63

Figure 2.8.	Position en coordonnées cartésiennes des blocs rocheux mesurés sur le terrain naturel. Le code couleur fait allusion à la taille des blocs. Seuls la position et le volume des blocs sont représentés sur ce schéma. La forme carrée des points est arbitraire et n'est aucunement liée à la forme des blocs	63
Figure 2.9.	Etapes d'une étude par photogrammétrie appliquée à l'aléa éboulements rocheux. Relevé photogrammétrique de l'événement par utilisation d'un drone.....	65
Figure 2.10.	Projection stéréographique des surfaces de discontinuités en utilisant une projection de type Wulff. B: disques caractérisant l'orientation des différentes surfaces de discontinuités données par Sirovison. C: épaisseur caractéristique des blocs comme résultat de la famille de discontinuité représentée en bleu (bedding plane)	67
Figure 2.11.	A. Plans de stratification définis par des bandes de matériaux altérés (traits rouges). B. faille verticale remplie par un matériau altéré suite aux mécanismes d'érosion. C. Faille horizontale de la matrice rocheuse très altérée et abondamment fracturée	67
Figure 2.12.	Vue aérienne du site	69
Figure 2.13.	Profil et vue de face de la zone instable	70
Figure 2.14.	Photo d'un ancien éboulement de petit volume (dépôt d'environ 200 m ³).....	70
Figure 3.1.	Modélisation d'un bloc en forme de M avec DEMbox. L'objet rigide est constitué de formes simples : des sphères (rouges) pour les sommets, des cylindres (verts) pour les arrêtes et des polygones 3D (jaunes) pour les faces	76
Figure 3.2.	Types de contacts élémentaires possibles dans DEMbox entre deux solides	76
Figure 3.3.	Contacts résultant de différentes combinaisons de contacts élémentaires	76
Figure 3.4.	Illustration schématique de la procédure de découpage suivant des familles de plans de discontinuités. Le volume initial, représenté ici par un cube, est un sphéro-polyèdre. A. Celui-ci sera découpé suivant la première famille de discontinuités (un seul plan jaune est représenté). B. Les blocs résultants seront chacun découpés suivant la famille suivante de discontinuités (un seul plan vert est représenté). C. Lorsque toutes les découpes sont réalisées, il en résulte un assemblage de blocs qui pourront interagir lorsqu'ils seront déstabilisés par la gravité.....	77
Figure 3.5.	Modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation de la propagation d'une avalanche rocheuse déclenchée artificiellement dans le cadre d'une purge préventive d'une écaille rocheuse instable du Néron près de Grenoble en 2011. Image tirée de (Bottelin et al. 2014)	78
Figure 3.6.	Représentation synthétique de l'algorithme de calcul utilisé pour la modélisation de la propagation de blocs rocheux	82
Figure 3.7.	(Gauche) Illustration schématique des paramètres du modèle de collision. (Droite) Relations force/déplacement pour les composantes normale et tangentielle ; les zones grisées montrent l'énergie (travail de la force) perdue lors d'un cycle complet de charge/décharge ; chacune des composantes de force est tracée en considérant que l'autre composante ne varie pas – ce qui n'est évidemment pas le cas en situation de collision.....	85
Figure 3.8.	A. Position stable. B. Position potentiellement instable	85
Figure 3.9.	Représentation du phénomène de basculement d'un bloc sur un sol meuble	86

Figure 3.10.	Illustration 2D des volumes englobant AABB (A) et OBB (B). Les boîtes en pointillés représentent les plus petits volumes, et les boîtes en traits pleins correspondent aux mêmes boîtes dont les faces ont été décalées d'une distance Dv (ou dv s'il s'agit d'un sous-élément). Lorsque deux boîtes en traits pleins se chevauchent, les sphéro-polyèdres sont déclarés « proches ». Sur cette illustration, avec des boîtes AABB A., les objets sont donc déclarés proches alors qu'avec des boîtes OBB B. ce n'est plus le cas.....	89
Figure 3.11	Le test de proximité pour l'objet sphérique 1 en rouge se limite aux objets 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 dans les cellules grisées.....	89
Figure 4.1.	Schéma de principe des simulations numériques réalisées.....	92
Figure 4.2.	Positions des blocs aux temps $t=0$ s (A) et $t=2.6$ s (B).....	93
