



HAL
open science

Développement d'un modèle numérique d'impact pour la quantification de la vulnérabilité du bâti exposé au risque de coulées de débris et crues éclair

Rime Chehade

► To cite this version:

Rime Chehade. Développement d'un modèle numérique d'impact pour la quantification de la vulnérabilité du bâti exposé au risque de coulées de débris et crues éclair. Génie civil. Université Clermont Auvergne, 2021. Français. NNT : 2021UCFAC075 . tel-03652597

HAL Id: tel-03652597

<https://theses.hal.science/tel-03652597>

Submitted on 26 Apr 2022

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.

Université Clermont Auvergne

École Doctorale

SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

Rime CHEHADE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : Génie Civil

Titre de la thèse :

**Développement d'un modèle numérique d'impact pour la quantification de
la vulnérabilité du bâti exposé aux phénomènes de coulées de débris et
crues éclair**

Soutenue publiquement le 2 décembre 2021 devant le jury composé de :

M. Pascal Villard, Professeur, 3S-R, Université Grenoble Alpes	Rapporteur
M. Franck Bourrier, Chargé de recherche - HDR, INRAE Grenoble	Rapporteur
Mme Claire Silvani, Maître de Conférence, Geomas, INSA de Lyon	Examinatrice
M. Jean-Claude Thouret, Professeur Emérite, LMV, UCA	Examineur
M. Fabian Dedecker, Chef de projet, Itasca Consultants, Lyon	Invité
M. Jean-Marc Tacnet, Docteur, INRAE, Université Grenoble Alpes	Invité
M. Pierre Breul, Professeur, Institut Pascal, Clermont Auvergne INP	Directeur
M. Bastien Chevalier, Maître de Conférence, Institut Pascal, Clermont Auvergne INP	Encadrant

RESUME

Les lahars, ou coulées de débris d'origine volcanique, génèrent des dégâts humains et matériels importants, en particulier lorsqu'ils sont amenés à traverser des zones urbanisées. Les outils existants pour modéliser ces écoulements restent imprécis dans l'estimation des pressions d'impact surtout si on s'intéresse à la contribution des blocs, représentant les plus gros débris solides présents dans l'écoulement.

Un modèle numérique discret est développé pour évaluer les pressions d'impact des coulées de débris à l'échelle du voisinage proche d'une structure. Les blocs sont modélisés explicitement à l'aide de la méthode des éléments distincts et le reste de la phase solide est intégré dans la phase fluide qui génère deux effets sur le mouvement des particules : la force d'Archimède et la force de traînée. Le champ de vitesse du fluide et la position de sa surface libre sont calculés à l'aide d'un code CFD (*Computational Fluid Dynamics*), puis importés dans la simulation discrète selon un couplage unidirectionnel. L'influence des caractéristiques de l'écoulement, telles que la profondeur, la vitesse, la granulométrie des blocs, sur les efforts d'impact subis par l'obstacle est alors étudiée. Les résultats numériques obtenus sont en accord avec des modèles empiriques existants dans la littérature. De plus, une augmentation des efforts est observée quand le diamètre maximal des blocs augmente. La pression engendrée par la coulée de débris, incluant l'effet de la taille des blocs, peut finalement être utilisée pour améliorer l'évaluation des dommages sur l'obstacle et quantifier sa vulnérabilité.

Mots clés : lahar, coulées de débris, méthode des éléments distincts, force d'impact, fluide, vulnérabilité.

ABSTRACT

Lahars, or volcanic debris flows, generate significant human and material damages, especially when they cross urbanized areas. Existing tools to model these flows remain imprecise in estimating impact pressures, especially regarding the contribution of blocks, which represent the largest solid particles.

A discrete numerical model is proposed to evaluate the impact pressures of debris flows at the local scale of a structure. Solid particles, or blocks, are modeled explicitly using the Distinct Element Method and finer particles are embedded in the fluid phase that generates two effects on block motion: the buoyancy force and the drag force. The fluid velocity field and its free surface position are calculated using a CFD code (Computational Fluid Dynamics) and then imported into the main discrete simulation using a one-way coupling scheme. The influence on the impact forces generated on the obstacle of the flow characteristics, such as the height, the velocity, or the block size distribution, are then studied. The numerical results obtained are in accordance with existing empirical models in the literature. Moreover, an increase in efforts is observed when the maximum diameter of the blocks increases. The pressure of the debris flows, including the size of blocks, can finally be used to improve the obstacle damage estimation and quantify its vulnerability.

Keywords: lahar, debris flows, distinct element method, fluid, impact forces, vulnerability.

REMERCIEMENTS

Trois ans passés à toute vitesse viennent de s'achever. J'espère n'oublier personne dans les lignes qui vont suivre.

Tout d'abord je remercie la Région AURA Auvergne Rhône-Alpes (Pack Ambition Recherche 2018) pour le soutien financier du projet de recherche.

J'aimerais également remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse : Jean-Marc Tacnet, Claire Silvani et en particulier, les deux rapporteurs Pascal Villard et Franck Bourrier pour le temps consacré à la lecture de ce travail de thèse.

Evidemment, je tiens à remercier mes encadrants de thèse qui m'ont donné une aide précieuse dans cette expérience enrichissante. En premier lieu mon directeur de thèse Pierre Breul. Sa patience, sa disponibilité, sa confiance et sa bonne humeur constante en ont fait un directeur de thèse idéal. Ses remarques pertinentes, les échanges d'idées, ses compétences m'ont beaucoup apporté. Enfin, je le remercie de m'avoir toujours soutenue et d'avoir accepté de me donner de l'autonomie tout en m'accompagnant. Par ailleurs, j'exprime ma gratitude à Bastien Chevalier pour son encadrement exceptionnel : merci pour ses précieux conseils pour ma motivation et surtout d'avoir toujours cru en moi et en nos recherches, même dans les périodes difficiles. Sa vision des problèmes et des modèles m'a ouvert des horizons et ses compétences dans la recherche et dans l'enseignement m'ont beaucoup apporté. J'ai apprécié travailler à ses côtés et je suis certaine que partager son bureau pour cette nouvelle année continuera de développer mes idées et compétences. Je souligne également que ses encouragements et accompagnements à chacune des conférences ou missions m'ont beaucoup touchée. Enfin, je suis très reconnaissante envers Pierre et Bastien de m'avoir acceptée en tant que stagiaire de fin de Master 2 et de m'avoir fait confiance pour continuer à me superviser pendant ces trois dernières années. Leurs qualités de chercheur et leur humilité font d'eux des encadrants que beaucoup de doctorants pourraient envier.

Cette thèse n'aurait pas avancé sans les discussions et les échanges permanents avec Fabian Dedecker : merci pour le travail effectué en tant qu'utilisateur aguerri du logiciel *PFC3D* (Itasca) que j'ai utilisé. Merci pour sa disponibilité systématique, à chaque problème sur mes modélisations il était présent. Je n'oublie pas de dire merci à la famille ITASCA : Rima, Christine, Daniel, Véronique, Marco, Charlotte et en particulier à Sacha Emam et Huy Tran pour leurs avis très pertinents.

Un grand merci au professeur Jean-Claude Thouret pour cette collaboration avec le labo LMV. Sa connaissance bibliographique était impressionnante, je le remercie pour tous les articles, papiers et ouvrages qu'il a partagés avec moi. Je n'oublierai jamais l'aventure à Arequipa que nous avons faite ensemble et je remercie également Liliane de m'avoir accompagnée durant ce long voyage.

Cette thèse de doctorat a eu lieu à Polytech Clermont au sein du laboratoire Institut Pascal. Merci de m'avoir accueillie et merci pour cette ambiance qui m'a encouragée à venir travailler tous les matins avec plaisir ! En particulier, je n'oublierai jamais la salle B202 « l'open space » qui a formé une vraie famille internationale de doctorants : Merci à Khaled mon compatriote, au départ ensemble sur les bancs du lycée, puis malgré des parcours différents nous étions par hasard ensemble pendant notre thèse de doctorat ! Ta présence à mes côtés rendait les choses plus faciles à gérer. Merci à Caroline pour cette vraie amitié, tes encouragements et ton bon cœur ; merci à Hichem pour ton soutien et tes valeurs

humaines impressionnantes ; merci à Phan pour ton sens de l'humour et ton sourire qui ne disparaît pas ; merci à Arthur (le premier avec qui je prends le café le matin) pour ton énergie au labo, tes explications du lexique français et bien évidemment d'avoir partagé ton affection pour l'écologie ! Merci à Bilal, Arnauld, Martian, Esther, Fengdong et Arnoul pour tous ces moments agréables. Je pense aussi aux anciens doctorants Elodie, Claude, Husam et Ali. Cette salle multilingue et multiculturelle m'a appris beaucoup de choses, et je n'oublierai jamais tous les moments que j'ai partagés avec vous, les faciles comme les difficiles.

Je remercie également tous les enseignants du département Génie Civil de Polytech de m'avoir accordé leur confiance et l'opportunité de connaître mes premières expériences d'enseignement pendant ces trois ans. En particulier, Omayma la nouvelle MCF, merci pour ta gentillesse et toutes les discussions toujours intéressantes. Un grand merci à nos secrétaires de laboratoire et de département Françoise Cialdella et Jacqueline Madebene d'avoir facilité nos missions.

Ces remerciements restent incomplets sans une pensée à mes amis libanais qui malgré la distance étaient toujours à l'écoute et capable de m'encourager : Racha ma meilleure amie d'enfance, Souad, Amin, Mohamad, Abdallah, Khodor ainsi que mes copines ingénieures Fatima, Rime, Amar et Nadine. En particulier, je remercie ma plus proche amie Sarah (la prochaine docteure) d'être toujours là, dans les meilleurs comme dans les pires moments. Je n'oublierai pas tous les voyages que nous avons organisés ensemble pour diminuer le stress de la thèse. Je pense également à remercier Dr. Hanna Kerroum d'être comme ma grande sœur à Clermont-Ferrand.

Pour finir, merci du fond du cœur à ma famille qui représente ma vie : Mon père Omar et ma chère mère Nahed, mon frère Mohamad, ma sœur Dalia et son mari Malek, mon neveu qui est aussi mon prince Samo. Sachez que c'était très difficile de prendre la décision de m'éloigner de vous et de mon pays. Malheureusement, la situation actuelle au Liban est désastreuse et je ne peux pas être avec vous. Grâce à votre soutien sans relâche, votre amour incessant, votre aide incroyable, votre fierté en moi que je lis dans vos yeux, je suis enfin arrivée au bout. Je n'oublie pas ma tante Nouhad, tu es ma confidente, ma deuxième maman et merci pour le soutien que tu m'as apporté. Un grand merci à mes grands-mères pour leur prière. Merci également à mes cousins Bilal et Mohamad ainsi que Rayane et Fatima pour avoir toujours été à mes côtés, ainsi que pour ces petits week-ends en famille. Un énorme merci à ma cousine Nour, sans elle je n'aurais jamais connu la magnifique ville de Clermont-Ferrand. Nour, ton mari Ahmed et toi avez été mes précieux alliés en France, à la fois pour mon intégration et pour m'avoir facilité la vie (par exemple en m'offrant un voyage chaque année !). J'envoie tout mon amour et mes pensées à « baby Rayen », le nouveau membre de la famille.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : Contexte et état de l'art

1. Les coulées de débris et écoulements associés	23
2. Les lahars, écoulements d'origine volcanique	24
2.1 Initiation des lahars	25
2.2 Types de lahars	25
2.3 Cas d'Arequipa (Pérou), une métropole exposée aux lahars	26
2.3.1 <i>Évaluation des risques : Zones de danger</i>	28
2.3.2 <i>Etude de cas</i>	32
3. Méthodes d'étude des écoulements et de leurs impacts	34
3.1 Ecoulements et impacts	34
3.2 Méthodes de calcul de la force d'impact	37
3.2.1 <i>Modèles empiriques</i>	37
3.2.2 <i>Méthodes expérimentales</i>	39
3.2.3 <i>Modélisation numérique (approches existantes)</i>	41
4. Evaluation du risque au sens de l'impact et de la perte	44
4.1 Définition de la vulnérabilité physique	44
4.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	45
4.3 Méthodologie générale des courbes de vulnérabilité	47
4.4 Fonctions de vulnérabilité des structures exposées aux écoulements	48
4.5 Résultats des études de vulnérabilité publiées	51
5. Bilan	54

CHAPITRE 2 : Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle

1. Introduction	58
2. Mise en place du modèle numérique	59
2.1 Description de la méthode des éléments distincts (DEM)	59
2.2 Description du logiciel	60
2.3 Description du modèle numérique	62
2.3.1 <i>Définition des phases solides et fluides</i>	62

2.3.2 Effet du fluide sur les blocs	65
2.3.3 Lois de contact interparticulaires	67
2.3.4 Génération d'un écoulement	69
3. Simulation de l'écoulement	70
3.1 Caractéristiques de l'écoulement de référence et du chenal	70
3.2 Paramètres mécaniques du modèle	72
3.3 Etude paramétrique	73
3.4 Résultat obtenu	75
4. Bilan	79

CHAPITRE 3 : Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

1. Introduction	81
2. Géométrie du chenal avec obstacle.....	82
2.1 Calcul de la phase fluide.....	83
2.1.1 Approche utilisant la loi de Darcy	84
2.1.2 Approche utilisant les équations Navier-Stokes	87
2.1.3 Discussion sur les deux approches.....	88
3. Mise en place du couplage DEM-CFD	89
3.1 Simulation d'un cas de référence.....	91
3.2 Résultats.....	92
4. Sensibilité des résultats d'impact aux paramètres du modèle.....	96
4.1 Paramètres de contact	96
4.2 Caractéristiques de l'écoulement.....	97
4.2.1 Effet de la hauteur de l'écoulement.....	98
4.2.2 Effet de la vitesse de l'écoulement.....	99
5. Validation du modèle	100
5.1 Validation des modèles numériques : état de l'art.....	101
5.2 Comparaison des résultats numériques obtenus avec les modèles empiriques	104
6. Bilan.....	105

CHAPITRE 4 : Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

1. Introduction.....	108
2. Paramètres liés à l'écoulement	108
2.1 Taille des blocs	108
2.2 Forme du bloc	111
2.2.1 <i>Cas de Référence</i>	112
2.2.2 <i>Étude paramétrique</i>	113
3. Etude de l'influence des paramètres de la structure	120
3.1 Forme du pilier	120
3.2 Orientation du pilier.....	123
4. Contacts individuels.....	124
5. Bilan.....	128

CHAPITRE 5 : Application à l'étude de la vulnérabilité

1. Introduction.....	131
2. Défauts et avantages des courbes de vulnérabilité.....	132
3. Intégration du modèle développé pour évaluer la vulnérabilité	133
3.1 Adaptation des fonctions de vulnérabilité et quantification de l'intensité de l'écoulement	134
3.2 Fonction de vulnérabilité améliorée	136
3.3 Comparaison avec d'autres fonctions de vulnérabilité basées sur la pression	140
4. Bilan.....	141

LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Volcan El Misti à l'arrière-plan de la ville d'Arequipa.....	27
Figure 2 : Lahars à Arequipa.....	27
Figure 3 : Carte des aléas volcaniques du Misti dans la région d'Arequipa (Franco et al., 2010)	30
Figure 4 : les différents terrasses du centre-ville d'Arequipa (Thouret et al., 2013).....	31
Figure 5 : Vue de l'ensemble de la zone d'étude de Quebrada Dahlia, Arequipa, (a) image aérienne avec cadre noir montrant les chenaux et les lignes transparentes montrant les rues de la zone, (b) reconstruction photogrammétrique de la surface, (c) bâtiments individuels et blocs de construction identifiés à partir des relevés de bâtiments (Mead et al., 2017).....	33
Figure 6 : Zones exposées au risque de lahar et d'inondation à Arequipa (Thouret et al., 2013)	34
Figure 7 : Processus d'impact pour les trois segments de DF (Cui et al., 2015) : cette figure montre en particulier la partie front-tête de l'écoulement.....	35
Figure 8 : Comparaison des modèles empiriques existants (Shu et al., 2020) montrant le coefficient de pression dynamique en fonction du nombre de Froude.....	39
Figure 9 : Méthodologie générale des fonctions de vulnérabilité	48
Figure 10 : Cycle de calcul en DEM	60
Figure 11 : Séquence d'opérations réalisée durant chaque cycle de calcul	62
Figure 12 : Distribution granulométrique générale montrant notre stratégie de la modélisation	63
Figure 13 : Diagramme montrant les étapes de simulation (sans obstacle)	65
Figure 14 : Comportement et composants rhéologiques du modèle linéaire (Itasca,2016)	68
Figure 15 : Un VER avec des blocs distribués entre un rayon $R = 0.05\text{m}$ et $R = 0.2\text{ m}$	71
Figure 16 : Dessin montrant le chenal numérique. Un VER est placé à l'entrée du chenal (<i>PFC3D</i>).....	71
Figure 17 : Stratégie de la calibration du modèle pour obtenir le modèle final	77
Figure 18 : Résultats obtenus pour l'écoulement de référence : (a)vitesse moyenne dans deux sections, (b) débit volumique en fonction du temps.....	78
Figure 19 : Canal linéaire simulé avec des blocs (temps de simulation de 12 s). Les blocs sont colorés selon leur vitesse (m/s)	78

Figure 20 : Chenal simulé avec un obstacle	83
Figure 21 . Modèle de processus et modèle d'impact des DF sur un obstacle d'après Proske et al., (2011)	83
Figure 22 : Maillage <i>FLAC3D</i> utilisé pour le modèle fluide (0.5×0.5)	84
Figure 23 : Etapes du couplage DEM- <i>FLAC3D</i>	86
Figure 24 : Résultat de la simulation de l'écoulement d'un fluide dans <i>FLAC3D</i> après 12 s de temps de simulation : (a) la distribution de la porosité, (b) la distribution de vecteurs vitesses (m/s)	86
Figure 25 : Calcul de la phase fluide avec le code <i>Telemac3D</i> : (a) surface libre, (b) champ de vitesses	88
Figure 26 : Diagramme montrant les étapes de la simulation incluant un obstacle	90
Figure 27 : Les blocs simulés (DEM) avec la surface libre de la phase fluide	91
Figure 28 : Interaction des particules avec le pilier à l'état final $t = 12$ s.....	91
Figure 29 : Pression appliquée par les blocs sur un pilier en fonction du temps de simulation. La courbe noire représente les données brutes et la courbe rouge montre de moyenne mobile (filtre) avec $k= 10$	94
Figure 30 : (a) Pression moyenne appliquée par les blocs (courbe grise), la phase fluide (courbe bleue) et la pression totale (courbe noire, sur le pilier (Cas de référence) ; (b) les limites de la pression moyenne (maximale et minimale) calculées en fonction de l'écart-type (entre 9 et 12s)	95
Figure 31 : Pression normalisée induite par un DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisé sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 hMu différents)	99
Figure 32 : Pression normalisée induite par un DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisé sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 V_{DF} différents).....	100
Figure 33 : Pression dynamique maximum normalisée en fonction de nombre de Froude, comparé à 4 modèles empiriques (l'écart-type de la pression maximale est présenté par les barres d'erreur).....	105
Figure 34 : Distribution granulométrique pour chaque choix d'un diamètre maximal	110
Figure 35 : Pression moyenne appliquée par le DF sur le pilier en fonction du diamètre maximal des particules solides de la simulation	110
Figure 36 : Épaisseur de la couche granulaire dans une section du chenal en fonction de la longueur du chenal et du diamètre maximal des plus grosses particules	111

Figure 37 : R-block généré dans <i>PFC3D</i> (sous 3 angles différents).....	112
Figure 38 : Deux simulations pour différentes formes de blocs : (a) Sphères, (b) R-blocks .	113
Figure 39 : Pression normalisée induite par le DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisée sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 <i>hMu</i> différents)	114
Figure 40 : Pression normalisée induite par le DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisée sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 <i>VDF</i> différents).....	115
Figure 41 : Comparaison des résultats numériques avec les modèles empiriques.....	116
Figure 42 : Force totale appliquée par les blocs sur un pilier en fonction du temps de simulation. La courbe noire montre la moyenne mobile (filtrée avec $k = 10$ pour les r-blocs et la courbe rouge pour les sphères	117
Figure 43 : Comparaison du coefficient de pression dynamique pour les deux formes de bloc (entre 9 et 12 s, (a) pour 3 <i>hMu</i> différents et (b) pour 3 <i>VMu</i> différents)	118
Figure 44 : Présentation du coefficient de pression dynamique pour 3 <i>hMu</i> différents entre 9 et 12 s, pour les deux formes de blocs (a) sphères (balls) et (b) r-blocks. Les barres d'erreurs représentent les écarts-types calculés pour chaque pression moyenne entre 9 et 12 s	119
Figure 45 : Différentes formes de structure étudiées	120
Figure 46 : Diagramme de pression pour les trois formes de piliers.....	121
Figure 47 : Épaisseur de la couche granulaire dans une section du chenal en fonction de la longueur du chenal pour chaque cas d'orientation du pilier face à l'écoulement	124
Figure 48 : Force d'impact moyenne en fonction du diamètre du bloc pour les 3 cas de <i>hMu</i>	126
Figure 49 : Pourcentage des valeurs de force de contact en fonction du diamètre des blocs pour les 3 cas de <i>hMu</i>	126
Figure 50 : Distribution de la probabilité des valeurs de F_{max} pour chaque classe granulométrique	127
Figure 51 : Répartition du nombre d'impacts pour chaque classe (cas $h = 1.5$ m)	128
Figure 52 : Paramètres dominants qui influencent la pression d'impact (Proske et al., 2011)	129
Figure 53 : Bilan sur les paramètres d'écoulement et de la structure qui influencent la pression d'impact mais qui ne sont pas très détaillés dans la littérature	129
Figure 54 : Démarche proposée pour améliorer l'estimation de la vulnérabilité.....	136

Figure 55 : Présentation des calculs de la vulnérabilité améliorée V' en fonction de différentes tailles de blocs (d_{max}) par rapport à la valeur de la vulnérabilité calculée avec le modèle Kang et Kim (2016) pour $d_{max} = 0.4m$	138
Figure 56 : Relation de P en fonction de d_{max} pour différentes simulations de différentes hauteurs	140
Figure 57 : Quebradas San Lazaro (prise sur site)	159
Figure 58 : Quebradas Mariano Melgar-Huarangal (prise sur site)	159
Figure 59 : différentes typologies dans la ville d'Arequipa (prise sur site).....	162
Figure 60 : Exemples de mesures de structure faites à Arequipa.....	164

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des lahars et des crues dans la ville d'Arequipa (Thouret et al. 2013)	28
Tableau 2 : Niveaux d'aléas résultant de la délimitation des terrasses (élévation au-dessus du chenal, débit et période de retour) (Thouret et al., 2013).....	32
Tableau 3 : équations empiriques existantes permettant de mesurer des pressions de façon empirique.....	38
Tableau 4 : Travaux expérimentaux visant à évaluer les forces induites par les DFs/LHs.....	40
Tableau 5 : Exemples des approches numériques pour la modélisation de l'écoulement et leurs impacts	43
Tableau 6 : Quelques études existantes sur la vulnérabilité.....	50
Tableau 7 : Exemples de types de fonction utilisés dans la littérature.....	52
Tableau 8 : Exemples des fonctions de vulnérabilité montrant le seuil choisi pour chaque intensité de l'aléa.....	53
Tableau 9 : Caractéristiques de l'écoulement choisi pour la simulation	70
Tableau 10 : Résultats de la calibration du modèle.....	74
Tableau 11 : Analyse des résultats du modèle de calibration.....	75
Tableau 12 : Résultat final obtenu après l'étude paramétrique.....	77
Tableau 13 : Comparaison des deux méthodes de calcul de la phase fluide.....	89
Tableau 14 : Paramètres de contact étudiés.....	96
Tableau 15 : Les différentes simulations réalisées	98
Tableau 16 : Résumé des modèles numériques existants.....	102
Tableau 17 : Modèles empiriques existants dans la littérature.....	104
Tableau 18 : Résumé des modèles de pression d'impact de DF (Poudyal et al., 2019)	121
Tableau 19 : Comparaison des résultats numériques pour les différentes formes de pilier ...	122
Tableau 20 : Fonction de vulnérabilité proposée par Kang et Kim, (2016) pour les structures en béton armé	135
Tableau 21 : Calculs de vulnérabilité pour 5 cas de simulations avec $d_{max} = 0.4$ et $d_{min} = 0.1$ m en utilisant les modèles de Kang et Kim, (2016)	135
Tableau 22 : Influence de d_{max} sur P et V	136
Tableau 23 : Calcul de vulnérabilité pour de différents d_{max} pour les R-blocks	139

Tableau 24 : Comparaisons de quelques fonctions de vulnérabilité fondées sur les seuils de pression d'impact	141
Tableau 25 : Types structuraux et classes de vulnérabilité utilisées dans les enquêtes de terrain sur le bâti à Arequipa en collaboration avec PLINIVS Study Center (Thouret et al., 2013, 2014)	161
Tableau 26 : Synthèse des mesures par matériaux (R : résistance à la compression/ E: module de Young).....	165

INTRODUCTION GENERALE

Les catastrophes naturelles sont des évènements dévastateurs dont la fréquence a considérablement augmenté ces dernières années, sous l'effet du changement climatique. Elles prennent la forme de tsunamis, de coulées de boue, de débris, de glissements de terrain ou de séismes. Elles causent la mort de milliers d'êtres humains et provoquent des dommages matériels qui se chiffrent en millions de dollars : ces pertes touchent aussi bien les habitats que les infrastructures permettant à la société d'assurer son bon fonctionnement, mais également la sécurité des personnes.

La place qu'occupent les écoulements parmi les facteurs de risques est considérable. Le terme d'écoulement recouvre une grande variété de phénomènes qui se rencontrent sur l'ensemble de la surface du globe, des climats polaires aux régions équatoriales, des plus hauts sommets jusqu'au fond des océans : on peut citer les écoulements biphasiques tels que les coulées de boue, ou les coulées de débris ; écoulement liquides comme les crues et les inondations qui en résultent ; les écoulements turbulents fluidisés comme les coulées pyroclastiques et les courants de turbidité.

Il est primordial de préparer les régions identifiées comme zones exposées à faire face à la survenue de ces évènements. Ainsi, il est indispensable de mettre en évidence le cheminement du phénomène considéré, de caractériser son comportement, ses évolutions temporelle et spatiale et ses interactions avec les ouvrages situés sur son trajet. Pour répondre à une partie de ces interrogations, la modélisation numérique est un outil puissant disponible de nos jours. Ce travail s'intéresse plus particulièrement à l'interaction écoulement-ouvrage.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons un modèle numérique permettant d'évaluer la pression d'impact (P) de coulées de débris sur des ouvrages ou structures de génie civil. Ce modèle a pour originalité de tenter de mieux prendre en compte l'effet des blocs présents dans ces écoulements : la taille de ces derniers est un paramètre pouvant influencer fortement la pression d'impact et a un effet considérable sur les dommages de la structure. Le modèle, par son apport à une meilleure évaluation des efforts engendrés sur les structures, peut aider à la conception de mesures de protection civile, en quantifiant leur vulnérabilité. Un modèle

granulaire-fluide à couplage unidirectionnel est développé : la phase granulaire est modélisée à partir de la méthode des éléments distincts (DEM) tandis que la phase fluide est fondée sur des résultats de calculs de dynamique des fluides (CFD). Plusieurs approches existent pour modéliser ce type d'écoulement et leur impact, mais le modèle développé ici présente plusieurs avantages dont les principaux sont : (1) la prise en compte plus précise de la contribution des blocs et (2) une échelle de modélisation relativement réduite, permettant de réaliser des simulations avec des temps de calcul raisonnables.

Ce travail a été réalisé en plusieurs étapes :

- Modélisation d'un écoulement, de caractéristiques fixées, dans un chenal de géométrie linéaire : utilisation du logiciel Particle Flow Code *PFC3D* (Itasca) pour simuler les blocs dans un chenal rectangulaire, et simulation de manière indépendante d'un écoulement fluide seul, afin d'obtenir les champs de vitesses et de surface libre de la phase fluide ;
- Modélisation de la structure exposée au passage d'un écoulement : choix de la forme, de l'orientation, des caractéristiques et des dimensions de la structure, qui sera modélisée par la méthode différences finies (*FLAC3D*, Itasca) ;
- Modélisation de l'interaction entre l'écoulement et la structure afin d'évaluer les pressions d'impact : calcul direct dans le code DEM à partir des forces de contact entre les blocs et le pilier ;
- Quantification et amélioration du calcul de la vulnérabilité de la structure exposée en fonction de la pression d'impact : Amélioration des fonctions de vulnérabilité existantes sur la base de nos simulations en considérant des nouveaux paramètres ;
- Etude paramétrique qui présente l'influence des paramètres d'écoulement et des structures sur la pression d'impact : Variation de plusieurs paramètres pour la partie écoulement (hauteur, vitesse, forme, taille du bloc...) et pour la structure (forme, orientation, nombre...).

Un modèle numérique permettant d'évaluer la pression d'impact de l'écoulement ainsi que les caractéristiques de l'écoulement dans plusieurs sections du chenal (vitesse, débit volumique, hauteur d'accumulation...) a été développé.

ORGANISATION DU MEMOIRE

La mémoire comprend 5 chapitres, organisés de la manière suivante :

- Chapitre 1 « Contexte et état de l'art sur les coulées de débris et leurs impacts » : ce chapitre expose un état de l'art sur les coulées de débris et les écoulements associés, les méthodes existantes pour le calcul de leur force d'impact sur les ouvrages, ainsi que pour l'étude de la vulnérabilité des structures. L'intérêt et les limitations des méthodes existantes sur l'impact sont présentés, ce qui permet de faire émerger la problématique de recherche de notre travail.
- Chapitre 2 « Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle » : ce chapitre décrit dans un premier temps la mise en place du modèle numérique proposé, la modélisation des deux phases d'écoulement en présence, puis détaille les paramètres du modèle DEM et leur calage pour simuler un écoulement ayant des caractéristiques données (hauteur, vitesse, concentration solide...) dans un chenal sans obstacle.
- Chapitre 3 « Couplage DEM-Fluide et validation du modèle » : ce chapitre comprend trois parties. La première partie présente la géométrie du chenal en présence d'un obstacle ; la mise en place du couplage DEM-Fluide est décrite, en présentant les différents codes de calcul fluide utilisés dans ce travail. La deuxième partie présente les résultats de plusieurs simulations sur la pression d'impact exercée par une coulée de débris sur l'obstacle. La dernière partie détaille la validation du modèle numérique.
- Chapitre 4 « Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle » : ce chapitre expose une étude paramétrique des paramètres liés à l'écoulement et à la structure, généralement non pris en compte dans les modèles empiriques.
- Chapitre 5 « Application à l'étude de la vulnérabilité » : ce dernier chapitre illustre l'application du modèle numérique à la vulnérabilité physique de la structure.

CHAPITRE 1

Contexte et état de l'art

1. Les coulées de débris et écoulements associés

Les coulées de débris sont des mouvements de masse rapides de mélanges de débris et d'eau, qui sont courants dans les terrains montagneux. Elles surviennent dans la plupart des cas après de fortes précipitations, lorsque l'eau de pluie est capable de mobiliser une grande quantité de sédiments. On peut les imaginer comme des glissements de terrain liquéfiés, contenant un mélange de fluides et des solides ayant un comportement particulier (non newtonien). Le terme anglais pour coulées de débris est « debris flows », souvent noté DF. Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons le sigle DF pour faire référence aux coulées de débris.

En raison de leur grande fluidité, ces écoulements peuvent parcourir de longues distances (jusqu'à des dizaines de kilomètres, Thouret et al., 2020). Les différents types de DF peuvent être divisés selon la concentration des sédiments, la distribution granulométrique, la densité apparente, le phénomène déclencheur.

Les phénomènes de coulées de boue, de crues éclair et DFs sont de plus en plus fréquents sous nos latitudes et exposent les zones urbanisées à des risques importants. Ils ont engendré par le passé des catastrophes dans plusieurs villes, qu'ils soient d'origine volcanique ou non, par exemple : 23 000 morts à Armero en 1985 (Nevado del Ruiz, Colombie (Pierson et al., 1990)), le Pinatubo (Philippines) en 1991 (Newhall et Punongbayang, 1996), le Mayon (Philippines) en 2006 (Paguican et al., 2009), Arequipa (Pérou) (Thouret et al., 2013; 2014 ; Pallares et al., 2015), Chaitén (Chili) en 2008 (Major et al., 2016).

Les coulées de débris empruntent généralement les chenaux des rivières, mais s'étendent parfois sur les berges des vallées et les cônes de déjection, recouvrant de vastes zones de matériaux épais et grossiers, causant ainsi de graves dommages à l'habitat urbain et aux

infrastructures, par exemple, Sarno (Italie) (Zanchetta et al., 2004), Arequipa (Pérou) (Thouret et al., 2014), El Porvenir et Rolando Rodriguez (Nicaragua) (Scott et al., 2005).

Partout dans le monde, de grandes villes se sont développées au cours des deux derniers siècles sur des terrains auparavant inhabités. Par exemple, la ville de Caraballeda au Vénézuéla a été partiellement détruite par une seule coulée de débris en 1999, et a coûté en quelques heures la vie de dizaines de milliers de personnes (Larsen et al., 2001). Ces écoulements ont suscité l'intérêt de la communauté des chercheurs en raison des destructions sévères, qui entraînent chaque année des dommages matériels coûteux et des milliers de victimes. Ils sont dangereux, difficiles à prévoir et à détourner ou freiner.

L'augmentation dans le temps de l'occurrence de ce type d'aléa est liée à plusieurs facteurs :

(1) le changement climatique, qui entraînerait une augmentation de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des précipitations (Petley et al., 2005) ,

(2) la déforestation qui accroît la susceptibilité aux glissements de terrain (Crozier, 2005),

(3) la croissance démographique, qui entraîne une augmentation du nombre et de la densité des victimes potentielles (Petley et al., 2007),

(4) l'urbanisation qui peut entraîner en particulier une croissance mal régulée des constructions (Schuster and Highland, 2001; Petley et al., 2007).

Ces changements globaux et/ou récents pourraient impliquer de nouvelles conditions de déclenchement des mouvements de masse et, par conséquent ils aboutissent à exposer des zones autrefois considérées comme sûres à de nouveaux types de risques.

2. Les lahars, écoulements d'origine volcanique

Les aléas volcaniques comprennent les retombées de téphras, les courants de densité pyroclastiques, les avalanches de débris, les coulées de lave et les lahars (LHs). Ces derniers sont des mélanges très mobiles d'eau et de sédiments d'origine volcanique, qui comprennent les coulées de débris et les écoulements hyperconcentrés. Ils peuvent être également déclenchés par des orages intenses pendant les périodes de repos volcanique (Doyle et al., 2011).

2.1 Initiation des lahars

Le processus d'initiation des LHs dépend des conditions locales du bassin versant, de la pluviométrie, et de la nature et teneur en eau des matériaux (sols, dépôts volcaniques). L'occurrence et la genèse permettent de classer trois catégories de lahars (Lavigne et Thouret, 2000) :

- Les lahars syn-éruptifs (primaires) se produisent pendant une éruption et sont déclenchés par de nombreux processus comme des éruptions sous-glaciaires, la fusion de la neige et l'irruption d'écoulements pyroclastiques dans une rivière (par exemple).
- Les lahars post-éruptifs se produisent quelques jours à quelques années après une éruption et leur déclenchement obéit à deux types de paramètres : climatiques (durée et intensité des précipitations) et morpho-sédimentologiques. L'endommagement considérable qu'ils engendrent est dû à la diversité et à la répétition des impacts physiques.
- Les lahars non-éruptifs ou secondaires sont engendrés sur les flancs des volcans en l'absence ou sans rapport direct avec l'activité éruptive récente. Certains lahars secondaires résultent de la remobilisation de cendres éloignées de la source ou de la transformation de glissement sur des volcans dormants ou inactifs (par ex. au Casita, Nicaragua en 1998 après le passage du cyclone Mitch ; Scott et al., 2005).

2.2 Types de lahars

Après leur déclenchement, les lahars présentent un comportement d'écoulement non-newtonien dû aux interactions complexes entre le fluide et les particules (et une pression interstitielle) qui les distinguent des avalanches de débris et des inondations (Manville et al., 2013; Iverson et George, 2014). Ces écoulements s'écoulent à grande vitesse (3 à 10 m/s en moyenne) sur les pentes des volcans et dans les chenaux des rivières radiales, notamment à la suite de précipitations intenses et/ou durables (Lavigne et Thouret, 2000).

Parmi les risques volcaniques, les lahars sont plus meurtriers et destructeurs que toute autre cause directe, à l'exception des écoulements pyroclastiques et des tsunamis. Brown et al., (2017) ont signalé que depuis 1500, environ 56 300 décès (26 % du total des décès liés aux volcans) sont dus aux LHs. En effet, ces derniers parcourent de grandes distances avec une

charge de blocs provoquant davantage de dégâts. Les particules solides présentent une large gamme de tailles allant du limon et sable jusqu'aux blocs de plusieurs mètres de diamètre (Lavigne et Thouret 2000 ; Doyle et al., 2010 ; Manville et al., 2013).

Le terme lahar ne correspond pas à un écoulement particulier mais il comprend une large gamme entre les coulées de débris (DF) et les écoulements hyperconcentrés (HCFs) (Manville et al., 2013 ; Pierson, 2005) :

- Les HCFs qui sont plus turbulents avec une concentration sédimentaire entre 20-50 % (en volume) et une densité apparente entre 1300-1800 kg/m³ et dont les dépôts sont moins hétérométriques et mieux triés.
- Les DFs qui sont denses, avec un régime plutôt laminaire, et qui présentent les dépôts massifs, hétérométriques et très mal triés, dont la concentration sédimentaire est supérieure à 50% en volume, et dont la densité apparente est entre 1800-2300 kg/m³.

La transition entre HCF et DF est liée à la concentration sédimentaire (> 50% en volume pour les DFs). Elle est aussi liée à des phénomènes internes du mélange fluide-solide dus à l'incorporation des sédiments, aux modifications de la pression interstitielle et des pulsations à l'intérieur de l'écoulement.

Pour ce type de phénomène, on a fait le choix d'une étude de cas de la ville d'Arequipa (Pérou) comme une application générale de l'étude.

2.3 Cas d'Arequipa (Pérou), une métropole exposée aux lahars

Arequipa est la deuxième plus grande ville du Pérou et l'un des principaux centres de commerce et de tourisme du pays. La ville est située entre 9 et 17 km de distance et à 3.5 km de dénivellation du sommet du volcan actif El Misti, qui culmine à 5822 m (Figure 1).

Cette métropole est exposée à de nombreux aléas naturels, notamment les séismes, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain, les lahars et les inondations dues à des crues éclair dues à des précipitations intenses et localisées en milieu semi-aride. Parmi les aléas, les lahars déclenchés par des pluies torrentielles, courtes mais concentrées (par exemple en Février 2013) et survenant en été austral, constituent un des risques les plus fréquents qui peuvent affecter la ville et ses environs (Figure 2).

La population d'Arequipa, de Chiguata et des villages voisins dépasse le million d'habitants (1 113 000 habitants d'après le recensement de 2017) : elle est passée de 330 000 habitants environ en 1972 à 820 000 habitants en 2007, avec un taux de croissance démographique d'environ 2.5% par an. Les zones bâties exposées à ce risque regroupent généralement des populations démunies et les structures sont réalisées en maçonnerie (ou briques) relativement rudimentaire. Cette ville souffre d'une croissance désordonnée et mal planifiée dans les faubourgs (contrastant avec le centre).

Arequipa est drainée par plusieurs ravines, localement appelées quebradas (Qda) ou torrenteras : les couloirs de passage du lahar. Elle s'est entièrement développée sur des terrasses fluviales le long de la vallée du Río Chili et sur les cônes de déjection et les terrasses qui ont été formés par ses cinq affluents (quebradas) à travers la ville (Thouret et al., 2014). Il convient également de noter que le Río Chili, avec ses barrages, est la principale source d'eau potable et d'énergie pour une centrale hydroélectrique alimentant la ville d'Arequipa.

Bien que la dernière éruption du volcan El Misti ait eu lieu au XV^e siècle, le volcan actif (sismicité, fumerolles) représente toujours une menace potentielle pour la population locale (Thouret et al., 2013). En raison de sa situation dangereuse, les scientifiques ont réalisé ces dernières décennies des recherches concernant le bassin de la ville et le volcan El Misti (Thouret et al., 2013) : s'ajoutant aux risques volcaniques catastrophiques, de fortes pluies et des inondations associées aux crues éclair affectent la ville une à deux fois par décennie.



Figure 1 : Volcan El Misti à l'arrière-plan de la ville d'Arequipa



Figure 2 : Lahars à Arequipa

Le Tableau 1 montre quelques caractéristiques des lahars et des crues dans la ville d'Arequipa. Pour la sécurité des populations, il est donc nécessaire d'évaluer et cartographier les risques au moyen de mesures de la vulnérabilité des structures exposées aux lahars.

Le cas de la ville d'Arequipa (Pérou), qui subit régulièrement ce type de phénomène, constitue le point de départ et le terrain d'application de ce travail de thèse. Dans le cadre du projet Quorum et dans le cadre de la collaboration avec le laboratoire Magma et Volcan (Jean-Claude Thouret), nous avons participé à une mission de terrain à Arequipa du 05 au 18 mai 2019. Cette mission de deux semaines dans la ville d'Arequipa a permis de réaliser un certain nombre de mesures et enquêtes de terrain. Le rapport de cette mission est détaillé en Annexe 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des lahars et des crues dans la ville d'Arequipa (Thouret et al. 2013)

Type	Volume	Fréquence	Exemples
Crues éclairs	260m ³ s ⁻¹ , 2–3m profondeur, proche centre-ville	Une ou deux fois par décennie	Rio Chili 1989, 1992 ; Qda.Huarangal 1997, 2011
Ecoulements hyperconcentrés	volume relativement faible <1.5 million m ³	Une ou deux fois par décennie	Qda Huarangal, 1997
Lahar: grains fines, coulées de débris	Volume moyen >1.5million m ³	Au moins une fois tous les 100 ans	Academia Tennis, Rio Chili à travers le centre-ville
Lahar: débris grossiers, coulées de débris	4 à 11 million m ³	Au moins une fois tous les 1000 ans	Rio Chili Qda. Huarangal, Qda. San Lazaro

2.3.1 Évaluation des risques : Zones de danger

Il est crucial d'identifier les différentes zones de danger qui sont affectées par le volcan El Misti. La Figure 3 ainsi que le Tableau 1 montrent quelques éléments existants de la cartographie des risques sur cette agglomération (Franco et al., 2010). Une carte des aléas volcaniques simplifiée d'El Misti est présentée à la Figure 3.

En se fondant sur le type et le volume des dépôts historiques, il est possible de supposer que les futurs événements volcaniques d'El Misti, même s'ils sont de magnitude modérée, constitueront une menace sérieuse pour les zones densément peuplées d'Arequipa. Différents écoulements (pyroclastiques, cf. (Charbonnier et al., 2013, 2020) ; et lahars cf. (Thouret et al., 2020)) peuvent atteindre et causer de grandes destructions dans les zones urbaines d'Arequipa, qui ont été construites depuis les années 1960 sur les cônes volcanoclastiques des Qda. San Lazaro, Qda. Huarangal-Mariano Melgar, et Qda. Paucarpata, ainsi que sur les basses terrasses du Río Chili (Figure 4).

Par conséquent, un événement volcanique ou un glissement de terrain de faible ampleur affectant les pentes ouest du volcan représenterait une menace sérieuse pour l'approvisionnement en eau (Franco et al., 2010 ; Thouret et al., 2014). De plus, Les différents niveaux de terrasses existants (élevations au-dessus du chenal) influencent le niveau de danger dans la ville (Tableau 2, Figure 4) : par exemple, les terrasses notées T3 (élévation de 10-15 m) et T4 (élévation de 15-30 m) ne sont susceptibles d'être inondées que par des lahars liés à des grandes éruptions, et à l'inverse, les terrasses T0 (< 1 m) et T1 (< 2-3 m) sont fréquemment inondées (tous les 2 à 10 ans). Les terrasses inférieures (T0 et T1), situées à moins de 100 m des quebradas sont donc les plus vulnérables aux lahars (Thouret et al., 2013; 2014).

