



Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Modélisation numérique et prédiction du rebond dans les bétons projetés

Travail de fin d'études réalisé par

TROQUAY Julien

en vue de l'obtention du grade de master *Ingénieur Civil des Constructions*, à finalité spécialisée en *civil engineering*

Promoteur :
M. COURARD Luc (ULiège)

Co-Promoteurs :
M. JOLIN Marc (ULaval)
M. BISSONNETTE Benoît (ULaval)

Lecteur :
M. FRANÇOIS Bertrand (ULiège)

Année académique 2023 - 2024

Résumé

La compréhension et l'optimisation des phénomènes de rebond sont capitales dans l'industrie du béton projeté, en particulier en voie sèche où les pertes par rebond peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à 30%. Une découverte récente pose l'hypothèse qu'une couche *fluide* est activée sur une certaine épaisseur du substrat par l'impact régulier des particules du jet de béton projeté par voie sèche. Ce n'est que quelques années plus tard que cette couche *fluide* a enfin été observée et validée au laboratoire de l'Université Laval grâce à un nouvel essai de pénétration dynamique consistant à projeter une bille en acier sur le substrat : la *catapulte*.

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à développer un modèle numérique représentant l'essai de la *catapulte*. Ce modèle a pour but principal de caractériser les propriétés des couches *fluide* et élasto-plastique du substrat, de déterminer l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche *fluide* et d'explorer les conséquences de la prise en compte d'un angle d'incidence de la bille. Le développement de ce modèle est rendu possible par l'utilisation du logiciel de calcul aux éléments finis ABAQUS.

Le développement du modèle numérique a permis de mettre en évidence des résultats très encourageants, insistant sur la nécessité d'explorer encore plus en détails la modélisation de ces phénomènes de rebond dans les bétons projetés. Au niveau des résultats probants, une combinaison module de Young - limite d'élasticité de faibles valeurs a pu être trouvée pour représenter la couche *fluide* et le modèle a mis en évidence l'effet négatif d'un angle d'incidence sur le rebond d'une particule : la dissipation de l'énergie cinétique de la particule en énergie de déformation du substrat. En effet, la perte d'énergie qui pourrait se produire par la création d'un angle relativement faible lors d'une projection à la main peut atteindre 50%. L'automatisation de la mise en place par l'utilisation d'un robot et d'une trajectoire bien définie permet de diminuer le rebond de 50% par rapport à une projection réalisée par un lancier.

Mots-clés : Modélisation numérique, ABAQUS, béton projeté, procédé par voie sèche, rebond, rhéologie, couche *fluide*, épaisseur, couche élasto-plastique, substrat, contrainte de pénétration dynamique, angle d'incidence, profondeur de pénétration, fréquence énergétique critique, module de Young, limite d'élasticité.

Abstract

Understanding and optimizing rebound phenomena is of vital importance in the shotcrete industry, particularly for the dry process where rebound losses can reach values of up to 30%. A recent discovery hypothesizes that a *fluid* layer is activated over a certain substrate thickness by the regular impact of particles from the dry shotcrete spray. It was only a few years later that this *fluid* layer was finally observed and validated in the Laval University laboratory, thanks to a new dynamic penetration test involving the projection of a steel ball onto the substrate : the *catapult*.

The main objective of this research work is to develop a numerical model representing the *catapult* test. The main aim of this model is to characterize the properties of the *fluid* and elasto-plastic layers of the substrate, to determine the influence of varying the thickness of the *fluid* layer, and to explore the consequences of an angle of incidence of the ball. The development of this model is made possible by the use of ABAQUS finite element software.

Development of the numerical model has produced some very encouraging results, highlighting the need to explore the modelling of rebound phenomena in shotcrete in even greater detail. In terms of convincing results, a combination of low Young's modulus and yield strength values was found to represent the *fluid* layer and the model highlighted the negative effect of an angle of incidence on the rebound of a particle : the dissipation of the particle's kinetic energy into substrate deformation energy. Indeed, the loss of energy that could occur through the creation of a relatively small angle during a handheld projection can be as high as 50%. By automating placement using a robot and a well-defined trajectory, rebound can be reduced by 50% compared with projection by a nozzleman.

Keywords : Numerical modeling, ABAQUS, shotcrete, sprayed concrete, dry-mix process, rebound, rheology, *fluid* layer, depth, elasto-plastic layer, substrate, dynamic contact stress, incidence angle, penetration depth, critical energy frequency, Young's modulus, yield strength.

Remerciements

Ce mémoire marque l'aboutissement de cinq années d'études et constitue une étape cruciale dans ma transition vers le monde professionnel. Il est le fruit de l'accumulation de nombreux savoirs et compétences acquis durant mon parcours académique. Je tiens à exprimer ma gratitude envers tous les professeurs, les membres du corps académique et les camarades de classe qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail.

D'abord, je souhaite remercier mon promoteur, Monsieur Luc Courard, pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un séjour de recherche à Québec ainsi que pour ses précieux conseils, ses multiples relectures et son investissement dans mon travail.

Dans la même lignée, je remercie Messieurs Marc Jolin et Benoît Bissonnette de l'Université Laval, mes co-promoteurs. D'une part, mes remerciements les plus sincères vont à Marc Jolin pour m'avoir intégré et accueilli dans son équipe de recherche, pour son soutien et sa disponibilité, même dans les derniers instants. Sans ses conseils et son expertise reconnue dans le domaine du béton projeté, il m'aurait été impossible de réaliser ce travail. D'autre part, un grand merci à Benoit Bissonnette, pour son aide dans les démarches administratives ayant rendu possible ce stage de recherche et pour sa bienveillance tout au long de celui-ci.

J'aimerais également adresser mes remerciements à mes collègues de bureau qui ont rendu cette expérience canadienne enrichissante et amusante. Je remercie particulièrement Jong-Beom, pour son accompagnement quotidien tout au long de mon stage de recherche et pour sa précieuse aide et Jean-Benoît Darveau, pour sa bienveillance et sa présence si sympathique du premier au dernier jour. Je tiens aussi à remercier Achraf pour son aide précieuse lors de la prise en main du logiciel de modélisation aux éléments finis.

J'aimerais également remercier Monsieur Bertrand François, mon lecteur, pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.

Enfin, je tiens à remercier mes parents, mon frère et ma sœur, ma compagne et mes amis pour leur confiance, leur soutien et leurs encouragements tout au long de mes études et pendant la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

Résumé i

Abstract ii

Remerciements iii

Table des matières vi

Liste des tableaux viii

Liste des figures xi

Liste des abréviations xii

1 Introduction 1

2 État de l'art 4

2.1 Introduction 4

2.1.1 Origine et définition du béton projeté 4

2.1.2 Techniques de projection 5

2.1.3 Applications et compositions typiques de béton projeté 7

2.2 Phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés par voie sèche . 9

2.2.1 Définitions du substrat et du rebond 9

2.2.2 Modèle physique du rebond à l'échelle d'une particule 11

2.2.3 Études à l'échelle du jet de béton projeté 15

2.2.4 Paramètres influençant le rebond en béton projeté par voie sèche . . . 19

2.3 Propriétés à l'état frais du béton projeté par voie sèche 22

2.3.1 Introduction 22

2.3.2 Consistance du substrat 22

2.3.3 Comportement *rhéologique* du substrat pendant la projection 23

2.4 Mesures des propriétés à l'état frais du substrat de béton projeté par voie sèche 29

2.4.1 Introduction . . . 29
2.4.2 Essai de pénétration statique . . . 30
2.4.3 Essais de pénétration dynamique conventionnels . . . 31
2.4.4 Nouvel essai de pénétration dynamique : la *catapulte* . . . 33
2.4.5 Validation de l'hypothèse de couche *fluide* grâce à la *catapulte* . . . 35
2.5 Modèles analytiques de prédiction du rebond . . . 37
2.5.1 Introduction . . . 37
2.5.2 Théorie à l'échelle d'une particule . . . 37
2.5.3 Théorie à l'échelle du jet . . . 38
2.6 Modélisation numérique . . . 40
2.6.1 Introduction . . . 40
2.6.2 Objectifs du modèle d'Armengaud . . . 40
2.6.3 Résultats obtenus . . . 42
2.6.4 Conclusion . . . 42

3 Méthodologie **43**
3.1 Développement des objectifs . . . 43
3.2 Développement du modèle numérique . . . 44
3.2.1 Clarification sur le substrat et limites principales du modèle . . . 44
3.2.2 Étape n°1 : tir d'une bille sur le substrat de béton frais à 90° . . . 47
3.2.3 Étape n°2 : influence de l'angle d'incidence d'une bille sur le substrat . 55
3.2.4 Étape n°3 : influence de l'épaisseur de la couche *fluide* . . . 57
3.3 Cas particuliers . . . 59
3.3.1 Influence de la taille de la bille . . . 59
3.3.2 Influence de la vitesse de la bille . . . 59

4 Résultats et analyse **60**
4.1 Mesures numériques des paramètres . . . 60
4.2 Développement du modèle numérique . . . 60
4.2.1 Étape n°1 : tir d'une bille sur le substrat de béton frais à 90° . . . 60
4.2.2 Étape n°2 : influence de l'angle d'incidence d'une bille sur le substrat . 73
4.2.3 Étape n°3 : influence de l'épaisseur de la couche *fluide* . . . 80
4.3 Cas particuliers . . . 88
4.3.1 Influence de la taille de la bille . . . 89
4.3.2 Influence de la vitesse de la bille . . . 92

5 Conclusion **96**
5.1 Conclusions générales 96
5.2 Limites du modèle numérique 98
5.2.1 Limites liées au comportement du béton projeté par voie sèche 98
5.2.2 Limites fondamentales du logiciel de modélisation numérique 98
5.3 Perspectives 99
5.3.1 Pistes d'améliorations du modèle numérique 99
5.3.2 Introduction de fibres dans le modèle 100

Bibliographie **101**

Annexes **105**

A Distributions du flux massique pour le béton projeté par voie humide **105**

B Résultats numériques **106**

C Fiche technique d'un mélange de béton projeté pour applications par voie sèche **129**

Liste des tableaux

2.1 Avantages de chaque technique de projection (ACI PRC-506-22, 2022) 7
2.2 Paramètres techniques influençant le rebond (Armengaud, 2016) 20
2.3 Trajectoires de projection et rebond associé 28
2.4 Mesures de la vitesse d'une bille (Kim et al., 2024) 34
2.5 Propriétés du substrat utilisées par Laradh (2020) 39

3.1 Propriétés de la bille 47
3.2 Propriétés du substrat 48
3.3 Variation de l'angle de tir de la bille 55
3.4 Position verticale de la bille en fonction de l'angle de tir 55
3.5 Vitesses selon z et y en fonction de l'angle d'incidence 56

4.1 Propriétés mécaniques de la CE pour les différentes combinaisons 63
4.2 Déplacement maximal de la CE et contrainte de pénétration dynamique pour les différentes combinaisons 63
4.3 Propriétés de la bille 64
4.4 Propriétés "mécaniques" de la CF pour les différentes combinaisons 72
4.5 Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour les différentes combinaisons 73
4.6 Déplacement maximal des CF et CE pour les différents angles 78
4.7 Dissipation d'énergie cinétique de la bille associée au déplacement du substrat pour différentes valeurs d'angle d'incidence 80
4.8 Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour une CF de 27 mm d'épaisseur 82
4.9 Déplacement maximal des CF et CE pour une CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaisons non valides 83
4.10 Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour une CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaisons valides 88
4.11 Déplacements des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique en fonction du diamètre de la bille 91
4.12 Déplacement de la CE et contrainte de pénétration dynamique en fonction de la vitesse de la bille 95

5.1 Propriétés mécaniques satisfaisantes des différentes couches 96

Liste des figures

2.1 Carl Ethan Akeley 5

2.2 Canon à double chambre *Cement Gun* inventé par Carl E. Akeley en 1907 . . . 5

2.3 Équipement en béton projeté par voie humide (tiré de Paquet, 2021) 6

2.4 Équipement en béton projeté par voie sèche selon le type de lance : courte à gauche et longue à droite (tiré de Paquet, 2021) 6

2.5 Mise en place du substrat de béton projeté par voie sèche (tiré de Cimbéton, 2019) 10

2.6 Rebond des granulats (gauche) et Évolution du rebond instantané à partir d'une surface de projection vide (droite) (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Parker, 1977) 11

2.7 Phase de pénétration (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Armelin, 1997) 12

2.8 Étapes de la pénétration d'une particule dans le substrat de béton projeté frais (tiré de Gagnon, 2017 ; adapté de Jolin, 1999) 14

2.9 Profils de vitesse du jet de béton projeté en fonction de la distance "x" par rapport à la sortie de la lance (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Ginouse, 2014) 16

2.10 Limites du jet en fonction du type de lance utilisée (tiré de Siccardi, 2018 ; adapté de Ginouse, 2014) 17

2.11 Distributions de flux massique normalisés en voie sèche pour les lances DB (à gauche) et Spirolet (à droite) (tiré de Siccardi, 2018 ; Bérubé, 2018) 17