Figure 4.3.	Evolution du rebond dans le temps pour : A. Le centre de masse équivalent. B. La face supérieure de l'assemblage.....	94
Figure 4.4.	A. Evolution de l'énergie totale dissipée en fonction du temps pour la configuration monobloc (tirets) et multi blocs (trait plein). B. Evolution dans le temps de l'énergie dissipée par interaction entre les blocs dans la configuration multi blocs.....	95
Figure 4.5.	A. Forces résultantes agissant sur les blocs pour une configuration multi blocs. B. Force résultante équivalente pour la configuration multi blocs comparée à celle d'une configuration monobloc.....	96
Figure 4.6.	Etude de sensibilité du paramètre de restitution normale sur le premier impact. A. Influence du coefficient $e_n^2_{BS}$ ($e_n^2_{BB}=0.5$). B. Influence du coefficient $e_n^2_{BB}$ ($e_n^2_{BS}=0.5$).....	97
Figure 4.7.	Évolution du rebond mesuré sur différents critères en fonction du coefficient de restitution normale.....	98
Figure 4.8.	Schéma de principe de l'impact d'un bloc sur un sol multicouche.....	99
Figure 4.9.	Déplacements verticaux des blocs en fonction du temps pour $H= 10$ m et $H = 20$ m pour chacun des blocs de l'empilement (du plus haut – 1 - au plus bas – 10) et du bloc impacteur (0).....	101
Figure 4.10.	Rebond du bloc impacteur en fonction du coefficient de restitution. A. En fonction du paramètre $e_n^2_{BB}$. B. En fonction du paramètre $e_n^2_{BS}$	102
Figure 4.11.	Evolution du rebond initial des six premiers blocs de l'empilement (les déplacements des blocs sous-jacents étant très faibles ils ne sont pas représentés).....	103
Figure 4.12.	Géométries de base des simulations numériques. A. Configuration 1 avec le cube. B. Configuration 2 avec la sphère.....	106
Figure 4.13.	Cinématique du cube à différents pas de temps avec sa vitesse de rotation.....	107
Figure 4.14.	Moment de résistance au roulement en fonction de l'angle de rotation pour A. La configuration avec le cube pour les deux premiers impacts avec le support. B. La sphère pendant les premiers moments du contact avec le sol. C. Le cube sur la durée totale de la simulation. D. La sphère sur la durée totale du contact.....	108
Figure 4.15.	Evolution du RunOut et des vitesses de translation et de rotation en fonction du temps pour le cube (A, B et C) et la sphère (D,E et F) avec et sans résistance au roulement (noté $RauR$).....	109
Figure 4.16.	Evolution du Run-Out lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement.....	111

Figure 4.17.	Evolution de la vitesse de translation lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement.....	112
Figure 4.18.	Evolution de la vitesse de rotation lors de la de simulation en fonction de la raideur normale au contact et ce pour différents valeurs des paramètres de la loi de résistance au roulement	113
Figure 4.19.	Schéma du dispositif expérimental d'avalanche granulaire de l'EPFL (Manzella et al. 2008).....	116
Figure 4.20.	Vue schématique de l'état de propagation des particules granulaires à différents instants de la simulation. A. Au repos t=0 seconde. B. Propagation sur le plan incliné à t=0,2 seconde. C. Passage des blocs entre le plan incliné et le support horizontal pour une transition courbe de 20 cm au t=0,6 seconde. D. Dépôt final à t=2 secondes.....	118
Figure 4.21.	Énergie dissipée sur chacun des segments de la zone de propagation pour le cas de référence (R= 20 cm et H=2m) - discrétisation en 1200 segments de longueur dx = 5 mm	119
Figure 4.22.	Bilan de l'énergie dissipée le long de l'axe de propagation (X) pour différents rayons de courbure (0, 5, 20, 60 et 90 cm). La couleur rouge caractérise l'énergie dissipée par frottement avec le support tandis que la couleur jaune représente l'énergie dissipée par chocs entre les blocs	120
Figure 4.23.	A. Pourcentage d'énergie dissipée par frottement au niveau de la rupture de pente pour différentes valeurs de rayon de courbure. B. Pourcentage de l'énergie dissipée par chocs dans l'arrondi pour différentes valeurs du rayon de courbure.....	121
Figure 4.24.	Distance de propagation de la masse granulaire en fonction des différentes valeurs de rayon de courbure.....	122
Figure 4.25.	Géométrie du problème et définition des forces agissant sur la masse M.....	122