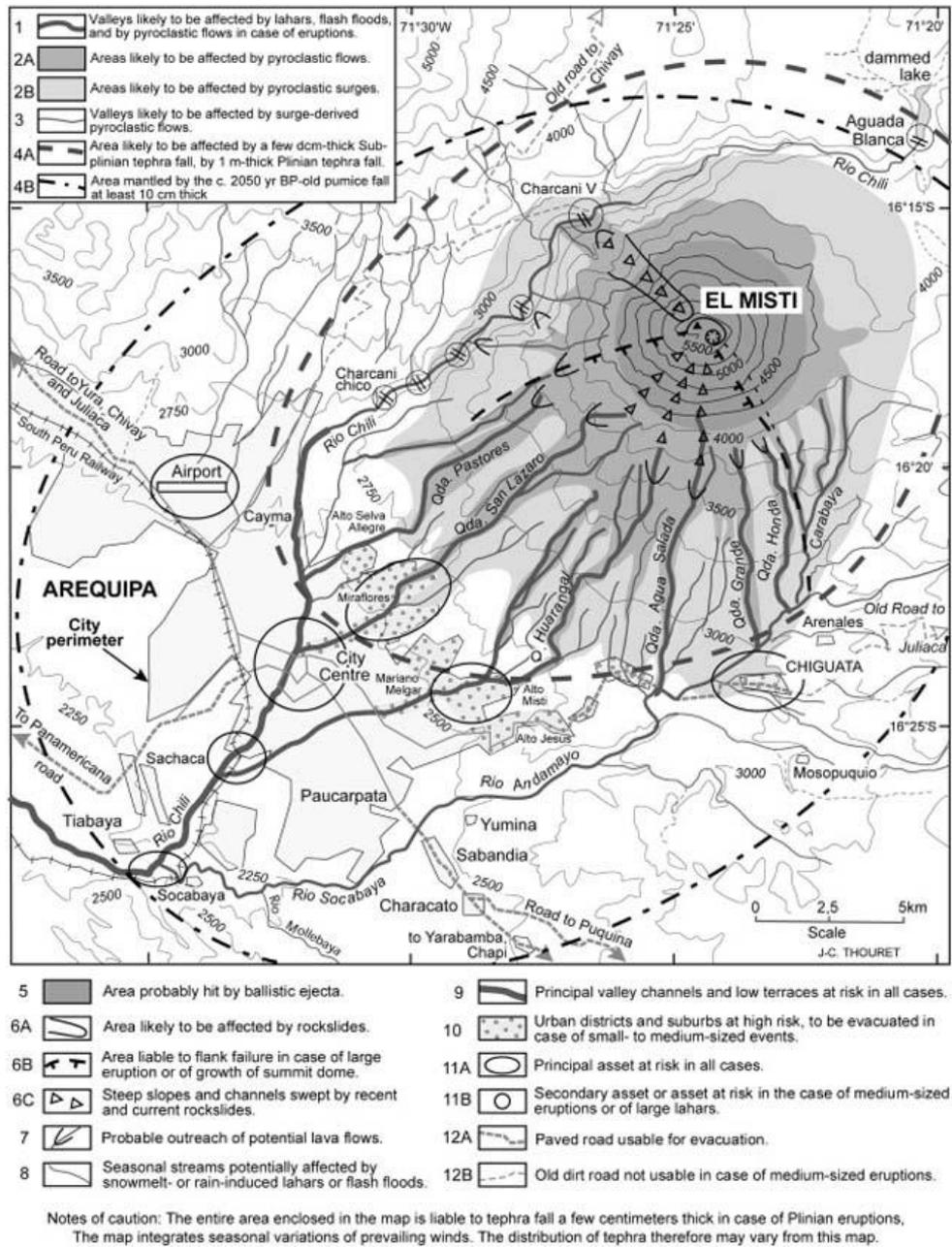


Figure 3 : Carte des aléas volcaniques du Misti dans la région d'Arequipa (Franco et al., 2010)

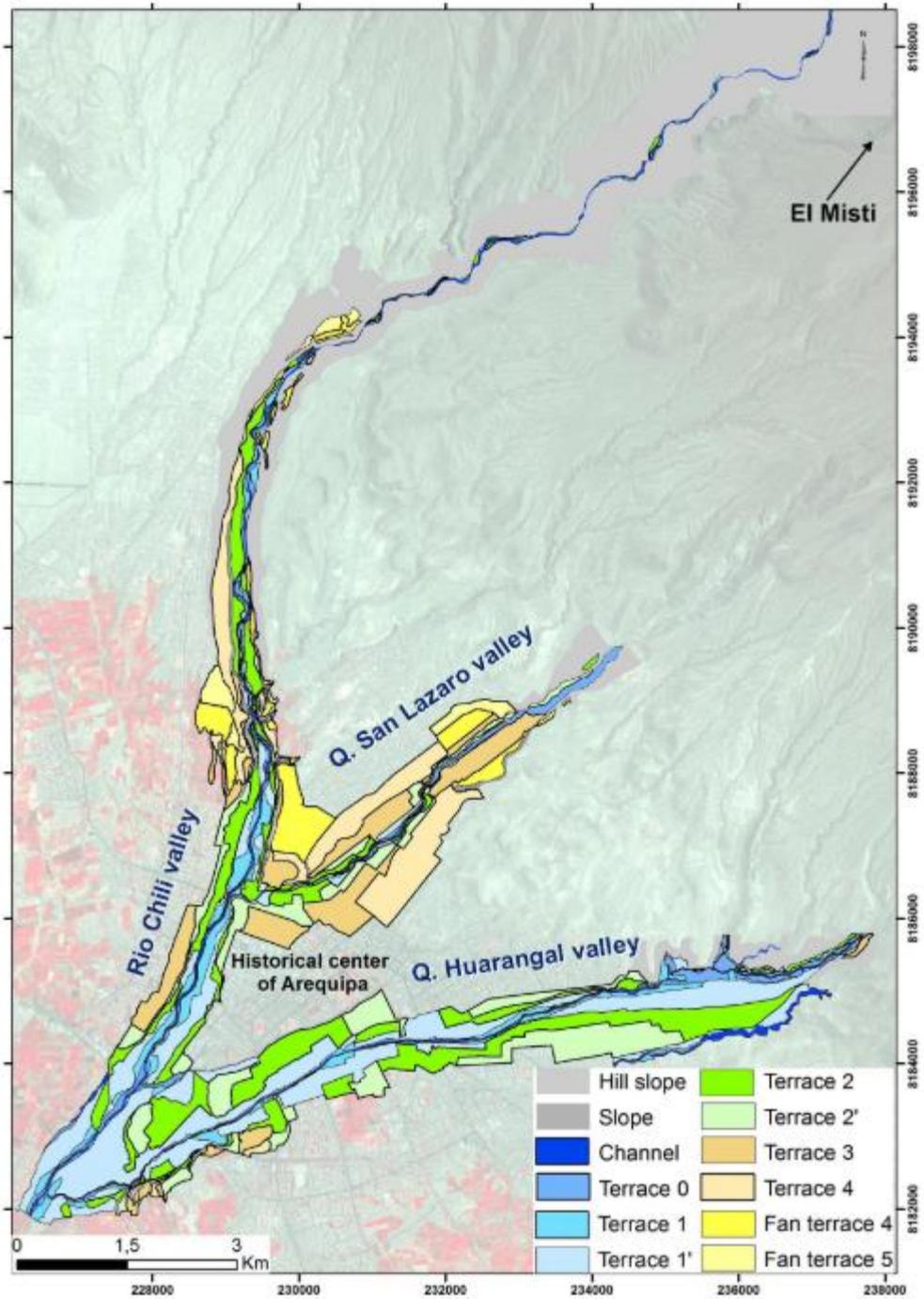


Figure 4 : les différents terrasses du centre-ville d'Arequipa (Thouret et al., 2013)

Tableau 2 : Niveaux d'aléas résultant de la délimitation des terrasses (élévation au-dessus du chenal, débit et période de retour) (Thouret et al., 2013)

Hazard level	GIS grade	Flash floods			Lahars (hyperconcentrated streamflows and debris flows)	
		Number	Return period	Discharge (m ³ s) ⁻¹	Return period	Discharge (m ³ s) ⁻¹
High	5	T0 + T1	10–100	5–10	> 0.5	10–50
Moderate	4	T1' + T2	100–150	> 10–50	0.5–1.5	50–100
Low	3	T2' + T3	150–260	50–100	1.5–4	> 100–1000
Very low	2	T4	> 260	> 100–1000	4–11	> 1000–10000
Residual	1	Above T4	–	–	–	–

2.3.2 Etude de cas

Une zone d'étude de la Quebrada Dahlia de la ville d'Arequipa (affluent de rive droite, Ouest, de la Qda Huarangal), a été choisie comme étude de cas pour plusieurs raisons. Conduite sur une section de 150 m de long, l'étude de Mead et al., (2017) a eu pour but d'examiner l'aléa de lahar et les dommages sur le bâtiment :

- Le chenal est rectiligne ce qui réduit l'effet des virages dans le cours d'eau sur la dynamique du lahar (Figure 5) ;
- La qualité des bâtiments est variable mais représentative d'un faubourg d'Arequipa, ce qui permet d'étudier les effets de la qualité du bâti sur les dommages causés par les lahars ;
- Les bâtiments sont situés sur la terrasse la plus basse, ce qui signifie qu'ils peuvent être affectés par des événements causés par les lahars les plus fréquents.

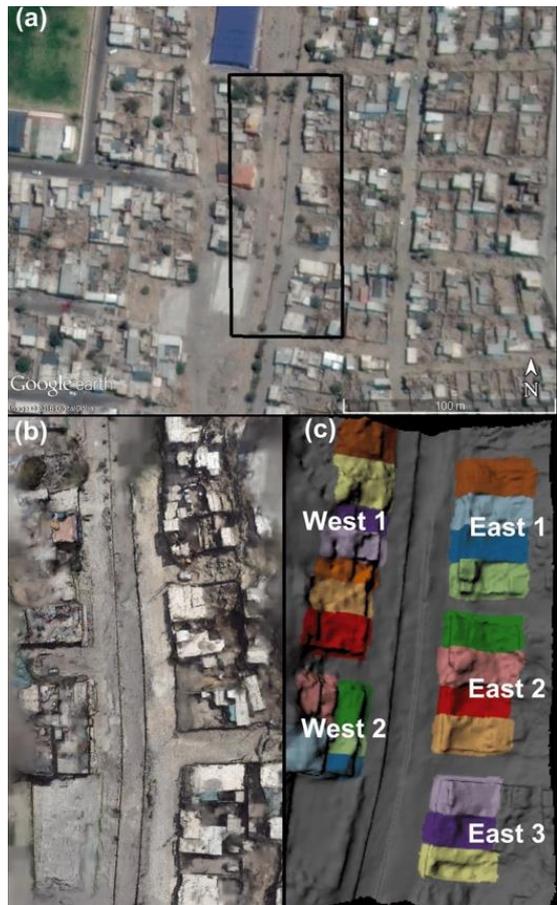


Figure 5 : Vue de l'ensemble de la zone d'étude de Quebrada Dahlia, Arequipa, (a) image aérienne avec cadre noir montrant les chenaux et les lignes transparentes montrant les rues de la zone, (b) reconstruction photogrammétrique de la surface, (c) bâtiments individuels et blocs de construction identifiés à partir des relevés de bâtiments (Mead et al., 2017)

Les derniers événements qui s'y sont produits ont généré des flux très denses de matériaux et des dépôts historiques visibles par les dépôts récents : ces cas méritent l'attention du public. Des cartes récemment établies nous permettent de mieux visualiser où se trouvent les zones à risque d'impacts de lahars dans la ville d'Arequipa (Figure 6).

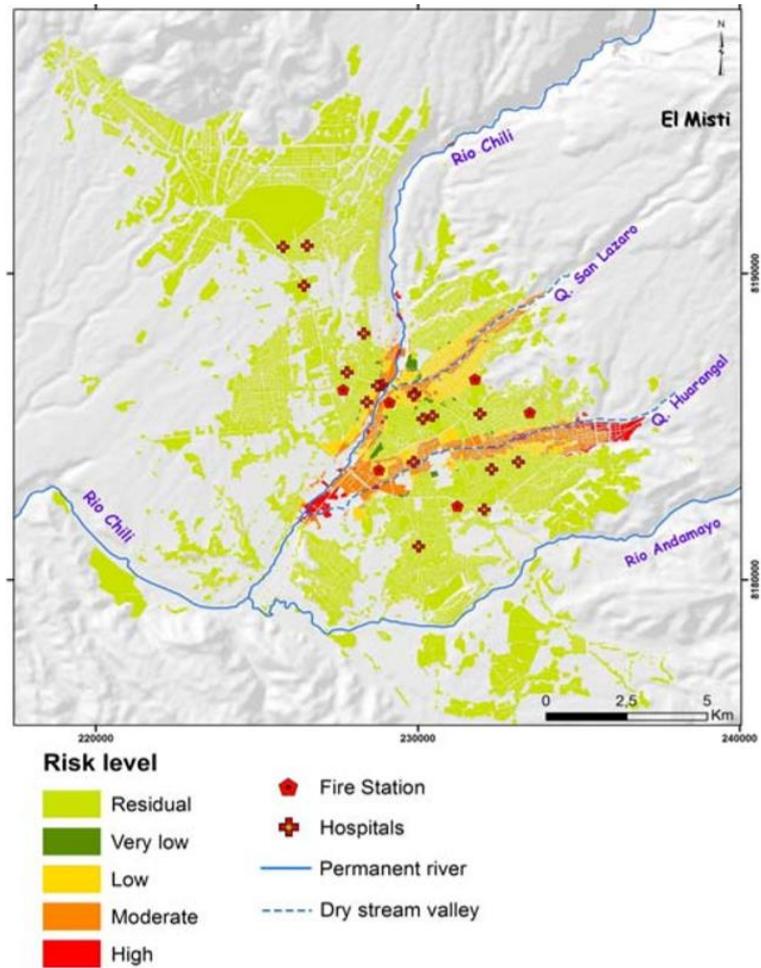


Figure 6 : Zones exposées au risque de lahar et d'inondation à Arequipa (Thouret et al., 2013)

Plusieurs types d'écoulement ont été présentés en montrant les risques importants causés par ces phénomènes. Plus particulièrement, la genèse et les caractéristiques des lahars ont été détaillées en choisissant Arequipa comme étude de cas exposée à ce type d'écoulement avec les zones de dangers correspondantes. Par la suite, un état de l'art sur les différentes méthodes d'évaluation des effets des écoulements est proposé.

3. Méthodes d'étude des écoulements et de leurs impacts

3.1 Ecoulements et impacts

L'impact est un terme générique qui comprend les actions et les conséquences directes et indirectes que les LHs et les DFs génèrent sur les ouvrages : bâtiments, infrastructures ou

réseaux (Thouret et al., 2020). Ces écoulements engendrent trois effets mécaniques majeurs (Zanchetta et al., 2004) : (1) une pression hydrostatique en fonction de la hauteur et de la densité de l'écoulement, (2) une pression hydrodynamique en fonction de la vitesse et de la densité, et (3) la collision des blocs en fonction de leur masse et de leur vitesse (Thouret et al., 2020).

Par ailleurs, ces écoulements ne sont pas linéaires, mais se propagent par pulsations dont les caractéristiques physiques et rhéologiques sont variables dans l'espace et le temps. Cela a été montré par différents travaux récents, soit sur le terrain dans des chenaux naturels instrumentés (cf. Semeru, (Doyle et al., 2010 ; 2011) ; expériences en Autriche-Suisse et en Chine), soit sur des rampes expérimentales (nombreuses publications de Iverson et al.).

Ces effets varient également dans l'espace et dans le temps, puisque un écoulement de lahar ou coulées de débris englobe communément trois segments à savoir la tête, le corps et la queue dont les caractéristiques sont différentes (Cui et al., 2015 ; Iverson, 2015) (Figure 7). La tête possède généralement une concentration plus élevée de particules solides de grande taille : elle génère pendant une courte période une pression dynamique et des forces de collision plus élevées que les segments suivants de l'écoulement. Le corps génère également des collisions et une pression dynamique de forte intensité, grâce à sa vitesse, mais aussi une pression hydrostatique importante. Enfin, la queue génère moins de collisions et de pression dynamique en raison de la diminution de la vitesse d'écoulement, mais la pression hydrostatique peut encore avoir un effet à ce stade (et après la phase de dépôt), tandis que l'incision et le décollement peuvent être induits par la queue diluée des écoulements (Cui et al., 2015).

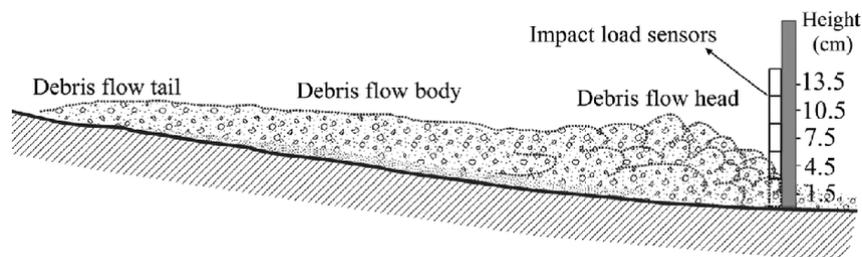


Figure 7 : Processus d'impact pour les trois segments de DF (Cui et al., 2015) : cette figure montre en particulier la partie front-tête de l'écoulement

Plusieurs facteurs rendent les mélanges de débris avec de l'eau biphasiques (DF/LHs) difficiles à prévoir ou à contrôler, ce qui influence aussi leurs impacts : (1) le comportement des LHs irréguliers qui forment des pulsations comportant les trois segments successifs 'front-tête, corps et queue', (2) la composition et la distribution granulométrique qui influencent la

dynamique de l'écoulement, (3) la morphologie du chenal qui joue un rôle sur la distance de propagation de l'écoulement (Doyle et al., 2010; De Haas et al., 2015; Thouret et al., 2020).

De nombreuses méthodes dans la littérature ont été utilisées pour mesurer les caractéristiques des LHs/DF, ainsi que leur comportement et/ou leur dynamique d'écoulement. Un réseau de capteurs peut être installés in situ dans les canaux pour mesurer les caractéristiques telles que la vitesse, le débit, la profondeur et la concentration en sédiments qui peuvent ensuite être utilisées pour mesurer d'autres paramètres comme le nombre de Froude, la densité... (Thouret et al., 2007; Doyle et al., 2010; Dumaisnil et al., 2010). D'autres tests rhéologiques peuvent aussi être effectués en laboratoire sur des matériaux d'écoulement pour mieux caractériser le comportement des écoulements. De plus, des caméras peuvent être utilisées pour mesurer les paramètres de la propagation des LHs comme aux volcans Semeru (Doyle et al., 2010), au Yakedake, Japon (Okano et al., 2012) et au Colima, Mexique (Vázquez et al., 2014), ainsi que pour visualiser le transport des blocs ou les instabilités de mélange créées. Des mesures indirectes peuvent être prises en tenant compte des radars ultrasons ou laser et des capteurs qui enregistrent la hauteur d'écoulement ainsi que des capteurs de pression interstitielle qui mesurent la pression du fluide et donnent une idée du régime d'écoulement, par exemple la turbulence (Doyle et al., 2011; Iverson et al., 2010). Ces études fournissent des données sur les comportements et les caractéristiques de plusieurs types d'écoulement qui sont intéressants pour la partie interaction « écoulement-structure ». Par conséquent, la capacité d'impact d'un écoulement est influencée par ses propres caractéristiques (vitesse, densité, hauteur...).

Les scientifiques et les ingénieurs sont depuis longtemps confrontés au défi de comprendre et d'analyser les forces d'impact des coulées de débris, qui peuvent détruire les structures exposées. L'évaluation des forces générées par ces écoulements sur les structures est un défi en raison (1) de la diversité et de la complexité des coulées de débris (composition, comportement), (2) de la topographie des chenaux des rivières ou torrents et des cônes de déjection le long desquels elles se propagent, et (3) de la diversité des types/formes de structures et de leur exposition. L'impact entre l'écoulement et les structures joue un rôle-clé dans l'évaluation du risque, au sens de la perte (rupture, endommagement, destruction). La mesure de l'impact de DF/LHs sur les structures vise à utiliser les données quantitatives obtenues à partir de mesures in situ ou de tests en laboratoire (vitesse et profondeur, pression d'impact) pour aider les ingénieurs à concevoir des structures capables d'atténuer les dommages causés

par ces écoulements (Zanchetta et al., 2004 ; Degli et al., 2008; Bugnion et al., 2012; Hu et al., 2011).

3.2 Méthodes de calcul de la force d'impact

Après la reproduction des écoulements avec des caractéristiques données, des études spécifiques ont été menées pour détailler les mécanismes des DFs et quantifier les contraintes mécaniques et les forces d'impact induites sur les structures (Mead et al., 2017; Gao et al., 2017; Kattel et al., 2018). Plusieurs approches ont été menées dans le but de mesurer et d'analyser les forces d'impact de LH/DF sur les structures : modèles empiriques, méthodes expérimentales et modélisation numérique.

3.2.1 Modèles empiriques

Plusieurs modèles empiriques de calcul des pressions d'impact existent dans la littérature : les modèles de collision solides sont utilisés pour représenter l'interaction des coulées de débris avec les structures (Hübl et al., 2009) et les modèles hydrauliques peuvent être distingués en modèles hydrostatiques, hydrodynamiques et combinés (Hübl et al., 2017; Thouret et al., 2020). Ces modèles sont validés par des expériences de laboratoire, des tests rhéologiques ou par l'analyse en retour d'événements réels.

En général, l'équation qui décrit la pression hydrostatique est définie comme suit :

$$P_{max} = k.\rho.g.h \quad (\text{Eq.1})$$

Avec P_{max} la pression d'impact maximale de DF (Pa), k un facteur empirique qui varie entre 1 et 13 (Hübl et al., 2009), ρ la densité de DF (kg/m^3), g l'accélération de la pesanteur (m/s^2), h la hauteur de DF (m).

Le modèle hydrodynamique présente la pression maximale dynamique comme suit :

$$P_{max} = \alpha.\rho.v^2 \quad (\text{Eq.2})$$

Avec α un facteur empirique qui dépend du type de l'écoulement (Hübl et al., 2009), v est la vitesse de DF (m/s).

Afin de mieux comprendre le mouvement des coulées de débris, des paramètres adimensionnels comme le nombre de Froude ($Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$) et le nombre de Reynolds (Re) qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, ont été introduits pour analyser la pression d'impact maximale (Shu et al., 2020). Hübl et al., (2009) et Proske et al., (2011) ont comparé les DFs expérimentales à petite échelle (voire miniature) et les DFs réels mesurés. Ils en ont déduit la relation entre Fr et les pressions hydrodynamiques et hydrostatiques. Ils ont constaté que l'utilisation de Fr ne permettait pas de réconcilier les tests d'impact miniaturisés avec les impacts de DF réels. Cui et al., (2015) ont divisé les processus d'impact des DF en trois phases en analysant les variations des signaux d'impact en lien avec les régimes d'écoulement. Ils ont introduit la relation entre le coefficient empirique α et le nombre de Froude pour les DF, et ont proposé un modèle pour calculer la pression dynamique.

Les équations de Hübl et al., (2009), Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018) présentent le coefficient de pression dynamique ($\frac{P}{\rho v^2}$) en fonction de nombre du Froude (Fr) (Tableau 3).

Tableau 3 : équations empiriques existantes permettant de mesurer des pressions de façon empirique

Hübl et al., (2009)	Cui et al., (2015)	Wang et al., (2018)
$\frac{P}{\rho v^2} = 5.2 Fr^{-1.6}$	$\frac{P}{\rho v^2} = 5.3 Fr^{-1.5}$	$\frac{P}{\rho v^2} = 3.476 Fr^{-2.389}$

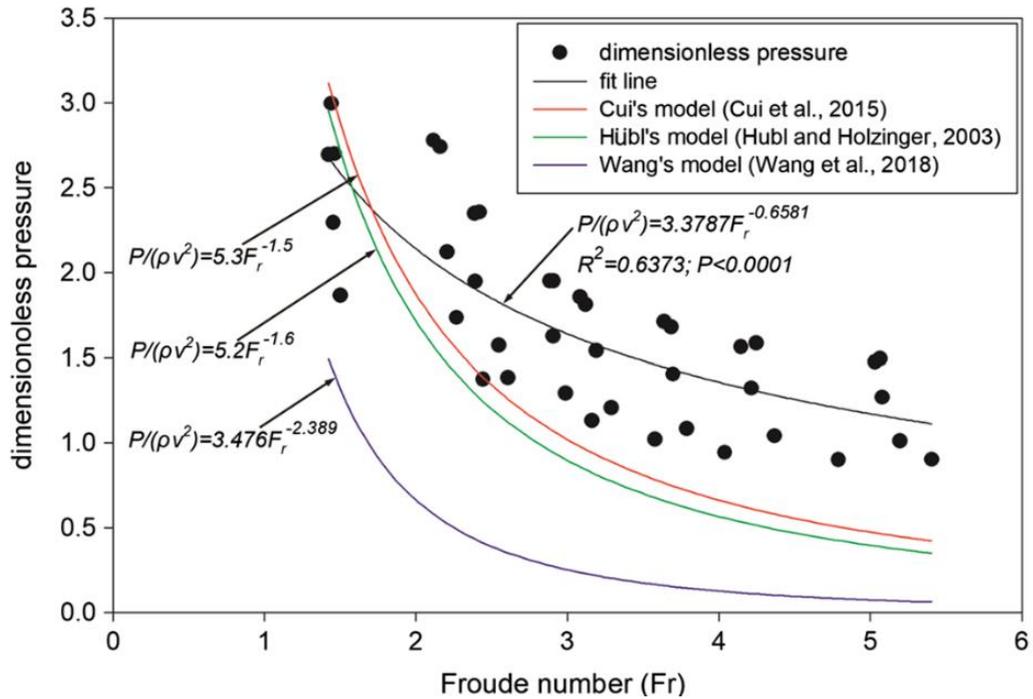


Figure 8 : Comparaison des modèles empiriques existants (Shu et al., 2020) montrant le coefficient de pression dynamique en fonction du nombre de Froude

En faisant varier le nombre de Froude, on remarque que le coefficient dynamique de pression peut-être différent d'un modèle à un autre, notamment celui de Wang (Figure 8). En effet, les modèles empiriques existants dans la littérature, qui présentent la pression d'impact exercée sur les structures, sont déduits des essais expérimentaux ou fondés sur des données d'événements réels. Chaque auteur a sa méthode et sélectionne les événements étudiés pour élaborer son modèle empirique, ce qui explique la différence des résultats entre ces nombreux modèles.

3.2.2 Méthodes expérimentales

Les méthodes expérimentales peuvent mesurer précisément les forces induites par les écoulements sur les structures, mais leurs conditions ne sont pas contrôlées et ne peuvent pas être modifiées. De plus, selon l'échelle du montage expérimental réalisé, les lois de similitudes sont difficiles à satisfaire entre des DF naturels et DF expérimentaux dont le comportement est différent. Le Tableau 4 résume quelques travaux existants dans la littérature sur l'évaluation de l'impact de LH/DF sur une structure : mesures in situ, expériences réalisées dans des canaux extérieurs avec des matériaux naturels ou à échelle réduite en laboratoire.

Tableau 4 : Travaux expérimentaux visant à évaluer les forces induites par les DFs/LHs.

Référence	Etude de cas	Méthode	Type d'écoulement et obstacle	Outil	Résultats
Zanchetta et al., 2004	May 5-6, 1998 coulées de débris volcanoclastiques, région de Sarno, (Italie)	Analytique et observations sur le terrain	DF / LH sur des structures rigides (bâtiments, ponts)	Observations sur le terrain, mesures de la zone d'étude et équations empiriques	Pression hydrostatique, dynamique, vitesse.
Tiberghien et al., 2007	Chenal de laboratoire, LTHE Grenoble	Expérience à échelle réduite	Coulée de boue sur une barrière fixe	Capteur de pression installé à l'intérieur du corps du pilier	Pression totale d'impact
Iverson et al., 2010	Chenal d'écoulement des débris de l'USGS dans la forêt expérimentale "H.J. Andrews" près de Blue River, Oregon, États-Unis	Expérience à grande échelle	DF dans différentes sections transversales du chenal	Capteurs électroniques le long de la ligne centrale du chenal	Profondeur de l'écoulement, contraintes normales basales et pressions du fluide interstitiel
Hu et al., 2011	Jiangjia Ravine, Chine, 25 Août, 2004	Mesures expérimentales et sur le terrain	DF sur fondation de pieux en acier	Trois capteurs à différentes profondeurs d'écoulement	Force d'impact des grains et pression de fluide
Bugnion et al., 2012	Chenal construit sur le côté d'une carrière de roche, près de	Chenal expérimental in situ	DF sur les petits obstacles	Deux capteurs d'impact installés in situ	Pression totale d'impact

	Veltheim, en Suisse				
Wang et al., 2018	SW Chine (2008)	Expérience de laboratoire à grande échelle	DF sur des piliers du pont	Modèles et analyses empiriques	Pression d'impact en fonction de nombre de Reynolds et de Froude

3.2.3 Modélisation numérique (approches existantes)

Dans le domaine de la modélisation numérique, différentes approches ont cherché à répondre à plusieurs questions comme le déclenchement des écoulements, la fluidisation et les impacts des écoulements sur les structures. Chacun de ces processus dépend des caractéristiques de l'écoulement (granulométrie, fraction solide, densité...). En général, une approche donnée se concentre sur un aspect particulier du comportement et/ou sur un type particulier d'écoulement. La modélisation numérique peut aider à surmonter les inconvénients des mesures expérimentales en permettant des analyses avancées des paramètres caractérisant un DF.

De nombreux modèles de simulation d'écoulement existent tels que DAN, VolcFLOW, FLO-2D, LaharZ et Titan2D (Pitman et Long, 2005 ; Kelfoun et Druitt, 2005 ; Charbonnier et al., 2013, 2020) ... Ils sont utiles pour mieux comprendre le comportement, prévoir leur distribution dans les zones, ce qui permettra aussi de développer les cartes d'aléa et de risque s'ils sont couplés avec les enjeux exposés (Martelli, 2013). Ces modèles sont des programmes ou codes numériques servant à reproduire les écoulements et montrer leurs effets. On distingue : (1) des modèles statistiques comme LAHARZ et DAN-W qui simulent la distance de « runout » (Scheidl et Rickenmann, 2011; Horton et al., 2013), (2) des modèles 2D basés sur des équations « depth-averaged shallow water » moyennant les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement par la profondeur, comme TITAN2D (Pitman et Long, 2005), VolcFlow (Kelfoun et Druitt, 2005) et (3) des modèles 3D d'approche hydrologique basés sur un code Lagrangien comme « Smoothed particle hydrodynamics » (SPH) (Huang et al., 2015).

La littérature fournit plusieurs approches numériques capables d'évaluer l'impact d'un DF sur une barrière ou un obstacle, allant de l'approche d'écoulement purement granulaire à granulaire-fluide en passant par des approches d'écoulement purement fluide.

En ce qui concerne les modèles purement granulaires, Teufelsbauer et al., (2011) ont utilisé la méthode des éléments distincts (DEM) pour simuler des avalanches de granulats secs en bas d'une rampe, en introduisant la résistance à la rotation qui fournit une description réaliste du comportement de l'écoulement. Albaba et al., (2019) ont également utilisé un modèle DEM purement granulaire avec des lois de contact modifiées entre les particules permettant de prendre en compte l'effet du fluide entre les particules par adhérence et cohésion.

En ce qui concerne les modèles fluides-granulaires, Leonardi et al., (2016) ont développé un modèle DEM-LBM (Lattice Boltzmann Method) pour simuler le mélange fluide-grain, mais cette approche a un coût de calcul très élevé. Kattel et al., (2018) ont simulé des DF à deux phases basées sur les modèles avec des équations moyennées en profondeur pour mesurer l'impact sur des obstacles tétraédriques de différentes tailles, emplacements et orientations par rapport à l'écoulement. Li et Zhao (2018) ont considéré un couplage DEM-CFD pour simuler l'impact des DF sur une barrière flexible : le couplage prend en compte l'effet du fluide sur les particules et l'interaction entre les particules de DF et la barrière, qui est également modélisée par DEM. Trujillo-Vela et al., (2020) ont réalisé un couplage complet SPH-DEM pour simuler l'écoulement de DF sur une distance de 300 m sur une pente afin d'obtenir le *run out*.

En ce qui concerne les modèles d'écoulement purement fluides, Federico et Amoruso, (2008) ont utilisé la méthode par éléments finis pour analyser l'impact du fluide contre des structures. Dai et al., (2017) ont réalisé un couplage fluide-structure basé sur un modèle utilisant la méthode SPH et ont mesuré l'impact des DFs sur des structures (barrages). Mead et al., (2017) ont utilisé le modèle numérique SPH pour prédire le mouvement des particules au sein du fluide, pour trois types d'écoulements (non-newtonien, HCF et DF) : chacun d'entre eux joue un rôle différent dans la détermination des pressions hydrostatiques et dynamiques appliquées aux bâtiments. Le Tableau 5 résume quelques approches numériques utilisées pour la simulation des écoulements et leurs impacts.

Tableau 5 : Exemples des approches numériques pour la modélisation de l'écoulement et leurs impacts

Référence	Méthode	Type d'écoulement/obstacle	Résultats
Toyos et al., 2008	Modélisation SIG de l'événement DF	Zone de sarno Italie (mai 1998) : estimation sur le terrain et empirique du débit et de la vitesse	Production de cartes de la vitesse et de la pression dynamique
Teufelsbauer et al., 2011	Modèle DEM (<i>PFC3D</i>)	Ecoulement granulaire sec sur des obstacles rigides	Pression totale
Mead et al., 2017	SPH	LHs/DF/HCF sur des bâtiments	Mesure de pression d'impact pour plusieurs scénarios
Kattel et al., 2018.	Depth-averaged shallow layer	Deux phases de DF sur des obstacles tétraédriques	Mesure de pression d'impact sur des obstacles de différentes tailles, orientations et positions
Li et Zhao, 2018	Modèle DEM-CFD	DF sur les barrières flexibles	Etude de l'influence de l'inclinaison du chenal et de la fraction volumique de DF sur la force d'impact, la déformation et la masse retenue par la barrière
Zhao et al., 2020	Couplage numérique à l'aide de LS Dyna	DF avec des blocs dans la tête de l'écoulement	Étude de la performance de la barrière souple impactée par des DF avec des blocs

A partir de l'évaluation et du calcul de la pression ou force d'impact exercée par l'écoulement sur les structures, on doit être capable d'évaluer la vulnérabilité de tout type de structure exposée à ces écoulements.

4. Evaluation du risque au sens de l'impact et de la perte

Evaluer la vulnérabilité physique des structures menacées par les différents écoulements est une application de cette étude qui contribuera à prendre des mesures de protection en cas d'endommagement. Des fonctions de vulnérabilité, de fragilité et des approches probabilistes ont été explorées par des ingénieurs et des chercheurs dans le cadre de l'évaluation quantitative du risque. Les fonctions de vulnérabilité empiriques développées expriment une relation entre la perte économique et l'intensité d'un aléa, tandis qu'un petit nombre d'auteurs a mis au point des fonctions de fragilité, c'est-à-dire la probabilité des relations entre le *dommage et l'intensité* d'un aléa (Haugen et Kaynia, 2008 ; Papathoma-Köhle et al., 2017 ; Prieto et al., 2018).

4.1 Définition de la vulnérabilité physique

Les environnements à haut risque, où résident un grand nombre de population, sont menacés par une série d'aléas naturels tels que les écoulements torrentiels, les glissements de terrain, les avalanches... La différence entre ces phénomènes est le moment de déclenchement, la durée, la fréquence ou la période de retour. Pour les écoulements torrentiels, les processus se distinguent par la variété des concentrations sédimentaires et des débits volumiques (et d'autres paramètres...). Ces phénomènes comprennent les coulées de débris. Ils entraînent des dommages directs (destructions, endommagements d'équipement exposés) mais aussi des dommages indirects liés par exemple, aux conséquences économiques de l'endommagement d'infrastructures critiques, tels que les réseaux de transport, d'énergie et de communication (Fuchs et al., 2017). Face à ces risques, les recherches sur la vulnérabilité physique progressent. Il existe différentes définitions de la vulnérabilité provenant de divers champs disciplinaires, comme la vulnérabilité humaine, institutionnelle, etc. (Spence et al., 2004). La vulnérabilité physique est définie comme un degré de perte d'un élément donné ou d'un ensemble d'éléments, dans la zone touchée par un aléa (phénomène dommageable). Le degré de perte est exprimé sur une échelle de 0 (aucune perte) à 1 (perte totale) (UNDRO, 1984 ; Fuchs et al., 2007 ; Fuchs et al., 2019 ; Papathoma-Köhle et al., 2017).

4.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Pour mesurer ou évaluer la vulnérabilité physique, plusieurs méthodes qualitatives ou quantitatives ont été exposées dans la littérature. Un nombre considérable d'études a été consacré à la vulnérabilité physique des bâtiments exposés aux coulées de débris (Fuchs et al., 2007 ; Totschnig et al., 2011; Papathoma-Köhle et al., 2017), ainsi que quelques études traitant de l'impact sur les infrastructures (les routes, les ponts, les réseaux d'eaux, d'électricité et de télécommunications, etc. par exemple (Wilson et al., 2014, 2017; Marchi et al., 2010). Les premiers travaux visant à mesurer et évaluer la vulnérabilité physique ont développé des matrices de vulnérabilité. Ces matrices de vulnérabilité ont évolué vers des courbes de vulnérabilité plus quantitatives, et plus récemment, des indicateurs de vulnérabilité ont été utilisés (Kappes et al., 2012 ;Papathoma-Köhle et al., 2017 ; Fuchs et al., 2019).

- **Les matrices de vulnérabilité :** c'est une méthode qualitative qui est fondée sur un petit nombre de données et d'informations sur les événements passés. Elle relie les dommages et les catastrophes à l'intensité des processus de l'environnement physique avec les conséquences associées telles que les pertes. Elle est fondée sur des données empiriques ou des avis des experts, et par conséquent les informations concernant les coûts des dommages et l'intensité exacte ne sont pas requises. On attribue une valeur de 0 à la vulnérabilité d'une structure qui n'a pas été endommagée et celle qui est totalement endommagée à une vulnérabilité de 1. Tous les autres cas seront classés par un expert dans des catégories intermédiaires. Les matrices de vulnérabilité ont l'avantage de rendre la relation entre le processus d'événement et les conséquences claires et faciles à comprendre pour les non-experts. En revanche, cette méthode est subjective. La description du niveau des dommages (élevé, modéré, léger) peut varier d'un expert à un autre et, par conséquent, il est difficile de les comparer (Zanchetta et al., 2004 ; Hu et al., 2011 ; Kang et Kim, 2016).
- **Les courbes ou fonctions de vulnérabilité :** c'est la seule méthode quantitative visant à évaluer la vulnérabilité des bâtiments. Elles sont largement utilisées pour évaluer les risques liés aux séismes ou aux inondations fluviales lorsque le nombre de bâtiments endommagés est important et là où les mesures permettent de créer une courbe fiable. Ces courbes traduisent la susceptibilité d'un élément exposé à être endommagé par un aléa d'une intensité donnée et elles sont quantifiées en fonction de l'aspect de l'élément

que l'on souhaite étudier, par exemple l'aspect physique, social, économique, ou environnemental. Selon plusieurs auteurs (Tarbotton et al., 2015 ; Fuchs et al., 2019), les fonctions de vulnérabilité sont des courbes continues qui mettent en relation l'intensité d'un processus dangereux (axe X), à l'état de dégradation d'un bâtiment (entre 0 et 1 sur l'axe Y). La perte peut être décrite en termes financiers et peut être comparée aux coûts des mesures de protection pour une analyse coût-bénéfice. En revanche, obtenir des données et des informations pour chaque structure dans la zone d'impact peut être difficile. Les courbes de vulnérabilité ne doivent pas être confondues avec les courbes de fragilité qui expriment la relation entre l'intensité et la probabilité des dommages. La fragilité sera explicitée ci-dessous.

- **Les indicateurs de la vulnérabilité :** ce sont les propriétés d'un système qui fournissent des informations sur la susceptibilité aux impacts. Les caractéristiques de l'élément à risque sont prises en considération. Certains indicateurs ne prennent en compte que les caractéristiques des bâtiments et non l'intensité potentielle du processus sur les bâtiments, ce qui donne un indice de vulnérabilité relative (Thouret et al., 2014 ; Ettinger et al., 2015). Cependant, la quantité et le niveau de détail des données requises sont élevés, ce qui entraîne des enquêtes de terrain qui prennent beaucoup de temps puisque la plupart des données ne sont pas disponibles à l'échelle locale. De plus, les résultats ne sont pas exprimés en termes de dommages monétaires, ce qui rend la méthode moins intéressante pour les spécialistes. Les méthodes qui utilisent les indicateurs sont encore récentes, mais certaines études présentent une méthode combinée avec les courbes de vulnérabilité afin d'utiliser les avantages des deux méthodes (Du J et al., 2013).
- **Les courbes ou fonctions de fragilité :** ce sont des fonctions qui estiment quantitativement la probabilité qu'un seuil de dommage soit dépassé en fonction de l'intensité de l'aléa. Les courbes de fragilité les plus récentes ont été publiées par Prieto et al., (2018). Elles modélisent la probabilité d'excéder un seuil d'endommagement pour un paramètre de l'intensité de l'aléa tel que le moment du flux (débit volumique par unité de surface) qui tient compte de la profondeur de l'écoulement et surtout de sa vitesse (hv^2). Winter et al., (2013) a fait une étude exceptionnelle en développant des courbes de fragilité pour les routes soumises aux coulées de débris, en présentant l'intensité comme volume de DF (m^3) (la plupart des courbes sont cependant élaborées

pour les bâtiments). Couplé aux scénarios, l'ensemble des fonctions de vulnérabilité et de fragilité, exprimées sous la forme de fonctions de probabilité, peut aider à évaluer les coûts des dégâts occasionnés par de futurs DF/LH destructeurs.

4.3 Méthodologie générale des courbes de vulnérabilité

Dans le but d'élaborer une courbe de vulnérabilité, il faut connaître la valeur de l'intensité (axe X) par ouvrage, puisqu'elle est variable dans l'espace. Cependant, cette valeur est rarement saisie à travers la documentation de l'événement. Il est également possible d'obtenir les valeurs de l'intensité de l'aléa (DF) par ouvrage par la modélisation numérique ou par l'expérimentation (Fuchs et al., 2019). D'autre part, l'état d'endommagement du bâtiment (axe Y) est attribué par l'intermédiaire d'une valeur comprise entre 0 et 1 et qui est souvent exprimée par le "degré de perte", c'est-à-dire le rapport entre le coût des dommages et la valeur de chaque élément exposé au risque. La première étape dans l'estimation du degré de perte consiste à calculer la valeur de marché de l'ouvrage. Cette valeur doit représenter la valeur de reconstruction plutôt que celle, commerciale, qui peut également dépendre d'autres facteurs (par exemple, l'emplacement, la vue, la proximité des transports publics ; Fuchs et McAlpin, 2005). Ensuite, il faut déterminer le coût des dommages par ouvrage. La plupart des courbes de vulnérabilité ne considère que les dommages structurels.

Les dommages individuels doivent être documentés et calculés directement après l'événement selon : (1) la population sur place qui peut informer les autorités civiles directement afin d'effectuer les travaux d'intervention (réhabilitation ou reconstruction) selon les pertes, (2) les entreprises d'assurance disposent d'un instrument efficace qui permet la documentation rapide et efficace des pertes. En fonction de ces données (caractéristique de l'écoulement et la structure exposée), des étapes de calculs ultérieures sont nécessaires pour calculer le coût de réparation des dommages. En tenant compte de ces valeurs, la courbe de vulnérabilité peut être tracée.

La Figure 9 présente une méthodologie montrant les trois étapes générales destinées à construire cette courbe de vulnérabilité : 1) la première étape est la récolte efficace des données et des informations sur le processus (DF) ainsi que la structure exposée (bâtiment, murs, poteau...) ; 2) la deuxième étape est le calcul de l'intensité du processus X (hauteur, vitesse,

force, pression...) et de l'estimation du degré de dommage Y de la structure exposée ; 3) la troisième étape est de construire la courbe de vulnérabilité (Y en fonction de X).