2.12 Distributions d'énergie dans le jet pour différents types de lances et de consistances en voie sèche (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Laradh, 2020) . . 18

2.13 Évolution du rebond en fonction de l'angle d'inclinaison de la lance (tiré de Armengaud, 2016 ; Puri & Uomoto, 1999) 20

2.14 Évolution de la probabilité de rebond en fonction de la taille des granulats (tiré de Armengaud, 2016 ; Armelin, 1997) 21

2.15 Modèle rhéologique de Bingham (tiré de Armengaud, 2016) 24

2.16 Schéma des différentes couches du substrat de béton frais (tiré de Paquet, 2021) 26

2.17 Vue de face des différentes couches du substrat et distribution simplifiée des fréquences énergétiques d'un jet fixe (tiré de Paquet, 2021) 27

2.18 Étendue de la CF en fonction de différentes distributions de fréquence énergétique des particules d'un jet fixe (tiré de Paquet, 2021) 27

2.19 Trajectoire planétaire (tiré de Paquet, 2021) 28
2.20 Schéma d'un pénétromètre statique électronique et d'un graphique d'acquisition typique pour la mesure de p_s (tiré de Paquet, 2021 ; adapté de Armelin, 1997) 30
2.21 Évolution du rebond en fonction de p_d (gauche) et p_s (droite) pour 2 mélanges différents (tiré de Jolin, 1999) 33
2.22 *Catapulte* fixée à un bras robotisé au laboratoire de béton projeté de l'Université Laval (Kim et al., 2024) 34
2.23 Profondeurs de pénétration finales de billes projetées à différents instants après la projection (Kim et al., 2024) 35
2.24 Valeurs de p_d à différents instants pour plusieurs mélanges à différentes consistances (Kim et al., 2024) 36
2.25 Étapes du modèle de prédiction du rebond de Laradh (tiré de Laradh, 2020) . . 39
2.26 Modèle aux éléments finis représentant le substrat de béton projeté (en bleu) et les essais de pénétration statique et dynamique (tiré de Armengaud, 2016) . 41
2.27 Paramètres d'entrée du modèle (tiré de Armengaud, 2016) 41
2.28 p_d en fonction de E 42
2.29 p_d en fonction de f_y 42

3.1 Représentation réelle et idéale du substrat 46
3.2 Maillage de la bille 48
3.3 Modélisation du substrat avec distinction entre les différentes couches (*fluide* en rouge et élasto-plastique en bleu) 49
3.4 Épaisseur de la CF dans le substrat - Vue latérale 50
3.5 Épaisseur de la CE dans le substrat - Vue latérale 50
3.6 Conditions limites et vitesse de la bille 51
3.7 Maillage du substrat 52
3.8 Substrat entièrement élasto-plastique 53
3.9 Substrat entièrement élasto-plastique - Vue latérale 54
3.10 Schéma d'une bille placée à 90° et à 30° 56
3.11 Représentation des vitesses pour un angle de 30° 57
3.12 Vue latérale de la CF de 27 mm d'épaisseur 58
3.13 Vue latérale de la CF de 6,75 mm d'épaisseur 58

4.1 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - Combinaison A 61
4.2 Déplacement maximal des nœuds de la CE - Combinaison A 62
4.3 Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison A . . . 62
4.4 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 1 66

4.5 Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 1 66
4.6 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 1 . . . 67
4.7 Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison 1 . . . 67
4.8 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 2 . . . 68
4.9 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 3 69
4.10 Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 3 70
4.11 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 3 . . . 70
4.12 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 4 71
4.13 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 4 . . . 72
4.14 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 75° 75
4.15 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 75° 76
4.16 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 45° 77
4.17 Déplacement maximal des nœuds de la CF - 45° 77
4.18 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 45° 78
4.19 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 27 mm d'épaisseur 81
4.20 Déplacement maximal des nœuds de la CF de 27 mm d'épaisseur 82
4.21 Déplacement des nœuds de la CF de 27 mm d'épaisseur en fonction du temps . 82
4.22 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 1 85
4.23 Déplacement des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur en fonction du temps - Combinaison 1 86
4.24 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 3 87
4.25 Déplacement maximal des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 3 87
4.26 Déplacement des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur en fonction du temps - Combinaison 3 88
4.27 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 10 mm de diamètre . 90
4.28 Déplacement maximal des nœuds de la CF - 5 mm de diamètre 90
4.29 Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 5 mm de diamètre . . 91
4.30 Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 5 m/s 92
4.31 Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - 20 m/s 93
4.32 Déplacement maximal des nœuds de la CE - 20 m/s 93
4.33 Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 20 m/s 94
4.34 Déplacement maximal des nœuds de la CE - 30 m/s 94

Liste des abréviations

CF Couche *fluide*
CE Couche élasto-plastique
C1 Combinaison 1
C2 Combinaison 2
C3 Combinaison 3
C4 Combinaison 4

Chapitre 1

Introduction

Contextualisation

À l'heure actuelle, le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde à hauteur de 150 tonnes par seconde. D'ailleurs, l'industrie du béton et principalement celle du ciment sont responsables d'environ 7 à 8% des émissions globales de gaz à effet de serre (Fleury, 2023) ; leur rôle dans la transition environnementale est donc d'une importance capitale.

Dans ce sens, les bétons projetés ne constituent pas une exception et présentent une problématique supplémentaire par rapport aux bétons conventionnels coulés : le rebond. La spécificité du procédé de mise en place des bétons projetés (Section 2.1) entraîne une perte de matériaux causée par les phénomènes de rebond des particules (Section 2.2.1). Cette perte doit inévitablement être minimisée pour diminuer l'empreinte environnementale liée à l'utilisation du béton projeté. Outre ces considérations, Gagnon (2017) soulève trois autres raisons justifiant l'optimisation du rebond dans les bétons projetés :

- **La perte d'efficacité et de ressources** : les pertes peuvent se situer entre 10% et 30% des ressources initiales.
- **La sécurité et la santé du lancier** : le rebond génère beaucoup de poussière dans un espace de travail souvent confiné.
- **La perte économique** : la perte associée au matériau a également une conséquence économique.

Depuis plus de 15 ans au laboratoire de béton projeté de l'Université Laval, l'équipe de recherche, sous la direction de Marc Jolin, tente de mieux comprendre et d'optimiser ce procédé de mise en place ayant pour objectif ultime la réduction maximale du rebond. Ce projet de recherche de longue haleine s'articule autour de trois axes principaux d'optimisation :

1. La **meilleure compréhension des phénomènes de rebond** à l'échelle d'une particule et à l'échelle du jet.
2. L' **automatisation** de la mise en place à l'aide d'un robot.
3. La connaissance **des propriétés *rhéologiques* du substrat** de béton projeté **pendant la mise en place**.

Tout d'abord, le premier axe d'optimisation sera développé dans l'état de l'art (Section 2.2).

Le deuxième axe a vu le jour avec le projet SPARO (*Shotcrete Placement Automation by Robot*), visant à automatiser le procédé par voie sèche avec un bras robotisé (Schaeffer, 2023). En effet, la qualité de la mise en place et le rebond sont dépendants de l'expérience du lancier. L'élimination du facteur humain permet de réduire le rebond de manière encore plus accrue. Cet axe ne constitue cependant pas la priorité de ce travail de recherche.

Le dernier axe est celui qui est en lien direct avec ce mémoire. Il sera développé plus en détails aux Sections 2.3 et 2.4 de l'état de l'art. La modélisation numérique s'inscrit directement dans la lignée de ce troisième axe de recherche et constitue une perspective intéressante pour améliorer la compréhension des phénomènes de rebond des particules et pour étudier l'influence d'une variété de paramètres sur le rebond, tel que l'angle de projection.

Par conséquent, les objectifs qui vont suivre s'inscrivent dans la continuité d'un projet de grande ampleur visant à réduire au maximum les pertes par rebond dans les bétons projetés. Cette étude revêt également un caractère exploratoire pour la littérature et se veut principalement phénoménologique. La courte période allouée à ce travail permet de poser les bases d'un modèle numérique visant à représenter une situation simplifiée et permettant la validation de quelques éléments choisis avec soin. Cette validation permettra de statuer sur l'intérêt de poursuivre les efforts en matière de modélisation numérique des phénomènes de rebond des particules. En fonction de cette conclusion et malgré la représentation d'une situation simplifiée, le modèle se voudra adaptable afin de traiter diverses situations qui s'éloignent de la situation de base. Un objectif secondaire de ce modèle est également sa transmission à un candidat au doctorat pour la suite de sa recherche.

Objectifs

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'améliorer la compréhension des phénomènes de rebond des bétons projetés par voie sèche. Pour atteindre cet objectif, un logiciel de calcul aux éléments finis, ABAQUS, est utilisé comme levier pour l'exploration, la compréhension et la validation d'observations expérimentales.

Les objectifs spécifiques de ce mémoire peuvent être classés en deux axes de recherche :

1. Évaluer l'efficacité d'un outil de modélisation numérique pour mieux comprendre les phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés.
2. Étendre ce modèle à des cas plus complexes en jouant sur l'angle d'incidence des particules, l'épaisseur de la couche *fluide* ainsi que la taille et la vitesse des particules.

Ces objectifs seront développés plus en détails au début du Chapitre 3.

Il est également important de mentionner les objectifs secondaires de cette étude :

- S'intégrer dans un environnement de recherche et d'application pratique.
- Participer à des réunions hebdomadaires avec l'équipe de recherche travaillant sur le sujet du béton projeté, ainsi que planifier les activités au laboratoire.
- Comprendre et appliquer les concepts entourant la théorie des bétons projetés, en particulier la théorie du béton projeté par voie sèche.
- S'informer sur les recherches les plus récentes et être capable de les analyser et de les évaluer sur base des connaissances acquises.
- Découvrir et apprendre à utiliser un nouveau logiciel de calcul aux éléments finis en peu de temps.
- Faire preuve d'initiative afin de faire évoluer le sujet de recherche tout au long du stage de recherche.
- Apporter de l'aide aux autres étudiants à la maîtrise, que ce soit au laboratoire ou au bureau.
- Participer aux efforts de recherche d'un candidat au doctorat, en échangeant de manière quotidienne sur l'évolution du projet et les perspectives à entrevoir.
- Transmettre et former le candidat au doctorat à l'utilisation du modèle numérique développé dans le cadre de ce travail.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Introduction

Le béton projeté est un procédé de mise en place du béton tout à fait complexe. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de rappeler l'état actuel des connaissances de manière assez approfondie.

2.1.1 Origine et définition du béton projeté

Le béton projeté fit son apparition aux États-Unis en 1907 sous l'impulsion de l'américain Carl Ethan Akeley, naturaliste et taxidermiste au *Field Museum of Natural History* de Chicago. Ce dernier mit au point une machine, appelée le *Plastergun*, afin de réparer la façade endommagée du musée à l'aide de plâtre. Ce canon fonctionnant selon le principe de la double chambre consistait en la projection pneumatique de poudre de plâtre dans une conduite à air comprimé, avec ajout d'eau à la lance. Le *Plastergun* est l'ancêtre du canon à béton projeté et, à l'époque, un simple mortier (*Gunite*) constitué de sable et de ciment était utilisé. En 1911, Carl Akeley fit breveter son *Plastergun* sous le nom de *Cement Gun* et se fera racheter les droits par la *Cement Gun Company*, une firme d'ingénierie, en 1912 (Jolin, 2016 ; Morgan & Bernard, 2017 ; Teichert, 2002). Tout d'abord, le béton projeté fut principalement utilisé pour protéger les charpentes en acier contre le feu et la corrosion, avant de s'étendre à d'autres domaines du génie civil tels que la réparation de bâtiments et d'ouvrages d'art, la construction de tunnels ou de barrages, ou encore de réservoirs d'eau (Jolin, 2016 ; Yoggy, 2000). Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale, avec l'arrivée de nouveaux appareils de projection, que le mélange a évolué. Ces nouveaux équipements permettaient d'introduire des granulats grossiers dans le mélange passant du simple mortier au béton et menant à la naissance du béton projeté tel qu'on le connaît à l'heure actuelle (Jolin, 2016 ; Yoggy, 2001).



FIGURE 2.1 – Carl Ethan Akeley

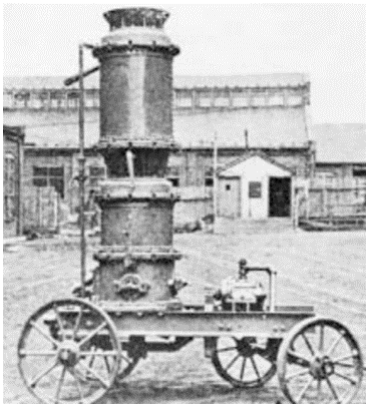


FIGURE 2.2 – Canon à double chambre *Cement Gun* inventé par Carl E. Akeley en 1907

L'*American Concrete Institute* (ACI) définit le béton projeté comme étant un : « procédé de mise en place du béton dans lequel le mélange est transporté à travers une conduite et est pneumatiquement projeté à haute vitesse sur une surface réceptrice afin d'obtenir le compactage du matériau en place » (ACI PRC-506-22, 2022 ; Gagnon & Siccardi, n.d.). Le terme *haute vitesse* a ici toute son importance, car il implique que cette vitesse est suffisante pour assurer un compactage approprié du matériau en place (Jolin, 1999).