Figure 4.26.	Comparaison entre les modèles phénoménologique et numérique de l'évolution de la dissipation d'énergie par frottement avec le support pour des valeurs différentes du rayon de courbure	124
Figure 4.27	Energie dissipée dans la zone de transition entre le plan incliné et le plan horizontal en fonction du rayon de courbure et de la hauteur de chute: A. Energie dissipée par frottement à la base de l'écoulement due à l'accélération centripète; B.Energie dissipée par frottement dans la masse; C. Energie dissipée par chocs entre les briques au sein de la masse granulaire; D. Energie dissipée par chocs entre les briques et le support de propagation.....	125
Figure 4.28.	Bilan de l'énergie totale dissipée pour chacune des configurations testées en fonction du rayon de courbure (H=2m).....	126
Figure 4.29.	Bilan de l'énergie dissipée par chocs entre les blocs dans l'arrondi en fonction de la forme des particules et de l'empilement initial pour des valeurs différentes du rayon de courbure (H=2m).....	127
Figure 4.30.	A. Bilan de l'énergie dissipée par frottement comme conséquence de l'accélération centripète dans l'arrondi en fonction de la forme et de l'arrangement initial des particules pour des valeurs différentes du rayon de courbure (H=2m).....	128
Figure 4.31.	Distance de propagation de la masse en fonction de la forme et de l'arrangement initial des particules pour différentes valeurs du rayon de courbure (H=2m).....	128

Figure 5.1.	Reconstruction numérique du volume de départ de l'éboulement de Millau pour les différentes configurations étudiées pendant la thèse. A. Configuration complexe en utilisant un Modèle Numérique de Terrain réaliste. B. Configuration simplifiée en utilisant des blocs de forme irrégulière. C. Configuration simplifiée en utilisant des blocs parallélépipédiques. A noter que sur cette figure les blocs sont colorés arbitrairement	131
Figure 5.2.	Exemple de lâcher d'un bloc rocheux sur le sol. Le terrain choisi pour l'expérience contient très peu de végétation pour en négliger l'effet. Le bloc rebondit à une hauteur d'environ 15 à 20 % de sa hauteur initiale (repérée par la flèche noire sur la figure en bas à gauche).....	133
Figure 5.3.	A. masse de départ scindée en 35 blocs parallélépipédiques de 30 m ³ . B. masse de départ scindée en 280 blocs parallélépipédiques de 3.5 m ³ . C. Données géométriques et rhéologiques de la simulation.....	134
Figure 5.4.	Simulations numériques de l'éboulement de Millau comportant 38 blocs (gauche) et 280 blocs (droite).....	135
Figure 5.5.	Comparaison des dépôts numérique et réel pour la configuration : A. 38 blocs. B. 280 blocs. L'origine des abscisses (axe horizontal) coïncide avec l'origine du versant incliné	136
Figure 5.6.	Vitesses du centre de masse (bleu) et du bloc le plus éloigné (rouge) pour les configurations à 35 blocs (trait pointillé) et à 280 blocs (trait continu)	137
Figure 5.7.	Bilan énergétique en fonction du temps pour les configurations A. 35 blocs. B. 280 blocs. C. Tableau synthétique des énergies dissipées au premier impact et sur la totalité de l'événement pour les deux configurations testées	138
Figure 5.8.	Schéma de la zone de premier impact entre la masse rocheuse et le versant incliné. A. Configuration de base. B. Mise en place d'un replat de 2 m en pieds de falaise	139
Figure 5.9.	A. Dépôt final des blocs avec le replat (carrés bleus) et sans le replat (cercles rouges). B. Evolution dans le temps du centre de masse pour les deux géométries testées	140
Figure 5.10.	Bilan énergétique en fonction du temps pour la configuration A. Avec replat. B. Sans replat. C. Tableau synthétique des énergies dissipées au premier impact et sur la totalité de l'événement pour les deux configurations numériques testées.....	141
Figure 5.11.	A. Géométrie de la falaise rocheuse. B. Géométrie de la zone de départ recrée numériquement. C. Stratigraphie observée sur la falaise rocheuse. D. Taille caractéristique des blocs du dépôt.....	142
Figure 5.12.	A. Granulométrie des blocs modélisés numériquement. B. Elancement calculé comme un rapport des inerties en Z et X respectivement.....	143
Figure 5.13.	Géométrie du versant de propagation	143