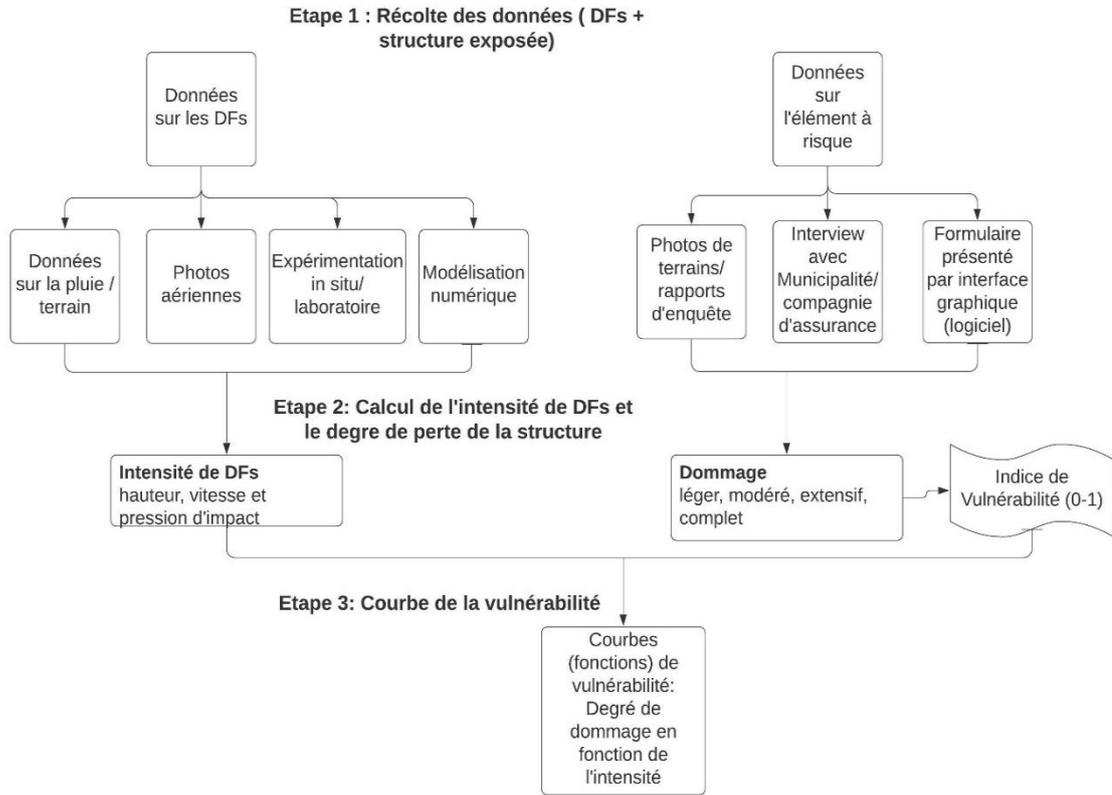


Figure 9 : Méthodologie générale des fonctions de vulnérabilité

4.4 Fonctions de vulnérabilité des structures exposées aux écoulements

Fuchs et al., (2007) et Akbas et al., (2009) ont publié des courbes fondées sur des données empiriques de risques torrentiels en Autriche et en Italie (Salvetta) à partir des données de hauteur de dépôts entourant 13 bâtiments. Totschnig et al., (2011) ont présenté des courbes de vulnérabilité pour les coulées de débris basées sur des "intensités relatives", exprimant l'intensité du processus comme un quotient entre l'épaisseur du dépôt de DF et la hauteur du bâtiment. Grâce à cette étude, les auteurs ont pu trouver une solution pour prendre en compte des bâtiments de différentes hauteurs dans une même courbe. Dans une étude ultérieure, Lo et al., (2012) ont utilisé des données provenant de Taïwan afin d'élaborer une courbe de vulnérabilité qui prend en compte la perte de contenu en plus des dommages structurels.

Totschnig et Fuchs, (2013) ont utilisé des données provenant de plusieurs domaines d'étude de cas et ont également quantifié les incertitudes. Ils ont utilisé les coûts des dommages dus aux différents processus (transport de sédiments et coulées de débris). Ils ont proposé une fonction de vulnérabilité commune en suggérant que la fusion des courbes de vulnérabilité pour différents types de bâtiments et processus torrentiels est possible. Kappes et al., (2012) se sont appuyés sur des données limitées en utilisant une documentation photographique pour évaluer l'intensité des risques et les dommages aux bâtiments sur la base d'une étude de cas en Italie. La courbe de vulnérabilité a ensuite été mise à jour à l'aide de données supplémentaires provenant d'autres événements survenus dans les Alpes européennes (Papathoma-Köhle et al., 2015), tandis que la perte a été calculée sur la base des travaux de reconstruction nécessaires pour la réhabilitation du bâtiment. Sur la base de ces études et d'autres plus anciennes, comme celle de Fuchs et al., (2007) et de Kappes et al., (2012), Azmeri et Isa (2018) ont publié un certain nombre de courbes (polynomiales d'ordre 2 et 3) pour les crues soudaines en Indonésie. Les différences par rapport aux courbes existantes ont été attribuées aux différences de caractéristiques des processus entre les cas étudiés.

Même si un événement est bien documenté, l'interaction entre les bâtiments exposés et l'écoulement est très difficile à enregistrer et à suivre de près, et pour cette raison (Zhang et al., 2016) ont utilisé des expériences de laboratoire visant à saisir cette interaction dans le cas des structures en brique et en béton. Ils ont utilisé une sphère d'acier pour simuler l'impact sur un mur et ils ont exprimé l'intensité de trois manières (moment cinétique, force d'impact maximale et moment de flexion ultime) dans le but de développer les courbes de vulnérabilité. Sur la base de leurs résultats, ils ont développé une courbe de vulnérabilité. Ciurean et al., (2017) ont travaillé sur les bâtiments soumis à des coulées de débris à l'échelle locale et régionale. Ils ont utilisé la valeur commerciale des bâtiments et la documentation photographique pour calculer le degré de perte (ratio de dommage). Afin d'inclure les incertitudes, deux courbes (maximum et minimum) ont été tracées. Ils ont également utilisé un modèle fondé sur des indicateurs (évaluation paramétrique de la vulnérabilité). Kang et Kim (2016), reconnaissant que le type de bâtiment joue un rôle majeur dans la vulnérabilité physique d'un bâtiment et le degré de perte, ont produit des courbes de vulnérabilité pour différents types de bâtiments en utilisant des données provenant de onze événements de coulées de débris à Taïwan.

L'intensité a été définie de manière empirique et exprimée en termes de hauteur de la coulée, vitesse et pression d'impact. Le Tableau 6 résume quelques études des méthodes d'évaluation de risques pour les DFs.

Tableau 6 : Quelques études existantes sur la vulnérabilité

Référence	Lieu/évènement	Intensité de l'aléa choisie	Méthode/enquête choisie	Endommagement	Nombre de bâtiment exposé
Fuchs et al., 2007	Autriche (août 1997)	Hauteur d'écoulement	Documentation	Estimé en euros (pas de morts)	16
Haugen et Kaynia, 2008	Italie (mai 1988)	Déplacement spectral	HAZUS (courbes de fragilité) – information sur l'évènement (Zanchetta et al. (2004))	Description selon des classes : léger/modéré /extensif/complet	13
Akbas et al., 2009	Selvetta-Italie (13 juillet 2008)	Hauteur de dépôt	Document préparé par des ingénieurs de la protection civile et la police	Estimé en euros (pas de victimes)	13
Quan Luna et al., 2011	Italie (juillet 2008)	Hauteur, Pression d'impact, viscosité	Modélisation de l'intensité	Coûts de dommage signalés (300 personnes évacuées)	13
Totschnig et Fuchs, 2013	Autriche (2005)	Hauteur de dépôt	Enquête de terrain-GIS-documentation	Donné pour chaque bâtiment par des experts de dommage	146
Kang et Kim, 2016	Corée (11 DF)	Hauteur, vitesse et pression d'impact	Empirique (carte topographique, photos, rapports de terrain)	Classes de dommage : complet, extensif, modéré et léger	25
Zhang et	DF en Province	Profondeur de	Données	Classes de	>390

al., 2018	de Gansu, nord-ouest de la Chine (7 Août 2010)	l'écoulement, vitesse, pression, moment du flux ($h v^2$), moment de renversement (vh)	d'observation des dommages causés aux bâtiments / simulation FLO-2D de l'intensité de DF	dommage : complet, extensif, modéré et léger	
Fuchs et al., 2019	Italie/Autriche (plusieurs événements)	Hauteur d'écoulement	Enquête de terrain- documentation photographique	Evaluation des dommages à partir des photos	217

Il subsiste des lacunes concernant l'interaction entre le bâti et un événement naturel tel qu'un écoulement catastrophique. Afin de réduire ces lacunes, des expériences en laboratoire et des travaux de modélisation numérique sont utilisés. Dans le cas des inondations par exemple, des informations sur l'interaction sont acquises (Armanini et al., 2011 ; Zhang et al., 2016). Dans le cas des risques torrentiels, les études ne sont pas nombreuses (Fuchs et al., 2019), mais Sturm et al., (2018) ont pu enregistrer l'interaction entre le bâti et ces écoulements torrentiels avec des expériences en laboratoire. Les résultats de mesures sont la pression d'impact et la hauteur d'écoulement par bâtiment pour différents scénarios. (Milanesi et al., 2018) se sont concentrés sur l'interaction entre les murs d'un bâti et un HCF, en étudiant des mécanismes d'effondrement et la stabilité des structures en maçonnerie. Quan Luna et al., (2011) ont fourni des courbes de vulnérabilité avec la modélisation et utilisé différentes expressions de l'intensité, notamment la hauteur, la vitesse et la viscosité de l'écoulement, chacune correspondante à une courbe différente.

4.5 Résultats des études de vulnérabilité publiées

Quelques exemples de fonctions de vulnérabilité sont présentés dans le Tableau 7 ci-dessous. On s'intéresse à ces références pour montrer une intensité de l'écoulement par exemple la 'hauteur h' : Fuchs et al., (2007) ont présenté la relation entre l'intensité de DF selon l'axe x (h en m) et la vulnérabilité selon l'axe y, par une fonction polynomiale du second ordre avec

un coefficient $R^2 = 0.86$. A partir de cette fonction, il en déduit que la destruction totale ($V = 1$) des bâtiments exposés se produit avec une $h > 3.15$ m. Totschnig et al., (2011) ont publié une courbe de vulnérabilité utilisant la fonction statistique Weibull modifiée avec $R^2 = 0.914$. Ils déduisent que la destruction complète peut se produire avec $h > 5.8$ m. Ces fonctions de vulnérabilité développées sont applicables aux bâtiments qui sont construits en maçonnerie de brique ou en béton. Lo et al., (2012) ont utilisé les fonctions de régression polynomiale du troisième ordre établies pour les structures en briques et celles en briques renforcées. Avec un grand nombre de bâtiments étudiés, ils ont remarqué que les structures en brique seront totalement détruites si $h > 3.43$ m. Papathoma-Köhle et al., (2015) et Totschnig et Fuchs, (2013) ont proposé un nouveau formulaire de documentation afin d'améliorer la courbe de vulnérabilité avec une distribution Weibull modifiée. En regroupant plusieurs données pour plusieurs événements de DF, la destruction totale est provoquée si $h > 7.8$ m.

Tableau 7 : Exemples de types de fonction utilisés dans la littérature

Etude (référence)	Type de fonction/Validité statistique
Fuchs et al., 2007	Fonction polynomiale de second ordre / $R^2 = 0.86$
Totschnig et al., 2011	Weibull modifié/ $R^2 = 0.914$
Lo et al., 2012	Régression polynomiale du troisième ordre/ -
Papathoma-Köhle et al., 2015	Weibull modifié/ RMSE = 0.1318
Zhang et al., 2016	Linéaire/-

Le Tableau 8 ci-dessous consigne quelques fonctions qui dépendent aussi du type de structure et qui précisent un seuil pour chaque paramètre, h , v et P , provoquant une destruction totale de la structure.

Il faut noter que la fonction de vulnérabilité dans chaque étude suggère des valeurs différentes de seuil à atteindre pour obtenir une vulnérabilité $V = 1$. Par exemple, le facteur de vulnérabilité est atteint, $V = 1$, pour une pression de 222 kPa d'après Kang et Kim, (2016) et de 90 kPa d'après (Zhang et al., 2018a) pour le même type de structure. En effet, pour une même intensité, la différence du degré de perte de V observée d'un cas d'étude à un autre est liée à plusieurs facteurs : la qualité et la quantité de données, la méthode d'enquête ou de calcul pour la collecte des informations et la méthode statistique choisie pour l'analyse des données. Le nombre de données dans ces études est limité et variable ; il n'est pas donc pas possible de

parvenir à une conclusion robuste si l'on veut savoir si l'écart est dû à une différence de modélisation ou à la technique de construction choisie ou à une combinaison des deux.

Tableau 8 : Exemples des fonctions de vulnérabilité montrant le seuil choisi pour chaque intensité de l'aléa

Référence	Etude de cas	Type de structure	Fonction de la vulnérabilité	Paramètre seuil pour atteindre V = 1.0
Fuchs et al., 2007	Autriche (DF)	Brick-concrete	$V_1 = 0.11 \times h^2 - 0.02 \times h$	$h \leq 3.15$ m
Kang & Kim, 2016	South korea (11 événements DF)	Non RC frame	$V_1 = 1 - e^{-2.2072 \times h^{2.019}}$	$h \leq 1.44$ m
			$V_2 = 1 - e^{-0.0140 \times v^{4.368}}$	$v \leq 3.8$ m/s
			$V_3 = 1 - e^{-0.0010 \times p^{2.227}}$	$p \leq 44.5$ kPa
		RC	$V_1 = 1 - e^{-0.1703 \times h^{1.537}}$	$h \leq 8.6$ m
			$V_2 = 1 - e^{-0.0094 \times v^{2.775}}$	$v \leq 9.4$ m/s
			$V_3 = 1 - e^{-0.0005 \times p^{1.69}}$	$p \leq 222$ kPa
Zhang et al., 2018	Zhouqu Country, China (bâtiments densément peuplés + une faible pente)	Brick-concrete	$V_1 = \frac{0.12 \times h^{3.39}}{1 + 9.24 \times h^{3.39}}$	$h \leq 2.7$ m
			$V_2 = \frac{0.17 \times v^{2.45}}{1 + 6.54 \times v^{2.45}}$	$v \leq 5.9$ m/s
			$V_3 = \frac{0.08 \times p^{1.08}}{1 + 15.45 p^{1.08}}$	$p \leq 45.2$ kPa
		RC	$V_1 = \frac{0.02 \times h^{2.06}}{1 + 97.84 h^{2.06}}$	$h \leq 10.2$ m
			$V_2 = \frac{0.0007 \times v^{4.94}}{1 + 1551 \times v^{4.94}}$	$v \leq 6.9$ m/s
			$V_3 = \frac{0.0001 \times p^{2.47}}{1 + 8614.79 \times p^{2.47}}$	$p \leq 90$ kPa

5. Bilan

Une large gamme de méthodes opérant à différentes échelles a été mise au point à la fois en laboratoire et dans les chenaux de rivières empruntées par les coulées de débris et lahars (*sensu lato*) dans le but d'évaluer les pressions d'impacts : des instruments de mesure, des expériences analogiques, des tests mécaniques, des modèles statistiques et numériques, et la cartographie (et système d'information géographique SIG) des aléas et du risque. Plusieurs méthodes, numériques ou expérimentales, ont été présentées afin d'évaluer l'impact de ces écoulements sur des obstacles. La synthèse sur les travaux réalisés a mis en évidence que les résultats des modèles empiriques sont variables selon les facteurs analysés : le type d'écoulement, la méthode d'analyse et les données elles-mêmes.

En termes phénoménologiques, les dommages provoqués par les écoulements résultent de trois forces principales : (1) la pression hydrodynamique, (2) la pression hydrostatique et (3) les forces de collision des blocs (Thouret et al., 2020). La densité, la vitesse, la profondeur de l'écoulement et l'angle d'impact minimum sur l'obstacle constituent tous des paramètres significatifs de la force d'impact et certains auteurs ont ajouté davantage de paramètres à cette liste (J. C. Thouret et al., 2020). De plus, la taille des blocs charriés par l'écoulement et entrant en collision avec les obstacles est un paramètre peu étudié dans la littérature, mais qui aura une influence non négligeable sur les pressions d'impact (Papathoma-Köhle et al., 2017; Mead et al., 2017). Il constitue un paramètre à étudier pour mieux évaluer son influence sur les résultats d'impact et aussi dans le but d'améliorer l'évaluation de la vulnérabilité de la structure.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité dépendent de l'impact et de l'intensité, ce qui aboutit à mesurer l'ordre de grandeur ou la probabilité d'endommagement. L'évaluation de l'aléa, de l'exposition et de la vulnérabilité s'exprime par des indicateurs, des matrices ou des fonctions. De plus, les fonctions de fragilité combinant des paramètres d'intensité de l'aléa avec la performance du bâti (Prieto et al., 2018) fournissent des modèles fiables pour l'évaluation quantitative du risque.

Plusieurs facteurs aident à réduire les pertes causées par ces écoulements : (1) la planification de l'utilisation du sol pour éviter leur occurrence, (2) l'édification d'ouvrages de protection pour modifier leurs effets, (3) installation d'un système d'alerte qui aide à l'évacuation de la population locale.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement des coulées de débris (DF) et leurs impacts sur les structures exposées, dans le but d'apporter une meilleure estimation de leur vulnérabilité. Arequipa (Pérou) est le point de départ de notre cas d'étude mais par la suite, le modèle développé devra pouvoir être applicable à d'autres cas d'études et à d'autres types d'écoulements.

L'originalité de notre approche par rapport aux études existantes repose sur deux aspects :

- **L'effet des blocs (partie solide) :**

La plupart des simulations récentes (Mead et al., 2017 ; Dai et al., 2017 ; Gao et al., 2017) s'intéresse à l'effet hydraulique de l'écoulement sans prendre en compte la contribution de la fraction solide (blocs). C'est pourquoi notre modèle cherchera à mieux prendre en compte l'effet de l'impact des particules solides, sans pour autant nous cantonner à un modèle d'écoulement purement granulaire. Par ailleurs, l'effet de la taille des particules sur l'impact reste un paramètre dont l'effet n'est pas expliqué ou quantifié (Poudyal et al., 2019 ; Mead et al., 2017 ; Papathoma-Köhle et al., 2017), ce que notre modèle cherchera à mettre en évidence.

- **L'échelle de modélisation locale**

Certaines études ont utilisé un couplage bidirectionnel, notamment Leonardi et al., (2016), qui ont réalisé un couplage complet avec la méthode DEM-LBM (Lattice Boltzman Method) pour simuler le mélange, ou Trujillo-Vela et al., (2020) qui ont réalisé un couplage SPH-DEM. Le principal inconvénient de ce type de modèle est son temps de calcul très élevé. Dans une optique d'application de ce modèle à l'estimation de la vulnérabilité des structures, ce modèle devra être capable de traiter des configurations diverses en termes de caractéristiques d'écoulement et de structures : il est indispensable que les simulations puissent être réalisées dans un temps raisonnable (quelques heures).

Afin de répondre à cette contrainte, nous choisissons de modéliser le problème à l'échelle locale, c'est-à-dire à l'échelle de la structure exposée en utilisant des hypothèses d'interaction fluide-solide simplifiées. Contrairement à Trujillo-Vela et al., (2020), cette solution ne permet pas de pouvoir modéliser la dynamique réelle de l'écoulement sur de grandes distances (jusqu'à plusieurs centaines de mètres), mais permet de réduire les temps de calcul, sans pour autant remettre en cause la cinétique de l'écoulement sur la section étudiée. Ce type de modèle est

bien adapté à l'objectif d'évaluation des forces d'impact sur les structures dans des contextes variables (formes, orientations, matériaux de construction...).

CHAPITRE 2

Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle

1. Introduction

Dans ce travail de recherche, l'approche générale repose sur trois objectifs successifs :

- Développement d'un modèle numérique capable de simuler les LHs/DFs et prenant en compte explicitement l'effet des blocs (chapitre 2) ;
- Modélisation de l'interaction entre écoulement de LH/DF et obstacle (ouvrage) afin de mesurer les pressions d'impact (chapitre 3 et 4) ;
- Quantification de la vulnérabilité de l'ouvrage exposé (chapitre 5).

Dans une première étape, un modèle numérique discret (DEM) est proposé pour modéliser un écoulement (DF) de caractéristiques connues (hauteur, vitesse, densité, fraction solide) dans un chenal de géométrie simple. On simule le corps de l'écoulement : il contient la majorité du volume de l'écoulement et génère les trois composantes de forces lors de l'impact sur une structure (dynamique, statique et la collision). A terme, lorsque l'écoulement sera stabilisé, il peut présenter un impact continu et constant avec une turbulence réduite, et la coulée se rapproche d'un écoulement laminaire constant.

Une fois les paramètres du modèle déterminés, il est utilisé pour simuler l'impact de l'écoulement sur des structures et évaluer les pressions mises en jeu. Un couplage DEM-fluide sera alors pris en compte pour mieux évaluer l'interaction du fluide sur la partie solide : en effet dans ce cas, le champ de vitesse du fluide ne peut plus être établi de manière simple.

La différence principale du modèle proposé avec les modèles existants réside dans l'échelle de la modélisation. On ne s'intéresse pas ici à la trajectoire de l'écoulement (*runout*

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

= propagation au-delà de la zone de déclenchement) mais plutôt à l'échelle locale, c'est-à-dire à l'échelle de la structure exposée. De plus, on ne cherche pas nécessairement à effectuer un couplage complet comme celui de (Leonardi et al., 2016) qui est très coûteux en temps de calcul, ni à l'inverse un modèle trop simplifié (1D) comme celui de (Horiguchi and Komatsu, 2019), ou un modèle DEM seul (Albaba et al., 2019) ou encore celui du seul fluide (Dai et al., 2017). Le modèle proposé se positionne entre toutes ces approches : (1) il intègre les 2 phases granulaire et fluide, en se fondant sur la DEM et des calculs CFD réalisés séparément, (2) il s'agit d'un intermédiaire entre un modèle purement granulaire et purement fluide, (3) il est capable d'estimer l'impact du LH/DF, en particulier la contribution de la partie solide la plus grossière (les blocs) sur un obstacle, (4) il a des avantages en temps de calcul et en réduisant la complexité, (5) les paramètres de l'écoulement et de la structure sont facilement modifiables.

Ce modèle numérique servira de base à la construction d'un modèle plus complexe contenant un obstacle et prenant en compte un couplage DEM/fluide avec une gestion de la surface libre (détaillé dans le chapitre 3). Dans ce chapitre, un champ de vecteurs de vitesses du fluide est considéré constant dans un chenal linéaire dans le but d'obtenir les caractéristiques du DF souhaité simulé.

2. Mise en place du modèle numérique

2.1 Description de la méthode des éléments distincts (DEM)

La méthode des éléments distincts (DEM) est une méthode numérique capable de décrire le comportement mécanique d'un ensemble de disques ou polygones (2D), de sphères ou polyèdres (3D). La méthode est fondée sur l'utilisation d'un schéma numérique explicite (propagation de la perturbation d'une particule à ses voisins uniquement) dans lequel l'interaction des blocs est contrôlée au niveau des contacts et le mouvement des blocs est simulé bloc par bloc (Figure 10).

Dans la méthode des éléments discrets, un groupe de blocs individuels interagissent les uns avec les autres au niveau de leurs contacts. Chaque bloc est soumis à un ensemble de forces, généralement la gravité et les forces de contact transmises par les blocs voisins.

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

Chaque bloc est modélisé en tant que corps rigide, mais les contacts sont considérés comme déformables, et donc les blocs peuvent se chevaucher légèrement aux points de contact.

Cette méthode reconnaît automatiquement les nouveaux contacts durant le processus de calcul pour simuler la rupture des contacts (propagation de fissures) ou les déplacements à grande échelle (Cundall et Strack, 1979). La DEM permet également la modélisation de la propagation d'ondes dynamiques à travers des assemblages de blocs, sans aucune limitation quant aux déplacements, rotations et séparations (Salciarini et al., 2010).

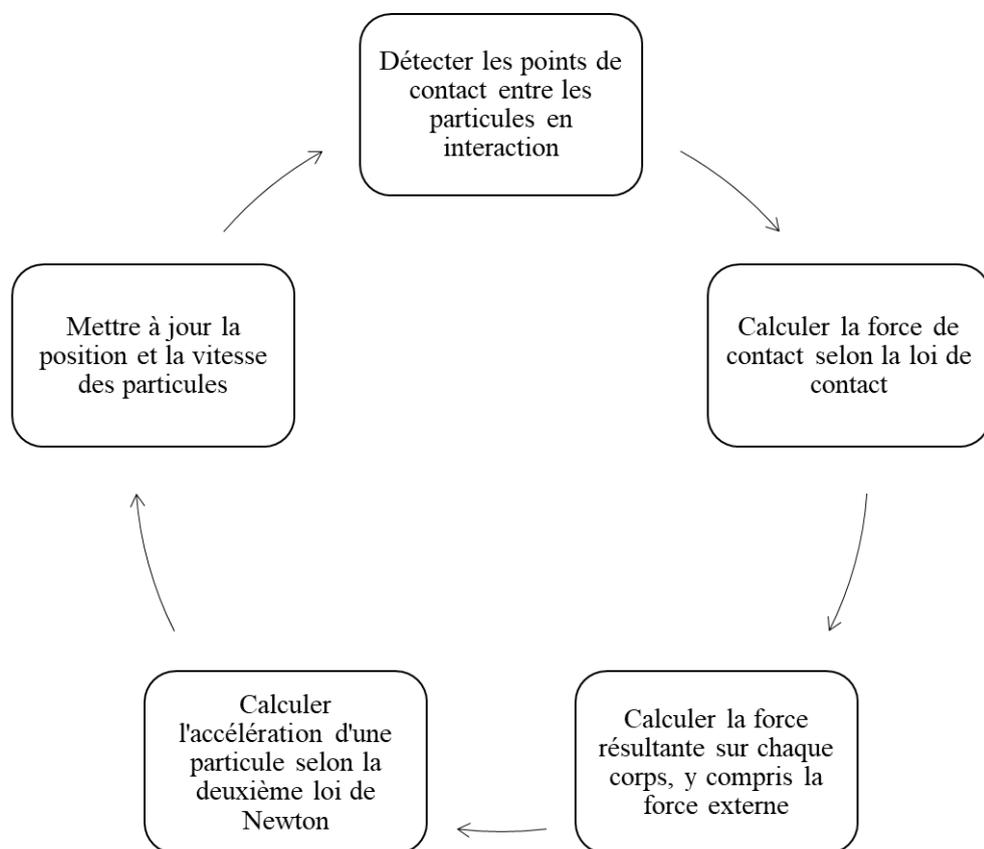


Figure 10 : Cycle de calcul en DEM

2.2 Description du logiciel

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse est réalisé avec le logiciel *PFC3D* (Particle Flow Code in 3 Dimensions), développé par la société ITASCA. Il s'agit d'un code utilisé pour l'analyse, l'expérimentation et la recherche dans tous les domaines pour lesquels

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

l'interaction de corps discrets, présentant de grandes déformations et/ou de la fracturation, est requise.

PFC3D est un code de type explicite, c'est-à-dire que la configuration du modèle évolue dans le temps selon la résolution de cycles de calcul successifs (Itasca, 2016). Les cycles de calcul sont stoppés lorsqu'un critère d'arrêt défini par l'utilisateur est satisfait. Le comportement observé résulte directement de l'interaction des différents corps en contact. A chaque cycle, une série d'opérations est réalisée, comprenant (Figure 11) :

1. La détermination du pas de temps : la DEM requiert un pas de temps suffisamment petit pour garantir la stabilité du modèle et pour permettre aux contacts entre 2 corps entrant en interaction d'être créés. En pratique, le pas de temps critique dépend du rapport entre la plus petite masse et la rigidité au contact la plus forte, élevé à la puissance $\frac{1}{2}$ (étape 1 du calcul DEM),

2. L'application des lois de déplacement : la position et la vitesse de chaque corps sont mises à jour en fonction des lois de Newton en utilisant le pas de temps calculé et les forces/moments calculés au cycle précédent (étape 4 du calcul DEM),

3. L'avancement du temps : le temps est incrémenté de la valeur du pas de temps courant (étape 5 du calcul DEM),

4. La détection des contacts : les contacts sont créés/supprimés de manière dynamique, en se fondant sur la position actualisée de l'ensemble des éléments du modèle (blocs, parois) (étape 1 du calcul DEM),

5. L'application des lois de contact : les forces et moments sont recalculés à chaque contact en utilisant le modèle de comportement qui lui est appliqué (étape 2-3 du calcul DEM).

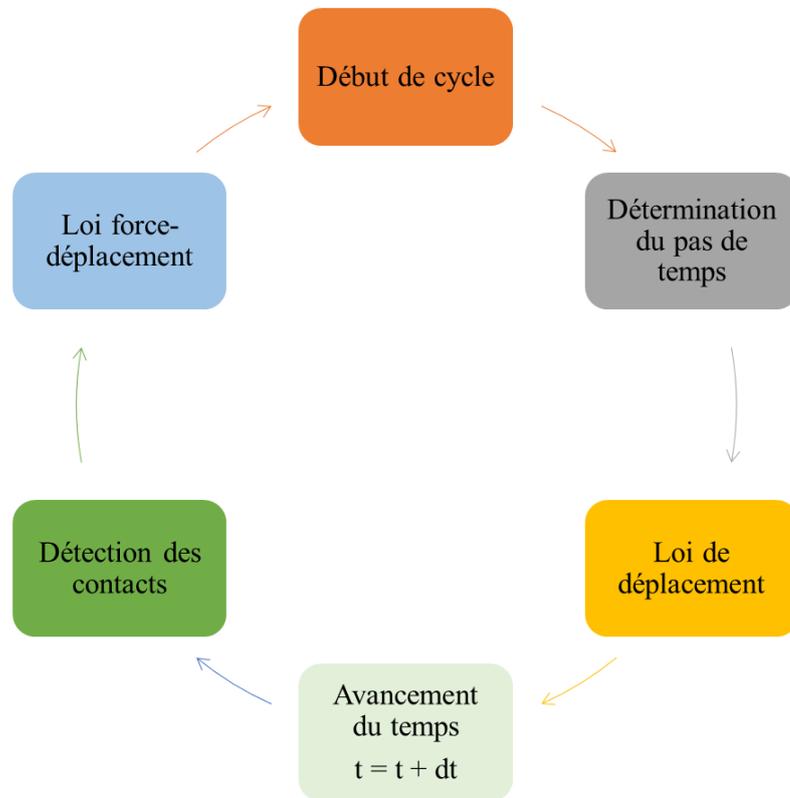


Figure 11 : Séquence d'opérations réalisée durant chaque cycle de calcul

2.3 Description du modèle numérique

L'étude se concentre sur la modélisation des impacts des blocs au cours de leur écoulement, puis de leur collision avec les obstacles situés sur leurs trajectoires. Dans cette partie, on commencera par la méthode de représentation des deux phases solide et fluide, ensuite les interactions du fluide sur les blocs et les lois de contacts interparticulaires, enfin le processus de génération de l'écoulement dans un chenal.

2.3.1 Définition des phases solides et fluides.

Les écoulements réels sont formés des particules solides, qui présentent une granulométrie très étalée, de quelques microns (limon) à plusieurs mètres (blocs) et de l'eau (Zanchetta et al., 2004). Dans notre modèle, les particules solides à grains les plus fins ($d < 2$ mm), composées de cendres, de limon et de sable fin, ne seront pas modélisées explicitement. Sur la Figure 12, la fraction 1 de la courbe granulométrique représente les particules ayant un diamètre entre 0 et un diamètre minimal d_{\min} . Cette fraction 1 se divise

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

en deux parties : la première (entre 0 et 2 mm) que l'on intègre au fluide les particules fines qui sont assez petites, et la deuxième (entre 2 mm et d_{\min}) dont on estime que leur contribution sur les forces d'impact est négligeable ; par conséquent, cette gamme des particules ne sera pas modélisée. Le fluide étant composé d'une partie d'eau et d'une partie de particules très fines en suspension, il a donc une densité supérieure à la densité de l'eau.

La fraction 2, la plus grossière, sera modélisée explicitement avec la DEM (partie indiquée en rouge sur la Figure 12). Elle est dénommée *blocs* dans la suite. Cette fraction représente la plage granulaire située dans un intervalle de taille $[d_{\min}, d_{\max}]$ où d_{\max} représente le diamètre maximal retenu dans la simulation dont la valeur pourra être modifiée. Afin de fixer un nombre de blocs dans la simulation et pour limiter le temps de calcul, on a fait le choix d'un intervalle $[d_{\min}, d_{\max}]$. Les diamètres d_{\min} et d_{\max} ne correspondent donc pas aux seuils granulométriques réels en sédimentologie.

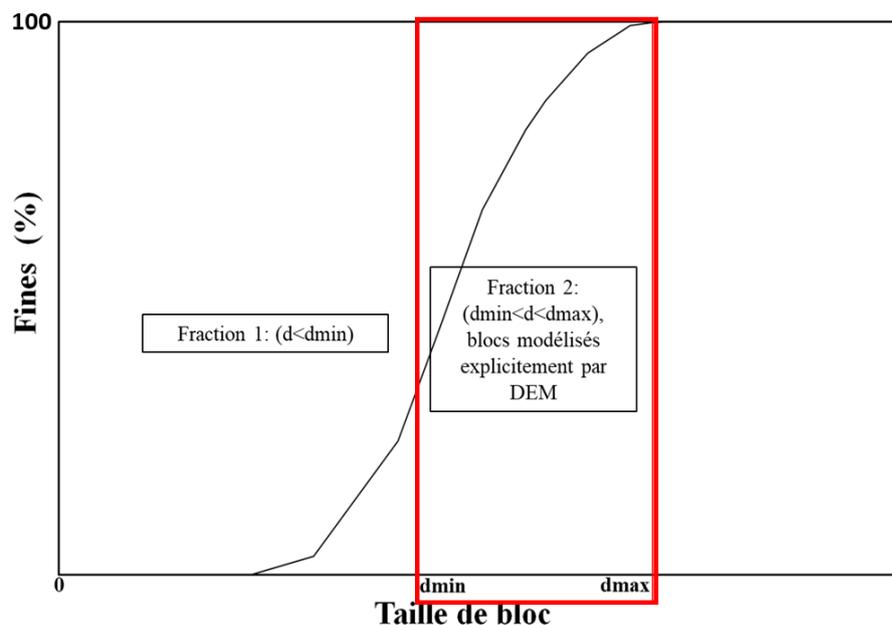


Figure 12 : Distribution granulométrique générale montrant notre stratégie de la modélisation

La phase solide représente des blocs modélisés par le code *PFC3D*. Elle est modélisée par des blocs sphériques réparties dans quatre classes granulométriques, distribuées entre un diamètre minimal d_{\min} et un diamètre maximal d_{\max} . On postule que d_{\min} est le seuil entre les particules fines et les blocs afin de réduire le temps de calcul et le nombre de blocs. Ce choix de la taille des blocs $[d_{\min}, d_{\max}]$ est fondé sur les conditions suivantes :

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

- (1) représenter une partie de la gamme des particules solides observée sur le terrain,
- (2) simuler les blocs qui contribuent significativement à la force d'impact sur les structures,
- (3) fixer un diamètre minimal suffisamment grand pour limiter le nombre total de blocs dans la simulation et réduire le temps de calcul,
- (4) fixer une taille maximale de bloc suffisamment petite pour obtenir un nombre représentatif de blocs entre le fond du chenal et la surface d'écoulement supérieure.

Sur la base de ces conditions, le diamètre minimal a été fixé à $d_{\min} = 0.10$ m (l'interaction des particules avec les structures ayant des diamètres inférieurs à 0.1 m est supposée négligeable sur la gamme granulométrique considérée) et le diamètre maximal à $d_{\max} = 0.40$ m (choisi comme cas de référence, sachant que par la suite ce paramètre va varier). Le modèle considère séparément les mouvements des blocs et du fluide et modélise l'effet du fluide sur les blocs.

La phase fluide joue un rôle majeur dans le mouvement de l'écoulement : l'effet de la phase fluide sur les blocs est pris en compte dans le modèle par l'intermédiaire de la force de traînée et de la force d'Archimède. Ce dernier doit être capable de reproduire un écoulement régulier, avec des caractéristiques données, en particulier la vitesse et le débit. Le champ de vitesses de la phase fluide doit être déterminé pour calculer les interactions produites par la phase fluide sur les blocs. Le champ de vitesse et de hauteur est considéré comme fixe dans la simulation actuelle. Le diagramme représenté dans la Figure 13 décrit chacune des étapes du processus de simulation.

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

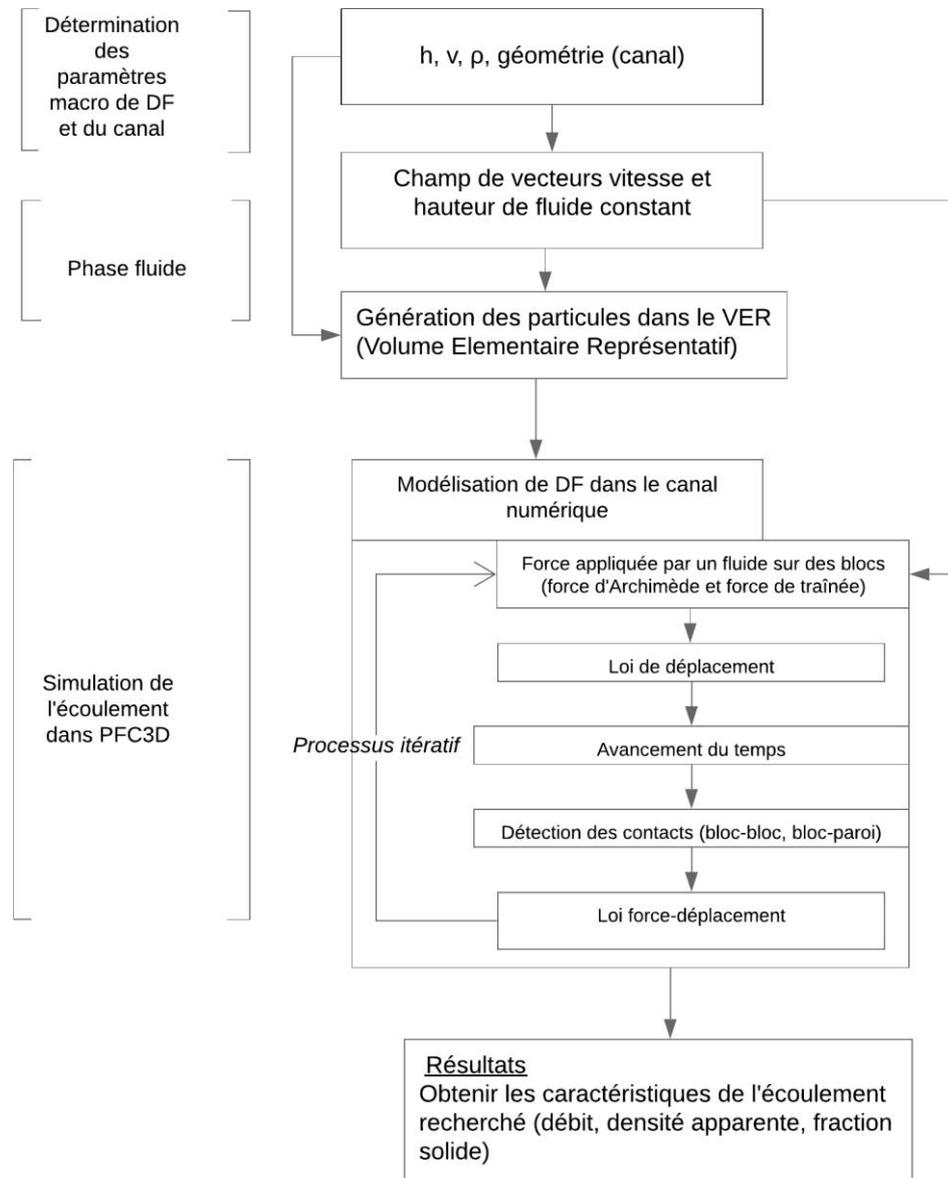


Figure 13 : Diagramme montrant les étapes de simulation (sans obstacle)

2.3.2 Effet du fluide sur les blocs

L'effet du fluide sur un bloc, dans ce modèle la force de traînée et la force d'Archimède, est mis à jour à chaque pas de temps, en fonction de la position du bloc dans le chenal et de sa vitesse d'une part, et de la vitesse du fluide et de la hauteur d'écoulement à cet endroit précis d'autre part.

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

Les formulations de la force fluide appliquée sur chaque bloc \vec{f}_f^p peuvent être définies comme suit (Schmeeckle et al., 2007) :

$$\vec{f}_f^p = \vec{f}_b^p + \vec{f}_D^p + \vec{f}_m^p + \vec{f}_l^p + \vec{f}_{am}^p + \vec{f}_{Ba}^p \quad (\text{Eq.3})$$

où \vec{f}_b^p est la force d'Archimède, \vec{f}_D^p la force de traînée, \vec{f}_m^p la force Magnus qui explique la modification de trajectoire, \vec{f}_l^p la force de levage induite par le cisaillement, \vec{f}_{am}^p la force de la masse ajoutée, et \vec{f}_{Ba}^p la force de Basset qui dépend de l'histoire du bloc.

Dans ce travail, l'objectif est d'établir un modèle de fluide simplifié qui aide à déplacer les blocs dans un chenal de géométrie donnée. Par conséquent, seules les principales forces hydrodynamiques ont été considérées : la force d'Archimède et la force de traînée. Toutes les autres interactions sont négligées. Les mêmes hypothèses sont prises par Zhao et al., (2014) et Li et Zhao, (2018) avec des modèles fondés sur un couplage DEM-CFD.

La force d'Archimède \vec{f}_b^p génère une force ascendante exercée sur un bloc immergé. Elle est définie comme suit :

$$\vec{f}_b^p = \rho_f v_i g \vec{z} \quad (\text{Eq.4})$$

Où ρ_f est la densité du fluide, v_i le volume du bloc immergé, g l'accélération gravitationnelle et \vec{z} l'unité vectorielle verticale vers le haut.

La force de traînée \vec{f}_D^p représente l'effet du fluide sur un bloc résultant de la différence de la vitesse entre eux. Elle est définie comme suit (Pudasaini, 2012) :

$$\vec{f}_D^p = \frac{1}{2} c_d \rho_f \frac{\pi d^2}{4} \|\vec{v}_f - \vec{v}_b\| (\vec{v}_f - \vec{v}_b) \quad (\text{Eq.5})$$

Où d est le diamètre du bloc (m), c_d est le coefficient de traînée, \vec{v}_f est le vecteur vitesse du fluide, et \vec{v}_b est la vitesse du bloc immergé.

Le coefficient de traînée peut être exprimé comme suit (Zhao et al., 2014):

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

$$c_d = \frac{24}{R_{ep}}(1 + 0.150R_{ep}) + \frac{0.407}{1 + \frac{87.10}{R_{ep}}} \quad (\text{Eq.6})$$

où R_{ep} , le nombre de Reynolds particulaire, est exprimé en $R_{ep} = \frac{\|\vec{v}_f - \vec{v}_b\| d}{\eta_f}$ avec η_f

la viscosité cinématique du fluide.

Un facteur de correction $n^{-\zeta+1}$ est proposé par Zhao et al., (2014) pour prendre en compte la fraction solide (n) dans l'écoulement, et est appliqué à l'équation 5. La force de traînée corrigée $\vec{f}_{D\text{corrigé}}^p$ est finalement prise en compte (Zhao et al., 2014) :

$$\vec{f}_{D\text{corrigé}}^p = \frac{1}{2} c_d \rho_f \frac{\pi d^2}{4} \|\vec{v}_f - \vec{v}_b\| (\vec{v}_f - \vec{v}_b) n^{-\zeta+1} \quad (\text{Eq.7})$$

Avec ζ un coefficient compris entre 3.4 et 3.7 et exprimé en fonction de R_{ep} :

$$\zeta = 3.7 - 0.65 \exp\left[\frac{-(1.5 - \log R_{ep})^2}{2}\right] \quad (\text{Eq.8})$$

2.3.3 Lois de contact interparticulaires

Le modèle de contact linéaire est utilisé pour les deux types d'interactions que nous rencontrons dans le modèle : le contact entre blocs appartenant à la phase solide, et le contact entre blocs et paroi, qui représente la collision entre les blocs et une structure rigide. Ce type de modèle est utilisé dans la plupart des études granulaires.

Ce modèle fournit le comportement d'une interface infinitésimale qui ne résiste pas à la rotation relative, de sorte que le moment de contact (M_c) est égal à zéro (Figure 14). La force de contact est résolue en composantes linéaires (normales et tangentiels à la surface de contact) et d'amortissements (damping). La composante linéaire fournit un comportement linéaire élastique (sans tension), tandis que la composante d'amortissement fournit un comportement visqueux. La force linéaire est produite par des ressorts linéaires avec des raideurs normales et tangentiels constantes kn et ks . La force d'amortissement est produite par des amortisseurs dont la viscosité est donnée par les rapports d'amortissement critique

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

normal et du cisaillement βn et βs . Les ressorts linéaires agissent en parallèle avec les amortisseurs (Itasca,2016).