Un des avantages majeurs du béton projeté est l'absence de coffrage qui permet une mise en œuvre d'une rapidité exceptionnelle et un gain économique important. De plus, ce procédé offre une meilleure accessibilité à des zones difficiles d'accès. Cependant, la qualité de la mise en place dépend fortement du lancier et de son expérience et est accompagnée de pertes par rebond pouvant atteindre 25 à 30% pour le procédé par voie sèche (Jolin et al., 2016).

2.1.2 Techniques de projection

Il existe actuellement deux grandes techniques de projection du béton : la voie humide et la voie sèche. La différence principale entre les deux techniques réside dans la position de l'introduction de l'eau de gâchage dans le circuit de mise en œuvre (Courard, 2008).

2.1.2.1 Voie humide

La consistance plus humide du béton projeté par voie humide et sa force de projection moins importante qu'en voie sèche lui confèrent une plus grande propension à capturer les granulats arrivant sur le substrat en place. Cette technique possède donc un rebond naturellement moindre. La consistance est définie comme : « la mobilité ou l'habilité du béton frais à s'écouler » (Jolin et al., 2016). L'équipement requis pour la voie humide est illustré à la FIGURE 2.3.

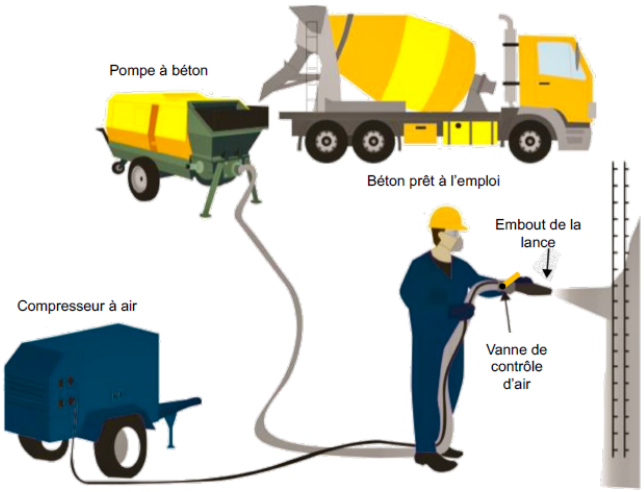


FIGURE 2.3 – Équipement en béton projeté par voie humide (tiré de Paquet, 2021)

Pour cette technique, un mélange de béton frais (granulats, sable, ciment et eau) tout droit sorti d'un camion toupie est inséré dans la machine de projection. Cela veut donc dire que la totalité de l'eau a déjà été introduite au mélange lors du malaxage. Ce mélange est ensuite pompé dans une conduite et accéléré de manière pneumatique au niveau de la lance afin d'obtenir une vitesse suffisante pour obtenir le compactage adéquat du matériau en place (Jolin et al., 2016).

2.1.2.2 Voie sèche

La deuxième technique de projection et celle qui retiendra notre attention pour la suite de ce mémoire est le béton projeté par voie sèche. Un aperçu de l'équipement nécessaire en voie sèche est illustré à la FIGURE 2.4.

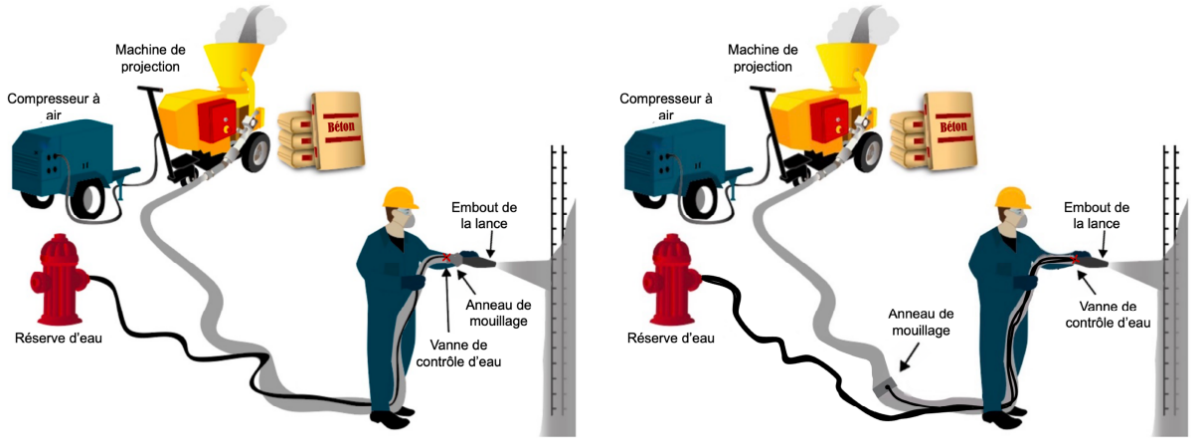


FIGURE 2.4 – Équipement en béton projeté par voie sèche selon le type de lance : courte à gauche et longue à droite (tiré de Paquet, 2021)

Contrairement à la technique précédente, l'eau est ici introduite au niveau de la lance par le lancier et, plus particulièrement, au niveau de l'anneau de mouillage. Ce n'est plus un béton prêt à l'emploi qui est introduit dans la machine de projection mais un mélange composé de matériaux secs (ciment, sable et granulats). Ensuite, ce mélange sec est transporté pneumatiquement dans une conduite jusqu'à la lance, où l'eau et d'éventuels adjuvants liquides sont rajoutés. Comme défini plus haut, le mélange est ensuite projeté à haute vitesse sur la surface afin d'obtenir le compactage désiré. Là où le malaxage avait lieu sur un laps de temps plus long dans le camion toupie pour la méthode par voie humide, il n'a ici lieu que sur une courte distance et pendant un court instant dans la lance et ensuite sur la surface de projection. La nature de la technique permet d'expliquer l'importance des pertes par rebond dans les bétons projetés par voie sèche (ACI PRC-506-22, 2022 ; Jolin et al., 2016).

2.1.2.3 Comparaison des techniques

Le Tableau 2.1 permet de comparer et d'établir une liste plus détaillée des avantages de chaque technique de projection.

Tableau 2.1 – Avantages de chaque technique de projection (ACI PRC-506-22, 2022)

Voie sèche	Voie humide
Contrôle instantané de l'eau et de la consistance du mélange au niveau de la lance pour répondre aux conditions variables du terrain.	Contrôle de l'eau de mélange au niveau de l'équipement de mélange, qui peut être mesurée avec précision.
Mieux adapté à la mise en place de mélanges contenant des granulats légers ou des matériaux réfractaires.	Meilleure garantie que l'eau de gâchage est bien mélangée aux autres ingrédients.
Tuyaux d'alimentation (boyaux) plus faciles à manipuler, plus légers.	Moins de poussière, de bruit et de matériaux perdus lors de l'opération de tir.
Bien adapté aux conditions dans lesquelles le moment de la mise en place du béton projeté ne peut être prédit ou est intermittent.	Moins de rebond, ce qui réduit les déchets.
	Meilleure homogénéité du béton en place.

2.1.3 Applications et compositions typiques de béton projeté

Outre les avantages en termes de coffrage, de rapidité et d'accessibilité, cette section vise à présenter les avantages et inconvénients de ce procédé de mise en place du béton dans les nouvelles constructions et en réparation d'ouvrages.

2.1.3.1 Nouvelles constructions

Tout d'abord, un béton projeté de bonne qualité doit posséder une grande résistance à la compression et offrir une bonne protection contre la corrosion des aciers d'armature, qui se traduit par une faible perméabilité (Courard, 2008).

Voie sèche

La voie sèche est la plus adaptée pour la réalisation de surfaces en surplomb, comme des plafonds ou des voûtes de mines et tunnels, grâce à sa grande force de projection rendue possible par la vitesse importante du jet en sortie de lance. Une liste non exhaustive des applications typiquement rencontrées en voie sèche est présentée ci-dessous :

- revêtements de parois de tunnels et de mines,
- piscines et toutes autres constructions en béton de ce genre,
- stabilisation de pentes.

En voie sèche, voici un exemple d'une composition typique en volume (Courard, 2008) :

- liant : 20-25%,
- rapport eau/ciment : 0,35 à 0,43,
- sable : 45-80%,
- pierre : 0-30%,
- fumée de silice : 8-10% du liant.

Les bétons projetés par voie sèche possèdent souvent des propriétés mécaniques plus élevées qu'en voie humide grâce à leur rapport eau/ciment plus faible (Courard, 2008).
Pour information, la fiche technique d'un mélange de béton projeté par voie sèche typiquement utilisé au laboratoire de l'Université Laval et dans l'industrie est présentée à l'Annexe C.

Voie humide

En voie humide, la réalisation de surfaces horizontales (projection vers le bas) et de surfaces verticales de grandes dimensions comme des murs ou des voiles seront préférées, notamment en raison des faibles pertes par rebond. La voie humide permet l'emploi d'un béton conventionnel avec un affaissement le plus faible possible, tout en permettant le pompage (Courard, 2008) :

- rapport eau/ciment maximal : 0,45,
- teneur en ciment d'environ 450 kg/m^3,
- air entraîné : 8 à 10%.

2.1.3.2 Réparation et entretien

En réparation, un béton projeté de bonne qualité doit offrir une bonne adhérence avec l'ancien béton. Pour cette raison, le béton projeté par voie humide possédant une force de projection beaucoup moins importante qu'en voie sèche ne sera pas privilégié en réparation. L'utilisation d'une telle technique ne permet pas une bonne adhérence avec l'ancien béton (Courard, 2008). Le béton projeté par voie sèche est donc privilégié en ce qui concerne les réparations et entretiens d'ouvrages tels que :

- réfection d'ouvrage en béton tels que ponts, viaducs, barrages, réservoirs, tunnels de métro, structures marines et stationnements multi-étagés,
- réfection et recouvrement de conduites d'aqueduc, d'égouts pluviaux et d'égouts sanitaires,
- réparation de surfaces endommagées par des problèmes de corrosion.

2.1.3.3 Adjuvantation et propriétés typiques

De manière générale, le rapport eau/ciment des bétons projetés est compris entre 0,35 et 0,50 et les résistances à la compression varient entre 30 MPa et 40 MPa. Des gros granulats de faible diamètre, environ 10 mm, sont typiquement utilisés. Pour améliorer les propriétés du béton projeté, des adjuvants, des ajouts minéraux ou encore des fibres peuvent être utilisés tels que (Courard, 2008) :

- un agent entraîneur d'air pour la durabilité au gel,
- un accélérateur de prise pour accélérer le taux de mise en place,
- un superplastifiant,
- de la fumée de silice pour une meilleure adhérence, moins de rebond et un taux de mise en place plus élevé,
- des fibres (1% à 2% en volume),
- du latex pour une meilleure adhérence et une perméabilité plus faible.

2.2 Phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés par voie sèche

2.2.1 Définitions du substrat et du rebond

Le substrat fait référence à la couche de béton frais projetée sur le support et son évolution peut être observée à la Figure 2.5.

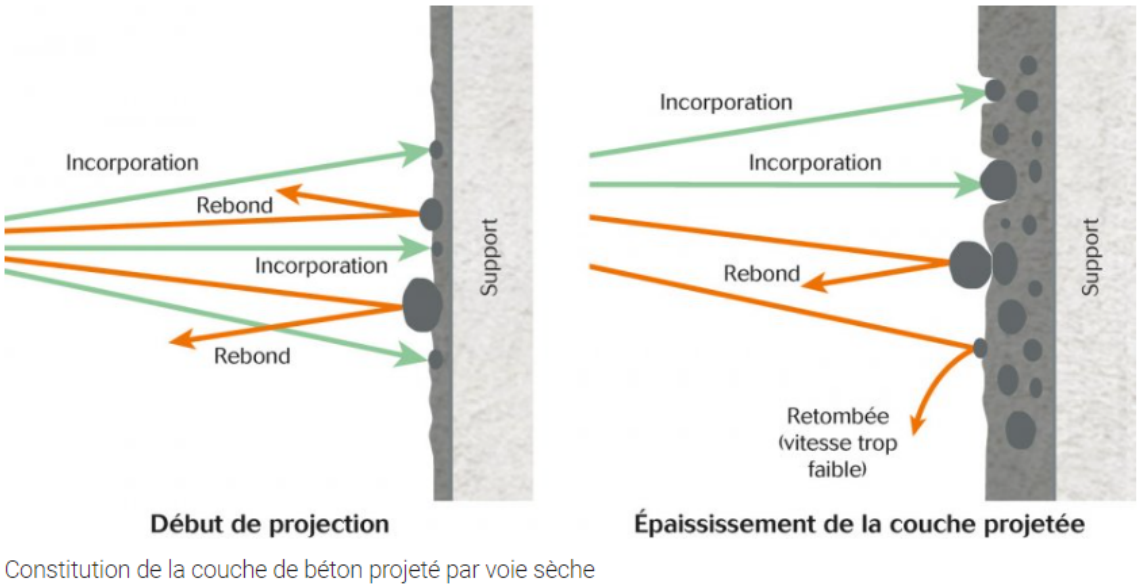


FIGURE 2.5 – Mise en place du substrat de béton projeté par voie sèche (tiré de Cimbéton, 2019)

Lorsque le mélange sec en suspension dans l'air comprimé arrive à la lance après avoir été transporté dans la conduite, il possède une vitesse élevée et se voit adjoindre de l'eau finement dispersée. Il est ensuite projeté et se retrouve en suspension dans l'air libre où le mélange est constitué de tous les composants du béton précédemment introduits. La totalité de ceux-ci ne constituera cependant pas le béton en place à cause du rebond d'une partie de ces constituants (Courard, 2008).