Figure 5.14.	Sensibilité de la position du centre de masse (A) et de l'étalement du dépôt (B) aux paramètres de restitution normale.....	144
Figure 5.15.	Distance de propagation du centre de masse en fonction des coefficients de frottement basal -A - et entre les blocs -B. Etalement du dépôt en fonction des coefficients de frottement basal -- et entre les blocs -D	145

Figure 5.16.	Distances de propagation des blocs isolés en fonction des paramètres de restitution entre les blocs et le sol (A) et entre les blocs eux-mêmes (B). La figure présente les distances de propagation des blocs de volume faible (volume < 2 m ³ – trait plein) et les blocs de taille importante (volume > 5 m ³ – trait en pointillé).....	146
Figure 5.17.	Distance de propagation des blocs isolés en fonction du frottement basal (A) et du frottement inter blocs (B). La figure présente les distances de propagation des blocs de petite taille ou de taille intermédiaire (volume < 2 m ³ – trait plein) et les blocs de taille importante (volume > 5 m ³ – trait en pointillé)	147
Figure 5.18.	Vitesse de rotation maximale observée en fonction de chacun des paramètres testés : A. Restitution normale Bloc-Sol. B. Restitution Bloc-Bloc. C. Frottement Bloc-Sol. D. Frottement Bloc-Bloc.....	148
Figure 5.19.	Variation des vitesses de rotation sur l’axe de propagation pour les blocs les plus éloignés en fonction de leur forme (jeu de paramètres optimal)	149
Figure 5.20.	Bilan énergétique final pour différentes valeurs des paramètres de contact A. Restitution normale entre les blocs. B Restitution normale entre les blocs et le sol. C. Frottement entre les blocs et D. Frottement basal	150
Figure 5.21.	Bilan énergétique au premier impact pour différentes valeurs des coefficients : A. de restitution normale entre les blocs. B de restitution normale entre les blocs et le sol.....	151
Figure 5.22.	Bilan énergétique au premier impact pour différentes valeurs des coefficients : A. de frottement entre les blocs et B. de frottement basal	152
Figure 5.23.	Vues de dessus du dépôt réel (A) numérique (B) et comparaison de la position des blocs (C)	153
Figure 5.24.	Energie dissipée tout-au-long de la trajectoire de l’avalanche rocheuse	154
Figure 5.25.	Schéma de principe de l’approche trajectographique. Chacun des blocs du volume initial est lâché verticalement et se propage individuellement sur le support incliné	155
Figure 5.26.	Propagation des blocs dans l’approche trajectographique (bloc isolé). La couleur fait référence à la position initiale des blocs sur la falaise avant la chute. Les traits pointillés et continus font référence respectivement aux positions du front du dépôt et des blocs isolés de grandes dimensions et de petites tailles obtenues par l’approche éboulement en masse.....	156
Figure 5.27.	Détail sur la propagation du centre de masse des blocs isolés les plus éloignés de petites tailles (A) et de dimensions importantes (B) pour l’approche éboulement en masse (rouge) et pour l’approche trajectographique (bloc isolé) (noir).....	157
Figure 5.28.	Variation de la vitesse de translation du centre de masse des blocs isolés de petites tailles (A) et de dimensions importantes (B) pour l’approche éboulement en masse (rouge) et l’approche trajectographique (bloc isolé) (noir).....	157
Figure 5.29.	Variation de la vitesse de rotation moyenne en fonction de la position du centre de masse des blocs isolés de petites tailles (A) et de grandes dimensions (B) pour l’approche éboulement en masse (rouge) et l’approche trajectographique (bloc isolé) (noir).....	157
Figure 5.30.	A. Photographie d’une partie de falaise. B. Reconstruction de la falaise en nuage de points. C. Maillage par triangulation de Delaunay	159

Figure 5.32.	Etape 1 : les falaises adjacentes (carrés blancs) sont translâtées sur la zone de falaise manquante (carré rouge).....	161
Figure 5.33.	Etape 2 : le volume de départ est obtenu par intersection entre les faces aval (falaise translâtée) et amont (falaise après éboulement).....	161
Figure 5.34.	Visualisation du volume de départ reconstruit. A. Vue de face de l'écaille rocheuse. B. Rotation de 45° par rapport à l'axe vertical (Y). C. Rotation de 135° par rapport à l'axe vertical (Y).....	162