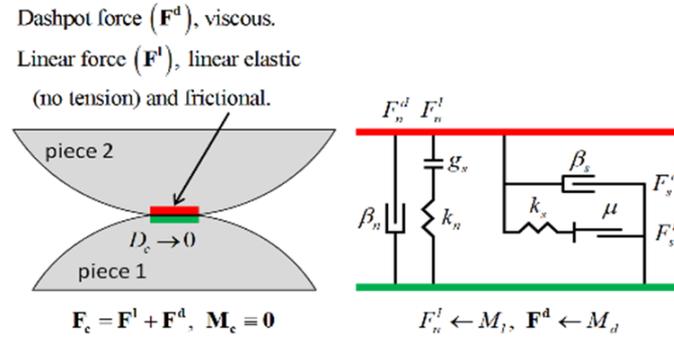


Figure 14 : Comportement et composants rhéologiques du modèle linéaire (Itasca,2016)

Le modèle de résistance au roulement est fondé sur le modèle linéaire, auquel un mécanisme de résistance au roulement est ajouté (Itasca,2016). Ce type de contact est utilisé ici pour empêcher le roulement entre les blocs et simuler indirectement le comportement des blocs un peu anguleux.

Le comportement de ce modèle de contact est similaire au modèle linéaire, sauf que le moment interne est incrémenté linéairement avec la rotation relative accumulée des blocs en contact au point de contact. Cette accumulation se produit jusqu'à une valeur limite maximale égale au produit de la force normale actuelle avec un coefficient de frottement de la résistance au roulement, μ_{rr} , et un rayon de contact effectif R (équation 11). L'incrément du moment interne est donné par :

$$\Delta M_r = -k_r \Delta \theta_b \tag{Eq.9}$$

où $\Delta \theta_b$ est l'incrément relation de flexion-rotation et $M^* = \mu_{rr} R F_n$ est la rigidité de la résistance au roulement. k_r est définie comme suit:

$$k_r = k_s R^2 \tag{Eq.10}$$

où k_s est la rigidité la rigidité de contact dans la direction tangentielle et R le rayon effectif de contact des deux éléments en contact avec:

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{Eq.11})$$

La magnitude du moment de résistance au roulement actualisée est ensuite vérifiée par rapport à la limite de seuil exprimée par :

$$M^* = \mu_{rr} R F_n \quad (\text{Eq.12})$$

où μ_{rr} est le coefficient de la résistance au roulement et F_n la force de contact linéaire normale. Les valeurs des paramètres du modèle de contact sont détaillées dans la section 3.2 ci-dessous.

2.3.4 Génération d'un écoulement

Un volume élémentaire représentatif (VER) de la matière constituant l'écoulement est d'abord créé à partir des caractéristiques de granulométrie et de porosité imposées. Ce VER est positionné dans une chambre d'alimentation, située en amont immédiat du chenal. Il compte environ 9500 blocs pour un volume total de 75 m³ et une porosité de 0.5 pour la première configuration. Dans la chambre d'alimentation, on suppose que tous les éléments du VER ont une vitesse identique et parallèle à l'axe du chenal. Les blocs sont injectés progressivement dans le chenal en fonction de leur progression dans la chambre d'alimentation (Figure 16). Dès que les blocs entrent dans le chenal, les effets du fluide leurs sont appliqués. Les blocs se déplacent le long du chenal en fonction des forces fluides qu'ils subissent ainsi que de leurs interactions avec les autres blocs et avec les parois. Le VER est répété de manière périodique afin d'assurer un approvisionnement constant du chenal.

La loi de contact, le logiciel utilisé et l'approche choisie pour la modélisation de l'écoulement ont été présentés. De plus, la distinction des phases solides et fluides et les interactions bloc-fluide prises en compte ont été détaillées. Dans la suite, une étude paramétrique est réalisée afin de calibrer le modèle, mettre en évidence l'influence des différents paramètres et définir les caractéristiques et les valeurs du modèle d'écoulement que l'on souhaite simuler.

3. Simulation de l'écoulement

3.1 Caractéristiques de l'écoulement de référence et du chenal

Le chenal est rectiligne, de section rectangulaire avec une faible pente (2 %) dans la direction de l'axe du chenal, similaire à celle mesurée dans le chenal de la quebrada Dahlia qui traverse la ville d'Arequipa. La largeur du chenal est fixée à 10 m. Pour calibrer les paramètres du modèle, nous commençons par modéliser l'écoulement dans un chenal de géométrie simple. Une longueur de chenal de 25 m a été choisie (Figure 16) de manière à obtenir un régime d'écoulement permanent stabilisé sur plusieurs mètres avant la terminaison du chenal, tout en optimisant les temps de calcul et en limitant le nombre de blocs présents dans le modèle numérique. La chambre d'alimentation est située à l'entrée supérieure du chenal tandis que les blocs qui « sortent » de ce dernier, sont supprimés du modèle.

Le Tableau 9 ci-dessous présente les caractéristiques de l'écoulement choisi comme cas de référence. Nous avons fixé la vitesse d'écoulement v à 3 m/s et la hauteur h à 1.5 m. Cela correspond à la valeur la plus faible de la gamme de vitesses pour de tels écoulements (Zanchetta et al., 2004), avec un nombre de Froude estimé à 0.78 (Hübl et al., 2009). Cependant, ces paramètres, tels que le débit, la vitesse et la hauteur d'écoulement, peuvent être modifiés facilement dans le modèle.

Tableau 9 : Caractéristiques de l'écoulement choisi pour la simulation

Fraction solide (vol%)	Densité ρ (kg/m ³)	Débit volumique (m ³ /s)	Vitesse v (m/s)	Hauteur h (m)	Nombre de Froude (Fr)
50-55	1800-1900	35-55	3	1.5	0.78

Avant de la simuler l'écoulement à proprement parler, on doit générer un VER de blocs. Ce VER a pour fonction d'alimenter le chenal et de satisfaire les critères de la section d'écoulement qu'on s'est fixé. La section de VER a donc une largeur de 10 m et une hauteur de 1.5 m, fixée par les paramètres d'entrées de notre modèle : la hauteur, la vitesse de l'écoulement et la géométrie du chenal permettent également d'estimer le débit de

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

l'écoulement proposé. Le critère de la longueur est fixé de 5 m afin de pouvoir reproduire chaque classe granulométrique et obtenir un nombre représentatif pour chaque classe (Figure 15).

La granulométrie des blocs est la suivante (un choix effectué pour présenter plusieurs tailles de blocs mais qui n'est pas fondé sur des données expérimentales granulométriques) :

- 10% de blocs de diamètres compris entre 0.10 et 0.15 m
- 30% de blocs de diamètres compris entre 0.15 et 0.20 m
- 40% de blocs de diamètres compris entre 0.20 et 0.30 m
- 20% de blocs de diamètres compris entre 0.30 et 0.40 m.

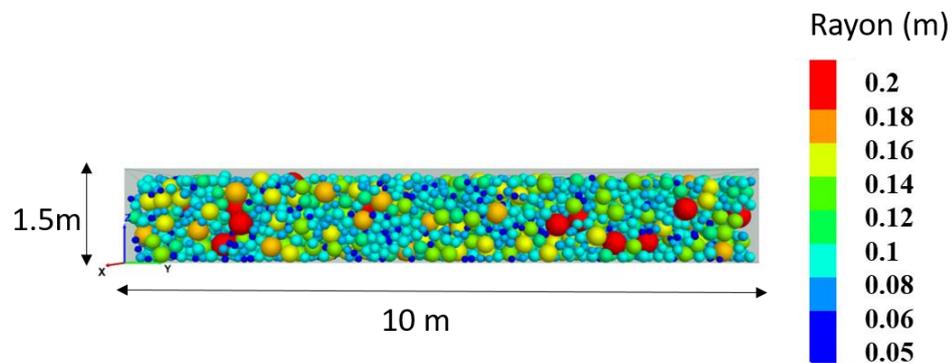


Figure 15 : Un VER avec des blocs distribués entre un rayon $R = 0.05\text{m}$ et $R = 0.2\text{ m}$

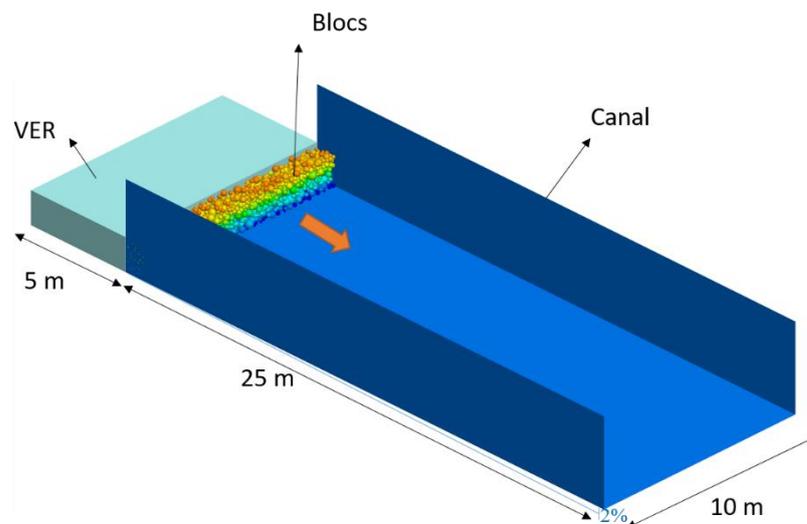


Figure 16 : Dessin montrant le chenal numérique. Un VER est placé à l'entrée du chenal (*PFC3D*)

3.2 Paramètres mécaniques du modèle

Plusieurs paramètres du modèle numérique ont été modifiés dans le cadre d'une étude paramétrique afin de montrer leurs effets sur l'écoulement. D'autres paramètres ont été fixés comme la rigidité (normale et tangentielle) et l'amortissement ou « damping ». Les choix de ces paramètres mécaniques sont détaillés ci-dessous :

- *Rigidité des contacts et amortissement ou « damping »*

La valeur de la rigidité de contact doit être suffisamment grande pour réduire le chevauchement entre les blocs tout en maintenant un pas de temps numérique suffisamment long. Concernant les paramètres mécaniques des modèles de contact, la rigidité de contact est fixée à $kn = 10^7$ N/m dans la direction normale et $ks = 5 \times 10^6$ N/m dans la direction tangentielle avec un rapport $ks/kn = 0.5$ (Itasca, 2016). Nous avons également considéré un amortissement visqueux dans la direction normale au contact: le rapport entre l'amortissement visqueux et l'amortissement visqueux critique est fixé à 0.4, sur la base des travaux réalisés par Albaba et al., (2015). Cet amortissement dissipe une partie de l'énergie lors d'un choc au niveau d'un contact

- *Coefficients de frottement*

Au niveau des contacts de bloc à bloc, différents coefficients de frottement μ_{b-b} entre 0.05 et 0.4 ont été testés. Le coefficient de frottement entre les blocs et les parois μ_{b-p} varie entre 0 et 1.

- *Résistance au roulement*

S'agissant de la résistance au roulement des contacts de bloc à bloc et bloc-paroi, différentes valeurs du coefficient μ_{rr} entre 0 et 0.6, ont été testées (Itasca, 2016).

- *Densités*

La densité des différents éléments (blocs et phase fluide) va déterminer notamment la force d'Archimède appliquée par le fluide sur les blocs. La densité des blocs ρ_b est comprise entre 2500 et 2700 kg/m³, une gamme qui englobe la densité moyenne d'une roche (Iverson, 1997). Pour la phase fluide composée d'eau et de particules très fines, les deux

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

paramètres pris en compte sont : la densité du fluide ρ_f (testée entre 1000 et 2000 kg/m³) et la viscosité dynamique μ_f .

- *Viscosité dynamique*

La viscosité dynamique μ_f est utilisée dans le calcul de la force de trainée appliquée par le fluide sur les blocs. Une valeur de μ_f comprise entre 0.03 et 0.075 (Pa.s) a été utilisée, sur la base des résultats de Mead et al., (2017) et de Cui et al., (2015).

3.3 Etude paramétrique

On simule l'écoulement sur une durée de 12 secondes, qui est suffisante pour remplir le chenal et permettre un écoulement continu et régulier (Figure 19). Pendant toute la durée de la simulation, nous enregistrons la hauteur de la couche de blocs, la vitesse d'écoulement moyenne et le débit total (des blocs et de la phase fluide) dans deux sections transversales. La densité apparente moyenne de l'écoulement dans le chenal a été calculée à la fin de la simulation. Nous avons également cherché à calibrer le modèle et à évaluer la sensibilité de ses paramètres. La fraction volumique solide v_s a été calculée selon la définition de Zanchetta et al., (2004) :

$$v_s = \frac{\rho_{bulk} - \rho_f}{\rho_b - \rho_f} \quad (\text{Eq.13})$$

où ρ_{bulk} est la densité apparente et ρ_f est la densité du fluide.

Cette étude paramétrique a été menée dans le but d'analyser l'influence de chacun des paramètres mécaniques. Le Tableau 10 présente 11 études de cas ainsi que les caractéristiques physiques macroscopiques des écoulements obtenus et la variabilité par rapport au cas de référence. Les paramètres du modèle qui influencent fortement les résultats peuvent être classés par ordre d'importance (Figure 17): (1) la résistance au roulement influence le débit et la fraction volumique solide, car elle favorise l'apparition de la dilatation dans le réseau de contact granulaire, (2) la densité du fluide et des blocs a une influence majeure sur la densité apparente, (3) la viscosité dynamique a un effet limité sur la vitesse, (4) le coefficient de frottement n'influence pas les résultats obtenus dans cette étude.

CHAPITRE 2 - Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle

Tableau 10 : Résultats de la calibration du modèle

run #	Paramètres du modèle						Résultats de la simulation en termes de caractéristiques de l'écoulement							
	ρ_b	ρ_f	Frottement		μ_f	μ_{rr}	Vitesse moyenne	Densité apparente	Débit volumique	Concentration solide	Vitesse moyenne	Densité apparente	Débit volumique	Concentration solide
	kg/m ³	kg/m ³	μ_{b-b}	μ_{b-p}	Pa.s	-	m/s	kg/m ³	m ³ /s	vol%	% de variation par rapport au cas de référence			
ref.	2700	1500	0.20	0	0.048	0	2.80	2139.6	45	53.3				
1	2500	1500	0.20	0	0.048	0	2.80	2029.0	45	52.9	0.0 %	-5.2 %	0.0 %	-0.8 %
2	2700	1000	0.20	0	0.048	0	2.55	1921.4	43	54.2	-8.9 %	-10.2 %	-4.4 %	+1.7 %
3	2700	2000	0.20	0	0.048	0	2.90	2361.9	47	51.7	+3.6 %	+10.4 %	+4.4 %	-3.0 %
4	2700	1500	0.05	0	0.048	0	2.80	2140.8	45	53.4	0.0 %	+0.1 %	0.0 %	+0.2 %
5	2700	1500	0.40	0	0.048	0	2.80	2132.4	45	52.7	0.0 %	-0.3 %	0.0 %	-1.1 %
6	2700	1500	0.20	0.5	0.048	0	2.80	2122.8	45	51.9	0.0 %	-0.8 %	0.0 %	-2.6 %
7	2700	1500	0.20	1.0	0.048	0	2.80	2131.2	45	52.6	0.0 %	-0.4 %	0.0 %	-1.3 %
8	2700	1500	0.20	0	0.030	0	2.60	2142.0	46	53.5	-7.1 %	+0.1 %	+2.2 %	+0.4 %
9	2700	1500	0.20	0	0.075	0	2.90	2138.4	46	53.2	+3.6 %	-0.1 %	+2.2 %	-0.2 %
10	2700	1500	0.20	0	0.048	0.6	2.60	2032.8	55	44.4	-7.1 %	-5.0 %	+22.2 %	-16.7 %

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

Tableau 11 : Analyse des résultats du modèle de calibration

Simulation run #	Paramètre	Observations
Cas de référence, cas 1	Densité des blocs	La vitesse moyenne d'écoulement est similaire. La densité apparente augmente dans la mesure où la densité des blocs est plus élevée. Le débit ne varie pas.
ref., cas 2 et 3	Densité du fluide	La densité du fluide est utilisée pour calculer la force de traînée : plus la densité du fluide est élevée, plus la force appliquée au bloc est grande, et donc la vitesse d'écoulement augmente. Ainsi, l'augmentation de la vitesse d'écoulement avec une densité du fluide plus élevée conduit à l'augmentation du débit. La densité apparente augmente avec la densité du fluide.
ref., cas 4 et 5	Frottement bloc-bloc	L'influence de ce paramètre est négligeable sur les résultats globaux étant donné la gamme de valeurs considérées.
ref., cas 6 et 7	Frottement paroi-bloc	L'influence de ce paramètre est négligeable sur les résultats globaux étant donné la gamme de valeurs considérées.
ref., cas 8 et 9	Viscosité dynamique	La vitesse moyenne d'écoulement augmente légèrement avec l'augmentation de la viscosité dynamique en raison de l'augmentation de la force de traînée appliquée au bloc. Le débit ne varie pas.
ref., cas 10	Résistance au roulement	Le paramètre de résistance au roulement simule les effets de la forme angulaire par rapport aux blocs sphériques : les blocs ont tendance à moins rouler et finissent par se bloquer, ce qui explique la diminution de la vitesse d'écoulement. D'autre part, la surface augmente (le modèle montre une plus grande hauteur d'écoulement, ce qui explique l'augmentation du débit).

3.4 Résultat obtenu

Dans le but de mieux expliciter la méthode de calibration fondée sur l'étude paramétrique réalisée (runs de #1 à #10) et sur l'influence des paramètres décrits ci-dessus, une stratégie de

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

calibration du modèle a été développée : on commence par régler les paramètres de résistance au roulement qui influencent les caractéristiques des écoulements obtenus, principalement la fraction volumique et le débit. Sachant que les blocs sont modélisés comme des blocs sphériques, la résistance au roulement permet de reproduire l'angularité des blocs en limitant le roulement des blocs sphériques. Ce paramètre est fixé à 0.2 pour atteindre la concentration solide et le débit requis. Dans un deuxième temps, nous fixons la densité des blocs et la densité du fluide (mélange de fluide et de fines particules). Ces deux paramètres sont directement liés à la densité apparente et à la fraction solide. En se fondant sur le cas #2 qui donne la densité apparente la plus faible, nous fixons la densité des blocs à 2500 kg/m^3 (la valeur la plus faible de la gamme considérée) pour obtenir une densité apparente de l'écoulement d'environ 1900 kg/m^3 . Nous sommes alors en mesure de fixer la densité du fluide à une valeur de 1100 kg/m^3 , pour mieux atteindre les propriétés de l'écoulement visées : la densité apparente, et dans une moindre mesure la vitesse moyenne. La calibration des densités doit également conduire à une fraction solide autour de 55%, ce qui correspond à l'écoulement considéré. La viscosité dynamique a été fixée à $0.048 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (par exemple, Mead et al., (2017)) pour ajuster la vitesse d'écoulement. Enfin, nous avons considéré un coefficient de frottement bloc-bloc de 0.4, ni trop faible ni trop fort, qui n'influence pas nos résultats.

Suite à l'analyse paramétrique, les paramètres du modèle ont été fixés aux valeurs suivantes (Tableau 12):

- La densité du fluide à 1100 kg/m^3
- La viscosité dynamique à $0.048 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- La densité des blocs à 2500 kg/m^3
- Le coefficient de frottement au contact bloc-bloc à 0.4
- Le coefficient de frottement au contact bloc-bloc à 0.0
- La résistance au roulement à 0.20

Cet ensemble de paramètres permet d'atteindre l'écoulement souhaité (proposé dans le Tableau 9) : une fraction solide de 55 % en volume et une densité apparente de 1867 kg/m^3 ont été obtenues, pour un débit volumique d'environ $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 17).

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

Tableau 12 : Résultat final obtenu après l'étude paramétrique

Résultat Final déduit des runs #1 à #10									
Paramètres du modèle fixés					Résultats de la simulation obtenus				
ρ_b	ρ_f	Frottement		μ_f	μ_{rr}	Vitesse moyenne	Densité apparente	Débit volumique	Concentration solide
kg/m ³	kg/m ³	μ_{b-b}	μ_{b-p}	Pa.s	-	m/s	kg/m ³	kg/m ³	vol%
2500	1100	0.4	0.0	0.048	0.2	2.8	1867	40	55

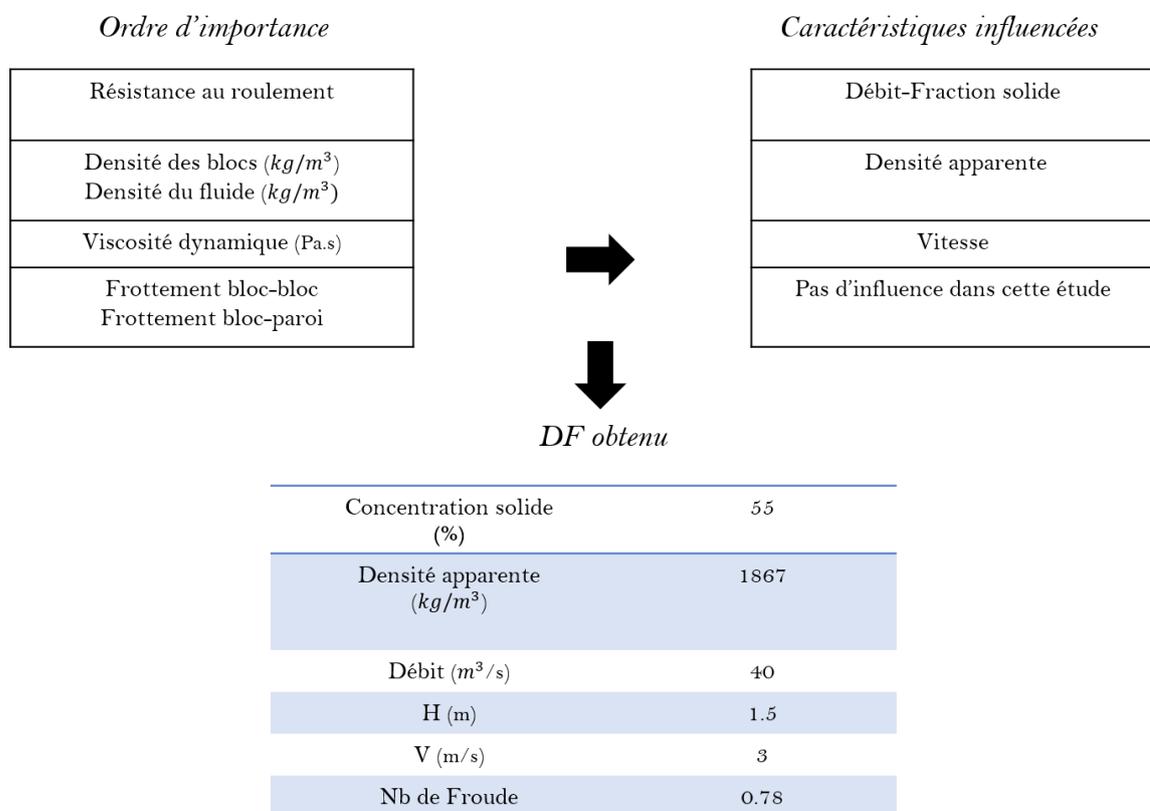


Figure 17 : Stratégie de la calibration du modèle pour obtenir le modèle final

L'écoulement obtenu présente des caractéristiques qui se situent dans les ordres de grandeurs recherchés, compte tenu des hypothèses prises dans la simulation, et sera utilisé dans la suite de nos travaux. La vitesse moyenne de l'écoulement est calculée dans deux sections du chenal ($x = 8$ m et $x=15$ m) et le débit volumique est calculé au 2/3 du chenal. La vitesse moyenne se stabilise à 2.8 m/s et le débit est égal à 40 m³/s (Figure 18).

CHAPITRE 2 - *Modèle numérique discret pour la simulation de l'écoulement sans obstacle*

La Figure 19 montre les vitesses des blocs dans le chenal après un temps de simulation de 12 s (résultat final obtenu à partir des paramètres du Tableau 12). Sur la base de ces ordres de grandeurs, le cas des coulées de débris DF est pris en compte dans cette étude (par opposition aux HCFs), comme par exemple la ravine Jiangjia en Chine (Hu et al., 2011; Mead et al., 2017).

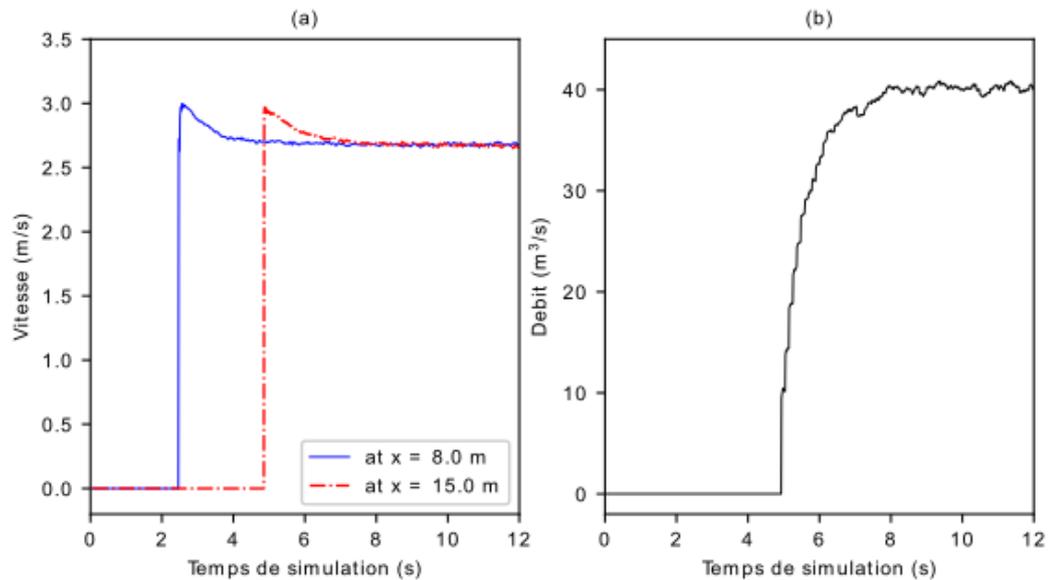


Figure 18 : Résultats obtenus pour l'écoulement de référence : (a)vitesse moyenne dans deux sections, (b) débit volumique en fonction du temps

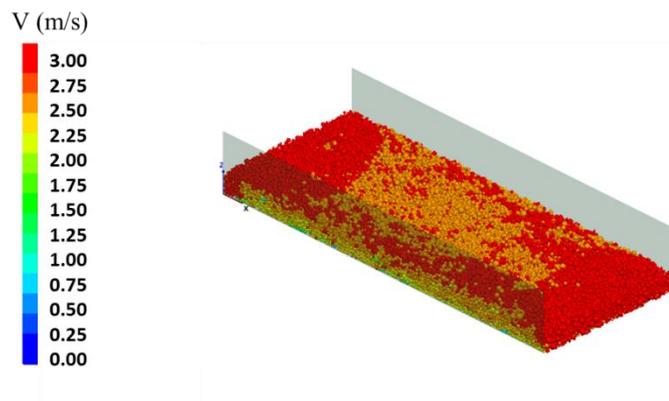


Figure 19 : Canal linéaire simulé avec des blocs (temps de simulation de 12 s). Les blocs sont colorés selon leur vitesse (m/s)

4. Bilan

L'objectif principal du modèle numérique développé est d'estimer la pression d'impact d'un écoulement avec des caractéristiques connues sur une structure exposée et ensuite évaluer sa vulnérabilité. Pour ce faire, un modèle DEM est développé dans le logiciel *PFC3D*.

En tenant compte des interactions de fluide sur les blocs et en négligeant toutes les autres interactions, un modèle discret a été développé afin de reproduire une coulée de débris avec des paramètres d'entrée spécifiques : la densité apparente, la fraction solide, la vitesse et la hauteur. Pour la partie solide : la forme, la granulométrie tronquée et les paramètres correspondants ont été choisis tandis que, pour la phase fluide (fines + eau) : la densité du fluide et sa viscosité dynamique ont été fixées. Avec une géométrie rectangulaire, la vitesse et la hauteur du fluide restent constantes, produisant un champ d'écoulement homogène et constant.

Dans le but de déterminer les paramètres du modèle, on définit tout d'abord les caractéristiques de l'écoulement que l'on souhaite reproduire. Dans le cas du type d'écoulement étudié, une gamme de valeurs de ces caractéristiques peuvent être collectées dans la littérature (Iverson , 1997; Al Baba et al., 2015, ; Mead et al., 2017). Nous avons ensuite fait varier les différents paramètres numériques du modèle afin d'évaluer leur influence sur les caractéristiques finales de l'écoulement. Cette étude paramétrique nous a permis de dégager une méthode de calibration de l'écoulement. Nous avons donc pu déterminer le jeu de paramètres permettant de simuler un écoulement donné, dont nous avons vérifié les caractéristiques macroscopiques principales en plusieurs points du chenal.

Une fois le jeu de paramètres calé (dans le cadre d'un écoulement dans un chenal simple sans obstacle), il peut être utilisé pour procéder à la modélisation de l'interaction entre l'écoulement et la structure dans le but d'évaluer les pressions d'impact. Le couplage DEM-fluide, l'effet des paramètres macroscopiques du DF sur la pression d'impact et la validation de ces résultats d'impact obtenus seront présentés dans le chapitre 3.

CHAPITRE 3

Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

1. Introduction

Dans la partie précédente, nous avons déterminé une méthode permettant d'ajuster les paramètres du modèle numérique pour modéliser un écoulement visé (DF). Ce calage a été réalisé sur la base d'un chenal linéaire (observé dans la Qda Dahlia à Arequipa) de géométrie simple, et avec une vitesse et une hauteur d'écoulement homogène. Les caractéristiques de DF sont considérées connues : hauteur, vitesse, densité, granulométrie...

Pour mesurer la pression d'impact d'un DF sur des éléments de structures, plusieurs étapes sont nécessaires :

- Déterminer les paramètres du modèle permettant de reproduire l'écoulement souhaité dans un chenal de géométrie simple,
- Modifier la géométrie du chenal en tenant compte des obstacles (éléments de structures) à étudier,
- Simuler la phase fluide dans le chenal correspondant à la géométrie choisie : le champ de vitesse et de hauteur de fluide ne seront plus constants,
- Importer les champs de vitesse et de hauteur de fluide dans le code DEM pour simuler le mélange (blocs-fluide).

Plusieurs méthodes de couplage DEM-fluide sont présentées dans la littérature : on retrouve par exemple des méthodes de couplage complet pour simuler le mélange, utilisant les méthodes DEM et LBM ou DEM et SPH (Leonardi et al., 2016; Trujillo-Vela et al., 2020) ou encore des méthodes de couplage unidirectionnel DEM et CFD (Computational Fluid Dynamic) simulant les deux phases successivement (Zhao et al., 2014).

Dans ce chapitre, on présente l'étude d'une géométrie de chenal rectangulaire au centre duquel est situé un pilier vertical de section carrée. Parmi plusieurs choix qui existent pour

simuler le fluide, deux méthodes ont été successivement étudiées : un couplage bidirectionnel DEM - Darcy (partie fluide modélisée avec *FLAC3D*) et un autre unidirectionnel DEM-CFD réalisé par *Telemac3D*. Chaque méthode a ses avantages et limites qui seront présentées dans la suite (Tableau 13). Les simulations et résultats présentés dans ce chapitre correspondent à la seconde approche dite DEM-CFD. La pression d'impact exercée par le DF sur le pilier est enregistrée en fonction du temps.

La validation du modèle numérique repose sur une comparaison des résultats avec les modèles empiriques que l'on trouve dans la littérature. Il est en effet complexe de valider les résultats à partir de données expérimentales : en effet, il nous a été impossible de trouver un événement réel, instrumenté, correspondant à un écoulement avec présence de blocs, ayant à peu près les caractéristiques et répondant aux scénarios de notre cas d'étude.

2. Géométrie du chenal avec obstacle

Le modèle développé pourra être utilisé pour évaluer les forces induites par cet écoulement : par exemple, sur un pilier situé au centre du chenal à une distance de 15 m de l'entrée (Figure 20). L'obstacle représente un pilier avec une section transversale horizontale de forme carrée (1 m × 1 m). Le code *FLAC3D* est utilisé pour modéliser le pilier selon la méthode des différences finies. Le pilier est maillé avec des zones en forme de briques (parallélépipèdes). Le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb est appliqué à toutes les zones, avec des propriétés pertinentes correspondant au béton armé : densité, module d'élasticité, coefficient de Poisson.

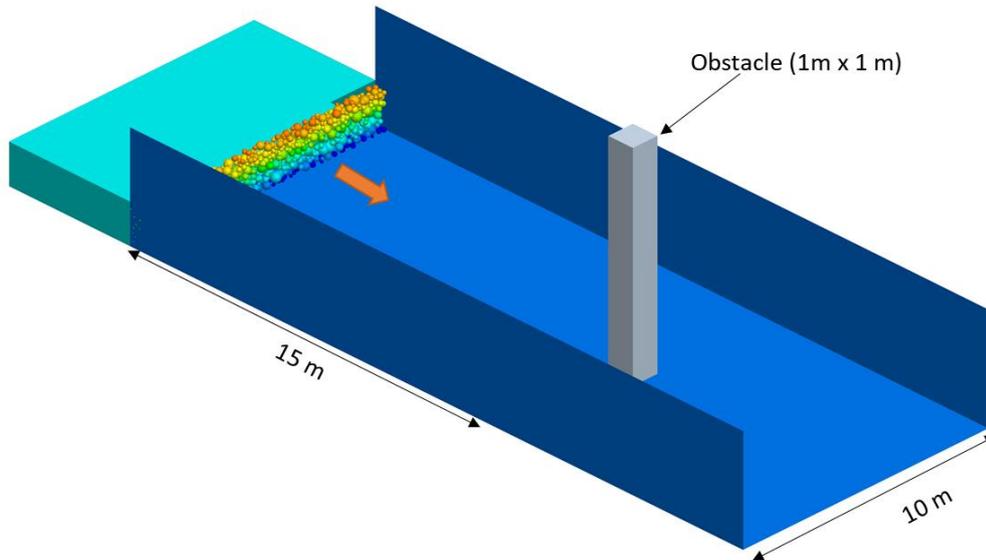


Figure 20 : Canal simulé avec un obstacle

Proske et al., (2011) montrent que la hauteur d'accumulation des DFs en amont d'un obstacle est plus élevée avec un obstacle situé au centre du canal. Si $h_{mu,2}$ correspond à cette mesure, nous pouvons écrire $h_{mu,2} = h_{ac} + h_{Mu}$, avec h_{Mu} la hauteur du DF à l'entrée du canal et h_{ac} la hauteur d'accumulation de DF (Figure 21). Dans la suite de ce travail, nous utilisons $h_{mu,2}$ pour calculer la pression d'impact des DF sur l'obstacle.

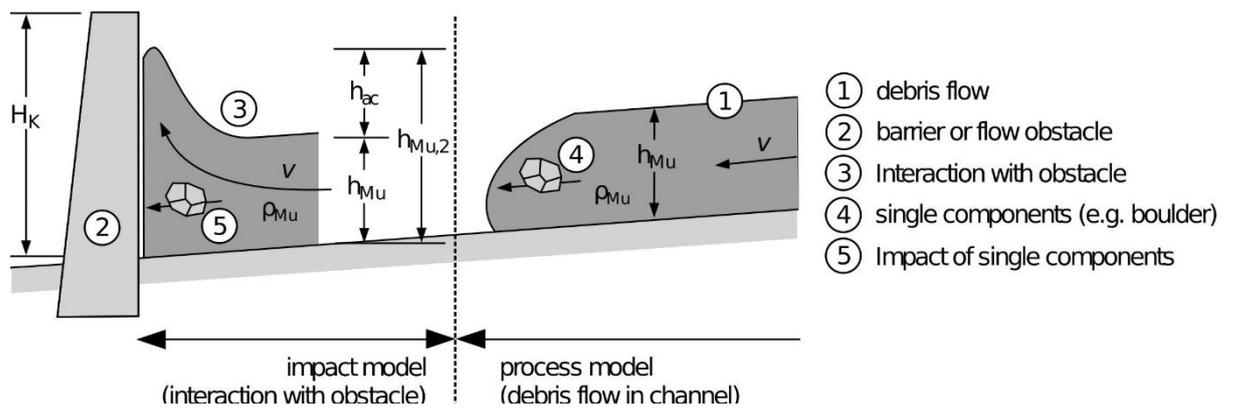


Figure 21 . Modèle de processus et modèle d'impact des DF sur un obstacle d'après Proske et al., (2011)

2.1 Calcul de la phase fluide

L'objectif principal de la simulation de la phase fluide est d'avoir accès aux valeurs (1) de vecteurs vitesses qui sont moteur pour la phase des blocs (force de trainée) et (2) de la hauteur

du fluide qui permet de calculer la poussée d'Archimède s'exerçant sur les blocs. De plus, ça pourra servir à connaître la surface libre de fluide selon la géométrie de chenal simulé.

Pour le faire, deux options ont été retenues pour simuler la phase fluide : (a) Loi de Darcy avec *FLAC3D*, (b) CFD avec *Telemac3D*. Les deux méthodes de couplage seront présentées ci-dessous, puis le choix (b) sera utilisé dans toute la suite de l'étude.

2.1.1 Approche utilisant la loi de Darcy

Pour obtenir le champ de vitesses du fluide dans les différentes zones du chenal, une première approche a été testée à partir de *FLAC3D* en utilisant la loi de Darcy (Itasca, 2016).

Un maillage simple a été réalisé en utilisant un maillage cubique, dont la taille de la cellule unitaire est fixée à 0.5 x 0.5 x 0.5 m : dans chacune d'elles, les composantes des vecteurs vitesses du fluide (orientation et intensité) sont calculées (Figure 22). La dimension des mailles a été déterminée en tenant compte du diamètre des particules ($d_{\min} = 0.1$ m et $d_{\max} = 0.4$ m) : la plus grosse particule pouvant ainsi être contenue dans une cellule fluide. L'écoulement simulé représente un fluide incompressible dans un milieu poreux de porosité donnée. La perméabilité k du milieu poreux a été estimée à partir de l'équation de *Kozeny-Carman*, avec une valeur seuil, afin de limiter la perméabilité maximale lorsque la porosité devient trop forte.

$$k(\varepsilon) = \frac{d^2}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad \text{si } \varepsilon \leq 0.6 \quad (\text{Eq.14})$$

$$k(0.6) \quad \text{si } \varepsilon > 0.6$$

Où d est le diamètre moyen des blocs dans la cellule et ε est la porosité de la cellule.

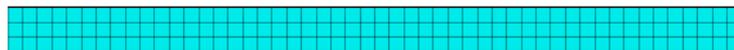


Figure 22 : Maillage *FLAC3D* utilisé pour le modèle fluide (0.5x0.5)

Bien évidemment, les mécanismes d'écoulement du lahar sont plus complexes que le modèle utilisant la loi de Darcy : les particules vont se déplacer avec la partie fluide et le régime d'écoulement est beaucoup plus turbulent que celui observé dans un milieu poreux. Par ailleurs, une contrainte est toujours imposée sur la surface de l'écoulement : la hauteur du fluide reste constante quelle que soit la géométrie du chenal.

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

Cependant, nous avons besoin d'un moyen simple et rapide pour estimer une distribution des vitesses d'écoulement dans le chenal, permettant d'entraîner les particules. La perméabilité considérée est calculée localement dans *PFC3D* en fonction de l'arrangement des blocs (la porosité ε). La densité prise en compte pour le fluide est la même que dans l'écoulement global, à savoir 1100 kg/m^3 . En termes de conditions aux limites, une pression est imposée à l'entrée et à la sortie du chenal : il s'agit d'appliquer un gradient de pression entre la face d'entrée et la face de sortie jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre.

La stratégie de couplage entre *PFC3D* et *FLAC3D* est présentée sur la Figure 23 ci-dessous. Un couplage *DEM-FLAC3D* bidirectionnel a donc été réalisé : la distribution spatiale de la porosité est exportée depuis le modèle *PFC3D* vers le modèle fluide *FLAC3D* afin d'actualiser les conditions d'écoulement du fluide. Un calcul fluide est mené jusqu'à l'équilibre puis les vecteurs vitesse du fluide sont ensuite exportés vers le modèle DEM, permettant d'actualiser les forces d'écoulement sur les blocs.

Dans le calcul fluide cependant, la hauteur du fluide reste constante. La Figure 24 montre un exemple de résultat fluide sur (a) la distribution de la porosité et (b) les vecteurs vitesses le long du chenal, après un temps total de simulation de 12 s. On remarque que ces vecteurs sont très importants le long des parois. Les vitesses d'écoulement sont plus rapides le long de la paroi de la ravine, car les porosités mesurées dans ces zones sont plus importantes et donc les perméabilités : cela est directement lié à l'alignement des particules qui peut apparaître du fait de la présence des parois rectilignes (effets de bord).

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

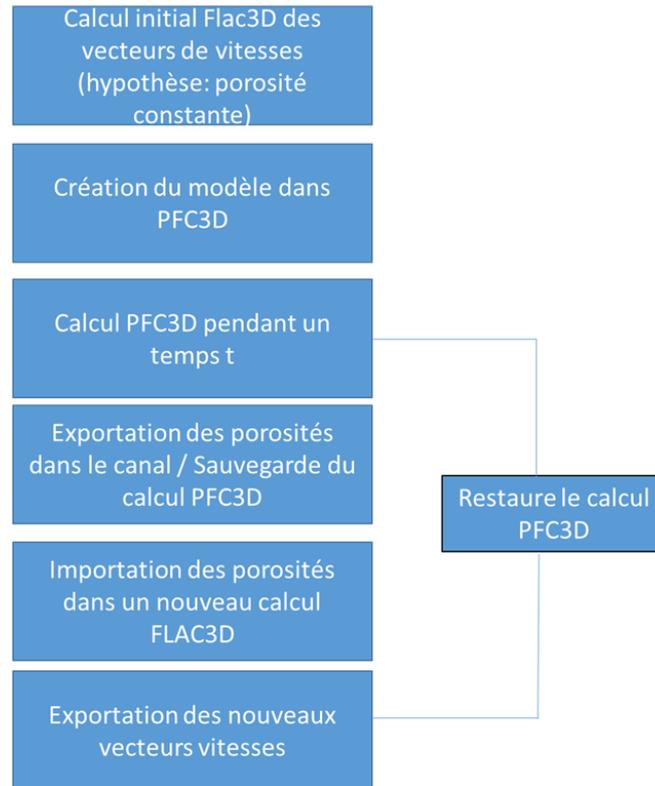


Figure 23 : Etapes du couplage DEM-*FLAC3D*

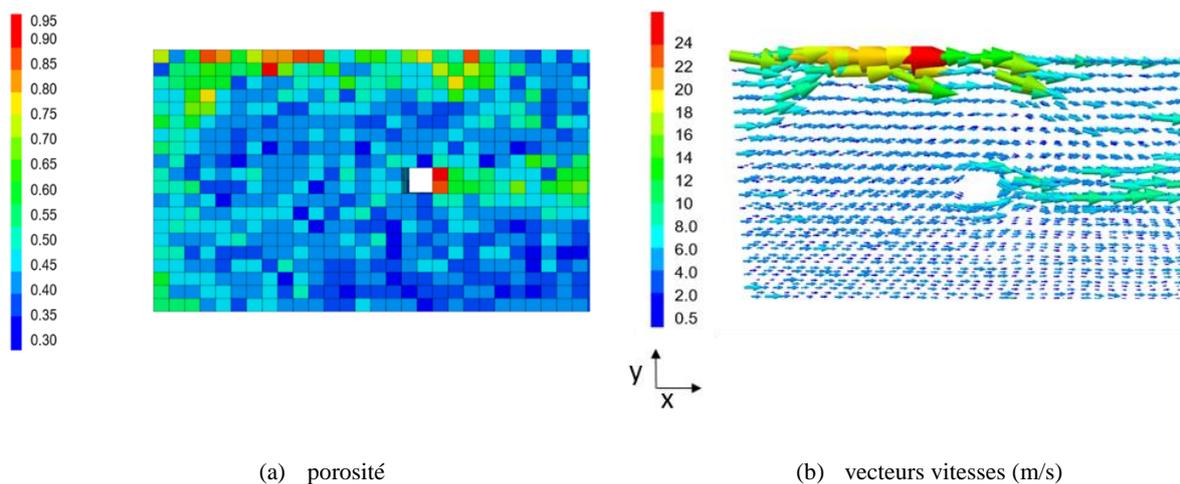


Figure 24 : Résultat de la simulation de l'écoulement d'un fluide dans *FLAC3D* après 12 s de temps de simulation : (a) la distribution de la porosité, (b) la distribution de vecteurs vitesses (m/s)

Avec la méthode de Darcy, on a rencontré la difficulté d'obtenir la surface libre de l'écoulement qui correspond à la géométrie du canal simulé ainsi que des vecteurs vitesses réels.