De manière générale, le rebond en béton projeté est défini comme le rapport entre la masse de matériaux qui n'adhère pas à la surface de projection et la masse totale de matériaux projetée à un moment précis (Parker, 1977). En d'autres termes, les pertes par rebond sont constituées de toutes les particules, souvent les plus gros granulats du mélange, qui n'ont pas adhéré à la surface de projection ou au substrat de béton fraîchement projeté. Il faut faire attention à bien distinguer rebonds et poussières de projection. Les poussières de projection concernent plutôt les particules fines de sable, de ciment et d'ajouts minéraux du mélange qui restent en suspension dans l'air (Jolin et al., 2016). Ces dernières ont une énergie cinétique insuffisante pour rejoindre la surface contrairement aux grosses particules, les granulats, qui rebondissent ou adhèrent au substrat (Dionne-Jacques, 2023). Ces granulats constituent la majorité des pertes par rebond et sont illustrés sur le schéma de gauche de la FIGURE 2.6. Il reste toutefois nécessaire de prendre en compte les poussières de projection dans le calcul du rebond, même si elles ne constituent qu'une infime partie du rebond total.

Sur la FIGURE 2.6, Parker (1977) présente l'évolution du rebond instantané durant une projection en fonction du temps. Le temps peut être assimilé à l'évolution de l'épaisseur du substrat de béton frais projeté.

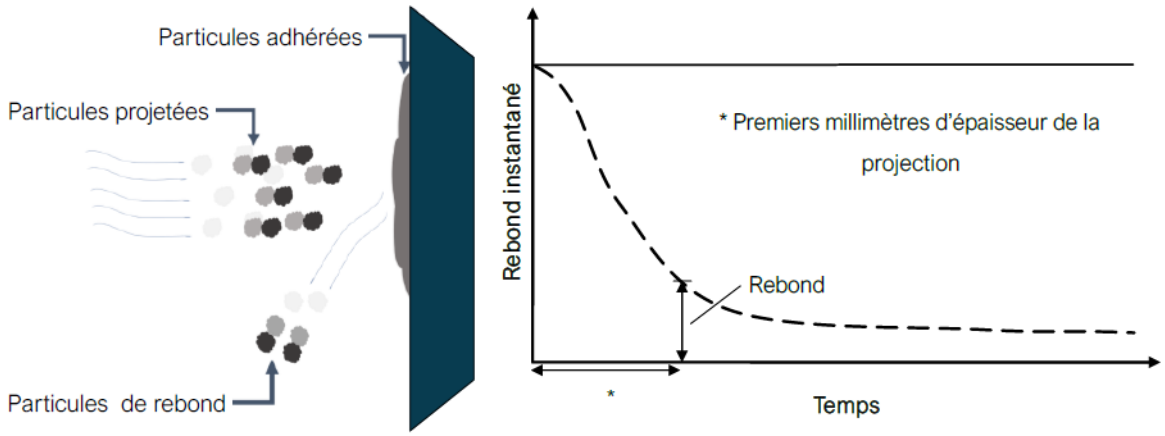


FIGURE 2.6 – Rebond des granulats (gauche) et Évolution du rebond instantané à partir d'une surface de projection vide (droite) (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Parker, 1977)

La FIGURE 2.6 permet de souligner l'importance prépondérante de l'épaisseur du substrat sur le rebond instantané. Au début de la projection (*), l'épaisseur du substrat est nulle et les particules rencontrent la surface de projection rigide. Dans ces premiers instants, le rebond est naturellement très important. Cependant, les particules ayant rebondi abandonnent sur la surface une couche de pâte de ciment qui va progressivement grossir jusqu'à être en mesure de capturer des particules de plus en plus grosses. Le substrat est donc formé d'un matériau plus riche en pâte de ciment que le mélange initial, le rebond étant majoritairement composé des granulats (Jolin, 1999). C'est ce qui est représenté sur la FIGURE 2.6 : le rebond diminue avec l'évolution de l'épaisseur du substrat, se stabilisant à partir d'une valeur seuil d'une dizaine de millimètres (Jolin, 1999).

2.2.2 Modèle physique du rebond à l'échelle d'une particule

2.2.2.1 Introduction

À l'époque, Armelin (1997) fut le premier à mettre au point une théorie rationnelle du rebond d'une particule sur un substrat de béton frais basée sur la mécanique des milieux continus. Ce modèle constitue la base de la compréhension des phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés.

Cependant, son modèle possède plusieurs hypothèses fortes qui ne permettent pas de l'utiliser directement dans l'application plus complexe de l'étude à l'échelle du jet de béton projeté :

- le modèle ne prend en compte qu'une seule particule à haute vitesse qui rebondit sur le substrat,
- la particule est supposée sphérique et rigide,
- le substrat de béton frais est représenté par un matériau élastique parfaitement plastique (élasto-plastique) et est supposé homogène,
- l'angle d'impact de la particule avec le substrat est de 90°.

Le modèle se décompose en deux phases représentant les différentes étapes du chemin parcouru par la particule.

2.2.2.2 Phase de pénétration

La première phase est la phase de pénétration de la particule dans le substrat de béton frais. Il s'agit de la partie dynamique du phénomène de rebond représentée à la FIGURE 2.7. En effet, la particule est projetée à très haute vitesse vers le substrat et possède une énergie cinétique donnée par la formule de base :

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \tag{2.1}$$

où :

- W_1 [J] est l'énergie cinétique incidente de la particule venant frapper le substrat.
- m [kg] est la masse de la particule.
- v [$\frac{m}{s}$] est la vitesse de la particule.

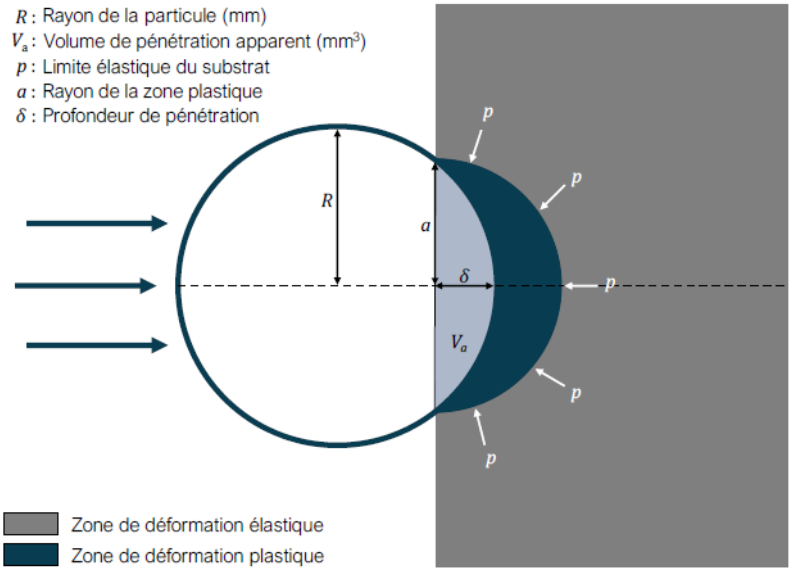


FIGURE 2.7 – Phase de pénétration (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Armelin, 1997)

Ensuite, la FIGURE 2.7 montre que la particule pénètre dans le substrat jusqu'à ce que son énergie cinétique W_1 s'annule et que la particule s'arrête. Elle a alors atteint sa profondeur de pénétration maximale (δ [m]). Au fur et à mesure que l'énergie cinétique de la particule diminue, celle-ci est transformée en énergie de déformation élastique W_2 et plastique du substrat. Liées à ces énergies, deux zones se forment dans le substrat élasto-plastique, les zones de déformation élastique et plastique, toutes deux représentées par une profondeur et un rayon de contact (FIGURE 2.7). Comme son nom l'indique, l'énergie de déformation élastique emmagasinée dans le substrat sera restituée à la particule lorsque la zone élastique reprendra sa forme initiale, tandis que l'énergie plastique aura été entièrement consommée pour déformer le substrat (Jolin, 1999).

L'énergie cinétique peut également s'exprimer en fonction du volume de pénétration apparent de la particule V_a [m^3] et de la contrainte de pénétration dynamique p_d [Pa] (SECTION 2.4.3) :

$$W_1 = p_d \cdot V_a \quad \textit{(Jolin, 1999)} \tag{2.2}$$

$$p_d = \frac{W_1}{V_a} \quad \textit{(Jolin, 1999)} \tag{2.3}$$

où V_a dépend uniquement du rayon de la particule R et de la profondeur de pénétration maximale δ (SECTION 2.4.3) : plus l'énergie cinétique de la particule est importante et plus la contrainte de pénétration dynamique du substrat est faible, plus la particule va pénétrer profondément dans le substrat. Cette profondeur accrue a tendance à augmenter l'énergie de décollement W_D (SECTION 2.2.2.3) requise pour "pousser" la particule hors du substrat, résultant en une diminution du rebond. Dans le cas contraire, une vitesse de la particule relativement faible (W_1 faible) ou un substrat rigide (p_d élevé) auront tendance à diminuer la profondeur de pénétration et, donc, l'énergie de décollement, favorisant le rebond (Jolin, 1999).

La FIGURE 2.8 montre les différentes étapes de la phase de pénétration et est un bon complément à la FIGURE 2.7. L'information supplémentaire apportée par la FIGURE 2.8 suggère que la pénétration de la particule s'accompagne d'une expulsion de matériau hors du substrat. La comparaison des étapes C et D suggère également que plus la pénétration de la bille est importante, plus l'expulsion de matériau est grande. Il s'agit d'un aspect auquel il faudra être attentif dans le modèle numérique.

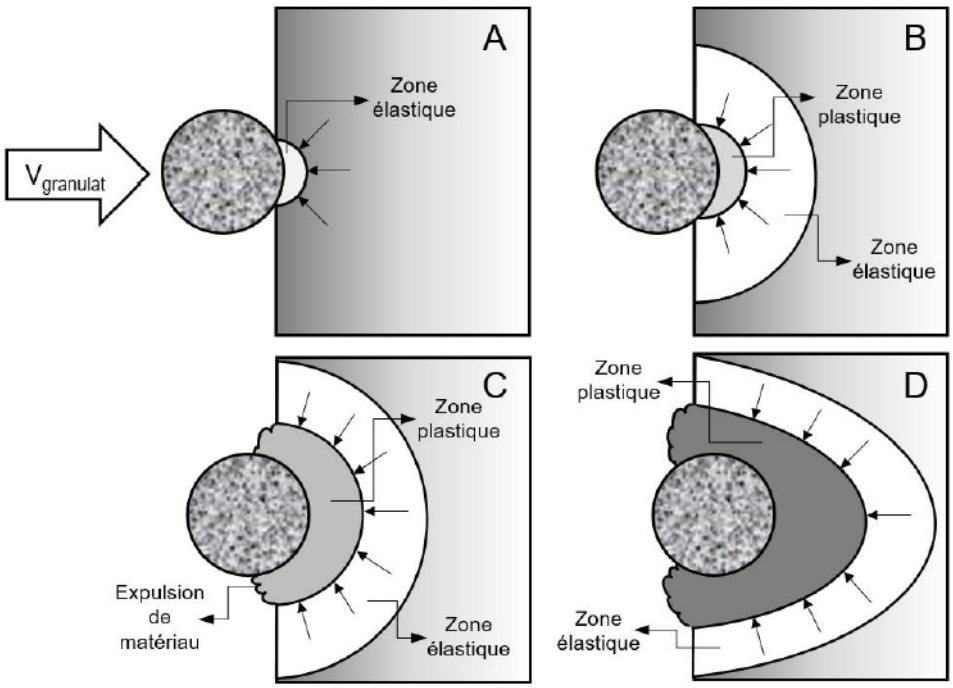


FIGURE 2.8 – Étapes de la pénétration d'une particule dans le substrat de béton projeté frais (tiré de Gagnon, 2017 ; adapté de Jolin, 1999)