Figure 5.35.	A. Blocométrie en fonction du nombre cumulé de blocs. B. Elancement de chacun des blocs du plus petit au plus grand. C. Volume de l'écaille rocheuse avant effondrement. D. Géométrie de la falaise après éboulement avec dièdre.....	163
Figure 5.36.	Vues de dessus des dépôts : réel (A), numérique sous la configuration simplifié (B) et numérique sous la configuration tridimensionnelle maillée (C). Les traits noirs et jaunes font référence à l'orientation de la falaise et de la direction de propagation des blocs. D. Comparaison des différents dépôts (numérique et expérimental) dans la direction de la propagation.....	165
Figure 5.37.	Pourcentage de l'énergie totale dissipée en fonction du temps pour la configuration simplifiée (A) et maillée (B). C. Tableau synthétique des énergies dissipées pendant la durée de l'événement et au premier impact des blocs avec le versant.....	166
Figure 5.38.	Vue de dessous d'un dépôt numérique d'éboulement. Définition de la dispersion des blocs (D) par rapport au centre de masse de l'éboulement (C)	167
Figure 5.39.	Vues de dessus des dépôts numériques (les blocs sont colorés en fonction de leur volume). A. Avec un pas de temps de 1e-5. B. Avec un pas de temps de 1e-6.....	169
Figure 5.40.	Modèles numériques de terrain pour différentes résolutions de la falaise de Millau. A. 0.50 m. B. 5 m.....	170
Figure 5.41.	Vues de dessus des dépôts numériques. A. 0.50 m. B. 5 m.....	171
Figure 5.42.	Etude sur l'influence de la résolution du maillage. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse	172
Figure 5.43.	Position des petits blocs dans l'empilement initial : A. En bas. B. Au milieu. C. En haut. La couleur des blocs fait référence à leur volume dont les plus petits sont colorés en marron foncé et les plus grands en marron clair	173
Figure 5.44.	Vues de dessus des dépôts numériques pour des différentes positions dans l'empilement initial des petits blocs. A. Positionnés en bas. B. Positionnés au milieu. C. Positionnés en haut	174
Figure 5.45.	Influence de la position initiale des blocs de faible volume. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Variation de la vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse sur l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse.....	175
Figure 5.46.	Influence de l'espacement entre les blocs. A. Propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Variation de la vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse sur l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse.	176
Figure 5.47.	Formes caractéristiques des découpages réalisés. Seul le plan de stratification horizontal n'a pas été modifié	177

Figure 5.48.	Vues de dessus des dépôts numériques pour des différentes directions et densité de découpage. A. Cubes avec une densité de découpage de 1 m. B. Cubes avec une densité de découpage de 3 m. C. Rhomboïdes avec une densité de découpage de 3 m. D. Parallélépipèdes rectangulaires avec une densité de découpage de 3 m. Le contour rouge correspond à l'enveloppe caractéristique du dépôt de la simulation A.....	178
Figure 5.49.	Influence de la morphologie des blocs. A. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse	179
Figure 5.50.	Configurations testées. A. Position des bandes horizontales pour l'étude de l'influence de la rhéologie des discontinuités. B. Variation de la fracturation des matériaux à l'intérieur des surfaces de discontinuités	180
Figure 5.51.	Vues de dessus des dépôts numériques. A. $e_n^2 = 0.05$. B. $e_n^2 = 0.001$. C. $e_n^2 = 0.30$	180
Figure 5.52	Vues de dessus des dépôts numériques. A. Matériau de remplissage peu fracturé. B. Matériau de remplissage très fracturé.....	181
Figure 5.53.	Influence de la nature du matériau de remplissage des discontinuités sur la propagation des blocs rocheux. A. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. B. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. C. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse. Influence du niveau de fracturation du matériau de remplissage des discontinuités sur la propagation des blocs rocheux. D. Distance de propagation du centre de masse dans le plan XY. E. Vitesse moyenne des blocs en fonction de la position du centre de masse suivant l'axe X. F. Dispersion des blocs par rapport au centre de masse.....	182