2.1.2 Approche utilisant les équations Navier-Stokes

Dans le cas d'un chenal comprenant un pilier, l'écoulement du fluide n'est plus uniforme : d'où la nécessité de calculer le champ de vitesse et la surface libre de la phase fluide le long du chenal. Une approche Computational Fluid Dynamics (CFD) fondée sur les équations de Navier Stokes en 3 dimensions est utilisée pour obtenir le champ de vitesse de la phase fluide ainsi que la position de la surface libre. On a utilisé le code *Telemac3D* : il s'agit d'un code éléments finis pour la simulation d'écoulements à surface libre développé par le LNHE (Laboratoire National pour l'Hydraulique et l'Environnement) et EDF (Electricité de France) et basé sur les équations hydrodynamiques 3D (Moulinec et al., 2011; Rameshwaran et al., 2013).

Concernant les conditions limites, un débit de fluide constant Q est imposé à l'entrée du chenal ainsi qu'une profondeur d'écoulement constante H à la sortie du chenal. La densité du fluide est prise égale à la même valeur que dans la simulation globale, c'est-à-dire 1100 kg/m^3 . Ainsi, la vitesse du fluide et la surface libre sont calculées en chaque point du maillage triangulaire et notamment autour du pilier. Ensuite, les données de champs de vitesse et la position de la surface libre du fluide sont exportées dans *PFC3D* où elles sont utilisées pour calculer la force de traînée comme décrit dans l'équation 7 (chapitre 2) ainsi que la poussée d'Archimède. La Figure 25 montre la surface libre (a) et le champ de vitesse (b) dans la géométrie du chenal choisie. La simulation DEM est réalisée avec des interactions fluides sur une durée de 12 s.

Dans cette approche, le calcul fluide est effectué une seule fois et avant que la simulation DEM ne soit réalisée. On simule le fluide sans les interactions particules-fluide. Les forces d'interaction du fluide sur les blocs sont ajoutées en continu pendant le processus d'écoulement des particules en fonction de la position de la particule dans le chenal, et l'interaction n'est considérée que dans un seul sens : action du fluide sur les particules uniquement. L'effet des particules sur le fluide est négligé pour plusieurs raisons : (1) l'écoulement est modélisé sur une courte distance en amont et en aval du pilier, ce qui signifie que nous n'avons pas besoin de reproduire la complexité des mécanismes d'écoulement sur de longues distances ; (2) l'objectif principal est la mesure de la pression d'impact des blocs à l'échelle de la structure exposée, donc la principale interaction qui influence la pression d'impact est la force de traînée ; (3) des hypothèses similaires sont faites dans d'autres modèles de couplage CFD-DEM dans la littérature (Zhao et al., 2014; 2017) ; (4) le couplage unidirectionnel permet d'avoir un temps

de calcul raisonnable pour obtenir un flux de particules stable (en termes de débit, de hauteur et de vitesse) et donc pour obtenir une estimation stable de la pression d'impact sur l'obstacle.

De plus, les particules vont influencer le fluide surtout s'il y a une grande différence de vitesse entre le fluide et les particules. En effet, si les blocs et le fluide ont des vitesses du même ordre de grandeur, alors le fluide se déplace comme les particules et l'interaction de celles-ci sur le fluide est limitée. La norme de la vitesse relative entre bloc et fluide est calculée et vérifiée tout au long de la ravine. Elle est faible dans tous les endroits de la ravine sauf pour les blocs en contact avec le pilier (zone de turbulence quand les particules sont bloquées derrière l'obstacle), donc nous avons considéré que l'on pouvait négliger cet effet.

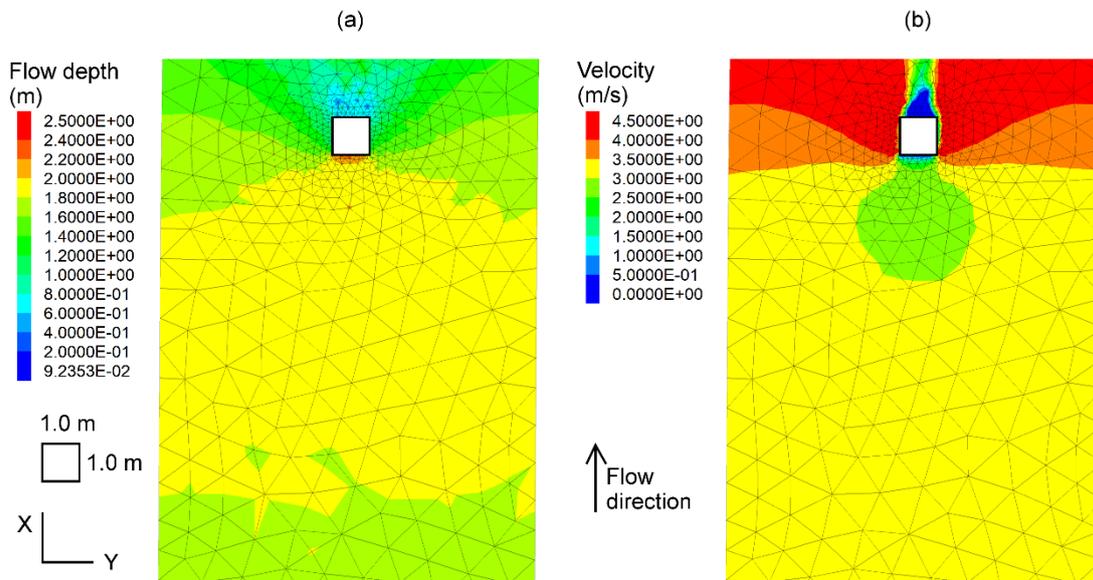


Figure 25 : Calcul de la phase fluide avec le code *Telemac3D*: (a) surface libre, (b) champ de vitesses

2.1.3 Discussion sur les deux approches

Deux méthodes de couplage ont été utilisées pour simuler les deux phases de l'écoulement dans un chenal. Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses défauts. Le Tableau 13 ci-dessous montre la différence entre le modèle DEM-Darcy et celui DEM-CFD.

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

Tableau 13 : Comparaison des deux méthodes de calcul de la phase fluide

DEM-Darcy	DEM-CFD
<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Facilité de couplage entre <i>FLAC3D</i> avec <i>PFC3D</i> ✓ Couplage bidirectionnel ✓ Avoir accès aux vecteurs vitesses de fluide dans chaque cellule du chenal 	<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Obtention d'un champ de vitesse d'un fluide à surface libre avec des conditions définies ✓ Création d'une simple turbulence du fluide ✓ Méthode de résolution des vecteurs vitesses et de la profondeur du fluide ✓ Equations Navier-Stokes
<p style="text-align: center;"><u>Limites</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Difficulté de modéliser la surface libre ✓ Loi de Darcy ✓ Pas de turbulences dans le modèle ✓ Difficile d'obtenir des vecteurs vitesses réels (effet de bord fort dans le chenal) 	<p style="text-align: center;"><u>Limites</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Implique une rhéologie des fluides newtoniens ✓ Couplage DEM-CFD unidirectionnel, réalisé une unique fois.

Pour la suite des travaux présentés dans ce manuscrit, on a fait le choix de l'approche CFD-DEM. La phase fluide est modélisée pour obtenir un champ de vitesse nécessaire à entraîner les particules le long du chenal en reproduisant sa surface libre. Cette solution a été choisie dans le but d'obtenir ce qui nous intéresse de la phase fluide, mais évidemment, il existe aussi d'autres méthodes CFD et d'autres solutions pour simuler cette phase.

3. Mise en place du couplage DEM-CFD

Le diagramme présenté sur la Figure 26 décrit chacune des étapes du processus de simulation DEM-CFD. Cette simulation utilise les blocs générés dans *PFC3D* et les champs de vitesse et de surface libre du fluide calculés une seule fois avec *Telemac3D* avant le calcul DEM (Figure 27).

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

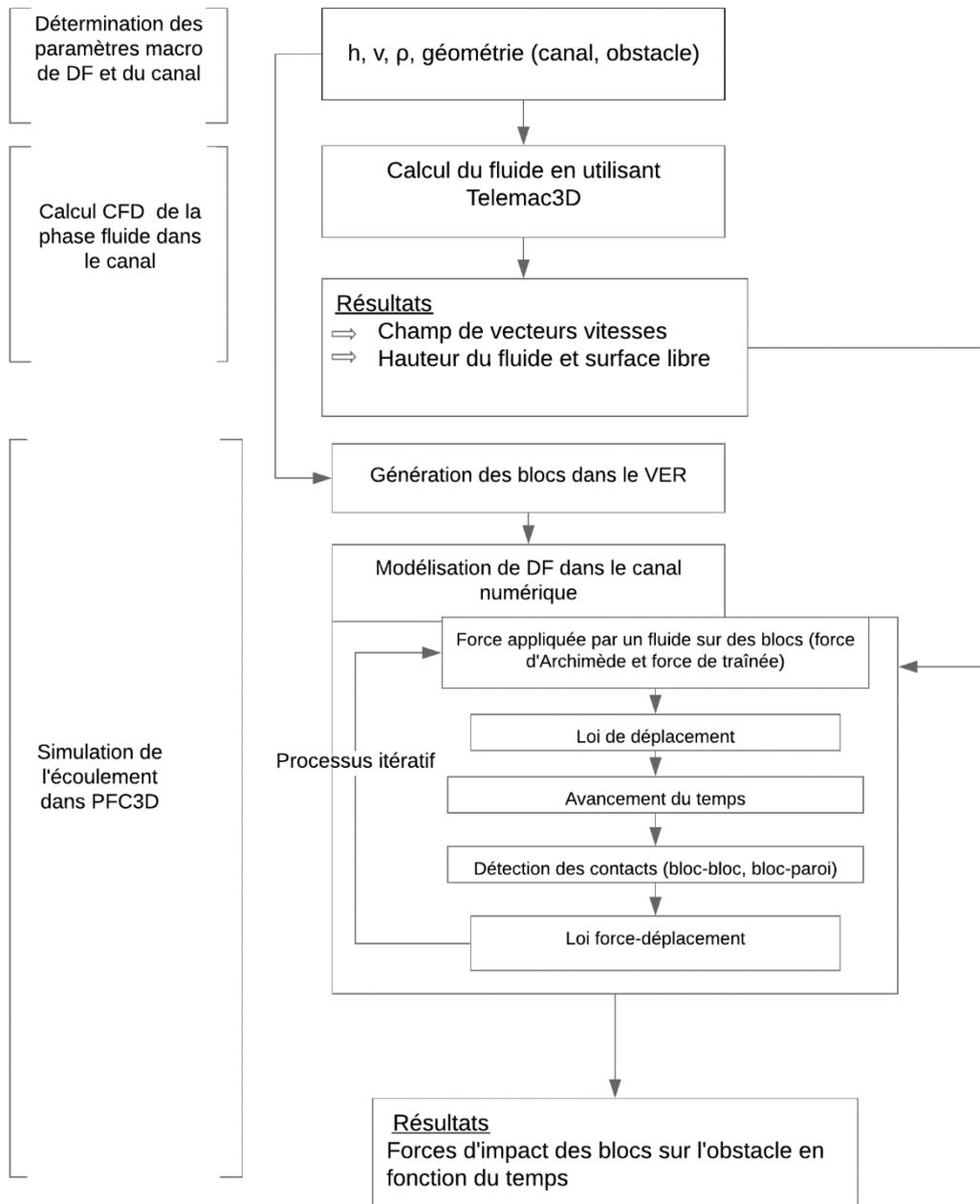


Figure 26 : Diagramme montrant les étapes de la simulation incluant un obstacle

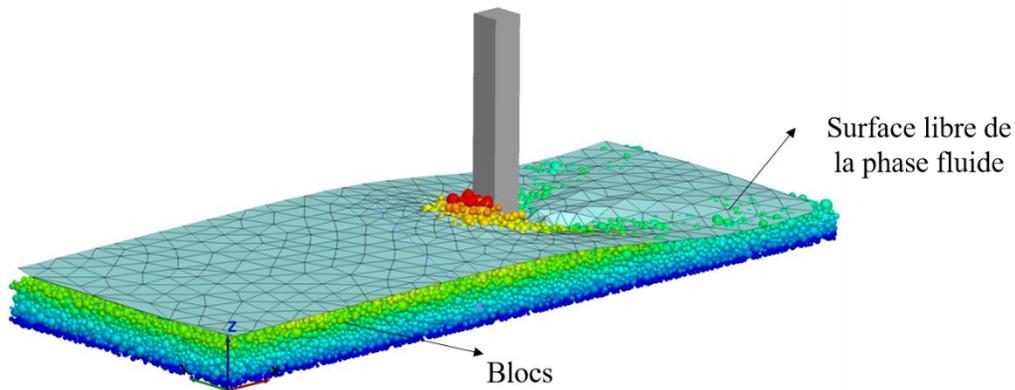


Figure 27 : Les blocs simulés (DEM) avec la surface libre de la phase fluide

3.1 Simulation d'un cas de référence

Nous nous fixons ici un cas d'écoulement DF de référence qui présente une densité d'écoulement de 1867 kg/m^3 , une vitesse V_{DF} de 3 m/s et une hauteur h_{Mu} de 1.5 m correspondant à un nombre de Froude $Fr = 0.78$ (Figure 28). Le calcul fluide est d'abord réalisé pour obtenir les champs de vitesse et la position de la surface libre, correspondant à ces caractéristiques. Ensuite, le DF est simulé dans le chenal en utilisant *PFC3D* sur une durée de 12 secondes. Le temps de calcul pour le cas de référence correspond à environ 8 heures. Les simulations ont été effectuées sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel (R) Core 307 (TM)i9-9900 et de 32Go de RAM (DDR4,2666Mhz). Au cours de la simulation, de nombreuses informations sont enregistrées : la vitesse moyenne des particules, la hauteur, le débit volumique et la distribution des pressions normales des blocs sur le pilier. Les paramètres du modèle DEM ont été détaillés et fixés dans le chapitre 2 (partie 3).

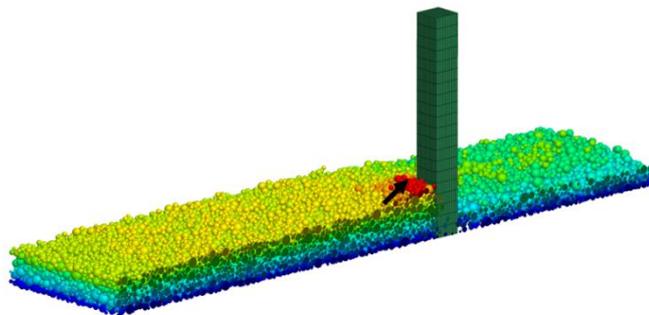


Figure 28 : Interaction des particules avec le pilier à l'état final $t = 12 \text{ s}$

3.2 Résultats

La Figure 29 montre la distribution de la pression appliquée par les blocs sur l'obstacle en fonction du temps, calculée directement dans le modèle DEM à partir de la distribution des forces de contact entre les blocs et le pilier. La courbe rouge représente une moyenne mobile pour une période $k = 10$ (valeurs). Elle est utilisée pour analyser les points de données de la courbe noire, en faisant la moyenne de différents sous-ensembles de l'ensemble des données. Le temps $t_1 = 5$ s correspond à l'instant où la première particule impacte le pilier. De $t_1 = 5$ s à $t_2 = 9$ s, la contrainte sur le pilier augmente progressivement. Pour $t > 9$ s, la contrainte d'impact, fondée sur la courbe de moyenne mobile, semble se stabiliser à environ 72 kPa.

Pour tous les cas présentés dans cette thèse, la pression dynamique est calculée comme une moyenne des valeurs mesurées entre $t_2 = 9$ s et $t_{\text{final}} = 12$ s. Pour évaluer la pression d'impact totale exercée par la coulée de débris sur le pilier, la contribution de la phase fluide sera ajoutée. La pression due au fluide présente deux composantes : hydrostatique et hydrodynamique (Nagl et Hübl, 2017; Mead et al., 2017). Pour calculer la pression hydrostatique P_{static} du fluide, la formule suivante est utilisée (Hübl et al., 2009; 2017) :

$$P_{\text{static}} = \rho_f g h_{mu} \quad (\text{Eq.15})$$

où ρ_f est la densité du fluide, g est la gravité et h_{mu} est la hauteur de DF.

La composante hydrodynamique P_{dynamic} due à la pression du fluide est calculée comme suit :

$$P_{\text{dynamic}} = \rho_f V_0^2 \quad (\text{Eq.16})$$

où V_0 est la vitesse de l'écoulement au voisinage de la face amont du pilier. Cette valeur de vitesse est proche de 0. Donc, la composante dynamique de la pression du fluide est supposée négligeable.

La pression d'impact totale due à la phase fluide de l'écoulement P_{fluide} est exprimée par :

$$P_{\text{fluide}} = P_{\text{static}} + P_{\text{dynamic}} \quad (\text{Eq.17})$$

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

La Figure 30 montre trois résultats pour le cas de référence, en fonction de la hauteur sur le pilier :

(i) l'évolution de la pression moyenne appliquée par les particules sur le pilier (de $t = 9$ s à $t = 12$ s) ;

(ii) le profil de pression statique du fluide ;

(iii) la pression totale (la somme des deux courbes précédentes).

Chaque point de la courbe de pression des blocs représente la moyenne entre quatre calculs différents, menés dans les mêmes conditions d'écoulement : chacune est présentée par un VER de blocs différent, généré aléatoirement. La Figure 30a montre également le niveau maximal des particules (hauteur d'accumulation des particules) et le niveau maximal de la phase fluide en amont du pilier. Dans ce cas, la pression totale de DF augmente vers le bas du pilier. Dans la partie inférieure du pilier (en dessous de 1.4 m), la pression augmente moins rapidement avec la profondeur de l'écoulement. De plus, il existe de fortes fluctuations temporelles des pressions sur le pilier : cette variabilité de la pression peut être liée à la variabilité temporelle des chocs entre les blocs et le pilier, due à la taille et à la vitesse des blocs. La Figure 30.b donne une idée de la variabilité des pressions en fonction de la hauteur sur le pilier : les pressions « P_{inf} » et « P_{sup} » montrent respectivement la différence et la somme entre la pression moyenne et l'écart-type correspondant à une hauteur donnée (entre 9 et 12 s). Cette variabilité donne une idée de la distribution des pressions minimales ou maximales, d'un cas donné sur un pilier.

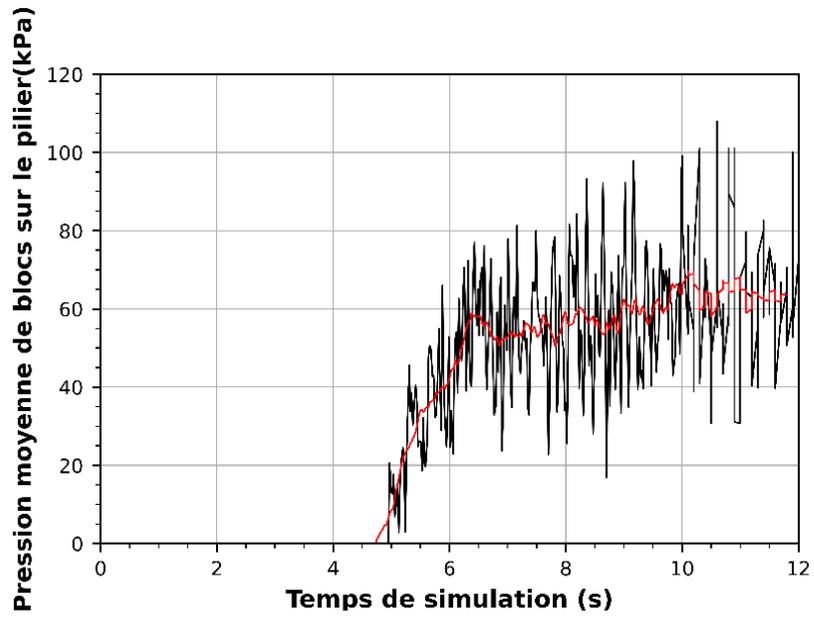
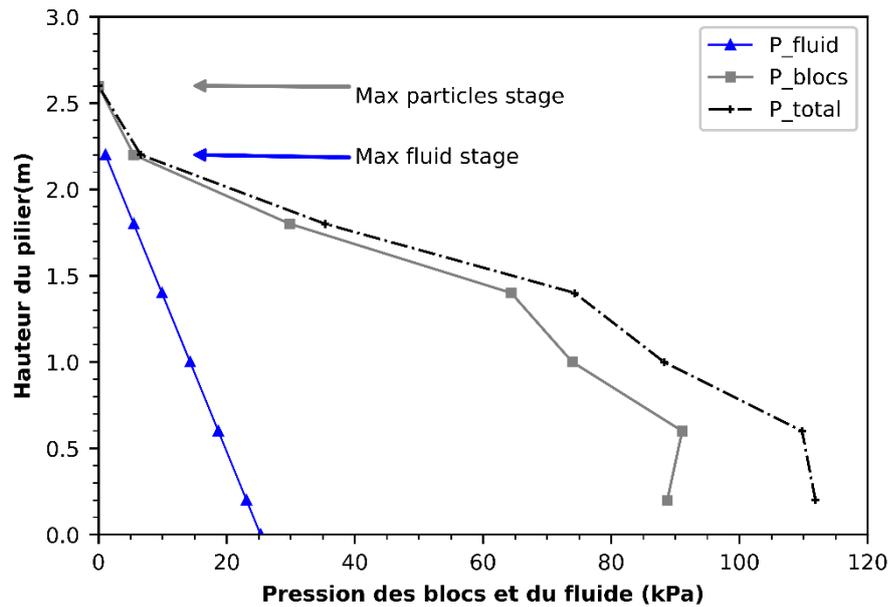
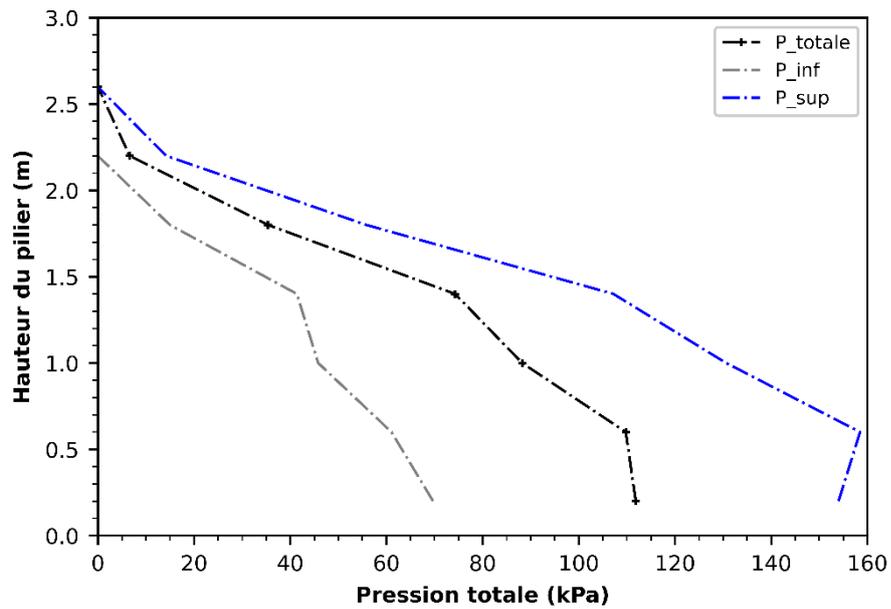


Figure 29 : Pression appliquée par les blocs sur un pilier en fonction du temps de simulation. La courbe noire représente les données brutes et la courbe rouge montre de moyenne mobile (filtre) avec $k=10$

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle



(a)



(b)

Figure 30 : (a) Pression moyenne appliquée par les blocs (courbe grise), la phase fluide (courbe bleue) et la pression totale (courbe noire, sur le pilier (Cas de référence) ; (b) les limites de la pression moyenne (maximale et minimale) calculées en fonction de l'écart-type (entre 9 et 12s)

4. Sensibilité des résultats d'impact aux paramètres du modèle

Plusieurs paramètres du modèle ont été étudiés pour montrer leur influence sur les résultats de pression d'impact de DF sur le pilier. Les paramètres de contact comme la rigidité, le frottement et la résistance au roulement ainsi que les paramètres macroscopiques (hauteur, vitesse) de l'écoulement sont étudiés et présentés dans la suite.

4.1 Paramètres de contact

Une étude paramétrique marginale a été menée pour mettre en évidence l'influence de chaque paramètre sur l'impact. Les paramètres étudiés sont résumés dans le Tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14 : Paramètres de contact étudiés

Paramètre étudié	Cas de référence	Cas variés
Rigidité normale kn Rigidité tangentielle ks (N/m)	$kn = 10^7$ $ks = 5 \times 10^6$	$kn = 10^8$ $ks = 5 \times 10^7$ $kn = 10^6$ $ks = 5 \times 10^5$
Rapport de rigidité $\frac{kn}{ks}$	$\frac{kn}{ks} = 2$	$\frac{kn}{ks} = 1$ $\frac{kn}{ks} = 3$
Frottement entre le pilier et les blocs ($\mu_{bloc-pilier}$)	$\mu_{bloc-pilier} = 0.4$	$\mu_{bloc-pilier} = 0.0$ $\mu_{bloc-pilier} = 0.2$
Résistance au roulement entre les blocs et le pilier ($\mu_{rr(bloc-pilier)}$)	$\mu_{rr(bloc-pilier)} = 0.2$	$\mu_{rr(bloc-pilier)} = 0.0$ $\mu_{rr(bloc-pilier)} = 0.4$

Principaux résultats obtenus et conclusions :

- Les tests sur la variation de la rigidité ($\times 10$ et $/10$) ont montré qu'elle n'influait pas les résultats de la modélisation en termes de pression maximale. L'estimation de la rigidité d'une particule est faite à partir de la rigidité du contact et du niveau de pression appliquée : plus la pression est élevée, plus les contacts vont devoir supporter des forces normales et plus les particules vont se recouvrir. Le recouvrement entre les particules

aussi a été calculé et rapporté à leur diamètre : l'ordre de grandeur est entre 1/1000 et 1/100000, ce qui n'est pas un recouvrement très important validant ainsi le choix des rigidités de contact choisies pour le cas de référence. La rigidité de contact a été prise suffisamment élevée pour que l'interpénétration entre les particules soit raisonnable, ce qui permet aussi de réduire le temps de calcul. De plus, le rapport des rigidités qui varie entre 1 et 3 n'a pas engendré de variations importantes sur le diagramme de pressions, ce qui confirme également le choix de ce paramètre lors de la phase de calibration du modèle.

- Concernant les paramètres de frottement : le frottement ($\mu_{\text{bloc-pilier}}$) et la résistance au roulement ($\mu_{rr(\text{bloc-pilier})}$) entre les particules et le pilier mettent en évidence une faible variabilité de la pression moyenne et/ou maximale exercée par les blocs sur le pilier. Cependant, en termes de pression maximale et moyenne induite sur le pilier, on observe peu ou pas d'influence majeure sur les valeurs obtenues. Cela confirme le choix de ces paramètres dans la partie calibration de l'écoulement.

Il était nécessaire d'étudier l'influence des paramètres de contact qui correspond à notre cas d'étude sur la partie impact de DF. L'absence d'influence importante de ces paramètres sur les résultats d'impact permettent de confirmer les choix des valeurs retenues dans la partie calibration de l'écoulement (chapitre 2).

A noter aussi que les contacts entre les blocs, voire entre blocs et parois, sont globalement très brefs dans notre cas et donc les paramètres de contacts vont peu influencer les résultats des modélisations, si on s'attache à choisir des valeurs suffisamment grandes (notamment pour les rigidités).

4.2 Caractéristiques de l'écoulement

Comme le montrent les modèles empiriques permettant d'évaluer la pression d'impact, cette dernière est principalement influencée par la hauteur h_{Mu} , la vitesse V_{DF} et la densité de l'écoulement ρ , qui sont les paramètres macroscopiques d'écoulement les plus importants. D'autres coefficients interviennent dans certains modèles empiriques disponibles dans la

littérature mais jouent un rôle plus négligeable (Proske et al., 2011; Armanini, 2008; Prieto et al., 2018).

Dans cette partie, on étudie l'effet de la hauteur et de la vitesse du DF sur l'impact exercé sur la paroi du pilier (située face au DF). Le tableau 3 présente les cas étudiés : h_{Mu} varie entre 1.5 et 4 m et la vitesse V_{DF} varie entre 3 et 6 m/s.

Tableau 15 : Les différentes simulations réalisées

Paramètres	Référence	No 1	No2	No 3	No 4
h_{Mu} (m)	1.5	3	4	1.5	1.5
V_{DF} (m/s)	3	3	3	4.5	6
Fr	0.78	0.55	0.49	1.18	1.56

S'agissant de l'étude des paramètres de l'écoulement, nous avons normalisé les résultats :

- La pression est normalisée par rapport à la densité du DF et la vitesse (ρV_{DF}^2) avec $\rho = 1867 \text{ kg/m}^3$. On note $\hat{p} = \frac{P_{MAX}}{\rho V_{DF}^2}$ par la suite. Chaque courbe obtenue représente quatre calculs de différents VER, générés aléatoirement et ayant les mêmes conditions d'écoulement.
- La hauteur est normalisée par rapport à la hauteur d'écoulement h_{Mu} .

4.2.1 Effet de la hauteur de l'écoulement

La Figure 31 montre la distribution de la pression totale normalisée (pression de fluide+ pression de solide) en fonction de la hauteur normalisée, à partir du bas du chenal $\frac{z}{h_{Mu}}$, pour trois cas de hauteur d'écoulement.

La pression totale augmente avec la hauteur d'écoulement, en particulier en bas de pilier. Le facteur de pression maximal est la valeur de pression mesurée à 10 % de la hauteur normalisée à partir du pied du pilier : pour $h_{Mu} = 4 \text{ m}$, \hat{p} est environ 21, pour $h_{Mu} = 3 \text{ m}$, \hat{p} est environ 15 et pour $h_{Mu} = 1.5 \text{ m}$, \hat{p} est égal à 7. On remarque que la pression normalisée maximale ou le coefficient de pression dynamique maximal, \hat{p} augmente quand le nombre de Froude diminue dans la plage du nombre de Froude (0.49-0.78) considérée pour ces 3 cas. Cette corrélation négative est conforme avec les résultats de Hübl et al., (2009); Cui et al., (2015);

Wang et al., (2018) indiquée sur la Figure 33. Le graphique indique également la hauteur maximale (avec accumulation des blocs) des DF en amont du pilier, ce qui explique les ratios de $\frac{z}{h_{mu}}$ supérieurs à 1.

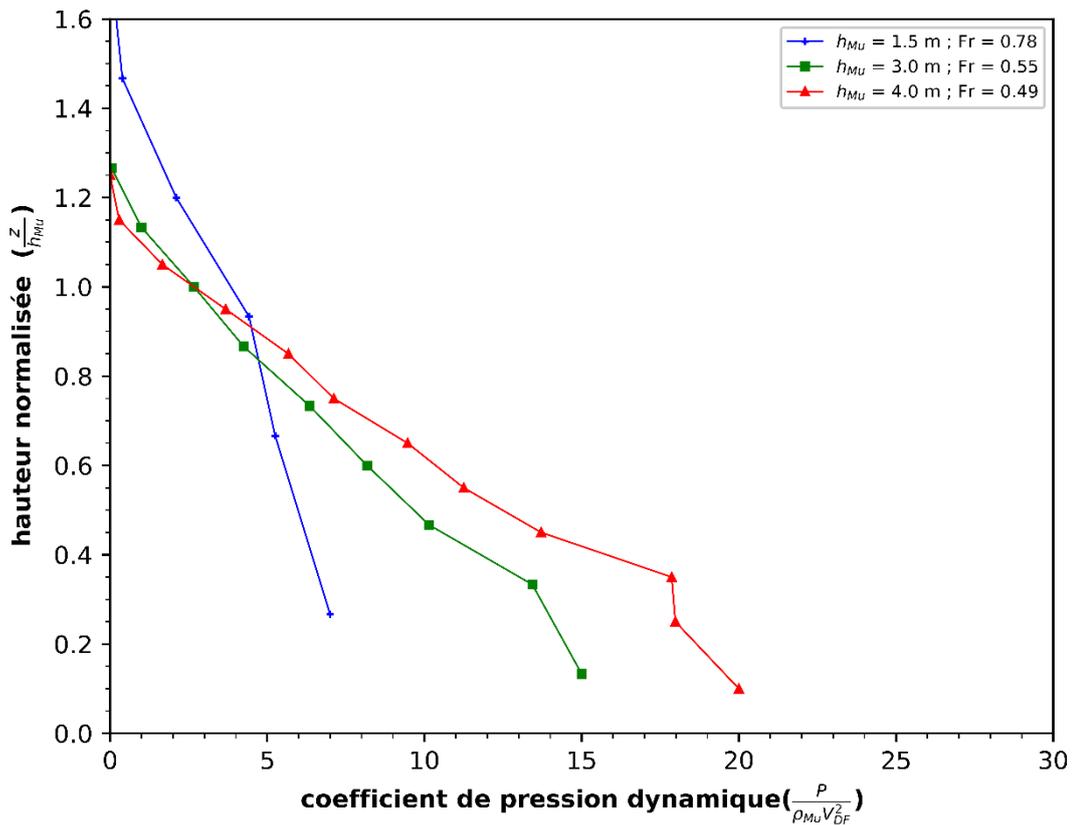


Figure 31 : Pression normalisée induite par un DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisé sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 h_{Mu} différents)

4.2.2 Effet de la vitesse de l'écoulement

La Figure 32 montre la distribution de la pression totale normalisée (pression de fluide + pression de solide) en fonction de la hauteur normalisée à partir du bas du chenal, pour trois vitesses d'écoulement, et une hauteur $h_{Mu} = 1.5 \text{ m}$ à l'entrée de la ravine. Plus la vitesse du fluide est élevée, plus la turbulence est importante autour du pilier : les particules sont agitées dans la partie supérieure de l'écoulement. Les courbes de pression normalisée sont présentées pour chaque cas de vitesse : le coefficient de pression maximal observé en bas du pilier augmente quand la vitesse d'écoulement diminue : pour $V_{DF} = 6 \text{ m/s}$, \hat{p} est environ 5.7, pour $V_{DF} = 4.5$, \hat{p} est environ 6.7 et pour $V_{DF} = 3 \text{ m/s}$, \hat{p} est égale à 7. On remarque que la pression normalisée maximale ou le coefficient de pression dynamique maximal \hat{p} , augmente un peu

quand le nombre de Froude diminue dans la plage de nombre de Froude (0.78-1.56) considérée pour ces 3 cas. Cette corrélation négative est conforme avec les résultats de Hübl et al., (2009); Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018) (Figure 33). Ce graphique indique également la hauteur maximale (avec accumulation des blocs) des DFs en amont du pilier qui montre l'influence de la vitesse sur la hauteur maximale pour les 3 cas, dont les ratios de $\frac{z}{h_{Mu}}$ sont supérieurs à 1.

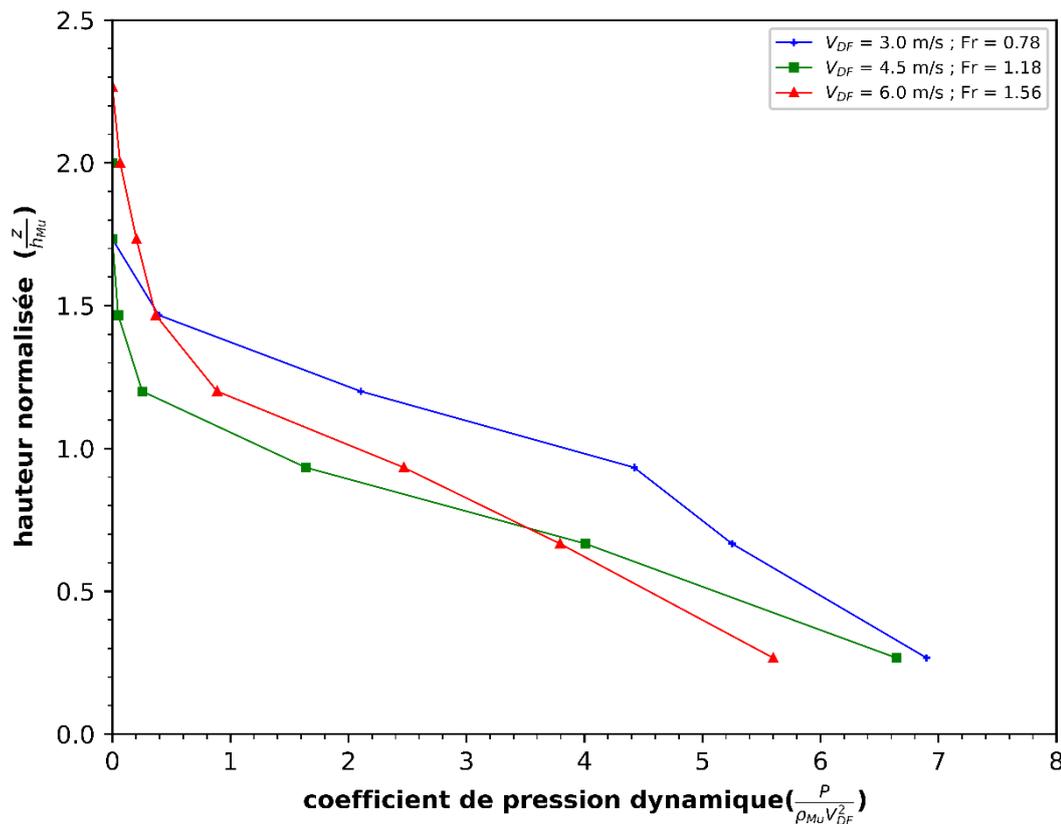


Figure 32 : Pression normalisée induite par un DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisé sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 V_{DF} différents)

5. Validation du modèle

La sensibilité du modèle par rapport aux paramètres de contact et aux paramètres macroscopiques de l'écoulement nous sert à valider le modèle, en nous basant sur les modèles empiriques fournis dans la littérature (Poudyal et al., 2019; Papatoma-Köhle et al., 2017). En effet, les paramètres de contact n'influencent pas les résultats d'impact et par conséquent ne

posent aucun problème par la suite. La validation du modèle numérique, réalisée sur la base des modèles empiriques, est décrite ci-dessous.

5.1 Validation des modèles numériques : état de l'art

L'objectif principal du modèle développé dans cette étude est d'obtenir une estimation de la pression de bloc sur une structure (ici un pilier) induite par un DF avec une vitesse, une hauteur et une distribution granulométrique connues. Le modèle reproduit un écoulement dans une zone locale et limitée autour de la structure. Le profil de pression d'impact est obtenu en fonction de la hauteur, de la vitesse et pour une distribution de taille de blocs donnée (ce dernier paramètre est rarement pris en compte dans la littérature), et doit pouvoir être utilisé pour améliorer l'évaluation de la vulnérabilité/fragilité de la structure exposée.

Le Tableau 16 ci-dessous présente une sélection d'articles traitant de différents modèles numériques simulant des DFs, et utilisés pour estimer la pression d'impact d'un écoulement sur des obstacles. Dans ces articles, la méthode de validation est basée sur la comparaison des résultats du modèle numérique soit avec des modèles expérimentaux, soit avec des méthodes empiriques. Les simulations de DF sont souvent validées par l'intermédiaire des profils (hauteur, vitesse) des DF et/ou par l'intermédiaire des trajectoires sur plusieurs kilomètres, prenant ainsi en compte la mobilité de l'écoulement. Nous pouvons donc noter que la validation des codes est très souvent effectuée en calibrant les paramètres du modèle, permettant d'obtenir les caractéristiques d'écoulement souhaitées telles que la hauteur, la vitesse et le profil des DF et non pas la validation des valeurs de la pression d'impact obtenue (Sosio et al., 2007; Toyos et al., 2008; He et al., 2018; Zhao et al., 2020 ; Trujillo-Vela et al., 2020). Ce processus se fait donc sans la présence de l'obstacle et/ou avant l'impact. Par conséquent, la pression d'impact n'est pas impliquée dans la méthode de validation, mais considérée comme un résultat du modèle, ce qui est également le cas dans notre modèle, qui se focalise sur la pression d'impact locale des blocs sur un obstacle.

Si on se concentre précisément sur la validation de la force d'impact (c'est-à-dire sur l'interaction DF-structure) (voir Tableau 16) :

- Une étude (He et al., 2018) montre que des essais expérimentaux d'écoulement granulaires secs ont été utilisés en utilisant un capteur sur l'obstacle exposé ;

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

- Deux autres études (Liu et al., 2018; Zhao et al., 2020) ont utilisé une validation indirecte en comparant la déformation ou la rotation de la structure exposée avec des observations expérimentales ;
- Enfin, une méthode de validation couramment utilisée dans la littérature consiste à comparer les forces d'impact avec des modèles analytiques ou empiriques (Toyos et al., 2008; Lei et al., 2018; Wang et al., 2018). Ceci justifie que les données collectées, et les modèles empiriques qui en résultent, puissent fournir une base réaliste pour la validation d'un modèle numérique.

Tableau 16 : Résumé des modèles numériques existants

Référence	Méthode	Etude de cas	Résultat
Wang et al., 2018	Expérience de laboratoire à grande échelle	DF au SW de la Chine (2008)	Estimation de la pression d'impact des DFs sur les piles de pont
Liu et al., 2018	Couplage MPM-DEM (Material Point Method) pour modéliser les écoulements granulaires et un bloc en bois	Coulées de débris granulaires (expériences d'effondrement d'un tas de sable frappant 3 blocs de bois)	Profil d'écoulement/distance d'écoulement/rotation du bloc de bois sont mesurés
He et al., 2018	Modèle SPH	Écoulement granulaire sec (essais expérimentaux en chenal)	Reproduction de la cinétique des flux, la force d'impact, le développement de la zone morte, le dépôt final. (Validation entre les modèles numériques et les expériences en chenal)
Lei et al., 2018	Décomposition en mode empirique (EMD) basée sur une méthode de traitement du signal	Essais en chenal miniaturisé sur des DF avec saisie du signal d'impact par un	La force d'impact du fluide présente un bon accord entre l'essai en chenal et les signaux. La force d'impact de la phase solide présente une

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

		enregistreur numérique	grande variation (en particulier les DFs naturels) → étudier la force d'impact des particules fines et de grosses particules séparément
Sosio et al., 2007	Observation sur le terrain + code Flo-2D pour reproduire les écoulements de DF	Événements de DF naturels le long de la vallée de Rossiga, Valsassina, Alpes d'Italie centrale	Estimation des paramètres rhéologiques des DF par différentes méthodes d'analyse : estimations sur le terrain en utilisant des relations empiriques et rétroanalyse du même paramètre par modélisation numérique
Toyos et al., 2008	Modélisation GIS des écoulements de DFs enregistrés à Sarno en 1998 (Est du Vésuve, dans cendres)	Zone de Sarno Italie (mai 1998) : estimation empirique et sur le terrain du débit et de la vitesse	Reproduction de cartes de vitesse et de pression dynamique
Zhao et al., 2020	Couplage numérique à l'aide de LS Dyna	Coulée de débris avec des blocs à l'avant	Etude des performances de la barrière souple impactée par des DFs avec des blocs
Trujillo-Vela et al., 2020	Couplage SPH-DEM	Simulations de DFs dans un long chenal selon de différents angles de pente (avec et sans blocs)	Etude de la vitesse, du profil de dépôt, de l'énergie et du comportement de la force d'impact des DFs

5.2 Comparaison des résultats numériques obtenus avec les modèles empiriques

Dans notre cas, l'approche numérique est validée en comparant les résultats obtenus avec des modèles empiriques. Les paramètres macroscopiques de l'écoulement (h, v, granulométrie et densité) représentent des paramètres d'entrée et l'écoulement est modélisé localement dans un chenal limité à la périphérie de la structure impactée (25 m de long, 10 m de large). Ceci nous permet de considérer que les caractéristiques pertinentes de l'écoulement (champ de vitesse du fluide, hauteur d'écoulement) peuvent être gelées autour de l'obstacle, c'est-à-dire constantes dans le temps, ce qui nous permet de nous concentrer sur la contribution des blocs. L'écoulement modélisé présente les caractéristiques typiques des DFs en termes de concentration de solides, de densité et de débit en se basant sur la littérature (Mead et al., 2017 ; Hu et al., 2011). Finalement, ce modèle est utilisé pour mesurer les interactions DF-structure et la pression est calculée en fonction des paramètres d'entrées connus.