2.2.2.3 Phase de réaction

La phase de réaction commence après l'arrêt de la particule, une fois la profondeur de pénétration maximale atteinte. Cette phase prend en compte le transfert de l'énergie de déformation élastique W_2 du substrat à la particule qui a tendance à la repousser et à causer le rebond si les forces d'adhésion ne sont pas assez grandes. Cette énergie de déformation est proportionnelle à la contrainte de pénétration statique p_s [Pa] (SECTION 2.4.2), au rayon de contact de la particule a [m] et au module de Young du substrat de béton frais ϵ_{pc} [Pa] :

$$W_2 = 0,27 \cdot \pi^2 \cdot a^3 \cdot p_s \cdot 3 \cdot \epsilon_{pc} \quad \textit{(Armelin, 1997)} \tag{2.4}$$

2.2.2.4 Rebond

Ensuite, le rebond aura lieu si l'énergie de déformation élastique restituée à la particule W_2 est supérieure aux forces d'adhésion la retenant sur le substrat. Ces forces d'adhésion sont représentées par l'énergie de décollement W_D [J]. Cette énergie nécessaire pour décoller la particule du substrat est fonction des propriétés du substrat et de l'enfoncement de la particule, à savoir la contrainte d'adhésion σ_0 [Pa] et la surface de contact de la particule (δ et a) :

$$W_D = \delta \cdot \left(\sigma_0 \cdot \pi \cdot a^3\right) \quad \textit{(Armelin, 1997)} \tag{2.5}$$

Cependant, si l'énergie de décollement est supérieure à l'énergie élastique restituée, la particule restera en place. Ces relations peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{W_2}{W_D} \geq 1 \longrightarrow \textbf{Rebond} \tag{2.6}$$

$$\frac{W_2}{W_D} < 1 \longrightarrow \textbf{Adhésion} \tag{2.7}$$

2.2.2.5 Conclusion

Appliquer une telle théorie au béton projeté par voie sèche est assez complexe, notamment à cause du caractère dynamique du phénomène et l'évaluation des vitesses de celui-ci (Dionne-Jacques, 2023), mais principalement à cause de la difficulté à représenter sa *rhéologie* au niveau du substrat (Jolin, 1999). Pour une caractérisation complète du phénomène de rebond, aussi bien à l'échelle d'une particule qu'à l'échelle du jet, il est nécessaire de déterminer l'énergie cinétique incidente des particules W_1 par l'évaluation de leur vitesse et de leur masse et la contrainte de pénétration dynamique du substrat p_d par la mesure de ses propriétés à l'état frais. Les considérations concernant les propriétés du substrat seront étudiées plus en détails dans les Sections 2.3 et 2.4.

En ce qui concerne la première considération, le matériel disponible à l'heure actuelle en laboratoire permet l'évaluation de la vitesse et, a fortiori, de l'énergie cinétique d'une particule. Le modèle d'Armelin (1997) à l'échelle d'une particule possède cependant certaines limites à l'étude des mécanismes de rebond des bétons projetés à l'échelle du jet. Il semble évident qu'il est nécessaire de passer à une étude à l'échelle du jet pour obtenir une compréhension complète des phénomènes mis en jeu, comme l'influence de la variabilité de l'angle d'incidence des particules sur le rebond par exemple. C'est la raison pour laquelle certains auteurs (Ginouse, 2014 ; Laradh, 2020 ; Siccardi, 2018) se sont intéressés au jet dans son ensemble (Section 2.2.3).

2.2.3 Études à l'échelle du jet de béton projeté

2.2.3.1 Introduction

Avant Ginouse (2014), les études sur le rebond dans les bétons projetés ne dépassaient pas le cadre d'une particule. Grâce à ses travaux et à l'utilisation d'une caméra haute vitesse, celui-ci a permis de décrire le mouvement du jet de particules en termes de distributions de vitesse, de distribution de masses et de limites d'expansion.

2.2.3.2 Profils de vitesse

Sur la FIGURE 2.9, Ginouse (2014) a trouvé les profils de vitesse des particules des bétons projetés par voie sèche et par voie humide.

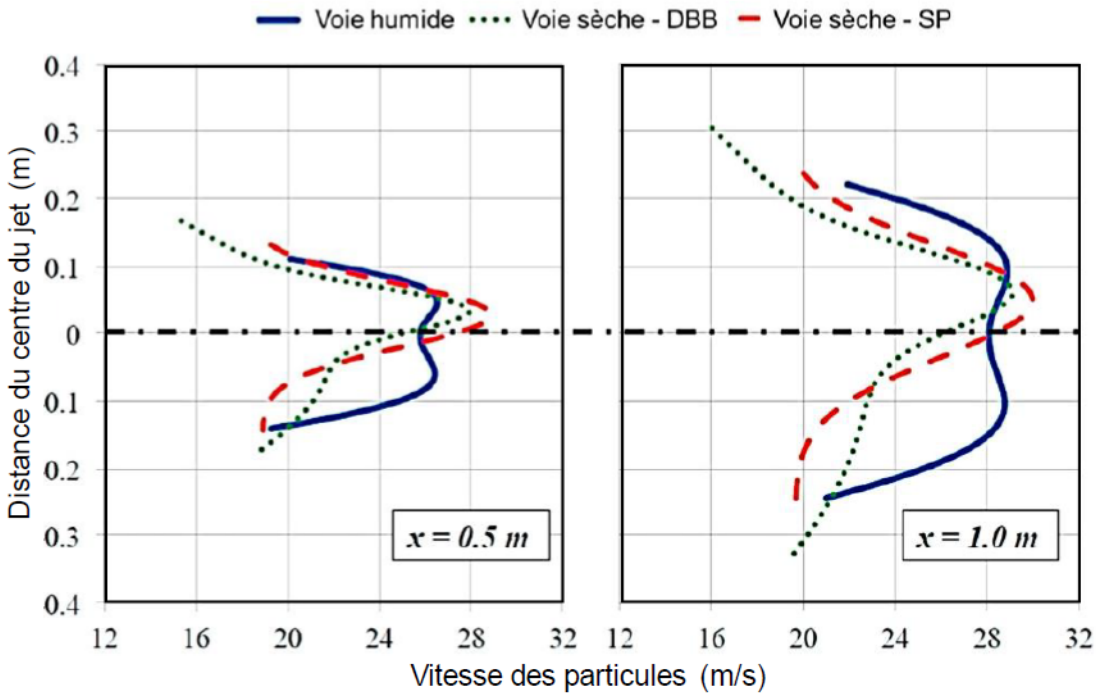


FIGURE 2.9 – Profils de vitesse du jet de béton projeté en fonction de la distance "x" par rapport à la sortie de la lance (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Ginouse, 2014)

Le profil de vitesse en voie humide est plus uniforme qu'en voie sèche. Il possède une distribution dite "top hat" traduisant une distribution homogène des vitesses dans la majeure partie du jet, sauf aux extrémités. Le plus faible taux de rebond de la voie humide peut être en partie expliqué par cette distribution de vitesse plus uniforme. Les particules, même celles en périphérie du jet, frappent le substrat avec une vitesse et donc une énergie cinétique plus importante et ont plus de chances d'adhérer profondément au substrat (Bérubé, 2018). L'autre raison étant sa consistance plus humide facilitant la capture des particules.

La voie sèche au contraire présente un profil de vitesse en forme de "cloche" avec des vitesses bien plus élevées pour les particules situées au centre du jet que celles en périphérie, pouvant atteindre jusqu'à 30 m/s. Ceci est par ailleurs confirmé par Courard (1985) qui a relevé le profil de projection de particules de sable sur des plaques de plâtre.

Ensuite, Ginouse (2014) a étudié les limites d'expansion du jet de béton projeté en fonction du type de lance employée. La Figure 2.10 montre que chaque lance permet d'obtenir un angle d'expansion du jet différent. Siccardi (2018) a ensuite démontré que la géométrie de l'embout utilisé avait une influence sur l'étendue du jet, une étendue plus faible permettant d'obtenir un jet plus concentré augmentant l'énergie cinétique des particules et diminuant le rebond.

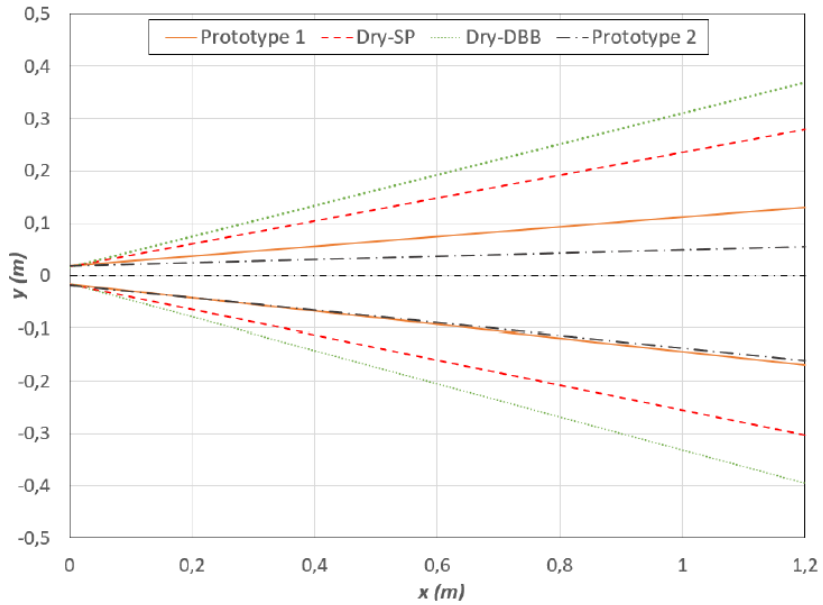


Figure 2.10 – Limites du jet en fonction du type de lance utilisée (tiré de Siccardi, 2018 ; adapté de Ginouse, 2014)

2.2.3.3 Distribution du flux massique

Bérubé (2018) a étudié la distribution du flux massique en voie sèche pour deux lances différentes (Figure 2.11). Les profils de flux de masse possèdent une forme typique d'une distribution gaussienne où le flux de matériaux est principalement concentré au centre du jet. Bérubé (2018) explique également qu'avec le Spirolet, 75% du matériau est concentré sur une surface représentant 26,8% de la surface totale du jet rencontrant le substrat.

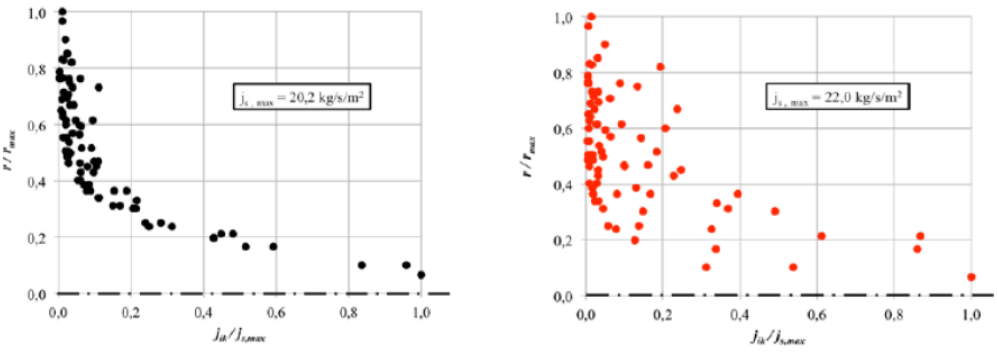


Figure 2.11 – Distributions de flux massique normalisés en voie sèche pour les lances DB (à gauche) et Spirolet (à droite) (tiré de Siccardi, 2018 ; Bérubé, 2018)

Les profils de flux de masse pour la voie humide peuvent être consultés à l'Annexe A.