Figure 5.54.	Aspect naturel de la falaise avec les surfaces de discontinuités identifiées via l'étude structurale	186
Figure 5.55.	Modèle numérique de la falaise avec une résolution de 2 m, associé aux surfaces de discontinuités identifiées via l'étude structurale	187
Figure 5.56.	Détail sur l'intersection des surfaces de discontinuités et identification du dièdre rocheux potentiellement instable	187
Figure 5.57.	A. Identification du volume de départ par intersection des familles de discontinuités avec la falaise. B. Modèle numérique du pan de falaise après suppression de l'écaïlle rocheuse	188
Figure 5.58.	Vue dans le plan X-Y du volume de départ estimé. B. Découpage orthogonal avec une fréquence de découpage de 2 m – Configuration 1. C. Découpage orthogonal avec une fréquence de 1 m – Configuration 2. D. Découpage orthogonal avec un plan à 45° par rapport à la direction du glissement – Configuration 3.....	189
Figure 5.59.	Vue en plan de l'état de la propagation des blocs rocheux pour la configuration 1 (gauche) et 2 (droite) à différents temps de la simulation. La couleur fait référence à la vitesse des blocs	191
Figure 5.60.	Bilans cinématiques de l'effondrement rocheux par rapport à l'axe perpendiculaire à la falaise (dénomé Axe horizontal) A. Position, B. Vitesse de translation et C. Vitesse de rotation pour la configuration 1. Les mêmes informations sont présentées pour la configuration 2 respectivement sur les figures D, E et F.	193

Figure 5.61.	Bilans cinématiques A. Position, B. Vitesse de translation et C. Vitesse de rotation pour la configuration 1. Les mêmes informations sont présentées pour la configuration 3 respectivement sur D, E, F	194
Figure 5.62.	Vue en plan de la géométrie du dépôt pour : A. La configuration 1. B. La configuration 3	195
Figure 5.63.	Descriptif de la cinématique des blocs pour différents temps de la simulation pour la configuration 3. La couleur des blocs est arbitraire	196
Figure 5.64.	Vue en plan de la forme du dépôt des blocs pour la configuration 1. A. Avec merlon. B. Sans merlon	197
Figure 5.65.	Bilan cinématique des blocs isolés. A. Trajectoires des blocs dans le plan XY. La couleur des traits fait référence aux volumes des blocs. B. Trajectoires des blocs dans le plan XZ. La couleur des traits fait référence aux volumes des blocs. C. Vitesses de translation D. Vitesses de rotation	198
Figure 5.66.	Discrétisation de la grille de mesures. A. Impact d'un bloc en un point. B. Impacts successifs sur plusieurs ou un même point. La vitesse résultante est mesurée au point d'impact du premier bloc avec l'ouvrage	200
Figure 5.67.	Vitesses d'impact maximales enregistrées sur chaque cellule. A Configuration 1. B. Configuration 2. C. Configuration 3. Notation : bleu : vitesse faible ; rouge : vitesse élevée	201
Figure 5.68.	A. Vue – Orthophoto - de la zone d'éboulement. B. MNT de la zone d'éboulement, résolution 10 cm	205
Figure 5.69.	A. Vue – Orthophoto - de la zone d'éboulement et du dépôt. B. Description du dépôt de référence	206
Figure 5.70.	A. Vue de la zone de départ après éboulement. B. reconstruction numérique de la zone de départ – géométrie supposée avant éboulement.....	207
Figure 5.71.	Découpage du volume de départ	207
Figure 5.72.	A. Photo du site avec le dépôt de référence. B. Dépôt numérique sans résistance au roulement. Position des blocs au temps $t = 20$ s. C. Dépôt numérique avec $\mu_R = 0.5$. Position des blocs au temps $t = 20$ s. D. Dépôt numérique avec $\mu_R = 0.8$. Position des blocs au temps $t = 20$ s.....	209
Figure 5.73.	Propagation dans la direction X du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différents valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)	210
Figure 5.74.	Vitesse de translations dans la direction X du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$).....	210
Figure 5.75.	Vitesse de rotation du centre de masse en fonction du temps. A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$)	211
Figure 5.76	Trajectoire du centre de masse du premier bloc impactant le versant de propagation A. Pour différentes valeurs de C_0 ($\mu_R = 0.5$). B. Pour différentes valeurs de μ_R ($C_0 = 1.7 \cdot 10^5$).....	211