Les équations de Hübl et al., (2009), Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018), qui présentent le coefficient de pression dynamique ($\frac{P}{\rho v^2}$) en fonction de nombre de Froude (Fr) sont détaillés dans le chapitre 1 et rappelées dans le Tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17 : Modèles empiriques existants dans la littérature

Hübl et al. (2009)	Cui et al.(2015)	Wang et al.(2018)
$\frac{P}{\rho v^2}=5.2Fr^{-1.6}$	$\frac{P}{\rho v^2}=5.3Fr^{-1.5}$	$\frac{P}{\rho v^2}=3.476Fr^{-2.389}$

La pression normalisée maximale, ou le coefficient de pression dynamique maximal \hat{p} , augmente lorsque le nombre de Froude diminue dans la gamme des nombres de Froude considérés dans cette étude, ce qui est cohérent avec les résultats de (Hübl et al., (2009) ; Scheidl et al., (2013) ; Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018)) : une corrélation négative est obtenue pour la plage de Fr = 0.49-0.78 correspondant à la variation de la hauteur d'écoulement dans notre modèle (Figure 33). Concernant la variation de la vitesse, les résultats concordent relativement avec ceux obtenus par ces mêmes auteurs : le coefficient de pression \hat{p} n'évolue

pas largement alors que Fr double (passe de 0.78 à 1.56), et une corrélation négative est également obtenue (Figure 33).

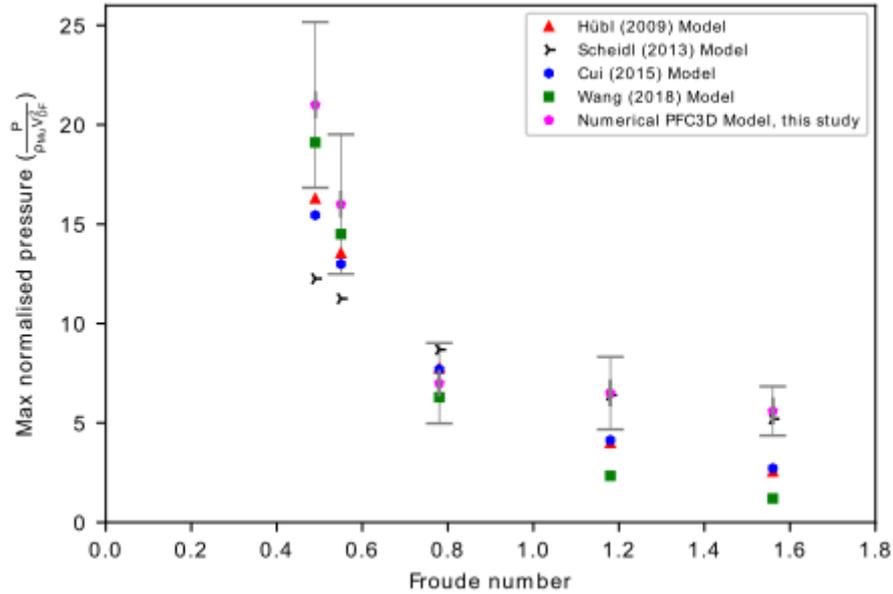


Figure 33 : Pression dynamique maximum normalisée en fonction de nombre de Froude, comparé à 4 modèles empiriques (l'écart-type de la pression maximale est présenté par les barres d'erreur)

6. Bilan

Un modèle numérique capable de simuler les impacts de DF à l'échelle de la structure a été développé, basé sur un couplage unidirectionnel CFD-DEM.

Les champs de vitesse et de surface libre du fluide sont obtenus à partir d'un code de dynamique des fluides CFD, puis importés dans la simulation DEM selon un schéma de couplage unidirectionnel.

Le modèle proposé permet d'obtenir plusieurs résultats comme : la hauteur, la vitesse, le débit volumique de l'écoulement dans plusieurs sections du chenal ainsi que la pression d'impact sur le pilier en fonction du temps, les diagrammes de pressions en fonction de la hauteur du pilier et les forces des contacts individuels.

La sensibilité des pressions d'impact sur l'obstacle en fonction des paramètres de contact du modèle (rigidité, frottement, résistance au roulement) et des paramètres macroscopiques de

CHAPITRE 3 - Couplage DEM-Fluide et validation du modèle

l'écoulement (hauteur et vitesse) a été étudiée : l'impact est peu influencé par les paramètres de contact tandis qu'il est plus influencé par la hauteur et la vitesse de l'écoulement, conformément à ce que prévoient les modèles analytiques ou empiriques. La pression dynamique normalisée ($\frac{P}{\rho v^2}$) est présentée en fonction du nombre de Froude pour plusieurs simulations. Les résultats sont comparés et validés avec des modèles empiriques existants dans la littérature.

La distribution de la force d'impact sur les obstacles peut être utilisée comme donnée d'entrée dans le code du génie civil pour la conception et/ou l'évaluation de la vulnérabilité des constructions.

Dans la plupart des cas, la modélisation des processus de DF nécessite de nombreuses hypothèses et simplifications. Le modèle proposé ici estime la pression d'impact et a des résultats conformes à ceux des modèles empiriques.

Dans le chapitre 4, une étude paramétrique sera conduite sur des paramètres plus spécifiques du modèle et peu présentés dans la littérature (comme la forme du bloc, sa taille, ainsi que la forme et l'orientation de la structure...), mais qui peuvent influencer les résultats d'impact.

CHAPITRE 4
*Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du
modèle*

1. Introduction

Dans la partie précédente, un modèle d'écoulement a été proposé et validé sur la base d'une comparaison avec des modèles empiriques existants. Par ailleurs, la sensibilité des résultats de pression d'impact a été évaluée en fonction des paramètres macroscopiques de l'écoulement.

Plusieurs paramètres du modèle liés aux écoulements (taille, forme des particules, ...) ou à la structure (forme, orientation, nombre...) sont modifiables dans le modèle numérique ; c'est d'ailleurs l'un des avantages de notre modèle. Ainsi, une étude paramétrique portant sur quelques-uns des paramètres d'écoulement et de structures est réalisée et détaillée dans ce chapitre en vue d'évaluer leur influence sur les résultats obtenus.

Grâce à la DEM, les forces d'impacts individuelles de chaque bloc sur la structure peuvent être enregistrées. Ainsi, une étude de la répartition des contacts individuels particules/pilier est donc présentée. Cette analyse doit permettre d'accéder à l'impact maximal subi sur la structure en fonction de la taille des particules et de leur position dans l'écoulement.

2. Paramètres liés à l'écoulement

2.1 Taille des blocs

L'étude de l'effet de la taille des blocs sur l'impact est rendue complexe par le fait de devoir faire varier la granulométrie des particules solides sans pour autant changer les paramètres d'écoulement à l'échelle macroscopique : densité apparente, vitesse, etc. Plusieurs

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

études indiquent que la granulométrie ou la taille de la particule reste un paramètre important à étudier, pour mettre en évidence son influence sur la force ou la pression exercée sur la structure exposée (Mead et al. 2017, Papathoma-Köhle et al., 2017).

Dans notre cas, on a fait le choix de dilater la distribution granulométrique en gardant le diamètre minimal constant $d_{\min} = 0.1$ m et en augmentant d_{\max} (Figure 34) : la distribution granulaire n'est pas changée et les volumes de vide occupés par la phase fluide ne sont pas modifiés. Ainsi, l'écoulement sans obstacle garde les mêmes caractéristiques (densité, concentration solide...).

La Figure 35 montre l'évolution de la pression moyenne appliquée par le DF sur le pilier, pour différents $d_{\max} = 0.4$ (cas de référence), 0.7, 1.0, 1.5 et 2 m (4 échantillons différents sont générés pour chaque cas). L'écart-type de chaque pression est calculé entre 9 et 12 s. On remarque que, tout en conservant les mêmes caractéristiques macroscopiques d'écoulement (la hauteur et la vitesse), la pression moyenne sur l'obstacle augmente avec la taille des particules.

La Figure 36 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche granulaire uniquement au droit de la section du pilier pour le cas de référence $d_{\max} = 0.4$ m et deux autres choix de d_{\max} (0.7 m et 1 m) à $t = 12$ s. Ces graphiques montrent que la hauteur d'accumulation des blocs en amont du pilier ($x = 15$ m) est liée à leur taille.

En conclusion, le choix de d_{\max} des blocs influence par définition la taille, le volume et la masse des particules, et par conséquent, la position, l'énergie dont disposent les blocs sont modifiées et donc la pression d'impact obtenue sur l'obstacle. Ce paramètre, rarement étudié dans la littérature, a donc un impact sur la vulnérabilité des structures. En effet, pour valider les pressions moyennes obtenues, il faudra les comparer avec des modèles empiriques qui prennent en compte la taille des blocs comme paramètre. Jusqu'à présent, ces modèles ne sont pas très explicites et détaillés dans la littérature.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

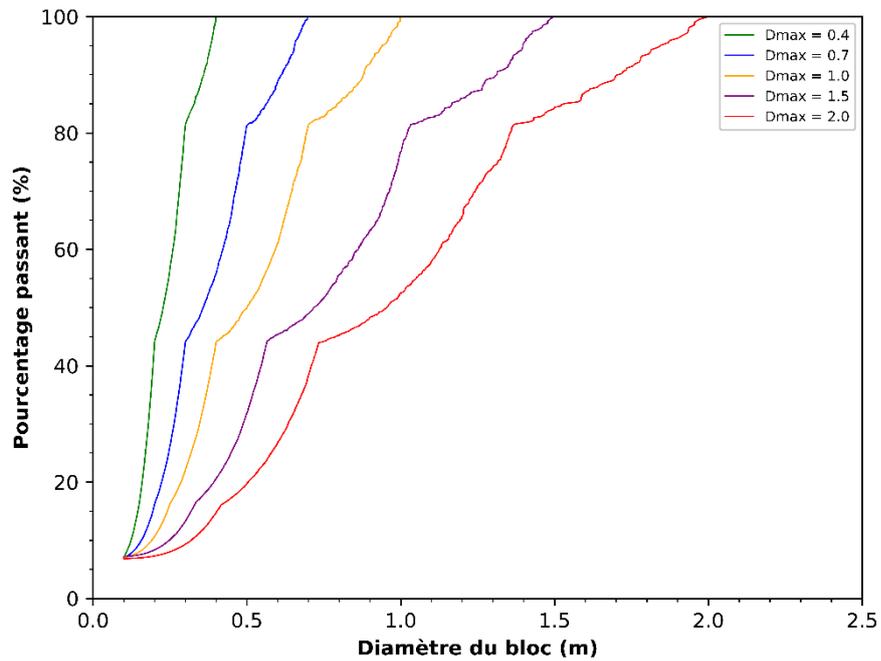


Figure 34 : Distribution granulométrique pour chaque choix d'un diamètre maximal

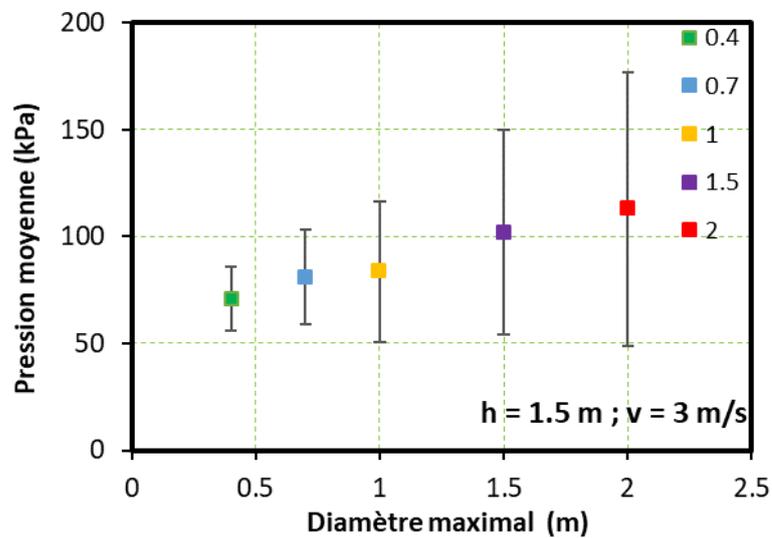


Figure 35 : Pression moyenne appliquée par le DF sur le pilier en fonction du diamètre maximal des particules solides de la simulation

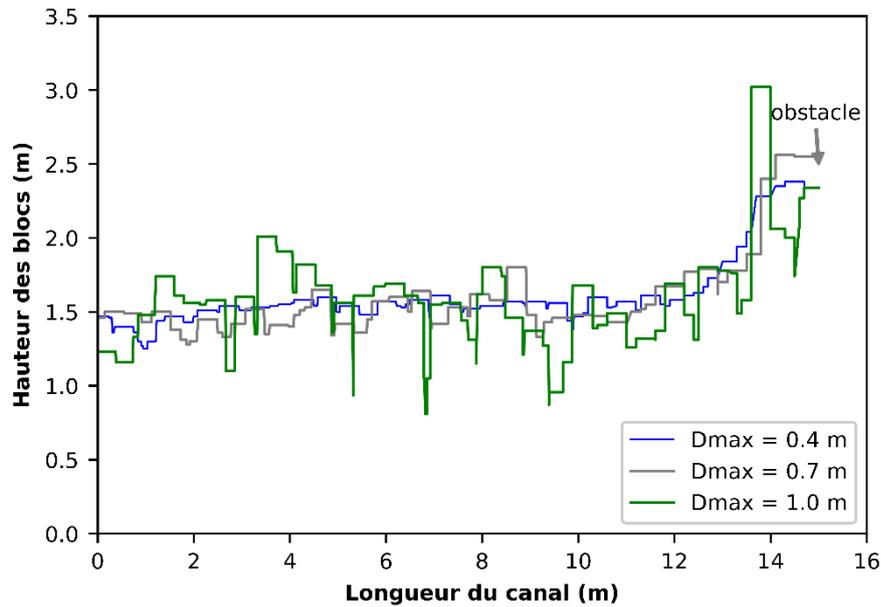


Figure 36 : Épaisseur de la couche granulaire dans une section du chenal en fonction de la longueur du chenal et du diamètre maximal des plus grosses particules

2.2 Forme du bloc

Pour montrer l'influence de la forme des particules sur l'impact, les sphères ont été remplacées par des blocs rigides polyédriques nommés « r-blocks ». La forme du bloc a été générée à l'aide d'un logiciel de CAO (Rhinceros) puis importée dans *PFC3D*. On a utilisé un seul type de bloc, contenant 180 facettes, ayant une forme anguleuse et plus rugueuse qu'une sphère (Figure 37). Dans la pratique industrielle, plusieurs méthodes existent pour caractériser la forme d'un bloc (Orosz et al., 2021). On distingue généralement quatre types de formes dans la pratique et l'ingénierie : (1) compacte (p. ex. cube ou sphère...), (2) plate (un disque ou une plaque...), (3) allongée (p. ex. aiguille) ou (4) plate-allongée ou en lame. Les caractéristiques de forme du r-block utilisé dans cette étude sont définies à partir de la méthode de la boîte de délimitation minimale « minimal bounding box ». L'idée principale de cette approche est d'inclure la particule dans un volume parallélépipédique rectangle "le plus petit" possible, soit en termes de volume ou de surface. Une fois le parallélépipède défini, les dimensions de la boîte - a (longueur), b (largeur) et c (profondeur) - sont mesurées pour calculer selon la méthode

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

« Kong et Fonseca »: la planéité $F = 1 - \frac{c}{b} = 0.2646$ et l'élongation $E = 1 - \frac{b}{a} = 0.1791$. Le rapport $\frac{c}{b}$ étant supérieur à 0.5, il s'agit d'un bloc compact (Orosz et al., 2021).



Figure 37 : R-block généré dans *PFC3D* (sous 3 angles différents)

2.2.1 Cas de Référence

Le cas de référence présenté pour les particules r-blocks est le même que celui avec des sphères. Il présente une densité de 1867 kg/m^3 , une vitesse de 3 m/s , et une hauteur de 1.5 m ($Fr = 0.78$). La même stratégie de calibration (section 3.3-Chapitre 2) a été utilisée pour modéliser l'écoulement souhaité avec la même distribution granulométrique, pour les deux formes de bloc : sphères (Figure 38.a) et r-blocks (Figure 38.b). Avec la forme des r-blocks, l'écoulement recherché a les mêmes caractéristiques que celui fourni par les sphères. Les paramètres locaux étudiés sont les mêmes : la densité des particules, la densité du fluide, la viscosité dynamique, le coefficient de frottement (bloc-bloc et bloc-paroi) et la résistance au roulement. Après réalisation d'une étude paramétrique, comme celle réalisée sur les particules sphériques, nous conservons les mêmes valeurs de paramètres locaux que dans le cas des particules sphériques : l'écoulement obtenu sans obstacle présente alors une concentration solide de 58% , une densité apparente d'environ 1900 kg/m^3 et un débit de $39\text{-}40 \text{ m}^3/\text{s}$ qui reste dans un domaine acceptable par rapport à l'écoulement recherché. Cela est rendu possible puisque le r-block choisi est relativement compact et sa forme reste relativement « sphérique ». Ainsi, il nous sera possible par la suite de comparer plus facilement les résultats entre les deux cas d'étude (sphères et blocs anguleux).

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

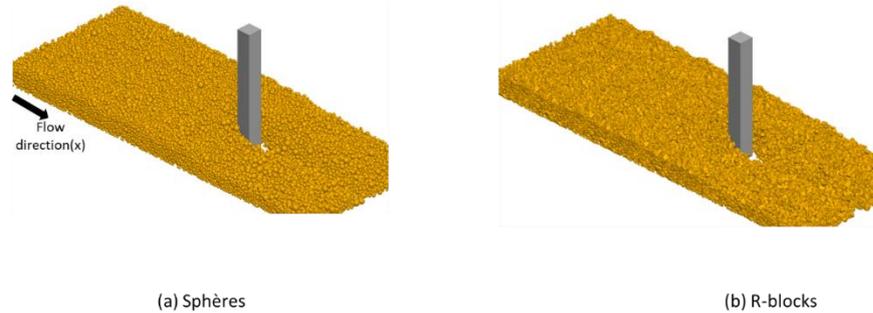


Figure 38 : Deux simulations pour différentes formes de blocs : (a) Sphères, (b) R-blocks

2.2.2 Étude paramétrique

On a fait varier la hauteur h_{Mu} et la vitesse V_{DF} de l'écoulement et donc le nombre de Froude, pour étudier l'influence de ces deux paramètres sur l'impact du DF sur le pilier avec des r-blocks.

2.2.2.1 Influence de h_{Mu}

La Figure 39 montre la distribution de la pression totale normalisée (pression de fluide + pression de solide) en fonction de la hauteur normalisée à partir du fond du chenal z/h_{Mu} pour trois hauteurs d'écoulement. Comme précédemment, la pression moyenne est calculée entre $t = 9$ s et $t = 12$ s. Elle est normalisée par rapport à la densité de DF et la vitesse ($\rho_{Mu} V_{DF}^2$). On note $\hat{p} = \frac{P_{MAX}}{\rho_{Mu} V_{DF}^2}$ par la suite.

On constate que la pression totale augmente avec la hauteur d'écoulement en particulier à la base du pilier. Le facteur de pression maximale est observé au bas du pilier : pour $h_{Mu} = 4$ m, $\hat{p} = 28$; pour $h_{Mu} = 3$ m, $\hat{p} = 19$ et pour $h_{Mu} = 1.5$ m, $\hat{p} = 8$. On remarque que la pression normalisée maximale ou le coefficient de pression dynamique maximal \hat{p} augmente quand le nombre de Froude diminue dans la plage de nombre de Froude (0.49-0.78) considérée pour ces 3 cas (Figure 41). Cette corrélation négative est conforme avec les résultats de Hübl et al., (2009); Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018). Ce graphique indique également la hauteur maximale (incluant l'accumulation) des DF en amont du pilier, ce qui explique les ratios de z/h_{Mu} supérieurs à 1.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

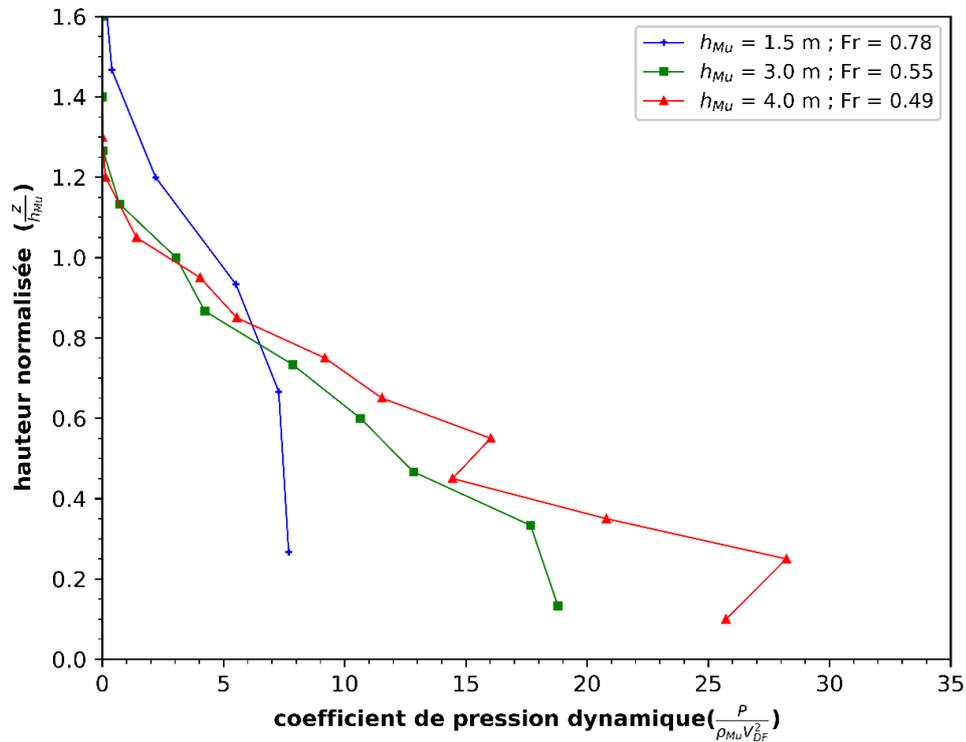


Figure 39 : Pression normalisée induite par le DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisée sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 h_{Mu} différents)

2.2.2.2 Influence de v

La Figure 40 montre la distribution de la pression totale normalisée (pression de fluide + pression de solide) en fonction de la hauteur normalisée à partir du bas du chenal z/h_{Mu} pour les trois vitesses d'écoulement, avec une hauteur $h_{Mu} = 1.5 \text{ m}$ à l'entrée de la ravine.

Plus la vitesse du fluide est élevée, plus la turbulence est importante autour du pilier et les particules sont agitées dans la partie supérieure de l'écoulement. En effet, les particules sont entraînées par le fluide de vitesse constante imposées à l'entrée du canal, ce qui leur procure une énergie cinétique d'autant plus grande que la vitesse d'écoulement est forte. La présence d'un obstacle empêche l'écoulement des blocs et casse la dynamique imposée par le fluide : l'agitation est par conséquent d'autant plus importante que l'énergie cinétique des blocs à l'amont de l'obstacle est forte.

Les courbes de pression normalisée sont présentées pour chaque vitesse : le coefficient de pression maximale observé à la base du pilier augmente quand la vitesse d'écoulement diminue. Pour $V_{DF} = 6 \text{ m/s}$, $\hat{p} = 6$, pour $V_{DF} = 4.5 \text{ m/s}$, $\hat{p} = 7.4$ et pour $V_{DF} = 3 \text{ m/s}$

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

m, $\hat{p} = 8$. On remarque que la pression normalisée maximale ou le coefficient de pression dynamique maximal \hat{p} augmente un peu quand le nombre de Froude diminue dans la plage de nombre de Froude (0.78-1.56) considérée pour ces 3 cas. Cette corrélation négative est conforme avec les résultats de Hübl et al., (2009); Cui et al., (2015) et Wang et al., (2018) (Figure 41). Ce graphique indique également que la hauteur maximale (inclut l'accumulation) des DF en amont du pilier est similaire pour les 3 cas, ce qui explique aussi les ratios de z/h_{Mu} supérieurs à 1.

La Figure 41 montre l'évolution du coefficient de pression dynamique en fonction de nombre de Froude pour le cas des sphères (balls) et des r-blocks. On remarque que les résultats sont conformes à la bibliographie pour les deux cas et que ce coefficient est plus important pour les r-blocks que les sphères.

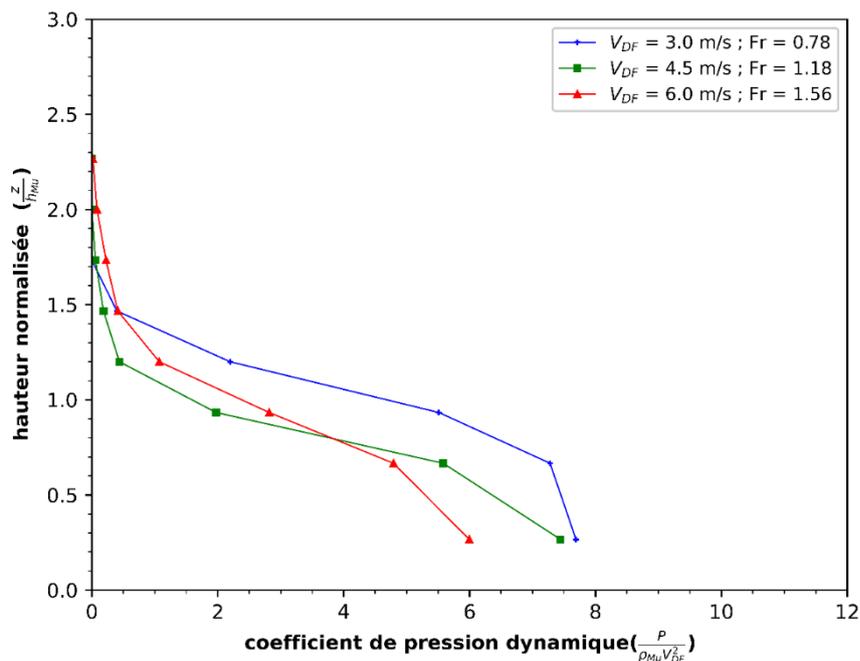


Figure 40 : Pression normalisée induite par le DF en fonction de la hauteur de l'écoulement normalisée sur le pilier (entre 9 et 12 s, pour 3 V_{DF} différents)

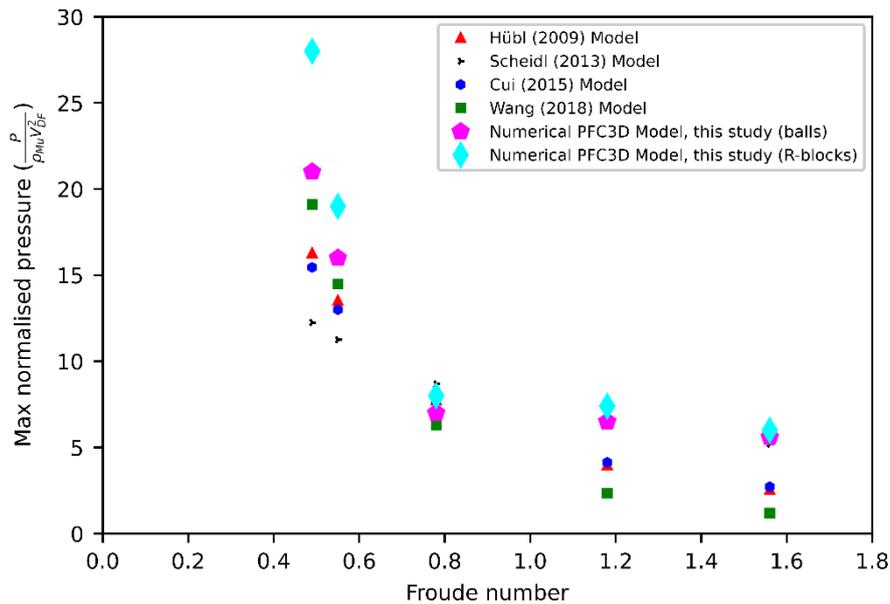


Figure 41 : Comparaison des résultats numériques avec les modèles empiriques

2.2.2.3 Comparaison des résultats avec les sphères

La Figure 42 montre l'évolution de la force appliquée par la phase solide (calculée directement dans le modèle DEM) à partir des forces de contact entre les blocs et le pilier, en fonction du temps. La courbe rouge représente une moyenne mobile pour une période $k = 10$ (valeurs) pour les sphères et la noire pour les r-blocks. Elle est utilisée pour analyser les points de données de la courbe noire, en faisant la moyenne de différents sous-ensembles de l'ensemble des données. Les deux formes de particules, sphérique et polyédrique, sont présentées. La première particule atteint le pilier après 5 s dans les deux cas. De $t = 5$ s à $t = 9$ s, la contrainte augmente progressivement. Après $t = 9$ s, et malgré des fluctuations rapides, la courbe de force d'impact se stabilise. La force totale exercée sur l'ensemble du pilier est plus importante pour les r-blocs que pour les sphères.

La pression d'impact normalisée, exercée par le DF sur un pilier situé au milieu du chenal, est présentée pour une simulation de 12 s pour les deux cas (Figure 43). Dans les deux cas, la pression totale de DF est plus importante sur le bas du pilier que sur sa partie haute. On remarque également que le coefficient de pression dynamique est plus important avec les r-blocks qu'avec des sphères (environ un facteur de 1.3 pour tous les cas - Figure 43).

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

Pour une même distribution granulométrique mais avec une géométrie de particule plus anguleuse (comprenant plusieurs facettes), la surface de contact entre le pilier et une particule pourra être plus grande que dans le cas d'une particule sphérique. Un r-block peut avoir simultanément plusieurs contacts avec le pilier. Dans le cas de particules sphériques, les blocs peuvent contourner l'obstacle plus facilement, une fois qu'ils sont entrés en contact avec ce dernier (roulement simple sur le pourtour du pilier), que dans le cas des particules polyédriques. Compte tenu de la forme des r-blocks, ceux-ci peuvent être ralentis dans ce processus de contournement du pilier : ils peuvent glisser ou tourner sur leur axe pour rouler autour du pilier.

Plusieurs échantillons ont été testés pour chaque cas de forme : la génération des particules et leur position dans le VER sont également différentes entre les des deux cas, ce qui peut aussi modifier la distribution des particules dans le chenal, en particulier celle en amont du pilier. Cet aspect peut également influencer le diagramme de pression d'un cas à un autre : la Figure 43 montre le coefficient de pression dynamique en fonction de la hauteur normalisée du pilier pour les deux formes de particules. Notons que la pression d'impact dépend également des caractéristiques de forme du bloc (compact, allongé...) et que les observations et conclusions tirées ne correspondent qu'au cas d'étude présenté ici (c'est-à-dire une forme de bloc compact).

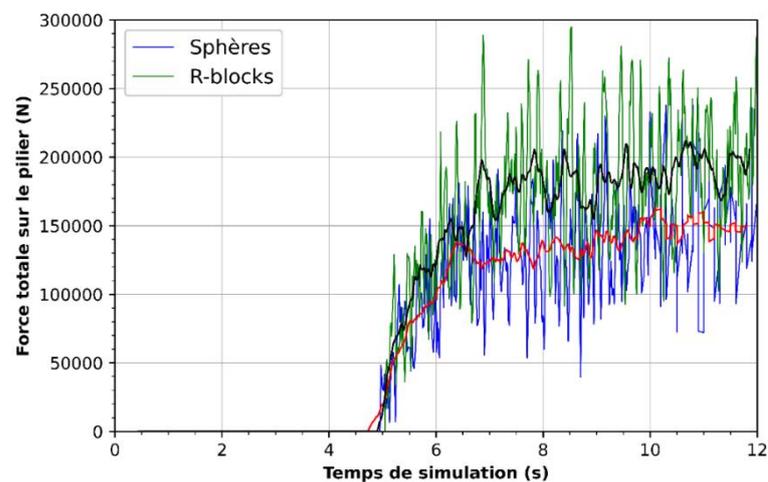


Figure 42 : Force totale appliquée par les blocs sur un pilier en fonction du temps de simulation. La courbe noire montre la moyenne mobile (filtrée avec $k = 10$ pour les r-blocs et la courbe rouge pour les sphères

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

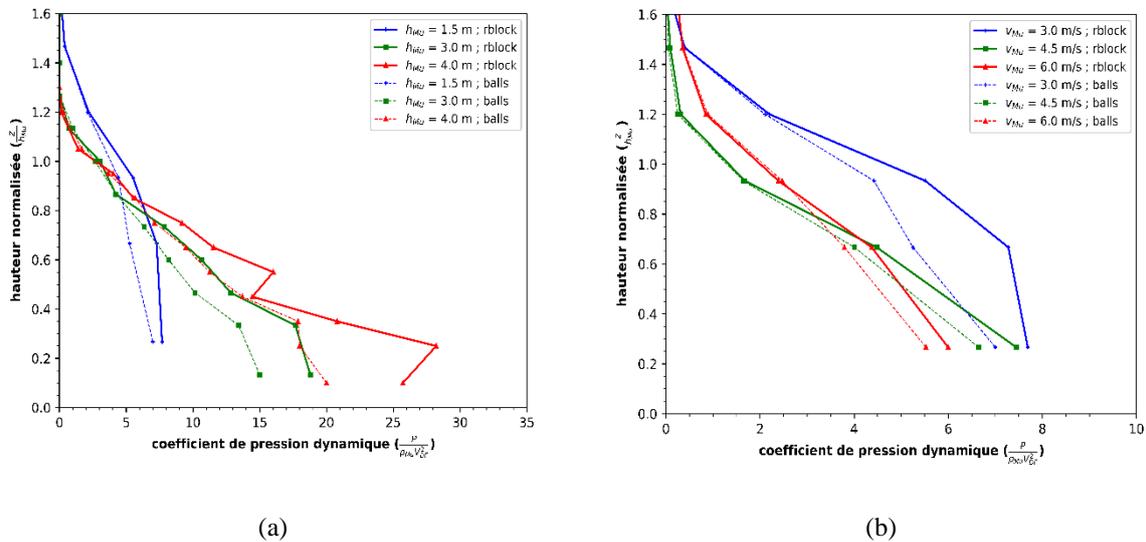


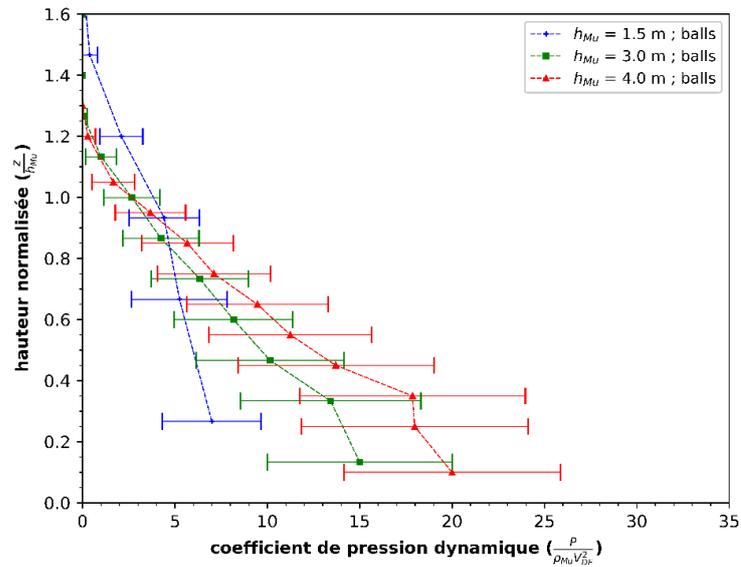
Figure 43 : Comparaison du coefficient de pression dynamique pour les deux formes de bloc (entre 9 et 12 s, (a) pour 3 h_{Mu} différents et (b) pour 3 V_{Mu} différents)

2.2.2.4 Variabilité temporelle de la pression moyenne

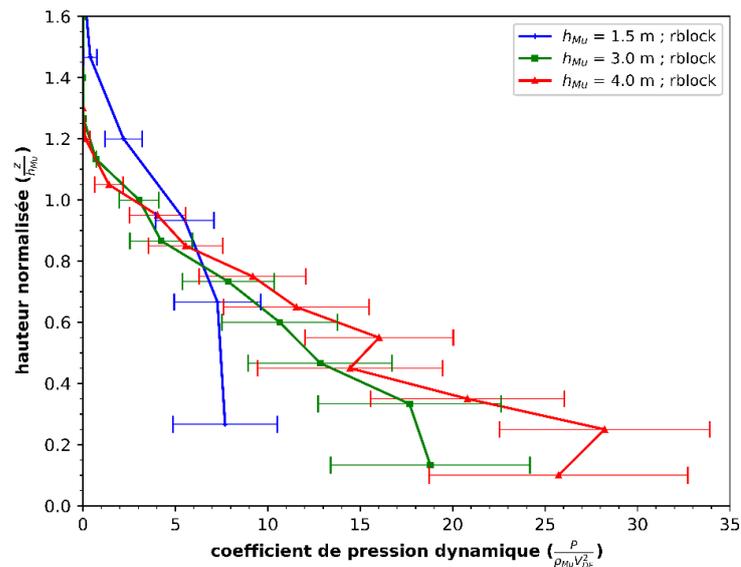
Les résultats décrits précédemment (par exemple, partie 2) présentent les pressions moyennes exercées par le DF sur un pilier entre $t = 9 \text{ s}$ et $t = 12 \text{ s}$, pour 4 simulations numériques différentes (c'est-à-dire 4 VER différents). Les pressions moyennes obtenues présentent une dispersion (liées aux différents calculs numériques réalisés) et des variabilités ponctuelles dans le temps (visible sur la Figure 42). La Figure 44 présente les écarts-types calculés pour chaque pression moyenne (a) pour les sphères et (b) pour les r-blocks. Ils sont représentés par des barres d'erreur horizontales pour chaque cas d'étude.

Ces résultats montrent la très forte variabilité des résultats quel que soit le cas d'étude. Cependant, nous pouvons noter que cette variabilité est d'autant plus forte que le coefficient de pression dynamique est fort. Même si une tendance semble apparaître en fonction la hauteur d'écoulement (h_{Mu}), nous pouvons noter que les écart-types créent un recouvrement partiel entre les différents cas simulés ($h_{Mu} = 1.5 \text{ m}$, 3 m et 4 m).

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle



(a)



(b)

Figure 44 : Présentation du coefficient de pression dynamique pour 3 h_{Mu} différents entre 9 et 12 s, pour les deux formes de blocs (a) sphères (balls) et (b) r-blocks. Les barres d'erreurs représentent les écarts-types calculés pour chaque pression moyenne entre 9 et 12 s

3. Etude de l'influence des paramètres de la structure

3.1 Forme du pilier

Dans cette étude, la géométrie du chenal est conservée à l'identique : chenal de 25 m de longueur, de 10 m de largeur avec un pilier de (1×1×8) situé à 15 m par rapport à l'entrée de la ravine. La forme du pilier choisie pour le cas de référence est un pilier carré. D'autres formes de section transversale de piliers sont présentées, pour étudier l'influence de la forme de la structure ainsi que l'effet du regroupement de plusieurs structures exposées aux DFs. Les formes étudiées sont présentées ci-dessous (Figure 45).

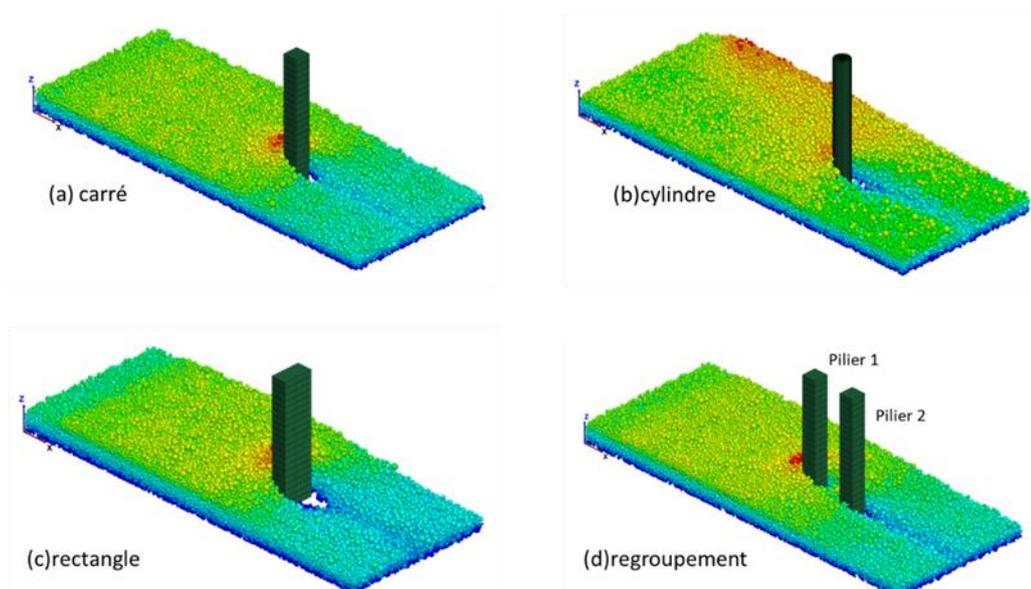


Figure 45 : Différentes formes de structure étudiées

Pour chaque cas, un calcul fluide est modélisé pour avoir accès au champ de vitesse et à la surface libre de fluide correspondant. Le même écoulement DF est utilisé. L'étude bibliographique n'a pas permis de tirer des conclusions claires quant à l'influence de la forme de la structure. Seuls Poudyal et al., (2019) ont proposé un résumé des modèles hydrauliques, pour estimer la pression d'impact exercée sur la structure, en fonction de la densité de DF ρ , la vitesse d'écoulement v et un coefficient de pression α qui dépend de la forme de la structure exposée (Tableau 18).

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

Tableau 18 : Résumé des modèles de pression d'impact de DF (Poudyal et al., 2019)

$P = \alpha \rho v^2$	
Pressure coefficient (α)	Reference
$\alpha = 1.0$	VanDine (1996)
$\alpha = 3.0$ to 5.0	Zhang (1993)
$\alpha = 1.0$ for circular structure $\alpha = 1.3$ for rectangular structure $\alpha = 1.5$ for square structure	MLR (2004)
$\alpha = 2.5$ to 3.0	Lo (2000), Kwan (2012)
$\alpha = 2.0$	Vagnon and Segalini (2016)
$\alpha = 1.5$ to 5.5	Canelli et al., (2012)
$\alpha = 2.0$ to 4.0	Hübl and Holzinger (2003)
$\alpha = 1.0$	NILIM (2007)
$\alpha = 1.0$	SWCB (2005)

Sur la base des résultats de pressions moyennes (calculées entre 9 et 12s) exercées par le DF sur les différentes formes de pilier (Figure 46) : on remarque que la forme de la structure exposée a une influence sur le diagramme de pression. Plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats, par exemple : la perturbation générée selon les champs de vecteurs vitesses et la surface libre obtenus pour chaque cas, la variation de la hauteur d'accumulation en amont de la structure qui dépend aussi de la forme, la surface de blocage des particules en amont de l'obstacle...

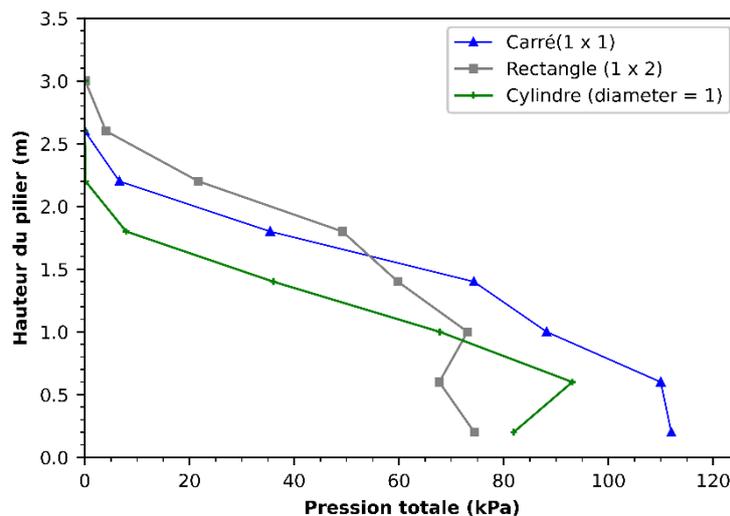


Figure 46 : Diagramme de pression pour les trois formes de piliers

La pression maximale totale exercée sur le pilier est plus importante pour le pilier carré que sur un pilier circulaire. On retrouve ce même résultat de même pour un pilier rectangulaire.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

L'ordre de grandeur présenté par les coefficients de pression α donnés dans le Tableau 18 pour chaque forme d'obstacle, est cohérent avec les résultats numériques.