2.2.3.4 Analyse énergétique du jet

Sur base des distributions de vitesse et de flux massique introduites précédemment, Laradh (2020) a pu déterminer la distribution d'énergie dans le jet pour la méthode par voie sèche (Figure 2.12). Pour ce faire, il a utilisé l'équation (2.1) qui dépend maintenant de la distance au centre du jet ou rayon autour de l'axe de projection "r" [mm] :

$$W_1(r) = \frac{1}{2} \cdot m(r) \cdot v(r)^2 \tag{2.8}$$

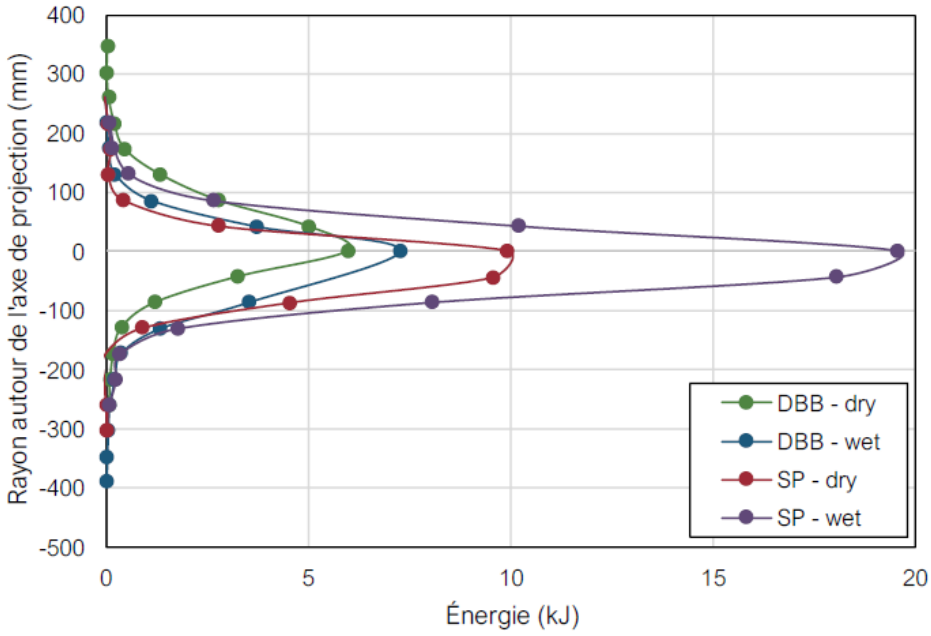


Figure 2.12 – Distributions d'énergie dans le jet pour différents types de lances et de consistances en voie sèche (tiré de Dionne-Jacques, 2023 ; adapté de Laradh, 2020)

Sur la FIGURE 2.12, la combinaison possédant les plus grandes valeurs d'énergie cinétique des particules est la consistance humide avec la lance Spirolet (*SP*). Il s'agit aussi de la combinaison engendrant le moins de rebond, à hauteur de 16%. L'énergie cinétique est maximale dans un rayon proche du centre du jet car elle suit les distributions de flux massique "$m(r)$" et de vitesse "$v(r)$". L'influence de la distribution de vitesse est plus importante d'un point de vue mathématique car elle se retrouve au carré dans l'équation de l'énergie cinétique (2.8), mais il ne faut pas oublier qu'en théorie il n'y a pas d'énergie sans particules. La distribution du flux massique revêt donc une importance primordiale.

2.2.3.5 Conclusion

Pour diminuer au maximum le rebond, Jolin (1999) explique que deux conditions doivent être remplies :

- une grande énergie cinétique incidente des particules W_1,
- une faible contrainte de pénétration dynamique du substrat p_d (SECTION 2.4.3).

Si ces deux conditions sont remplies, une pénétration profonde des particules dans le substrat est attendue, associée à un faible taux de rebond.

Cette section a permis de mettre en évidence les distributions de vitesse, de flux massique (Ginouse, 2014) et d'énergie cinétique incidente (Laradh, 2020) d'un jet de béton projeté. La première considération énoncée à la SECTION 2.2.2.5 a donc été résolue à l'échelle du jet. L'atteinte d'une grande valeur d'énergie cinétique (Jolin, 1999) passe principalement par des vitesses de particules et un flux de matériaux élevés. Grâce à ses travaux, Laradh (2020) a réussi à étendre le modèle du rebond d'une particule d'Armelin (1997) à l'échelle du jet et a proposé un modèle de prédiction du rebond (SECTION 2.5) se basant sur l'énergie cinétique incidente des particules dans le jet.

2.2.4 Paramètres influençant le rebond en béton projeté par voie sèche

Les facteurs influençant la quantité de rebond peuvent être classés en deux catégories principales (Armengaud, 2016) :

1. Les paramètres techniques.
2. La formulation initiale des mélanges.

2.2.4.1 Paramètres techniques

Le Tableau 2.2 reprend les différents paramètres techniques influençant le rebond.

Tableau 2.2 – Paramètres techniques influençant le rebond (Armengaud, 2016)

Processus de mise en place	Paramètres in-situ
Le débit d'air	Le type de surface et son inclinaison
La vitesse de projection	L'épaisseur de béton à appliquer
L'angle d'incidence de la lance	La température

La formation des lanciers, les opérateurs qui projettent le béton, est primordiale pour parvenir à une maîtrise accrue des paramètres de mise en place sur le rebond. C'est seulement en offrant aux lanciers des formations de qualité que l'on pourra réduire la variabilité du processus de mise en place en lui-même (Armengaud, 2016). Dans le cadre de cette étude, les paramètres spécifiques à la situation, au chantier ou encore à la localisation ne seront pas évalués.

Cependant, un paramètre de mise en place sera intéressant pour la modélisation numérique : l'angle d'incidence de la lance par rapport à la surface réceptrice. La plupart des auteurs s'accordent à dire que le rebond le plus faible est obtenu pour une orientation de la lance perpendiculaire à la surface (ACI PRC-506-22, 2022 ; Armelin, 1997 ; Armengaud, 2016 ; Jolin, 1999 ; Puri & Uomoto, 1999). Sur la Figure 2.13, Puri & Uomoto (1999) observent qu'en passant d'un angle de 0° (perpendiculaire à la surface) à un angle de 30°, le rebond subit une augmentation de 10% à 15%.

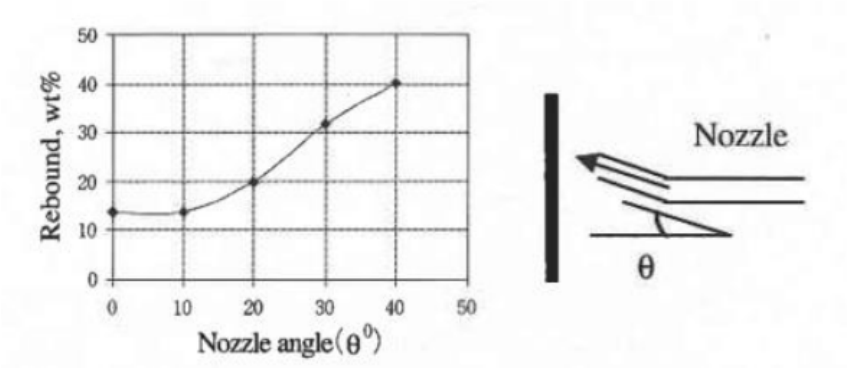


Figure 2.13 – Évolution du rebond en fonction de l'angle d'inclinaison de la lance (tiré de Armengaud, 2016 ; Puri & Uomoto, 1999)

2.2.4.2 Formulation des mélanges

Dans ce travail, l'intérêt n'est pas porté vers l'optimisation de la formulation des mélanges de béton projeté, malgré son importance sur les propriétés de mise en place et le rebond. Cependant, un bref aperçu des différentes propriétés du béton projeté influençant le rebond est donné ci-dessous (Armengaud, 2016) :

- la taille et la densité des granulats,
- la granulométrie,
- la teneur en eau,
- la teneur en ciment,
- les adjuvants et additions.

Selon Armelin (1997) et Jolin (1999), plus la taille d'un granulat augmente, plus la probabilité de rebond augmente également. Ceci est rapporté sur la Figure 2.14.

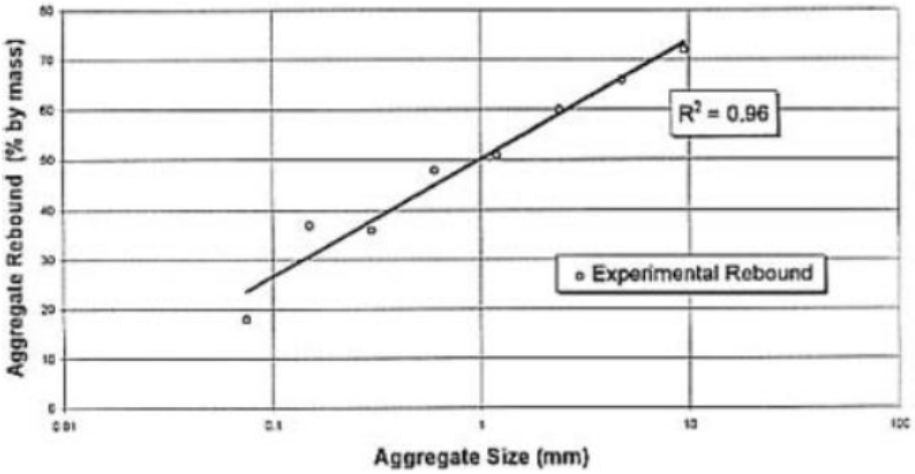


Figure 2.14 – Évolution de la probabilité de rebond en fonction de la taille des granulats (tiré de Armengaud, 2016 ; Armelin, 1997)

De son côté, Bindiganavile (2007) a constaté que les granulats de plus grande densité ont également une plus forte probabilité à rebondir.

2.3 Propriétés à l'état frais du béton projeté par voie sèche

2.3.1 Introduction

Dans ce travail, la caractérisation du béton projeté par voie sèche à l'état durci n'est pas une thématique d'importance, les efforts étant tournés vers les phénomènes de rebond qui ont lieu durant la projection. Ici, ce sont les propriétés et le comportement du substrat de béton projeté à l'état frais qui vont avoir un intérêt. Ces propriétés et, plus principalement, la contrainte de pénétration dynamique p_d constituent la dernière considération à étudier afin d'obtenir une compréhension complète des mécanismes de rebond.

2.3.2 Consistance du substrat

Pour caractériser le béton projeté par voie sèche à l'état frais de manière qualitative, la notion de consistance du substrat peut être utilisée. Il s'agit d'un paramètre assez subjectif (Armengaud, 2016 ; Jolin, 1999). Comme expliqué à la Section 2.1.2.2, c'est au lancier qu'incombe la tâche d'ajouter l'eau au mélange lors de la projection. Ce dernier ajuste la quantité d'eau en temps réel en évaluant la consistance du béton de manière visuelle (Armengaud, 2016). Il existe deux types de consistance (Armelin, 1997) :

- sèche,
- humide.

Une consistance *sèche* correspond à un substrat plus rigide et contenant moins d'eau, pour lequel le rebond est supérieur. En théorie, le lancier essaiera donc toujours d'obtenir une consistance *humide* optimale pour laquelle le rebond n'est pas trop important, mais où la stabilité et les propriétés mécaniques sont garanties. Le rebond dépend donc directement de la consistance du mélange (Armengaud, 2016).

La consistance n'étant qu'un paramètre relativement qualitatif, il est essentiel de disposer de mesures quantitatives pour caractériser le substrat. Pour ce faire, deux méthodes de mesure ont été mises au point (Section 2.4) :

- un essai de pénétration statique, consistant en l'enfoncement d'une aiguille à vitesse constante sur le substrat, permet de représenter la phase de réaction (2.2.2.3) quasi-statique. Cet essai permet de déterminer la contrainte de pénétration statique p_s,
- un essai de pénétration dynamique, consistant en l'impact d'une bille sur le substrat, permet de représenter la phase de pénétration (2.2.2.2) dynamique. Cet essai permet de déterminer la contrainte de pénétration dynamique p_d.

La Section 2.3.3 met en évidence le phénomène rendant difficile la mesure des propriétés du substrat à l'état frais avec précision. Les méthodes de mesure conventionnelles et nouvelles seront présentées à la Section 2.4.

2.3.3 Comportement *rhéologique* du substrat pendant la projection

Malgré les avancées majeures réalisées pour passer de l'échelle d'une particule à l'échelle du jet entier de béton projeté, une zone d'ombre subsiste au niveau du comportement du substrat de béton frais et l'évolution de ses propriétés au cours de la projection et ne permet pas de comprendre le phénomène du rebond de manière complète (Kim et al., 2024). En effet, il existe une interaction complexe entre le comportement *rhéologique* du substrat de béton frais et les granulats qui arrivent à grande vitesse (Dionne-Jacques, 2023 ; Laradh, 2020 ; Paquet, 2021 ;). Ceci conditionne la quantité de pertes dues au rebond.

2.3.3.1 Rhéologie du béton frais coulé

Pour étudier le comportement du substrat de béton projeté par voie sèche à l'état frais, la rhéologie semble être l'outil idéal à première vue. « La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées » (Hu, 1995). Cette science s'intéresse donc principalement aux matériaux fluides.

Les bétons frais conventionnels coulés sont assez bien représentés par le modèle rhéologique de Bingham (Tattersall & Banfill, 1983), par l'intermédiaire de deux paramètres principaux : le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique μ. Voici l'équation régissant ce modèle rhéologique :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{2.9}$$

où :

- τ [Pa] est la contrainte de cisaillement.
- τ_0 [Pa] est le seuil de cisaillement.
- μ [Pa.s] est la viscosité plastique.
- $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] est la vitesse de déformation.

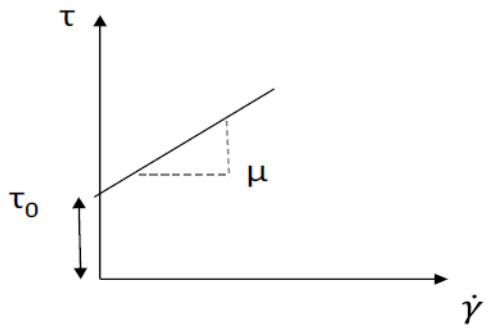


FIGURE 2.15 – Modèle rhéologique de Bingham (tiré de Armengaud, 2016)

2.3.3.2 Limitation à l'application de la rhéologie au béton projeté par voie sèche

La tentation est grande d'essayer de caractériser le substrat de béton projeté par voie sèche à l'état frais à l'aide de paramètres tels que ceux retrouvés dans le modèle de Bingham, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cependant, un tel modèle ne peut être appliqué avec précision au substrat, ne capturant pas la déformation élastique du substrat liée à la pénétration des particules (SECTION 2.2.2). La seconde limitation et la plus importante est présentée à la SECTION 2.3.3.3 ci-dessous.

2.3.3.3 Hypothèse de couche *fluide*

La zone d'ombre évoquée plus haut a été partiellement comblée par les travaux de Laradh (2020). Ce dernier a proposé une nouvelle théorie basée sur l'énergie cinétique des particules incidentes :

> *Une zone avec laquelle des particules entrent en contact avec le substrat à des intervalles de temps plus régulier implique une adhérence plus facile, car les nombreux impacts font chuter [localement] le seuil de cisaillement. Ce phénomène est similaire à la vibration du béton ordinaire. Par conséquent, la fréquence des impacts entre les particules et le substrat est un facteur qui modifie localement la rigidité du substrat et qui peut être facilement déterminé à l'aide de la distribution de masse.* (Laradh, 2020)

Cette théorie implique qu'il existe une couche *fluide* (FIGURE 2.16) facilitant l'adhésion des particules incidentes directement sous la partie la plus concentrée du jet (Dionne-Jacques, 2023). Cette couche *fluide* sera appelée "CF" pour le reste de ce document. La création de cette CF est causée par l'abaissement local du seuil de cisaillement du matériau initialement élasto-plastique et résulte en une diminution importante du rebond. Cette nouvelle théorie est une grande révolution par rapport au modèle initial d'Armelin (1997) qui ne considérait qu'un matériau élasto-plastique parfait. Pour bien comprendre le comportement du substrat, l'état de base élasto-plastique correspond à un matériau plutôt "rigide" ou "solide" par rapport à l'état

fluide associé à celui de la CF.

Si ce phénomène est d'une importance capitale pour la réduction du rebond et nécessite d'être étudié plus en profondeur, la caractérisation de cette CF ne s'avère pas aisée. En effet, la transition de la zone du substrat directement impactée par le jet depuis son état élasto-plastique vers son état *fluide* (CF) se fait très rapidement, en l'espace de quelques secondes. Cependant, cette transition est également très rapide dans l'autre sens. Lorsqu'elle n'est plus excitée, la CF repasse en quelques secondes dans son état élasto-plastique et prend une consistance très rigide (Kim et al., 2024 ; Laradh, 2020). Le caractère évolutif rapide du substrat pose un problème au niveau de sa caractérisation, les mesures conventionnelles effectuées sur ce dernier ayant souvent lieu dans son état élasto-plastique et non *fluide* (Kim et al., 2024).

Le caractère *fluide* de la CF nécessite d'être discuté un peu plus en détails et constitue la seconde limitation ne permettant pas d'utiliser la rhéologie pour la caractérisation du substrat. Selon Dionne-Jacques (2023), la zone du substrat excitée par le flux régulier de particules (CF) se comporte comme un "liquide visqueux". Plusieurs auteurs s'accordent également pour dire que la CF possède les caractéristiques d'un "liquide visqueux" (Dionne-Jacques, 2023 ; Laradh, 2020 ; Paquet, 2021). Par "liquide visqueux", il est question d'un matériau caractérisé par un seuil de cisaillement et une viscosité. Cependant, le béton projeté à l'état frais dans son état *fluide* ne peut être considéré comme un tel matériau fluide parfait, son comportement étant encore relativement inconnu. L'idée est de percevoir cet état *fluide* comme un état intermédiaire entre celui d'un liquide (fluide) et d'un solide. Il s'agit toujours d'un matériau élasto-plastique mais possédant des propriétés très faibles. Ce comportement relativement complexe est un frein à la caractérisation du béton projeté à l'état frais par une approche rhéologique classique et des modèles rhéologiques connus, tels que ceux de Bingham ou de Herschel-Bulkley. La caractérisation de la CF ne se fera pas à l'aide de propriétés rhéologiques telles que la viscosité et le seuil de cisaillement.

La Figure 2.16 permet d'observer les différentes couches mentionnées plus haut sur le substrat. En gris, la couche élasto-plastique (appelée "CE" pour le reste de ce document) correspond au béton déjà rigidifié qui n'est pas soumis à l'impact direct du jet de particules. La CF sous l'impact répété des particules incidentes venant du jet est représentée en rouge. Il est important de voir la CF comme une couche qui apparaît en surface et non qui se développe sur toute l'épaisseur du substrat.

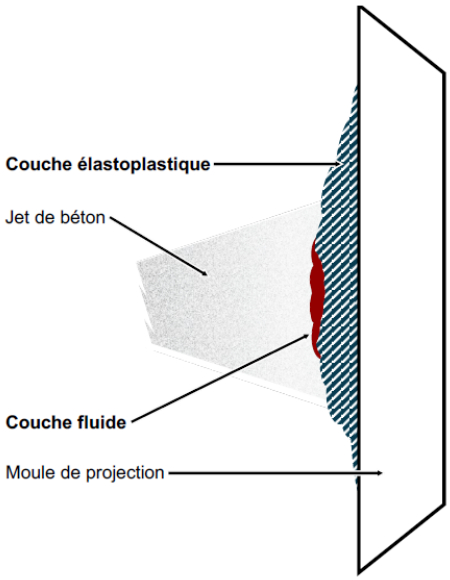


FIGURE 2.16 – Schéma des différentes couches du substrat de béton frais (tiré de Paquet, 2021)

2.3.3.4 Hypothèse d'historique rhéologique

Paquet (2021) a ensuite permis d'expliquer schématiquement cette hypothèse de CF en se basant sur la théorie de Laradh (2020) et de ses observations expérimentales. Pour que cette CF soit activée, il est nécessaire que la fréquence énergétique des particules dépasse une valeur seuil appelée fréquence énergétique critique. Pour déterminer cette fréquence énergétique, la distribution de masse est le paramètre le plus important. La distribution de masse trouvée en voie sèche (FIGURE 2.11) montre que le flux massique est bien plus important au centre du jet et diminue en périphérie.

La FIGURE 2.17 permet de distinguer la taille des deux couches pour l'empreinte de projection d'un jet fixe en fonction de la distribution de fréquence énergétique des particules du jet. La CF se trouve au centre du jet (en rouge), là où le débit massique est le plus grand et entraîne l'obtention d'une fréquence énergétique des particules élevée permettant l'activation de la CF et la diminution locale du seuil de cisaillement. En périphérie du jet (en bleu), le substrat se trouve dans son état élasto-plastique, le débit massique étant trop faible pour que la fréquence énergétique dépasse la valeur critique. Il s'agit de la CE.

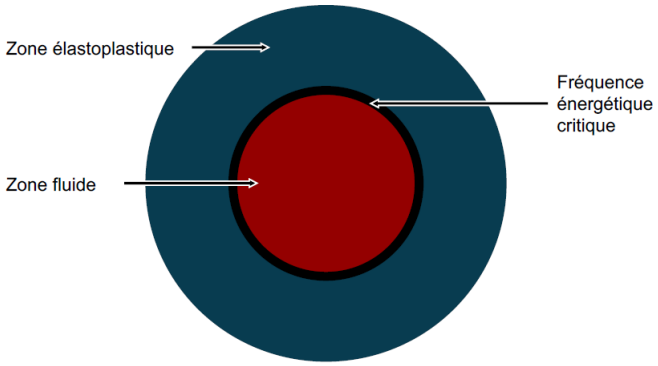


FIGURE 2.17 – Vue de face des différentes couches du substrat et distribution simplifiée des fréquences énergétiques d'un jet fixe (tiré de Paquet, 2021)

En fonction du profil énergétique du jet, le rayon de la CF peut augmenter ou diminuer. Différentes situations sont présentées sur la FIGURE 2.18.

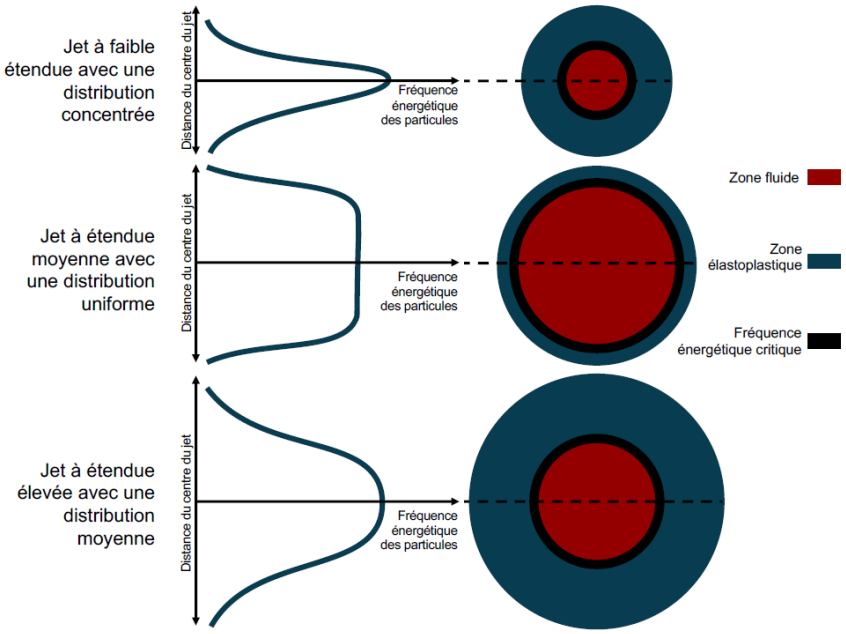


FIGURE 2.18 – Étendue de la CF en fonction de différentes distributions de fréquence énergétique des particules d'un jet fixe (tiré de Paquet, 2021)

2.3.3.5 Automatisation de la mise en place : mouvement planétaire avec robot

Les explications précédentes concernent un jet fixe. Il est intéressant de les appliquer à une situation réelle de projection. Ceci permet en même temps d'introduire les notions d'automatisation et de trajectoire planétaire (Schaeffer, 2023). Dans le cadre du deuxième axe de recherche fondamental visant à optimiser le rebond, il a été question de l'automatisation de la mise en place à l'aide d'un robot. Lors d'une projection réelle, ce robot ou un lancier suit une trajectoire

de projection. Avant de l'expliquer plus en détails, la FIGURE 2.19 donne un aperçu de l'idée derrière la trajectoire planétaire.

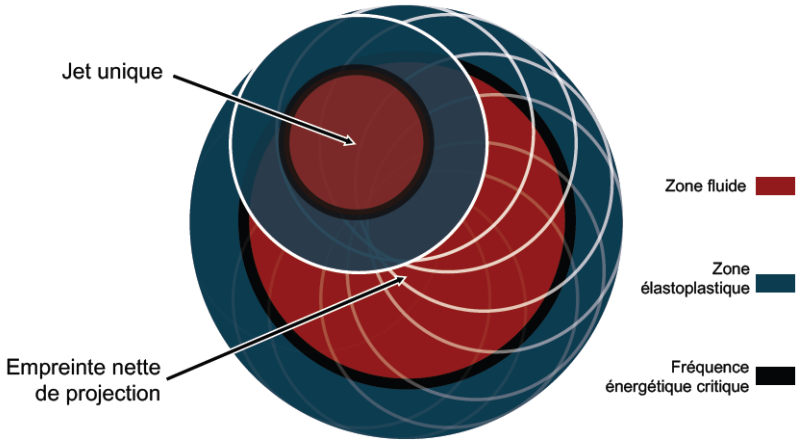


FIGURE 2.19 – Trajectoire planétaire (tiré de Paquet, 2021)

Sans parler de l'avantage immense du robot qui permet de projeter en continu avec un angle de 90° par rapport à la surface et de s'affranchir de la création d'angles associée à une projection à la main, il est utile de s'intéresser à la trajectoire de projection planétaire. La réalisation de petits mouvements circulaires à fréquence élevée permet d'augmenter le rayon de la CF réelle, en repassant de manière répétée sur la CF déjà formée. Cette trajectoire présente des valeurs de rebond très faibles qui se rapprochent de celles obtenues en voie humide. Elle génère également moins de rebonds que la trajectoire « classique » largement adoptée par les lanciers (Schaeffer, 2023). La comparaison des différentes trajectoires et les valeurs de rebond associées sont présentées au TABLEAU 2.3.