Le Tableau 19 présente la pression moyenne, toujours calculée entre 9 et 12 s, la hauteur d'accumulation $h_{mu,2}$, valeur moyenne calculée sur la largeur du pilier, et enfin le rapport de la pression moyenne rapporté au coefficient de pression α correspondant, extrait du Tableau 18. Par exemple, on remarque qu'on obtient un rapport de coefficient de pression α (numérique) égal à 1.2 pour le cas (carré-cylindre) au lieu de α (tableau) 1.5 en se basant sur la référence MLR (2004). Ces résultats montrent que les tendances sont bien respectées et l'ordre de grandeur est acceptable même si une différence est observée : celle-ci est due à la variation ou à l'ignorance de plusieurs paramètres tels que le matériau de construction, le manque de précision (p.ex., pour la forme rectangulaire on n'a pas de précision sur le rapport longueur/largeur), les caractéristiques de l'écoulement...

Tableau 19 : Comparaison des résultats numériques pour les différentes formes de pilier

Forme	$h_{mu,2}$ (numérique)	Pression moyenne /écart type (kPa) (numérique)	P(carré)/P(rectangle) = α (carré)/ α (rectangle)		P(carré)/P(cylindre) = α (carré)/ α (cylindre)	
			Numérique	Tableau 1	Numérique	Tableau 1
Carrée	2.4 m	72/15	Numérique	Tableau 1	Numérique	Tableau 1
Circulaire	1.7 m	63/18	0.98	1.15	1.2	1.5
Rectangulaire	2.5 m	74/10				

Concernant le regroupement (ou le nombre) de plusieurs piliers dans un chenal, il influence aussi les caractéristiques d'écoulement générées, la hauteur d'accumulation, la trajectoire des particules et surtout l'impact. Si on prend le modèle avec deux piliers placés l'un devant l'autre et distants de 2 m (Figure 45.d), on note que le pilier 1 aide à protéger le pilier 2 : la hauteur d'accumulation de DFs est 2.4 m en amont de pilier 1 et 1.3 m en amont de pilier 2 donc la pression exercée sur le premier pilier en face est plus importante que le deuxième. Ce qui explique que le nombre de structure successivement exposées, ou bien les dispositions constructives permettant de protéger les ouvrages, influencent bien sûr grandement la mobilité et le trajet de l'écoulement et donc l'impact.

3.2 Orientation du pilier

Parmi les caractéristiques de la structure, son orientation aussi joue un rôle sur l'impact et sur la variation de distribution des forces sur le pilier exposé. L'orientation de la structure se rapproche du paramètre de l'angle minimum entre la direction de l'écoulement et la paroi d'une structure (Prieto et al., 2018).

D'après la littérature, les modèles empiriques qui prennent en compte l'orientation de la structure pour calculer la pression d'impact ne sont pas détaillés. Plusieurs simulations ont été faites avec différentes orientations de pilier, par rapport à la direction x de l'écoulement : 45° , 30° , 15° et 90° (le cas de référence). Les résultats montrent qu'avec un pilier carré dont on fait varier l'orientation, la pression maximale induite sur la surface projetée du pilier n'est pas trop influencée. Cependant, ce qui est remarquable, c'est l'influence de cette orientation sur la hauteur d'accumulation des blocs qui est différente en amont de chaque pilier : p.ex., pour une orientation de 90° , $h_{mu,2} = 2.4$ m, tandis qu'avec une orientation de 45° elle diminue à 2.1 m pour $x = 15$ m où il se situe le pilier (Figure 47). Kattel et al., (2018) ont étudié l'évolution et l'interaction entre l'écoulement et l'obstacle exposé pour la phase solide, fluide et pour le mélange. Ils ont prouvé avec des simulations que la masse de DF était déviée avec l'orientation d'obstacle : il n'y aura pas une forte accumulation en amont de l'obstacle. Tandis que, pour l'obstacle de 90° en face de DF, une partie de la masse est bloquée en amont et une partie réduite de volume continue son trajet.

L'intérêt des orientations des structures a été montré comme des stratégies d'atténuation pour dévier la masse pour des zones potentiellement à risque. En conclusion, l'orientation du pilier par rapport à la direction de l'écoulement aide à dévier la masse de l'écoulement. Par conséquent la hauteur d'accumulation diminue, ce qui influence aussi la pression exercée sur paroi située en face d'écoulement, ce qui confirme nos résultats numériques avec Kattel et al., (2018).

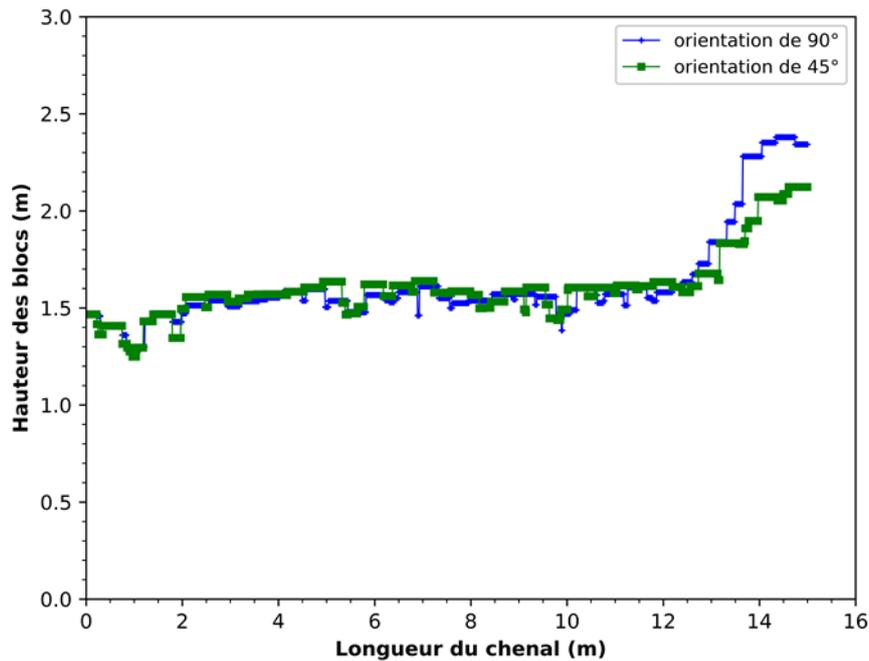


Figure 47 : Épaisseur de la couche granulaire dans une section du chenal en fonction de la longueur du chenal pour chaque cas d'orientation du pilier face à l'écoulement

4. Contacts individuels

Le modèle numérique proposé valorise l'intérêt de la méthode DEM en calculant et détaillant les impacts individuels des blocs sur le pilier. Ce modèle peut enregistrer durant la simulation des informations sur les impacts individuels : leurs valeurs (maximale/minimale), leurs positions, la taille du bloc correspondant et le temps d'apparition du contact.

Les paramètres macroscopiques (hauteur, vitesse, densité) influencent aussi les impacts individuels sur le pilier. Les valeurs des forces d'impact pour chaque cas de h_{Mu} (4 études avec des échantillons différents) sont présentées : toutes les forces d'impact survenues entre les blocs et le pilier sur une période de 3 secondes, sont enregistrées entre $t = 9$ s et $t = 12$ s. La Figure 48 montre la répartition des forces d'impact en fonction du diamètre des blocs pour chaque cas. Comme on pouvait s'y attendre, on remarque que la force exercée par un bloc sur le pilier augmente avec sa taille mais également avec la hauteur d'écoulement (que l'on a fait varier entre 1.5 et 4 m). Par exemple, on peut noter que la force de contact entre le bloc et le pilier est multipliée par dix entre un diamètre de particule de 0.12 et 0.38 m.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

Pour des particules plus petites que la limite inférieure choisie d_{\min} , la force d'impact aurait été encore plus faible. Sur la base des résultats obtenus, nous avons considéré qu'il était raisonnable de conserver la limite inférieure de 0.1 m pour la distribution de la taille des particules et que cela valide l'hypothèse prise au départ pour définir la taille des particules ayant une influence en termes d'impact.

La Figure 49 montre le pourcentage des forces de contact qui sont portées par les particules en fonction de leur diamètre, pour chaque hauteur d'écoulement : dans ce cas, on remarque que le pourcentage du nombre d'impact le plus important correspond à la classe granulométrique (0.15 - 0.2 m) qui représente le plus grand nombre de particules. En effet, ce résultat dépend directement de la distribution granulométrique générée dans le VER et par conséquent injectée dans la ravine. Par ailleurs, ce résultat prouve que l'écoulement reste relativement homogène quelle que soit la hauteur d'écoulement puisque les distributions sont proches les unes des autres. De plus, ce graphe montre la différence du nombre total d'impacts enregistrées d'un cas à un autre : environ 9617 valeurs pour $h_{Mu} = 1.5$ m, 16974 valeurs pour $h_{Mu} = 3$ m et 17999 valeurs pour $h_{Mu} = 4$ m.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

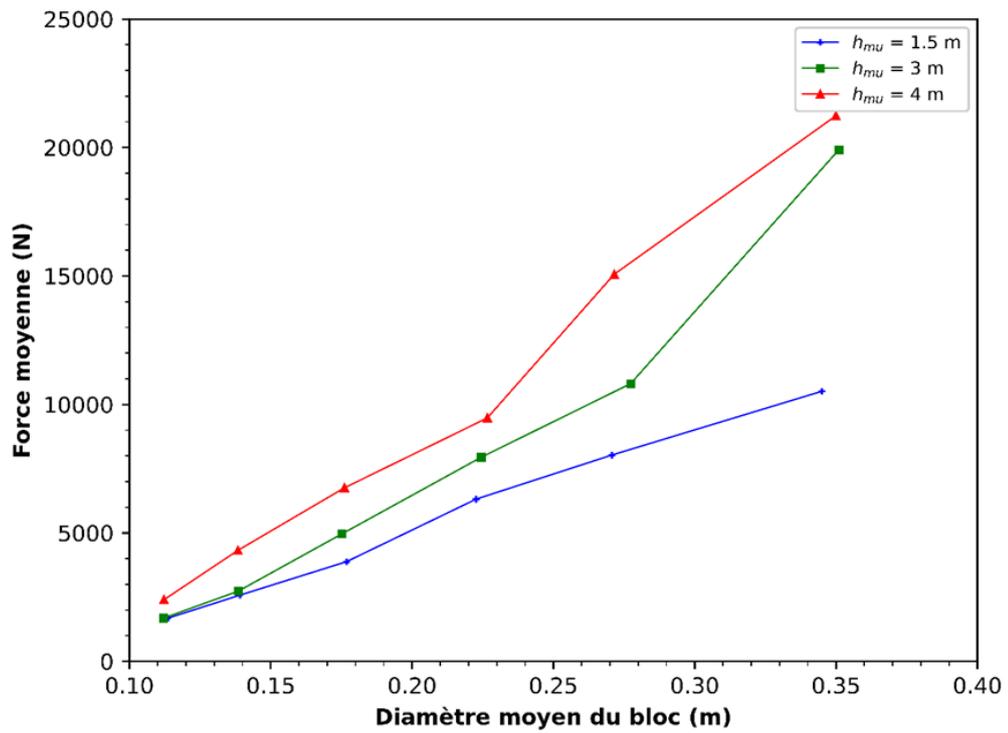


Figure 48 : Force d'impact moyenne en fonction du diamètre du bloc pour les 3 cas de h_{Mu}

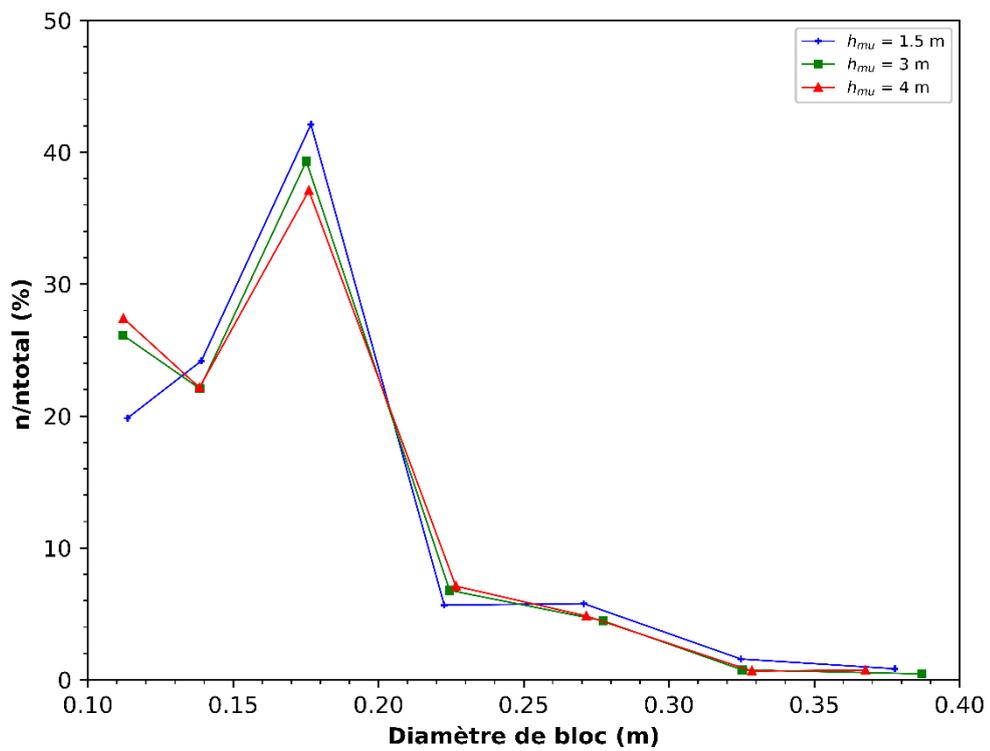


Figure 49 : Pourcentage des valeurs de force de contact en fonction du diamètre des blocs pour les 3 cas de h_{Mu}

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

Pour le cas de référence ($Fr = 0.78$), la force maximale F_{max} est mesurée pour chaque bloc entrant en contact avec le pilier, au cours de son parcours. Ces forces sont ensuite analysées en fonction de la classe granulométrique à laquelle elles appartiennent (0.1 m - 0.15 m ; 0.15 m - 0.2 m ; 0.2 m - 0.25 m...0.35 m - 0.4 m), de manière à tracer la distribution de la probabilité des F_{max} pour chaque classe granulométrique (Figure 50). Ces courbes confirment que les petits blocs ont tendance à présenter les intensités de forces les plus faibles et les gros blocs présentent des forces plus fortes, ce qui est logique (Nagl and Hübl, 2017). C'est pourquoi la répartition du nombre de force d'impact en fonction de chaque classe granulométrique est représentée (Figure 51). On remarque que les classes qui représentent un diamètre inférieur à 0.2 m sont celles qui fournissent le plus d'impact et les autres classes (surtout [0.35-0.4]) fournissent un nombre d'impact beaucoup plus faible. Tout ceci est cohérent avec la distribution de particules générée dans le VER : un plus grand nombre de petites particules que de grosses.

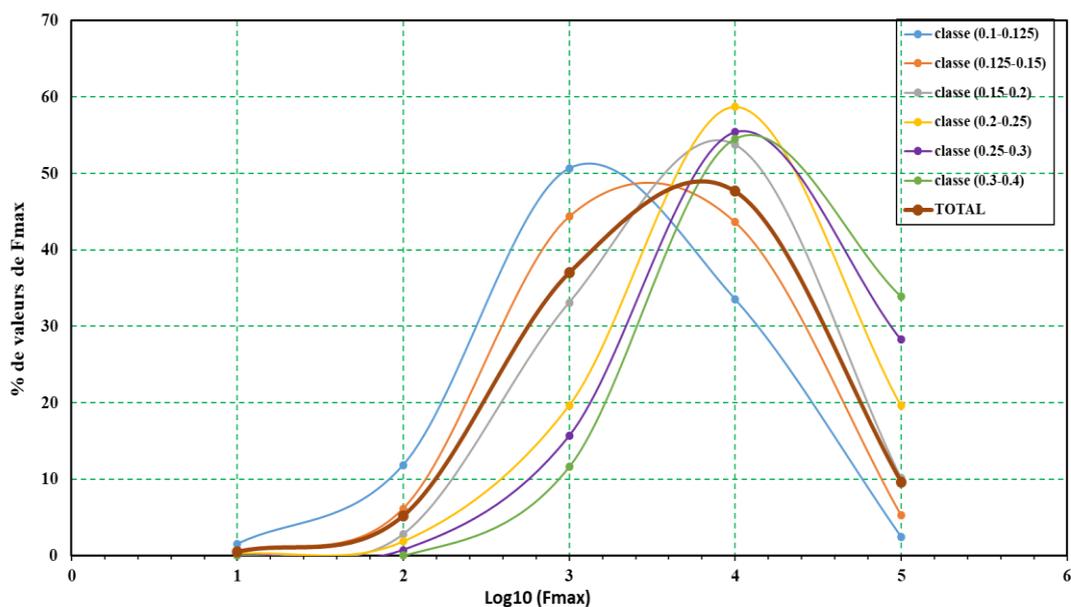


Figure 50 : Distribution de la probabilité des valeurs de F_{max} pour chaque classe granulométrique

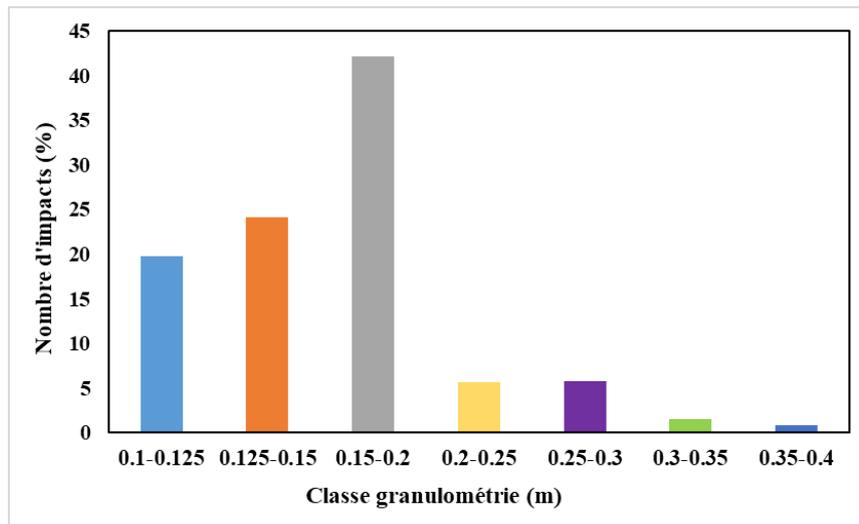


Figure 51 : Répartition du nombre d'impacts pour chaque classe (cas $h = 1.5$ m)

5. Bilan

L'écoulement d'un DF est influencé par des forces solides et fluides, ce qui le rend particulièrement destructeur. Les forces de pression et d'impact induites sont dépendantes de l'épaisseur de l'écoulement, la vitesse et du débit de l'écoulement ainsi que de la géométrie du chenal et/ou de sa pente.

L'incertitude sur la force d'impact de la coulée de débris est dominée par une gamme d'incertitudes sur la connaissance des propriétés du DF, telles que la hauteur de l'écoulement, la vitesse ou la densité (Figure 52). C'est pourquoi, les modèles empiriques cherchant à estimer la pression d'impact (moyenne ou maximale) présentent une relation entre la pression, la hauteur, la vitesse et la densité de l'écoulement et des facteurs empiriques.

Avec le modèle numérique proposé ici, les paramètres d'écoulement ainsi que les paramètres de la structure sont modifiables facilement. Une fois l'écoulement choisi et calé, l'influence des paramètres, tels que forme de bloc, taille, nombre et orientation du pilier, peut être étudiée (Figure 53). On constate que la pression d'impact et la trajectoire de l'écoulement dépend de la forme des obstacles et aussi de son orientation par rapport à l'écoulement et en jouant sur ces paramètres on peut éviter ou limiter les grands dommages dans les zones à risque.

CHAPITRE 4 - Etude de sensibilité des paramètres spécifiques du modèle

Cependant, les modèles empiriques proposés dans la littérature, qui considèrent ces paramètres, ne fournissent pas suffisamment d'informations pour faire une comparaison directe avec les cas simulés. Il est donc difficile de valider les résultats numériques avec la littérature.

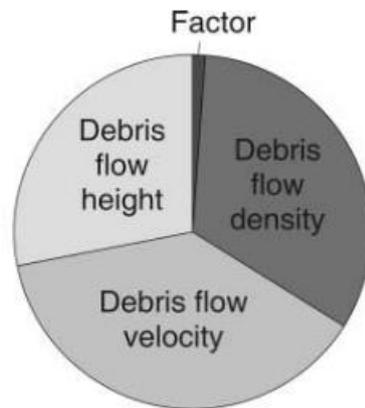


Figure 52 : Paramètres dominants qui influencent la pression d'impact (Proske et al., 2011)

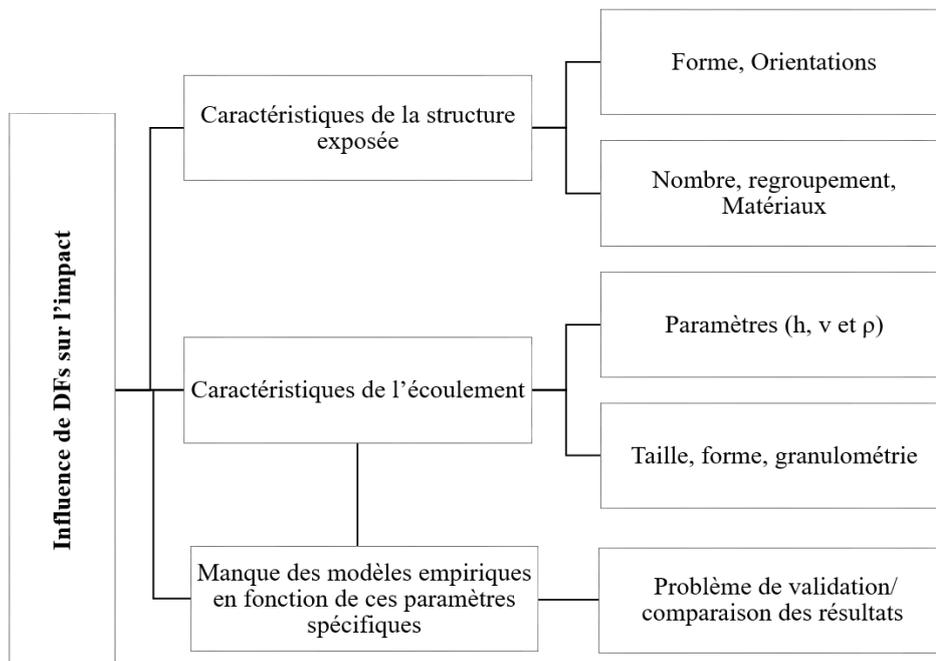


Figure 53 : Bilan sur les paramètres d'écoulement et de la structure qui influencent la pression d'impact mais qui ne sont pas très détaillés dans la littérature

CHAPITRE 5

Application à l'étude de la vulnérabilité

1. Introduction

Les coulées de débris sont parmi les processus de mouvement de masse les plus fréquents, et présentent des risques importants pour les vies humaines et pour la stabilité des bâtiments ou des infrastructures (Prieto et al., 2018). Ces écoulements peuvent provoquer de nombreuses victimes notamment dans les pays en voie de développement (Thouret et al., 2020). Dans ces pays, la faiblesse des infrastructures, la mauvaise qualité des matériaux de construction, la quasi-absence de normes de sécurité et surtout la forte densité des habitants dans les zones exposées sont des facteurs aggravants lors de ces catastrophes naturelles. Une évaluation correcte de la vulnérabilité des bâtiments peut conduire à une évaluation plus efficace des risques, et donc à une meilleure gestion des situations d'urgence et à des mesures d'atténuation des risques plus efficaces (Zhang et al., 2018; Kappes et al., 2012).

Ce chapitre répond au dernier objectif de ce travail de thèse, à savoir la quantification de la vulnérabilité de la structure exposée aux impacts des DFs. De nombreuses fonctions de vulnérabilités sont disponibles : elles se fondent généralement sur les paramètres macroscopiques des écoulements (hauteur, vitesse, densité apparente). Ces méthodes présentent des avantages et des défauts qui sont détaillées dans la suite de ce chapitre.

On s'attachera également à mettre en évidence l'intérêt d'utiliser le modèle numérique, développé dans les chapitres précédents, dans l'évaluation de la vulnérabilité et/ou des courbes de fragilité. En particulier, une adaptation de fonctions de vulnérabilité existantes sera proposée : cette adaptation repose sur l'introduction d'un nouveau paramètre permettant de mieux prendre en compte les caractéristiques des blocs.

2. Défauts et avantages des courbes de vulnérabilité

Selon la plupart des études (Jakob et al., 2012, Kappes et al., 2012, Papathoma-Köhle et al., 2017, Zhang et al., 2018), la vulnérabilité des bâtiments aux risques naturels dépend de plusieurs paramètres tels que le matériau de construction de la structure considérée, son âge, son degré de maintenance, sa hauteur, sa géométrie, etc... L'établissement des courbes de vulnérabilité nécessite des données moins détaillées que les autres méthodes, et c'est l'une des raisons pour lesquelles elles sont si populaires auprès des spécialistes. La principale raison de leur popularité est qu'elles fournissent une représentation quantitative de la vulnérabilité physique.

Cependant, la collecte de ces informations pour chaque bâtiment présent dans une zone d'impact donnée peut être coûteuse et fastidieuse. Les courbes ne fournissent pas d'informations sur les caractéristiques d'un bâtiment en particulier et, par conséquent son type, ses caractéristiques structurelles, son orientation et son emplacement, etc. ne peuvent être reliés directement aux conséquences, qui permettraient de proposer des moyens de réduire sa vulnérabilité.

En outre, dans la plupart des études, l'intensité de l'écoulement est exprimée d'une seule manière : par exemple, l'intensité ne tient compte que de la hauteur de l'écoulement, et ignore les autres caractéristiques du processus telles que la vitesse, la viscosité, la direction de l'écoulement, etc. Un inconvénient supplémentaire de cette méthode, qui s'ajoute au problème global de disponibilité des données, est que pour élaborer ces courbes de vulnérabilité, il faut disposer d'informations sur l'intensité du processus pour chaque bâtiment. La fiabilité d'une courbe dépend de la qualité et de la quantité des données empiriques disponibles et, en particulier, de la méthode d'enquête utilisée pour réaliser la collecte des données, ainsi que de la méthode statistique utilisée pour l'analyse des données. Une source importante d'incertitude dans le développement des courbes de vulnérabilité provient de l'ajustement des courbes (Papathoma-Köhle et al., 2017, Fuchs et al., 2019).

L'utilisation du modèle numérique développé dans le cadre de ce travail de thèse peut permettre de répondre à certains de ces défauts : on sait par exemple qu'une unique caractéristique de l'écoulement n'est pas suffisante pour calculer de manière réaliste la vulnérabilité. De plus, on pourra montrer que la pression d'impact, calculée avec ce modèle

numérique et utilisée pour le calcul de la vulnérabilité, intègre d'autres paramètres de l'écoulement, telles que sa hauteur, sa vitesse, la densité et aussi la distribution de taille des blocs qui le constituent.

3. Intégration du modèle développé pour évaluer la vulnérabilité

Comme présenté dans la section 4 du chapitre 1, la détermination des courbes de vulnérabilité nécessite des données relatives au DF et d'autres qui concernent la structure exposée. On pourra alors estimer le degré de perte de cette structure en fonction de l'intensité étudiée d'un DF (hauteur, vitesse, densité...).

Dans la littérature, plusieurs paramètres mesurés ont été pris en compte pour représenter l'intensité d'un écoulement. Les plus couramment utilisés sont : la hauteur de l'écoulement (h), sa vitesse (v) et la pression d'impact qu'il produit sur la structure considérée (P). Pour ce qui est du modèle numérique proposé, h et v sont deux paramètres d'entrée nécessaires pour modéliser l'écoulement souhaité. Le résultat du modèle correspond à la pression d'impact P de l'écoulement, ayant une distribution granulométrique donnée, sur une structure située dans une ravine à une distance donnée.

Cependant, dans notre cas la quantification de la vulnérabilité de la structure (le pilier par exemple) est difficile à exprimer. En effet, dans la littérature, les courbes sont présentées pour tout le bâtiment et dépendent surtout de sa valeur financière (valeur qui dépend de nombre d'étages, de son âge, du niveau de maintenance...) et la perte de valeur qu'il subira en raison de son exposition à ce DF. Le modèle numérique présenté ici ne quantifie pas les dommages subis par la structure. On peut obtenir sa déformation mais pas d'informations plus précises sur son niveau de destruction (p.ex, la vulnérabilité est égale à 1). De plus, la démarche à suivre pour établir une courbe complète nécessite des centaines ou milliers de calculs et donc même si le modèle développé donne un résultat dans un temps de calcul raisonnable (moins d'une journée), il ne peut pas être utilisé pour la construction de telles courbes.

En général, la vulnérabilité d'une structure est quantifiée en fonction d'un seul paramètre. Cependant, il est possible que d'autres paramètres aient une influence plus grande sur la vulnérabilité de la structure que le paramètre étudié. En effet, une structure donnée, dans un site

donné, pourrait subir une destruction totale d'après un modèle de vulnérabilité existant utilisant un paramètre donné (p. exemple, la hauteur de l'écoulement) et une vulnérabilité inférieure pour un autre paramètre (p. exemple, la vitesse de l'écoulement). Notre modèle est capable de prédire les niveaux de pression sur une structure en intégrant un ensemble de paramètres de l'écoulement (hauteur, vitesse, densité et la taille de bloc) et de la structure (matériau, orientation, forme). Ainsi l'évaluation de la vulnérabilité peut être améliorée par rapport à la situation où un seul paramètre d'entrée est considéré.

Indirectement, le modèle numérique pourra être utilisé comme modèle prévisionnel des pertes, si on y associe les fonctions de vulnérabilité. Il est par ailleurs capable de fournir, en plus de la pression moyenne sur l'ouvrage, les forces d'impacts localisées. Ces dernières peuvent produire des dommages importants sur un ouvrage qui ne sont pas pris en compte dans l'approche traditionnelle utilisant une pression répartie sur l'ouvrage.

3.1 Adaptation des fonctions de vulnérabilité et quantification de l'intensité de l'écoulement

En tenant compte des résultats numériques et des fonctions de vulnérabilité existantes dans la littérature (Kang and Kim, 2016; Zhang et al., 2018; Fuchs et al., 2019), plusieurs étapes ont été nécessaires dans le but de proposer d'améliorer les calculs de vulnérabilité.

1. L'expression de la vulnérabilité V est différente d'une étude à l'autre, d'où la nécessité de choisir au préalable un modèle de vulnérabilité existant dans la littérature (Papathoma-Köhle et al., 2017 ; Fuchs et al., 2019). A partir de ce modèle, on pourra comparer les résultats du modèle numérique et donc estimer le niveau de dommage de la structure. On pourra également montrer que pour un même écoulement, et selon le paramètre étudié (hauteur, vitesse ou pression), on obtient trois valeurs différentes de V . Par exemple, si on applique le modèle de Kang et Kim, (2016) (leur Tableau 20) pour 5 simulations numériques décrites dans le Tableau 21: on utilise h (m) pour calculer une première valeur de vulnérabilité V_1 , la vitesse v (m/s) pour calculer V_2 et enfin la pression moyenne P (kPa) pour calculer V_3 . Ce tableau confirme qu'un seul écoulement DF (p.ex, $h = 1.5$ m et $v = 3$ m/s entraînant à une pression moyenne de 72 kPa) pourra aboutir à des évaluations de vulnérabilité différentes suivant le

CHAPITRE 5- Application à l'étude de la vulnérabilité

paramètre considéré, comme V_1 égale à 0.272 , V_2 égale à 0.179 et V_3 égale à 0.489, pour une même structure exposée à ce DF. Etant donné que la pression intègre indirectement les autres variables comme la hauteur, la vitesse et la granulométrie, elle constitue un paramètre de choix pour caractériser l'intensité associée à un écoulement.

Tableau 20 : Fonction de vulnérabilité proposée par Kang et Kim, (2016) pour les structures en béton armé

Paramètre de l'intensité	Fonction de vulnérabilité
Hauteur h (m)	$V_1 = 1 - e^{-0.0005 \times h^{1.537}}$
Vitesse v (m/s)	$V_2 = 1 - e^{-0.0005 \times v^{2.775}}$
Pression P (kPa)	$V_3 = 1 - e^{-0.0005 \times P^{1.69}}$

Tableau 21 : Calculs de vulnérabilité pour 5 cas de simulations avec $d_{\max} = 0.4$ et $d_{\min} = 0.1$ m en utilisant les modèles de Kang et Kim, (2016)

h (m)	v (m/s)	P_{moy} (kPa)	V₁	V₂	V₃
1.5	3	72	0.272	0.179	0.489
3	3	142	0.602	0.179	0.885
4	3	179	0.761	0.179	0.959
1.5	4.5	123	0.272	0.457	0.817
1.5	6	180	0.272	0.742	0.96

2. Dans le but d'améliorer la fonction de vulnérabilité existante, il serait nécessaire d'intégrer des paramètres supplémentaires qui aident à mieux quantifier l'intensité de l'écoulement. La taille des blocs, paramètre qui influence fortement les forces d'impact (Papathoma-Köhle et al., 2017) et pouvant être pris en compte par le modèle numérique, a été choisie pour jouer ce rôle.

En effet, nous avons montré précédemment (section 2.1- chapitre 4) que la distribution granulométrique a une influence importante sur les pressions induites par l'écoulement sur la structure impactée. On peut donc facilement concevoir que ce paramètre agira également sur la vulnérabilité. Le Tableau 22 présente un exemple d'écoulement de caractéristiques macroscopiques fixées, et pour lequel on obtient une vulnérabilité qui varie entre 0.48 et 0.77, passant ainsi d'un état de dommage modéré à une destruction quasiment complète. Cette différence montre l'importance de la taille des blocs présents dans l'écoulement, et qu'une amélioration du calcul de la vulnérabilité prenant en compte la valeur de d_{\max} est nécessaire.

Tableau 22 : Influence de d_{max} sur P et V

h (m)	v (m/s)	d_{max} (m)	P_{moy} (kPa)	V_3
1.5	3	0.4	72	0.489
		0.7	81	0.568
		1	83.5	0.587
		1.5	102	0.710
		2	113	0.771

3. La prise en compte de d_{max} dans le calcul de la vulnérabilité pourra ainsi éviter la réalisation d'une longue série de calculs avec des granulométries différentes : cette partie sera détaillée ci-dessous (partie 3.2).

La Figure 54 résume les arguments principaux pris en compte pour améliorer la vulnérabilité.

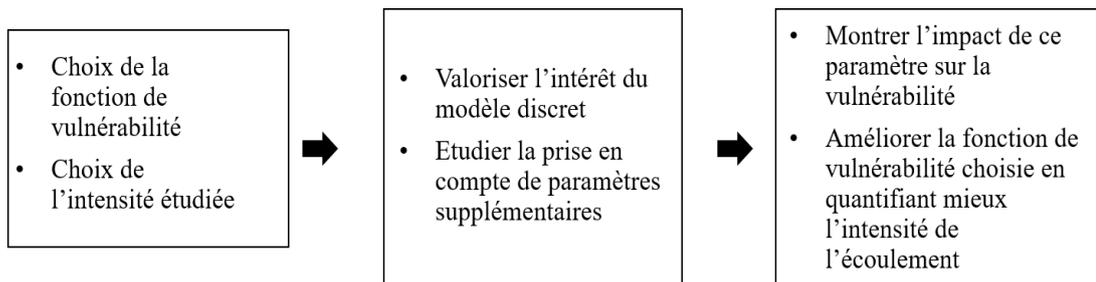


Figure 54 : Démarche proposée pour améliorer l'estimation de la vulnérabilité

3.2 Fonction de vulnérabilité améliorée

Dans cette partie, on a fait le choix des fonctions de vulnérabilité proposées par Kang et Kim, (2016) mais le principe aurait pu être adapté à d'autres fonctions de vulnérabilité.

3.2.2 Première proposition

A) Sphères :

La fonction de vulnérabilité V choisie est exprimée en fonction de la pression (P) pour les structures en béton armé :

CHAPITRE 5- Application à l'étude de la vulnérabilité

$$V=1-e^{-0.0005 \times P^{1.69}} \quad (\text{Eq.18})$$

Le diamètre maximal des blocs d_{\max} est pris comme paramètre supplémentaire pour le calcul de la vulnérabilité. Dans les simulations réalisées, le diamètre minimal d_{\min} reste constant. La pression P sera remplacée par un paramètre \bar{P} est égal à :

$$\bar{P} = P_{ref} \times \left(\frac{d_{\max}}{d_{ref}} \right)^n \quad (\text{Eq.19})$$

où d_{ref} est le diamètre maximal utilisé dans le cas de référence (imposé dans une première simulation, dans notre cas 0.4 m), P_{ref} est la pression moyenne du DF sur le pilier pour un écoulement de diamètre maximal égal à d_{ref} , et n est le coefficient qui suit la loi d'augmentation de nos résultats.

Pour le diamètre maximal des blocs dans le cas de référence, il faut choisir une taille de bloc qui permette un nombre suffisant de blocs par rapport à la largeur de l'obstacle et par rapport à la hauteur choisie de l'écoulement. Ainsi, l'extrapolation des valeurs de \bar{P} sera plus précise.

La fonction de vulnérabilité améliorée V' de Kang et Kim, (2016) s'exprime comme suit :

$$V' = 1 - e^{-0.0005 \times \bar{P}^{1.69}} \quad (\text{Eq.20})$$

Le coefficient « n » est exprimé en fonction d'un paramètre adimensionnel de l'écoulement, à savoir le nombre de Froude Fr , d'où :

$$n = -0.2308Fr + 0.4338 \quad (\text{Eq.21})$$

Avec cette adaptation du modèle, en dilatant la courbe granulométrique (tout en gardant les mêmes porosités, densité et d_{\min}), le modèle peut servir à évaluer la variabilité que l'on peut attendre sur la vulnérabilité (aussi la pression) quand la taille de bloc d_{\max} change.

Grâce à cette nouvelle fonction de vulnérabilité qui tient compte de la taille des blocs, on peut mieux quantifier les conséquences de l'écoulement sur la structure et jauger de l'influence de la taille de blocs transportés sur celle-ci. En effet, la Figure 55 ci-dessous montrent les résultats de calcul de la vulnérabilité du modèle original de Kang et Kim, (2016) et de la

méthode de calcul proposée V' , pour plusieurs tailles de blocs (cas d'écoulement $h = 1.5$ m ; $v = 3$ m/s, $Fr = 0.78$). On remarque que les résultats de la pression moyenne changent en fonction de d_{max} et par conséquent on peut obtenir des valeurs de vulnérabilité différentes pour un écoulement de même caractéristiques macroscopiques. Avec le modèle numérique, on pourra apporter des améliorations aux modèles empiriques existants pour la prédiction de la pression d'impact.

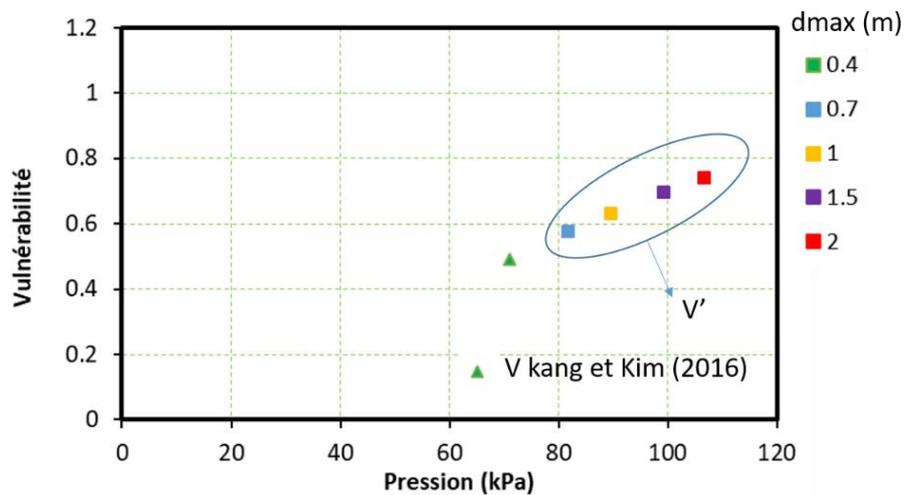


Figure 55 : Présentation des calculs de la vulnérabilité améliorée V' en fonction de différentes tailles de blocs (d_{max}) par rapport à la valeur de la vulnérabilité calculée avec le modèle Kang et Kim (2016) pour $d_{max} = 0.4$ m

(B) R-blocks :

On a appliqué le modèle de calcul de vulnérabilité V' (équation 20) aux simulations réalisées avec des r-blocks au lieu des sphères (Tableau 23). En tenant compte des résultats obtenus en fonction de d_{max} , on pourra utiliser la même stratégie pour estimer la pression (et donc la vulnérabilité) pour les r-blocks.

Tableau 23 : Calcul de vulnérabilité pour de différents d_{max} pour les R-blocks

Cas	d_{max}	P_{moy} (kPa)	V'
H = 1.5 m , v = 3 m/s (r-blocks)	0.4	83	0.583
	0.7	91	0.671
	1	100	0.726
	1.5	121	0.786
	2	129	0.825

3.2.3 Seconde proposition

Une seconde méthode a été proposée pour montrer l'influence de la taille de bloc sur P et V. Les résultats de différentes simulations ont montré une relation linéaire entre P et d_{max} (Figure 56). La modification proposée ici se fonde aussi sur la pression P qui sera définie comme suit :

$$P = a d_{max} + b \tag{Eq.22}$$

Dans cette relation, a et b peuvent être déterminés en faisant un nombre réduit de simulations d'un écoulement ayant des caractéristiques macroscopiques déterminées et en faisant varier d_{max} . Par exemple, la Figure 56 montre les valeurs de pression obtenues pour différents écoulements en faisant varier la hauteur entre 1.5 m et 4 m et pour un écoulement ayant les caractéristiques suivantes : $v = 3$ m/s, $\rho = 1867$ kg/m³ et pour des d_{max} différents. On a représenté sur la Figure 56 la régression linéaire correspondante à l'équation 22. On remarque une relation linéaire de la pression moyenne calculée en fonction d_{max} , ce qui permet d'obtenir également un aperçu de l'évolution de la vulnérabilité si l'on fait varier la taille des blocs. En effet, ces coefficients « a et b » dépendent de la variation de la hauteur ou de la vitesse de l'écoulement.

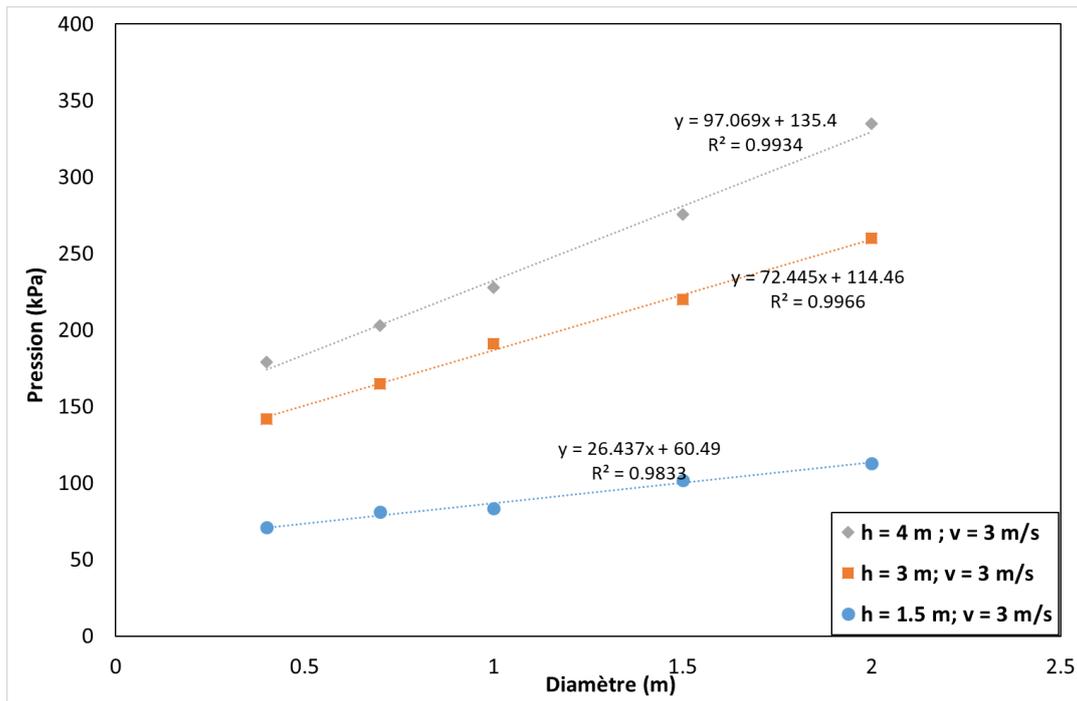


Figure 56 : Relation de P en fonction de d_{max} pour différentes simulations de différentes hauteurs

Parmi les deux propositions précédentes permettant de prendre en compte la taille des blocs dans l'évaluation de la pression d'impact d'un écoulement, la première méthode sera plus facile en mettre en œuvre car elle ne requiert qu'un petit nombre de simulations.

3.3 Comparaison avec d'autres fonctions de vulnérabilité basées sur la pression

Plusieurs fonctions de vulnérabilité existent dans la littérature en tenant compte de la pression d'impact comme intensité : chacune présente un seuil différent pour atteindre une vulnérabilité égale à 1 (destruction totale de la structure). La comparaison de ces seuils dans le Tableau 24 montre clairement qu'une variation significative de pression d'impact existe pour différents types de bâtiments dans la même région (par ex. l'ouest de la Chine) mais aussi dans des zones différentes (comparaison entre la Corée du Sud et l'ouest de la Chine). Il est évident que le seuil de rupture dépend d'autres facteurs que la pression d'impact elle-même. On peut citer notamment, la direction de l'impact, des caractéristiques supplémentaires des bâtiments (matériaux de construction, âge, étages...) ou la présence de blocs dans l'écoulement.

CHAPITRE 5- Application à l'étude de la vulnérabilité

En plus de l'étude des données empiriques déjà disponibles, il serait certainement nécessaire de mener des expériences en laboratoire pour avoir une meilleure compréhension de l'interaction entre les structures et les DFs (Papathoma-Köhle et al., 2017). En effet, on constate que la comparaison de quelques fonctions présentées ci-dessous (Tableau 24), met en évidence l'importance de fixer une étude pour évaluer la vulnérabilité puisque les résultats changent d'une étude à l'autre ainsi que d'une fonction à une autre.

Tableau 24 : Comparaisons de quelques fonctions de vulnérabilité fondées sur les seuils de pression d'impact

Référence	Origine des données	Type de structure	Seuil de la pression d'impact pour $V = 1$
Zanchetta et al., 2004	Sarno, Italie, (mai 1998)	Tout type	> 90
Hu et al., 2012	Ouest de Chine (Août 2010)	Brique Béton armé	> 18 > 110
Quan Luna et al., 2011	Italie (juillet 2008)	Maçonnerie, béton	>37.5
Kang and Kim, 2016	Corée du Sud (mai et août 2011)	Brique Béton	> 35 > 200

4. Bilan

Le modèle numérique que l'on a développé donne la pression moyenne en fonction de la hauteur d'écoulement h , de la vitesse d'écoulement v et de la taille des blocs d_{max} . On a montré qu'un écoulement de caractéristiques macroscopiques données (hauteur, vitesse, densité) induira des vulnérabilités différentes suivant le paramètre d'intensité considéré. De plus, les courbes ou fonctions de vulnérabilité qui existent dans la littérature sont utiles pour évaluer le degré de dommage d'une structure exposée aux DFs en fonction de l'intensité de l'écoulement.

Plusieurs propositions ont été énoncées afin d'améliorer les fonctions de vulnérabilité existantes à partir des résultats fournis par le modèle numérique :

- (1) améliorer la pertinence des courbes en quantifiant mieux l'intensité de l'écoulement,

CHAPITRE 5- *Application à l'étude de la vulnérabilité*

(2) évaluer les niveaux de dommage de la structure en fonction de plusieurs paramètres (h, v, p et granulométrie) ainsi que le type de la structure, et

(3) dans les prochains travaux essayer d'utiliser le modèle pour caractériser les impacts localisés et leur influence sur la vulnérabilité, alors qu'ils ne sont actuellement pas pris en compte dans les fonctions existantes.

Avec la granulométrie, les forces d'impact individuels, les histogrammes des forces, on pourrait montrer l'intérêt de la méthode discrète et se focaliser sur ces données dans le but de montrer leur relation avec la vulnérabilité.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de thèse, un modèle numérique pour la simulation d'impact de coulées de débris sur des éléments de structures a été présenté. Le modèle repose sur un couplage entre des calculs utilisant la *Computational Fluid Dynamics* (CFD) d'une part et la Méthode des Éléments Discrets (DEM) d'autre part. Il permet de simuler les deux phases de l'écoulement, séparées en une phase fluide et une phase solide composée de blocs dont la distribution granulométrique est modifiable en fonction des conditions étudiées. Pour toutes nouvelles conditions d'écoulement (hauteur ou vitesse de l'écoulement, forme du chenal, position et forme de l'obstacle considéré), un nouveau calcul CFD doit être mené afin de déterminer le champ des vitesses et de surface libre de la phase fluide. En parallèle, dans le code DEM, un nouveau volume élémentaire représentatif (VER) de blocs doit être généré lorsque certaines conditions d'écoulement changent : hauteur de l'écoulement, distribution granulométrique, forme des blocs ou fraction solide de l'écoulement.

Dans la littérature, de nombreux modèles existent pour étudier ces écoulements et leurs trajectoires sur des échelles de plusieurs kilomètres (Gao et al., 2018). Dans ce travail, on s'est intéressé particulièrement à l'impact des blocs sur des éléments de structure et non pas au trajet de l'écoulement. Le modèle numérique représente donc un complément aux modèles existants, car il se focalise sur le voisinage proche de l'ouvrage. On utilise comme paramètres d'entrée des caractéristiques d'écoulement possiblement observés dans cette zone (hauteur, vitesse, densité...).

En termes de domaine d'application, le modèle proposé permet de simuler des DFs pour lesquels la concentration en blocs est importante. Les caractéristiques de l'écoulement, telles que vitesse, débit, densité apparente et hauteur d'écoulement, peuvent être modifiées en fonction du cas d'étude considéré. Une fois l'écoulement à modéliser défini, on peut déterminer le jeu de paramètres à utiliser dans le modèle pour le reproduire dans un chenal sans obstacle. Par la suite, l'ensemble de ces paramètres sont utilisés pour modéliser l'interaction de l'écoulement avec un élément de structure ou un obstacle, dont la position, la forme et les caractéristiques mécaniques peuvent varier. On obtient ainsi les efforts générés par l'écoulement sur l'obstacle en fonction du temps, qui peuvent ensuite être utilisés pour quantifier sa vulnérabilité et ainsi aider les ingénieurs à améliorer sa conception.

Le modèle numérique présenté offre plusieurs avantages : une meilleure précision dans l'étude des forces d'impact et par conséquent une meilleure analyse dans l'évaluation de la vulnérabilité. Le modèle numérique pourra alors être adapté et intégré à l'amélioration des calculs de la vulnérabilité par l'intégration de paramètres supplémentaires, comme par exemple, la prise en compte de la taille des blocs. Un nouveau modèle empirique de la pression d'impact, prenant en compte le diamètre maximal des blocs, a été proposé ce qui permettra de mieux estimer la vulnérabilité des structures en fonction de cette variable.

Les DFs sont des écoulements complexes, non-newtoniens, viscoplastiques et biphasés. L'approche CFD utilisée pour calculer le champ de vitesse et de surface libre du fluide est basée sur une rhéologie de fluide newtonienne, simplificatrice par rapport au phénomène réel. Cependant, nous utilisons ces champs essentiellement pour rendre possible l'entraînement des blocs le long du canal et ainsi estimer leur impact sur des obstacles. La pression d'impact obtenue résulte de l'analyse des impacts exercés par les blocs dans le calcul DEM et de la partie fluide considérée séparément. En outre, notre modèle ne tient pas encore compte de la destruction complète des éléments de structure sollicités.

En tenant compte de ces hypothèses, la méthode proposée a été appliquée avec succès à différents problèmes mentionnés dans la littérature, ce qui a permis de conclure qu'il est capable de :

1. Reproduire avec un temps de calcul raisonnable l'écoulement d'un DF avec des paramètres d'entrée spécifiques : densité apparente, vitesse moyenne, pourcentage de solides, hauteur, granulométrie, viscosité dynamique.
2. Séparer la pression d'impact induite par les blocs sur les piliers et la pression d'impact de la phase fluide.
3. Mesurer les impacts en fonction du temps et obtenir la distribution des forces d'impact sur la structure.
4. Reproduire l'effet de la hauteur et de la vitesse de l'écoulement sur les pressions d'impact en accord avec les modèles empiriques existants dans la littérature.
5. Prendre en compte divers jeux de paramètres d'écoulement et aussi les paramètres des structures (forme, nombre, orientations...).
6. Donner accès à la distribution des forces d'impact sur une structure.

Ce modèle, par ces capacités, s'inscrit dans un ensemble d'outils permettant l'évaluation de la vulnérabilité des structures : de la modélisation de l'aléa à grande échelle, jusqu'à la modélisation d'une structure particulière dans un code orienté génie civil.

Le modèle pourra être utilisé dans des recherches ultérieures, avec une plus grande gamme de DF (débit, densité, distribution de la taille des blocs, vitesse et hauteur d'écoulement). L'étude de sensibilité des paramètres pourra être mieux détaillée par exemple (la distribution de la taille des blocs et la viscosité dynamique du fluide). De plus, le modèle fluide pourra être améliorée en se basant sur un autre calcul CFD.

L'étude peut être facilement étendue pour obtenir des simulations avec multi-obstacles, une idée intéressante étant l'utilisation de séquences d'obstacles avec, par exemple des matériaux de construction différentes. La méthode peut également être utilisée pour approfondir les problèmes d'optimisation, par exemple en ce qui concerne la géométrie des obstacles ou structures, les matériaux qui les composent et en montrant aussi leur influence sur la trajectoire et l'impact. Le modèle de ségrégation tridimensionnel observé dans la phase granulaire pourrait aussi être reproduit.

De nouveaux projets peuvent être réalisés ultérieurement, comme de développer un pilote expérimental (ou des travaux en collaboration avec des équipes expertes en expérimentation) pour aller plus loin et valider le modèle numérique sur l'expérience ou étudier d'autres phénomènes ou caractéristiques.

Pour évaluer le degré de dommage des structures, un certain nombre de chercheurs se sont concentrés sur des études théoriques, numériques et expérimentales des caractéristiques dynamiques des coulées de débris. Ces caractéristiques dynamiques comprennent principalement la vitesse, la hauteur (Tian et al., 2017) et la force d'impact (Dai et al., 2017). Elles servent à effectuer une évaluation de la vulnérabilité. Les caractéristiques dynamiques et l'évaluation de la vulnérabilité fournissent des indications essentielles pour les décideurs afin de mettre en place des mesures d'atténuation. Par conséquent, le modèle développé pourrait aider à construire des solutions d'ingénierie avancées basées sur la taille des blocs pour la prévention des risques causés par ces écoulements et les solutions d'atténuation possibles.

VALORISATION DES TRAVAUX

Article Journal

- R. Chehade, B. Chevalier, F. Dedecker, P. Breul et JC Thouret « Discrete modelling of debris flows for evaluating impacts on structures », in *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **2021**, <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02278-3>

Participations et publications internationales

- R. Chehade, B. Chevalier, F. Dedecker et P. Breul, « Coupled numerical model CFD-DEM of debris flows impact to improve the vulnerability quantification of structures », *Europe and Safety and Reability Conference, Angers, septembre, 2021*
- R. Chehade, B. Chevalier, F. Dedecker et P. Breul, « Influence on the particle shape on the impact force of lahar on an obstacle », *the International Conference Powder and Grains, Virtual, juillet, 2021*
- R. Chehade, B. Chevalier, F. Dedecker et P. Breul, « Impact assessment of debris flows on structures using discrete numerical modelling », *the 5th International Itasca Symposium, Applied Numerical Modeling in Geomechanics, Paper 14-03, Vienna, février, 2020*
- R. Chehade, B. Chevalier, F. Dedecker et P. Breul, « Evaluation of the impact of debris flows on a pillar using discret numerical modelling », *the 15th International Student Conference On Advanced Science and Technology, Kumamoto University, Japan, Online, novembre, 2020*
- Participation au webinar ITASCA Consultants, janvier, **2021**
- Participation au comité international « Assosiation of Geohazard Professionals » (AGHP), août, **2020**

Participations nationales

- Salon pollutec à Lyon Eurexpo France (*14 Octobre 2021*)
- 39^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (*26 au 28 mai 2021*) : Prix Jeunes Chercheurs- RENE HOUPERT
- Présentation de mes travaux de recherche à IRSTEA Grenoble (*janvier 2020*)
- 37^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (*19 au 21 juin 2019*) : Poster + papier

Prix

- Prix spécial Travaux public sponsorisé par la FNTP (RUGC 2021)
- Prix de la meilleure présentation (ICAST-2020)

REFERENCES

- Akbas, S., Blahut, J., Sterlacchini, S., 2009. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. *Landslide Process. from Geomorphol. Mapp. to Dyn. Model.* 229–233.
- Albaba, A., Lambert, S., Nicot, F., Chareyre, B., 2015. Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling. *Granul. Matter* 17, 603–616. <https://doi.org/10.1007/s10035-015-0579-8>
- Albaba, A., Schwarz, M., Wendeler, C., Loup, B., Dorren, L., 2019. Numerical modeling using an elastoplastic-adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 2339–2358. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2339-2019>
- Armanini, A., 2008. On the dynamic impact of debris flows. *Recent Dev. Debris Flows* 208–226. <https://doi.org/10.1007/bfb0117770>
- Armanini, A., Larcher, M., Odorizzi, M., 2011. Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wal. 5th Int. Conf. Debris-Flow Hazards. Mitigation, Mech. Predict. Assess. 1041–1049. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-113>
- Azmeri, A., Isa, A.H., 2018. An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia. *Jamba J. Disaster Risk Stud.* 10. <https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.550>
- Brown, S.K., Jenkins, S.F., Sparks, R.S.J., Odbert, H., Auken, M.R., 2017. Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification. *J. Appl. Volcanol.* 6. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0067-4>
- Bugnion, L., McARDell, B.W., Bartelt, P., Wendeler, C., 2012. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides* 9, 179–187. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0294-4>
- Charbonnier, S.J., Germa, A., Connor, C.B., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.C., Lavigne, F., Dixon, T., Connor, L., 2013. Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 261, 295–315. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.021>
- Charbonnier, S.J., Thouret, J.C., Gueugneau, V., Constantinescu, R., 2020. New Insights Into the 2070calyrBP Pyroclastic Currents at El Misti Volcano (Peru) From Field Investigations, Satellite Imagery and Probabilistic Modeling. *Front. Earth Sci.* 8, 0–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.557788>
- Ciurean, R.L., Hussin, H., van Westen, C.J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Frigerio, S., Glade, T., 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Nat. Hazards* 85, 929–957. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6>
- Crozier, M.J., 2005. Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: Hazard management issues. *Landslides* 2, 247–256. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0019-7>
- Cui, P., Zeng, C., Lei, Y., 2015. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surf. Process. Landforms* 40, 1644–1655. <https://doi.org/10.1002/esp.3744>

- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique* 29, 47–65.
- Dai, Z., Huang, Y., Cheng, H., Xu, Q., 2017. SPH model for fluid–structure interaction and its application to debris flow impact estimation. *Landslides* 14, 917–928. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0777-4>
- De Haas, T., Braat, L., Leuven, J.R.F.W., Lokhorst, I.R., Kleinhans, M.G., 2015. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *J. Geophys. Res. F Earth Surf.* 120, 1949–1972. <https://doi.org/10.1002/2015JF003525>
- Degli, S., Meccanici, E., Dall, I., Federico, F.R., Amoroso, A.N., 2008. Di Colate Fluidi Su Strutture Simulation of Mechanical Effects Due To the Impact of Fluid-Like Debris Flows on Structures 1, 5–24. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2008-01.O-01>
- Doyle, E.E., Cronin, S.J., Cole, S.E., Thouret, J.C., 2010. The coalescence and organization of lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Bull. Volcanol.* 72, 961–970. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0381-8>
- Doyle, E.E., Cronin, S.J., Thouret, J.C., 2011. Defining conditions for bulking and debulking in lahars. *Bull. Geol. Soc. Am.* 123, 1234–1246. <https://doi.org/10.1130/B30227.1>
- Du J, Yin K, Nadim F, Lacasse S, 2013. Quantitative vulnerability estimation for individual landslides Estimation quantitative de la vulnérabilité aux glissements de terrain 2181–2184.
- Dumaisnil, C., Thouret, J.C., Chambon, G., Doyle, E.E., Cronin, S.J., Surono, 2010. Hydraulic, physical and rheological characteristics of rain-triggered lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 1573–1590. <https://doi.org/10.1002/esp.2003>
- Ettlinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A.F., Thouret, J.C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., De Gregorio, D., Nardone, S., Uchuchoque, J.A.L., Arguedas, A., Macedo, L., Manrique Llerena, N., 2015. Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *J. Hydrol.* 541, 563–581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>
- Federico, F., Amoroso, A., 2008. Simulation of mechanical effects due to the impact of fluid-like debris flows on structures.
- Franco, R.D.V., Thouret, J.C., Delaite, G., Van Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., Stinton, A., 2010. Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.* 464, 265–280. [https://doi.org/10.1130/2010.2464\(13\)](https://doi.org/10.1130/2010.2464(13))
- Fuchs, S., Heiss, K., Hübl, J., 2007. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7, 495–506. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007>
- Fuchs, S., Keiler, M., Ortlepp, R., Schinke, R., Papathoma-Köhle, M., 2019. Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: Challenges and the way forward. *J. Hydrol.* 575, 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.067>
- Fuchs, S., McAlpin, M.C., 2005. The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5, 319–330. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-319-2005>
- Fuchs, S., Röthlisberger, V., Thaler, T., Zischg, A., Keiler, M., 2017. Natural Hazard Management from

- a Coevolutionary Perspective: Exposure and Policy Response in the European Alps. *Ann. Am. Assoc. Geogr.* 107, 382–392. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1235494>
- Gao, L., Zhang, L.M., Chen, H.X., 2017. Two-dimensional simulation of debris flow impact pressures on buildings. *Eng. Geol.* 226, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.06.012>
- Haugen, E., Kaynia, A., 2008. Vulnerability of structures impacted by debris flow. *Landslides Eng. Slopes. From Past to Futur.* 381–387. <https://doi.org/10.1201/9780203885284-c37>
- He, X., Liang, D., Wu, W., Cai, G., Zhao, C., Wang, S., 2018. Study of the interaction between dry granular flows and rigid barriers with an SPH model. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 42, 1217–1234. <https://doi.org/10.1002/nag.2782>
- Horiguchi, T., Komatsu, Y., 2019. Method to evaluate the effect of inclination angle of steel open-type check dam on debris flow impact load. *Int. J. Prot. Struct.* 10, 95–115. <https://doi.org/10.1177/2041419618789702>
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 869–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Hu, K., Wei, F., Li, Y., 2011. Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Jiangjia Ravine, China. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 1268–1278. <https://doi.org/10.1002/esp.2155>
- Hu, K.H., Cui, P., Zhang, J.Q., 2012. Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 2209–2217. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2209-2012>
- Huang, Y., Cheng, H., Dai, Z., Xu, Q., Liu, F., Sawada, K., Moriguchi, S., Yashima, A., 2015. SPH-based numerical simulation of catastrophic debris flows after the 2008 Wenchuan earthquake. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 74, 1137–1151. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0705-6>
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., Scheidl, C., 2009. Debris flow impact estimation. *Elev. Int. Symp. water Manag. Hydraul. Eng.* 137–148.
- HUEBL, J., NAGL, G., SUDA, J., RUDOLF-MIKLAU, F., 2017. Standardized Stress Model for Design of Torrential Barriers under Impact by Debris Flow (According to Austrian Standard Regulation 24801). *Int. J. Eros. Control Eng.* 10, 47–55. <https://doi.org/10.13101/ijece.10.47>
- Iverson, R.M., 2015. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. *Geomorphology* 244, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.033>
- Iverson, R.M., 1997a. of Debris. *Rev. Geophys.* 35, 245–296.
- Iverson, R.M., 1997b. of Debris. *Rev. Geophys.* 35, 245–296. <https://doi.org/10.1603/033.046.0206>
- Iverson, R.M., George, D.L., 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 470. <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0819>
- Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G., Berti, M., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *J. Geophys. Res.* 115. <https://doi.org/10.1029/2009jf001514>
- Kang, H. sub, Kim, Y. tae, 2016. The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Nat. Hazards* 80, 1475–1493. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2032-z>
- Kappes, M.S., Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., 2012. Assessing physical vulnerability for multi-

- hazards using an indicator-based methodology. *Appl. Geogr.* 32, 577–590. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002>
- Kattel, P., Kafle, J., Fischer, J.T., Mergili, M., Tuladhar, B.M., Pudasaini, S.P., 2018. Interaction of two-phase debris flow with obstacles. *Eng. Geol.* 242, 197–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.023>
- Kelfoun, K., Druitt, T.H., 2005. Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2005JB003758>
- Larsen, M., Wieczorek, G., Eaton, L., Torres-Sierra, H., 2001. Natural Hazards on Aluvial Fans: The Debris Flow and Flash flood disaster of December 1999, Vargas State, Venezuela, in: *Proceedings of the Sixth Caribbean Islands Water Resources Congress*, Edited by: Sylva, W., Mayagüez, Puerto Rico. pp. 1–7.
- Lavigne, F., Thouret, J.-C., 2000. Les lahars; depots, origines et dynamique. *Bull. la Société géologique Fr.* 171, 545–557.
- Lei, Y., Cui, P., Zeng, C., Guo, Y., 2018. An empirical mode decomposition-based signal process method for two-phase debris flow impact. *Landslides* 15, 297–307. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0864-1>
- Leonardi, A., Wittel, F.K., Mendoza, M., Vetter, R., Herrmann, H.J., 2016. Particle-Fluid-Structure Interaction for Debris Flow Impact on Flexible Barriers. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 31, 323–333. <https://doi.org/10.1111/mice.12165>
- Li, X., Zhao, J., 2018. A unified CFD-DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 42, 1643–1670. <https://doi.org/10.1002/nag.2806>
- Liu, C., Sun, Q., Zhou, G.G.D., 2018. Coupling of material point method and discrete element method for granular flows impacting simulations. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 115, 172–188. <https://doi.org/10.1002/nme.5800>
- Lo, W.C., Tsao, T.C., Hsu, C.H., 2012. Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study. *Nat. Hazards* 64, 2107–2128. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0124-6>
- Major, J.J., Bertin, D., Pierson, T.C., Amigo, Á., Iroumé, A., Ulloa, H., Castro, J., 2016. Extraordinary sediment delivery and rapid geomorphic response following the 2008–2009 eruption of Chaitén Volcano, Chile. *Water Resour. Res.* 52, 5075–5094. <https://doi.org/10.1002/2015WR018250>
- Manville, V., Major, J.J., Fagents, S.A., 2013. Modeling lahar behavior and hazards. *Model. Volcan. Process. Phys. Math. volcanism*, Ed. by Fagents, SA, Gregg, TKP, Lopes, RMC 300–330.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E., 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *J. Hydrol.* 394, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
- Martelli, K., 2013. The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and flash floods : application to the case study of Arequipa , Peru 354.
- Mead, S.R., Magill, C., Lemiale, V., Thouret, J.C., Prakash, M., 2017a. Examining the impact of lahars on buildings using numerical modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 703–719. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-703-2017>
- Mead, S.R., Magill, C., Lemiale, V., Thouret, J.C., Prakash, M., 2017b. Examining the impact of lahars on buildings using numerical modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 703–719. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-703-2017>

- Milanesi, L., Pilotti, M., Belleri, A., Marini, A., Fuchs, S., 2018. Vulnerability to Flash Floods: A Simplified Structural Model for Masonry Buildings. *Water Resour. Res.* 54, 7177–7197. <https://doi.org/10.1029/2018WR022577>
- Moulinec, C., Denis, C., Pham, C., Rougé, D., Hervouet, J., Razafindrakoto, E., Barber, R.W., Emerson, D.R., Gu, X., 2011. Computers & Fluids TELEMAC : An efficient hydrodynamics suite for massively parallel architectures *q* 51, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.003>
- Nagl, G., Hübl, J., 2017. Advancing Culture of Living with Landslides. *Adv. Cult. Living with Landslides* 465–471. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1>
- Okano, K., Suwa, H., Kanno, T., 2012. Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake volcano, Japan. *Geomorphology* 136, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.006>
- Orosz, Á., Angelidakis, V., Bagi, K., 2021. Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterise the form of individual particles. *Powder Technol.* 394, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.054>
- Paguican, E.M.R., Lagmay, A.M.F., Rodolfo, K.S., Rodolfo, R.S., Tengonciang, A.M.P., Lopus, M.R., Baliatan, E.G., Obille, E.C., 2009. Extreme rainfall-induced lahars and dike breaching, 30 November 2006, Mayon Volcano, Philippines. *Bull. Volcanol.* 71, 845–857. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0268-8>
- Pallares, C., Fabre, D., Thouret, J.C., Bacconnet, C., Charca-Chura, J.A., Martelli, K., Talon, A., Yanqui-Murillo, C., 2015. Geological and geotechnical characteristics of recent lahar deposits from El Misti volcano in the city area of Arequipa, South Peru. *Geotech. Geol. Eng.* 33, 641–660. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9848-x>
- Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., Fuchs, S., 2017. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Rev.* 171, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007>
- Papathoma-Köhle, M., Zischg, A., Fuchs, S., Glade, T., Keiler, M., 2015. Loss estimation for landslides in mountain areas - An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. *Environ. Model. Softw.* 63, 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.10.003>
- Petley, D.N., Hearn, Æ.G.J., Hart, Æ.A., Rosser, N.J., Dunning, Æ.S.A., Oven, Æ.K., Mitchell, W.A., 2007. Trends in landslide occurrence in Nepal 23–44. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9100-3>
- Pierson, T.C., 2005. Hyperconcentrated flow—transitional process between water flow and debris flow, in: *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, pp. 159–202.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 41, 17–66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90082-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90082-Q)
- Pitman, E.B., Long, L.E., 2005. A two-fluid model for avalanche and debris flows. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 363, 1573–1601. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1596>
- Poudyal, S., Choi, C.E., Song, D., Zhou, G.G.D., Yune, C.Y., Cui, Y., Leonardi, A., Busslinger, M., Wendeler, C., Piton, G., Moase, E., Strouth, A., 2019. Review of the mechanisms of debris-flow impact against barriers. *Debris-Flow Hazards Mitig. Mech. Monit. Model. Assess. - Proc. 7th Int. Conf. Debris-Flow Hazards Mitig.* 1027–1034.
- Prieto, J.A., Journeay, M., Acevedo, A.B., Arbelaez, J.D., Ulmi, M., 2018a. Development of structural

- debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Eng. Geol.* 239, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.014>
- Prieto, J.A., Journeay, M., Acevedo, A.B., Arbelaez, J.D., Ulmi, M., 2018b. Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Eng. Geol.* 239, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.014>
- Proske, D., Suda, J., Hübl, J., 2011. Debris flow impact estimation for breakers. *Georisk* 5, 143–155. <https://doi.org/10.1080/17499518.2010.516227>
- Pudasaini, S.P., 2012. A general two-phase debris flow model. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JF002186>
- Quan Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C.J., Sterlacchini, S., Van Asch, T.W.J., Akbas, S.O., 2011. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2047–2060. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2047-2011>
- Rameshwaran, P., Naden, P., Wilson, C.A.M.E., Malki, R., Shukla, D.R., Shiono, K., 2013. Inter-comparison and validation of computational fluid dynamics codes in two-stage meandering channel flows. *Appl. Math. Model.* 37, 8652–8672. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.016>
- Salciarini, D., Tamagnini, C., Conversini, P., 2010. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers. *Phys. Chem. Earth* 35, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.05.002>
- Scheidl, C., Rickenmann, D., 2011. TopFlowDF-A SIMPLE GIS BASED MODEL TO SIMULATE DEBRIS-FLOW RUNOUT ON THE FAN. 5th Int. Conf. Debris-Flow Hazards Mitigation, Mech. Predict. Assess. 253–262. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-030>
- Schmeeckle, M.W., Nelson, J.M., Shreve, R.L., 2007. Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 112, 1–21. <https://doi.org/10.1029/2006JF000536>
- Schuster, R.L., Highland, L.M., 2001. Socioeconomic Impacts of Landslides in the Western Hemisphere. *U.S. Geol. Surv.* 47.
- Scott, K.M., Vallance, J.W., Kerle, N., Macías, J.L., Strauch, W., Devoli, G., 2005. Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: Occurrence, bulking and transformation. *Earth Surf. Process. Landforms* 30, 59–79. <https://doi.org/10.1002/esp.1127>
- Shu, H., Ma, J., Qi, S., Chen, P., Guo, Z.Z., Zhang, P., 2020. Experimental results of the impact pressure of debris flows in loess regions. *Nat. Hazards* 103, 3329–3356. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04132-3>
- Sosio, R., Crosta, G.B., Frattini, P., 2007. Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 290–306.
- Spence, R.J.S., Baxter, P.J., Zuccaro, G., 2004. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: A model and its application to Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133, 321–343. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00405-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00405-0)
- Sturm, M., Gems, B., Keller, F., Mazzorana, B., Fuchs, S., Papatoma-Köhle, M., Aufleger, M., 2018. Experimental analyses of impact forces on buildings exposed to fluvial hazards. *J. Hydrol.* 565, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.070>
- Tarbotton, C., Dall’Osso, F., Dominey-Howes, D., Goff, J., 2015. The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Rev.* 142, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.002>

- 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 Geotech.* 6, 119–133. <https://doi.org/10.1007/s11440-011-0140-9>
- Thouret, J., Antoine, S., Magill, C., Ollier, C., 2020. Earth-Science Reviews Lahars and debris flows : Characteristics and impacts 201. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003>
- Thouret, J.C., Antoine, S., Magill, C., Ollier, C., 2020. Lahars and debris flows: Characteristics and impacts. *Earth-Science Rev.* 201. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003>
- Thouret, J.C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J.A., Nagata, M., Arguedas, A., MacEdo, L., 2013. Combining criteria for delineating lahar-and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 339–360. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-339-2013>
- Thouret, J.C., Ettinger, S., Guitton, M., Santoni, O., Magill, C., Martelli, K., Zuccaro, G., Revilla, V., Charca, J.A., Arguedas, A., 2014. Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: The case of Arequipa (Peru). *Nat. Hazards* 73, 1771–1815. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1172-x>
- Thouret, J.C., Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B., Surono, 2007. Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars. *Bull. Volcanol.* 70, 221–244. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0133-6>
- Tian, S., Wang, C., Zhang, Z., 2017. A hybrid method of debris flow velocity estimation based on empirical equation. *Int. J. Heat Technol.* 35, 147–152. <https://doi.org/10.18280/ijht.350120>
- Tiberghien, D., Laigle, D., Naaim, M., Thibert, E., Ousset, F., 2007. Experimental investigations of interaction between mudflow and an obstacle. *Debris-flow Hazards Mitig. Mech. Predict. Assess.* Amer Geophys Union; Assoc Engr Geol; Amer Soc Civi.
- Totschnig, R., Fuchs, S., 2013. Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Eng. Geol.* 155, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.019>
- Totschnig, R., Sedlacek, W., Fuchs, S., 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Nat. Hazards* 58, 681–703. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9623-5>
- Toyos, G., Gunasekera, R., Zanchetta, G., Oppenheimer, C., Sulpizio, R., Favalli, M., Pareschi, M.T., 2008. GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy: II. Velocity and dynamic pressure. *Earth Surf. Process. Landforms J. Br. Geomorphol. Res. Gr.* 33, 1693–1708.
- Trujillo-Vela, M.G., Galindo-Torres, S.A., Zhang, X., Ramos-Cañón, A.M., Escobar-Vargas, J.A., 2020. Smooth particle hydrodynamics and discrete element method coupling scheme for the simulation of debris flows. *Comput. Geotech.* 125, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103669>
- Vázquez, R., Capra, L., Caballero, L., Arámbula-Mendoza, R., Reyes-Dávila, G., 2014. The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcán de Colima, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 272, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.013>
- Wang, D., Chen, Z., He, S., Liu, Y., Tang, H., 2018a. Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments. *Landslides* 15, 1331–1345. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0944-x>
- Wang, D., Chen, Z., He, S., Liu, Y., Tang, H., 2018b. Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments. *Landslides* 15, 1331–

1345. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0944-x>

- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., Blake, D.M., Cole, J.W., 2017. Framework for developing volcanic fragility and vulnerability functions for critical infrastructure. *J. Appl. Volcanol.* 6. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0065-6>
- Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I., Cole, J.W., 2014. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 286, 148–182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5-6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): Relationships to structural damage and hazard zonation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133, 377–393. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00409-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00409-8)
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5 ^ 6 , 1998 volcanoclastic debris £ ows in the Sarno area (Campania , southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation 133, 377–393. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00409-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00409-8)
- Zhang, J., Guo, Z.X., Wang, D., Qian, H., 2016. The quantitative estimation of the vulnerability of brick and concrete wall impacted by an experimental boulder. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 299–309. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-299-2016>
- Zhang, S., Zhang, L., Li, X., Xu, Q., 2018a. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows. *Eng. Geol.* 247, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.017>
- Zhang, S., Zhang, L., Li, X., Xu, Q., 2018b. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows. *Eng. Geol.* 247, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.017>
- Zhao, L., He, J.W., Yu, Z.X., Liu, Y.P., Zhou, Z.H., Chan, S.L., 2020. Coupled numerical simulation of a flexible barrier impacted by debris flow with boulders in front. *Landslides* 17, 2723–2736. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01463-x>
- Zhao, T., Houlsby, G.T., Utili, S., 2014. Investigation of granular batch sedimentation via DEM–CFD coupling. *Granul. Matter* 16, 921–932. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0534-0>

ANNEXE

Annexe 1- Rapport de la mission d'évaluation in situ effectuée à Arequipa en mai 2019

La première semaine, nous avons participé à la réalisation d'enquêtes sur les édifices et auprès des populations qui habitent de part et d'autre sur les rives de deux ravines empruntées par des écoulements (quebrada San Lazaro), dans les deux districts : rive est à Alto Selva Alegre et rive ouest à Miraflores. La deuxième semaine, nous avons poursuivi par des mesures de paramètres de structure sur les bâtiments et les ponts. Notre travail s'est concentré dans la quebrada Huarangal dans les districts de Mariano Melgar (4 jours), et dans la quebrada Venezuela, à Cayma et enfin dans le centre-ville historique d'Arequipa.

Quebrada San Lazaro

La quebrada San Lazaro est une ravine qui prend sa source sur le flanc sud-ouest du volcan el Misti et qui contient des dépôts de lave et des avalanches de débris. Il s'agit de la ravine la plus profonde parmi le réseau du drainage du volcan El Misti qui traversent Arequipa et elle représente le chemin le plus direct entre le volcan et la ville (Figure 57). La rivière a transporté des dépôts de lahar de quelques mètres d'épaisseur et de coulées pyroclastiques de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. L'habitat urbain privé prédomine dans les quartiers de Miraflores et d'Alto Selva Alegre, suivis par les zones commerciales, quelques entrepôts industriels et de petites usines.



Figure 57 : Quebradas San Lazaro (prise sur site)

Quebrada Huarangal

La quebrada Huarangal est une ravine qui prend sa source sur le flanc sud-est d'El Misti (Figure 58). Cette ravine est occupée par des habitations denses dont certaines sont construites dans le chenal ou à proximité (sur la basse terrasse inondable). Elle est l'un des principaux sites qui pourraient être affectés par un futur lahar. Elle contient des dépôts témoignant d'une succession de coulées pyroclastiques et des dépôts de lahars. Les logements urbains privés prédominent et sont suivis par les zones industrielles comme les briqueteries.



Figure 58 : Quebradas Mariano Melgar-Huarangal (prise sur site)

Typologie des bâtiments

Dans cette ville, les matériaux de construction les plus utilisés qui dominent sont la brique et l'ignimbrite (ou *sillar*), puis la maçonnerie (moellons de qualité variable). Les zones d'habitation exposées au risque des écoulements et débordement de lahar regroupent généralement des populations pauvres et les infrastructures sont de mauvaise qualité. La plupart des bâtiments ne sont pas conformes aux codes de construction (qui ne font pas l'objet de vérification sur place), parce que la procédure d'obtention d'un permis de construire est longue et coûteuse. Ainsi, l'auto-construction est favorisée, la construction est faite par l'habitant sans mesures adéquates et sans matériel convenable.

La plupart des maisons d'habitation ne sont pas achevées et demeurent en construction puisque les populations n'ont souvent pas les ressources suffisantes pour poursuivre l'édifice (Figure 59.(a-b)). L'inachèvement des bâtiments pourrait également s'expliquer par une volonté de s'exonérer d'un certain nombre de taxes liés aux biens immobiliers. Par conséquent, la majorité des structures ne serait pas capable de faire face convenablement au risque que représentent les écoulements.

Sur le terrain, dans les deux quebradas (San Lazaro et Huarangal), nous avons réalisé une enquête sur la typologie des bâtiments : géométrie du bâti, matériaux de construction, structure, type de toit et matériau, position par rapport à la rivière et aux écoulements, degré de maintenance... Nous avons mené cette enquête sur 7 blocs dans San Lazaro et 4 blocs dans Huarangal (plus d'une centaine des bâtiments au total). Le Tableau 25 est utilisé pour classer les bâtiments selon une typologie allant de 1 (les moins résistants) à 8 (les plus résistants) en se basant sur le matériau de construction, la structure et le toit.

C'est remarquable dans la ville aussi, que plus on éloigne des quebradas et du volcan plus on pourra trouver des typologies de bâtiment qui représentent les bâtis résistants (Figure 59(c-d)).

Tableau 25 : Types structuraux et classes de vulnérabilité utilisées dans les enquêtes de terrain sur le bâti à Arequipa en collaboration avec PLINIVS Study Center (Thouret et al., 2013, 2014)

Typology Materials, structure, roofs		Class
1	Make-shift housing	A0
1A	Masonry of lapilli concrete with roof made of metal sheet (1 storey)	A0
1B	Masonry of ignimbrite without mortar with roof made of metal sheet (1 storey)	A0
2A	Masonry of terra cotta with roof made of metal sheet (1 storey)	A0
2B	Masonry of ignimbrite with mortar with roof made of metal sheet (1 storey)	A0
3A	Masonry of terra cotta with reinforced concrete roof, with structural deficiencies (1–2 storeys)	A
3B	Masonry of terra cotta with reinforced concrete roof (1–2 storeys)	A
4	Masonry of terra cotta confined in reinforced concrete (RC) frame with RC roof (1–3 storeys)	B
5	Masonry of ignimbrite (1,500) with mortar with masonry vaults: historical building (1–2 storeys)	A
6A	Masonry of ignimbrite (1,500) modified with RC elements and raisings of type 3 (2–3 storeys)	B
6B	Masonry of ignimbrite (1,500) modified with RC elements and raisings of type 8 (2–5 storeys)	B
6C	Masonry of ignimbrite (1,900) modified with RC elements (2–3 storeys)	B
7	RC buildings without seismic design with RC flat roofs (2–4 storeys)	C
8A	New RC buildings with RC pitched roofs (1–2 storeys)	D
8B	New RC buildings with RC flat roofs (3–8 storeys)	D
8C	Buildings with RC walls and RC flat roofs (in the historical center)	D



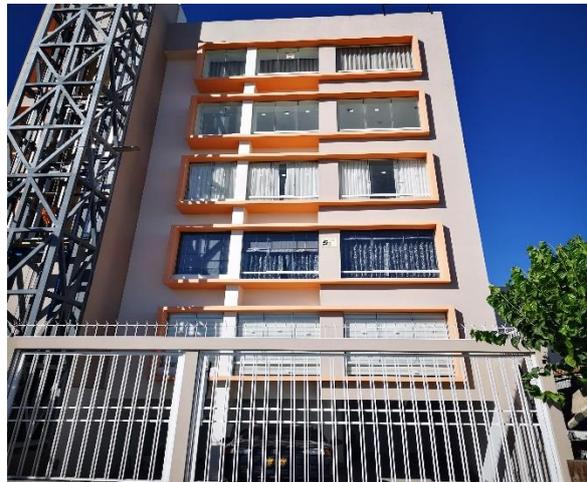
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 59 : différentes typologies dans la ville d'Arequipa (prise sur site)

Mesure des paramètres de structure

Des mesures de paramètres mécaniques du bâti (matériau de construction) et des ponts (béton armé) ont été réalisées : la résistance du matériau à la compression R et le module de Young E . Les structures mesurées sont des bâtiments de différents types et des ponts dans des différents quebradas. Les appareils utilisés pour nos mesures sont :

- *Scléromètre classique* : le mesureur de dureté de maniement facile s'utilise fondamentalement dans le domaine des matériaux de construction. Au moins 10 mesures sont

réalisées pour obtenir la valeur moyenne de l'indice de rebondissement R, puis la résistance à la pression (N/mm^2) est calculée à partir d'un graphe.

- Un scléromètre *Schmidt OS-120* est utilisé pour mesurer la résistance à la compression précoce du béton ou des matériaux à faible résistance à la compression et de manière non destructive.

- *Pundit Pl-200 proceq* : cet appareil comprend un écran tactile, 2 transducteurs de 54 KHz, 2 câbles BNC de 1.5 m, couplant une barre de calibration, un câble adaptateur, un chargeur de batterie, USB, DVD avec logiciel et documentation. C'est une méthode ultrasonique d'essai non destructif qui mesure directement la résistance à l'écrasement, le module de Young, la vitesse de surface...

A partir de ces appareils, on a pratiqué des mesures de R et de E pour plusieurs structures (bâtiments et ponts) et dans plusieurs endroits. Voici quelques exemples :



Mesure Brique isolé le pundit



Carrière Igimbrite (scléromètre)



Mesure de pont 8 octobre par le scléromètre.



Mesure d'un colonne BA avec Schmidt

Figure 60 : Exemples de mesures de structure faites à Arequipa

La mesure de la résistance à la compression R (MPa) a été effectuée à l'aide de 3 appareils : le scléromètre classique, le scléromètre Schmidt et le Pundit. Le module de Young E (GPa) a été mesuré par le Pundit directement.

Après avoir calculé les mesures (R et E) au moyen de différents appareils, on a pu rédiger une synthèse des mesures de la résistance par matériaux. On obtient l'ordre de grandeur de la résistance de chaque matériau de construction utilisé dans cette ville (Tableau 26). Ces ordres de grandeur pourront être utilisés plus tard pour une partie plus détaillée concernant la modélisation des structures et aussi pour évaluer sa vulnérabilité après l'interaction entre l'écoulement et la structure de matériau donné.

Tableau 26 : Synthèse des mesures par matériaux (R : résistance à la compression/ E: module de Young)

Matériaux	Résistance (Min/Max) (Mpa)	R moyenne/Ecart type (Mpa)	E moyenne/Ecart type (Gpa)
Poutre-Pont BA	15-45	38.5/9.6	10.01/2.2
Pilier-Pont BA	38.4-64.1	51.25/18.1	1.12/0.5
Voile intérieur-pont BA	28.2-45	37.62/6.5	7.52/8.5
Voile extérieur-pont BA	25-47.9	29.28/7.4	6.57/6.26
Tablier-Pont BA	27.8-52	36.4/10.7	1.2/-
Tablier caisson BP	17.3-53.2	35.25/25.4	16.47/-
Mur culé-Pont	54.1-56	55/1.34	20.84/-
Colonne Béton A	10.0-42	22.33/9.1	7.8/2.3
Joint	2.2-18.6	9/4.7	8.82/-
Brique king kong	14-42.5	25.89/10.4	3.6/2.16
Brique Pandereta	6.8-16.8	11/3.7	4.71/3.8
Brique Medio Piso	10.6	10.55/0.07	3.73/-
Brique pleine	4.2-14.8	10.0/6.7	3.53/-
Sillar mauvais	7.1-20	15.7/7.2	3.9/0.5
Sillar rose	15.6-24.3	18.8/4.52	4.93/-
Sillar historique	18;36-26.2	23.5/3.81	13.14/3.3
Sillar aeroport	25.2	19.6/7.8	8.19/-
Bloqueta	10.6-19.6	11.3/0.9	6.34/4.24

On remarque qu'une différence existe dans les résultats de la mesure de la résistance obtenue avec les 3 appareils et notamment avec le Pundit qui donne des valeurs généralement plus faibles. Plusieurs facteurs expliquent cette différence : l'état de surface du matériau (lisse ou rugueux), l'âge du matériau, la géométrie de la structure, les transducteurs utilisés qui donnent de meilleurs résultats pour le béton présentant un état de surface lisse, le gel de contact (utilisé avec le Pundit) qui influence également les résultats ...

Cette expérience a permis d'observer les dépôts des écoulements de lahar et hyperconcentrés, des « quebradas » et des structures locales et de recueillir des données in situ pour obtenir des ordres de grandeur, pour avoir une idée sur les ordres de grandeurs, la qualité des matériaux de construction et les utiliser dans les prochains modèles numériques surtout en vue de détailler la partie « modélisation des structures ».