TABLEAU 2.3 – Trajectoires de projection et rebond associé

Trajectoire	**Rebond (%)**
À la main	20-25
Classique avec robot	18
Planétaire avec robot	13

Le passage à une automatisation par robot en éliminant la composante humaine permet déjà de diminuer le rebond, mais l'utilisation couplée d'un robot et de la trajectoire planétaire présentent une diminution encore plus impressionnante. Par rapport à une projection manuelle, le rebond peut être diminué de moitié. Ces résultats prometteurs sont le signal positif qui encourage les projets concernés à poursuivre dans cette direction.

2.3.3.6 Conclusion

L'hypothèse de CF est une avancée majeure dans l'optique de mieux comprendre et caractériser le phénomène de rebond durant la projection. En effet, elle a une influence très importante

sur le rebond, celui-ci étant beaucoup plus faible en considérant la CF qu'en considérant une CE sur tout le substrat. Cependant, aucun auteur en faisant mention (Dionne-Jacques, 2023 ; Laradh, 2020 ; Paquet, 2021) n'a réussi à la mesurer ou à prouver son existence expérimentalement. Les méthodes de mesure conventionnelles ne sont pas assez rapides pour capturer cette CF temporaire avant qu'elle ne redevienne élasto-plastique (Dionne-Jacques, 2023 ; Jolin, 1999 ; Paquet, 2021). Il est nécessaire d'en développer de nouvelles qui permettent d'obtenir ce genre d'informations (Kim et al., 2024 ; Paquet, 2021). Cette hypothèse reste donc fondamentalement théorique : il faut encore la valider expérimentalement. La caractérisation des propriétés du substrat peut se faire par l'intermédiaire de la contrainte de pénétration dynamique p_d (Jolin, 1999). Pour réussir à prouver l'existence de cette CF, il faut être capable de mesurer p_d lorsque le matériau est encore dans son état *fluide*, chose que personne n'a réussi à faire jusqu'à présent.

Paquet (2021) vient confirmer cette idée :

> *Il est possible d'utiliser la rhéologie pour caractériser le béton projeté par voie sèche. Cependant, la complexité du béton projeté par voie sèche a montré que les méthodes de mesure utilisées étaient trop lentes pour capturer avec succès l'état "fluide" temporaire. Cela démontre que les données collectées avec la pénétration dynamique de sphères lâchées sont plus susceptibles d'être associées au comportement du matériau dans son état "élasto-plastique" que dans son état "fluide".* (Paquet, 2021)

Il paraît donc évident que la mesure des propriétés du substrat de béton frais doit se faire le plus vite possible après la fin de la projection, lorsque le béton est toujours dans un état *fluide* (Laradh, 2020 ; Paquet, 2021) et avant que ce dernier ne repasse dans son état élasto-plastique. Il n'est pas possible de mesurer quoi que ce soit durant la projection, à cause du flux de particules. Une nouvelle méthode de caractérisation a été développée par Kim et al. (2024) et sera présentée à la Section 2.4.4.

2.4 Mesures des propriétés à l'état frais du substrat de béton projeté par voie sèche

2.4.1 Introduction

Si le béton projeté par voie humide se prête plutôt bien aux mesures rhéologiques, notamment depuis les travaux de Beaupré (1994) et la création du rhéomètre IBB (Beaupré & Mindess, 1996), ce n'est pas le cas du béton projeté par voie sèche (Kim et al., 2024). Les outils dont nous

disposons à l'heure actuelle ne permettent pas de caractériser les propriétés rhéologiques de bétons avec très peu ou pas d'affaissement, ce qui est le cas pour le béton projeté par voie sèche. En effet, la consistance du béton projeté par voie sèche à l'état frais est beaucoup plus rigide que celle d'un béton frais classique (Jolin, 1999). C'est le passage rapide de l'état *fluide* à élasto-plastique qui rend impossible la caractérisation classique à l'aide de rhéomètres. De plus, le béton projeté par voie sèche à l'état frais a tendance à se désintégrer lorsqu'il est passé dans un rhéomètre conventionnel, ce qui revient à mesurer les propriétés rhéologiques d'un matériau différent ce celui qui est en place (Jolin, 1999).

2.4.2 Essai de pénétration statique

La mesure à l'état frais la plus commune pour les bétons projetés est la contrainte de pénétration statique p_s. La FIGURE 2.20 montre un exemple de pénétromètre statique utilisé pour la mesurer.

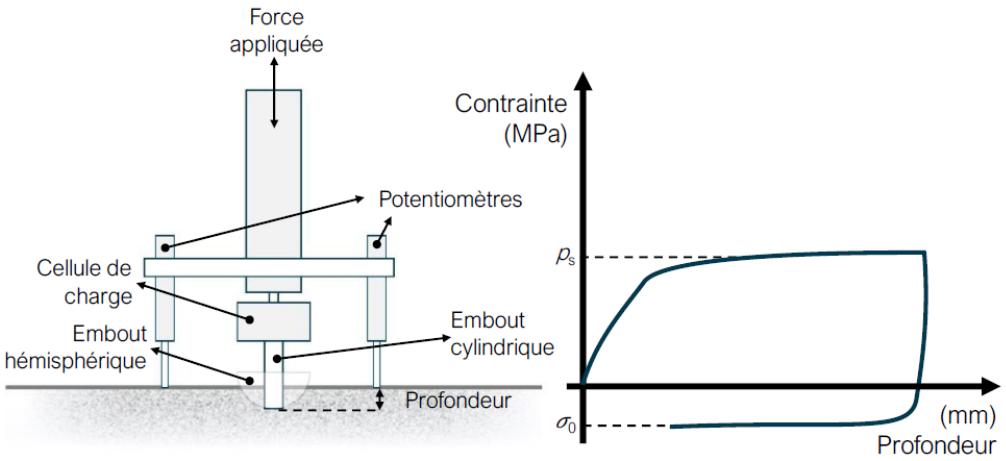


FIGURE 2.20 – Schéma d'un pénétromètre statique électronique et d'un graphique d'acquisition typique pour la mesure de p_s (tiré de Paquet, 2021 ; adapté de Armelin, 1997)

Cet essai de pénétration statique consiste en l'enfoncement à vitesse lente d'un embout à l'intérieur du béton projeté frais, tout en mesurant la contrainte requise pour atteindre une certaine profondeur de pénétration (Jolin, 1999). L'évolution de la profondeur de pénétration de l'embout en fonction de la contrainte appliquée est représentée sur le graphique de la FIGURE 2.20. Il y a une augmentation rapide de la contrainte à appliquer pour les premiers millimètres d'enfoncement. À partir d'une certaine profondeur, cette augmentation est suivie d'un plateau pour lequel la contrainte se stabilise malgré l'enfoncement de l'embout. La valeur du plateau correspond à la contrainte de pénétration statique p_s. Ce comportement est similaire à celui d'un matériau élastique parfaitement plastique. En 1968, Powers (1968) définit cette notion de contrainte de pénétration statique comme : « la résistance d'un matériau à une déformation

». Le substrat de béton projeté à l'état frais dans son état élasto-plastique peut donc bien être caractérisé par un comportement élasto-plastique parfait.

2.4.2.1 Lien entre p_s et le rebond

À l'époque, p_s était utilisé comme paramètre afin de quantifier le rebond. Plusieurs auteurs (Armelin, 1997 ; Jolin, 1999) ont réalisé des essais afin de démontrer la relation entre le rebond et cette contrainte de pénétration statique. Selon eux, p_s est linéairement proportionnel au rebond. Plus la contrainte de pénétration statique est grande, plus le béton est ferme et le rebond important (Armelin, 1997 ; Armengaud, 2016 ; Jolin, 1999). À l'opposé, une p_s faible traduit un béton plus fluide ce qui est plus avantageux d'un point de vue rebond (Armengaud, 2016).

Cependant, à la lumière des études récentes sur le comportement transitoire du substrat sous la sollicitation dynamique d'un flux de particules, il semble que cette mesure ne soit plus vraiment adaptée pour quantifier le rebond. C'est le passage d'un matériau élasto-plastique à *fluide* qui va guider la quantité de pertes par rebond. La détermination de la contrainte de pénétration dynamique p_d est plus pertinente pour réussir à quantifier le rebond de manière adéquate en capturant le comportement du matériau dans son état *fluide*. La contrainte de pénétration statique peut cependant toujours être utilisée pour caractériser le comportement du substrat dans son état élasto-plastique, c'est-à-dire lorsque la sollicitation dynamique est nulle ou insuffisante.

2.4.3 Essais de pénétration dynamique conventionnels

2.4.3.1 Définition de la contrainte de pénétration dynamique p_d

Comme expliqué ci-dessus, la contrainte de pénétration statique est plutôt associée au comportement du substrat lors de la phase de réaction quasi-statique et oublie de prendre en compte l'influence du caractère dynamique lié à la projection d'un flux de particules à haute vitesse lors de la phase de pénétration. Cet évènement dynamique a un impact important sur l'état du substrat si la fréquence énergétique des particules est suffisante (Section 2.3.3). Il est donc nécessaire de réaliser des essais de pénétration dynamique afin de reproduire les phénomènes de la phase de pénétration et d'obtenir une mesure dynamique pour bien traduire la valeur de p_d (Jolin, 1999).

Rappelons que p_d est évaluée comme le rapport entre l'énergie cinétique de la particule et son volume de pénétration apparent dans le substrat après l'impact (Section 2.2.2) :

$$p_d = \frac{W_1}{V_a} = \frac{\frac{1}{2}\, m\, v^2}{V_a} \tag{2.10}$$

En fonction de la profondeur de pénétration maximale δ et du rayon de la bille R, le volume de pénétration apparent V_a peut être calculé de différentes manières (Dionne-Jacques, 2023) :

$$V_a = \frac{\pi \cdot \delta^2 \cdot (3 \cdot R - \delta)}{3} \qquad ; \qquad \delta < R \tag{2.11}$$

$$V_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^3}{3} + \pi \cdot R^2 \cdot (\delta - R) \qquad ; \qquad \delta \geq R \tag{2.12}$$

Ces essais dynamiques consistent en l'impact dynamique d'une particule sur le substrat de béton frais. Armelin (1997) et Jolin (1999) ont ouvert la voie à de tels essais. L'essai d'Armelin (1997) consiste à projeter une bille à haute vitesse sur le substrat à l'aide d'un pistolet à air comprimé, tandis que celui de Jolin (1999) vise à lâcher une bille d'une hauteur donnée sur ce même substrat. La mesure à effectuer lors de ces essais est assez simple. L'énergie cinétique W_1 de la bille est connue à l'avance car la masse et la vitesse de la bille sont connues. Pour déterminer la valeur de p_d, il ne reste plus qu'à déterminer V_a qui dépend uniquement de δ, le rayon de la bille étant également connu.

2.4.3.2 Essai n°1 : pistolet à air comprimé (Armelin, 1997 ; Armengaud, 2016)

Pour déterminer p_d, Armelin (1997) propose d'utiliser un pistolet à air comprimé permettant de projeter une seule particule dont la vitesse est enregistrée par une caméra à haute vitesse (Armengaud, 2016). Dans l'expérience réalisée par Armengaud, ce pistolet permet d'atteindre des vitesses de l'ordre de 20 m/s, ce qui correspond approximativement aux vitesses de projection trouvées par Ginouse (2014) pour le béton projeté par voie sèche.

2.4.3.3 Essai n°2 : chute de bille (Dionne-Jacques, 2023 ; Jolin, 1999)

Jolin (1999) propose un autre test qui consiste à étudier la chute d'une bille d'une hauteur donnée sur le substrat de béton frais. La vitesse de la bille est déterminée sur base de la formule de la vitesse d'un corps en chute libre :

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \tag{2.13}$$

où :

- h [m] est la hauteur de chute.
- g [$\frac{m}{s^2}$] est l'accélération de la pesanteur.

2.4.3.4 Lien entre p_d et le rebond

Sur base de l'hypothèse de Jolin (1999), l'influence de p_d sur le rebond est assez simple. Plus la profondeur de pénétration maximale d'une particule dans le substrat est grande, plus son

volume de pénétration apparent est grand et plus la contrainte de pénétration dynamique est faible. Une grande profondeur de pénétration est associée à un faible rebond. Donc, plus la contrainte de pénétration dynamique est faible, plus le rebond est faible pour une énergie cinétique de la particule fixée (Armelin, 1997 ; Armengaud, 2016 ; Dionne-Jacques, 2023 ; Ginouse, 2014 ; Jolin, 1999 ; Paquet, 2021).

Sur base de ses essais expérimentaux, Jolin (1999) a établi graphiquement une relation entre p_d et le rebond (graphe de gauche sur la FIGURE 2.21) en se basant sur la relation entre p_s et le rebond (graphe de droite sur la FIGURE 2.21).

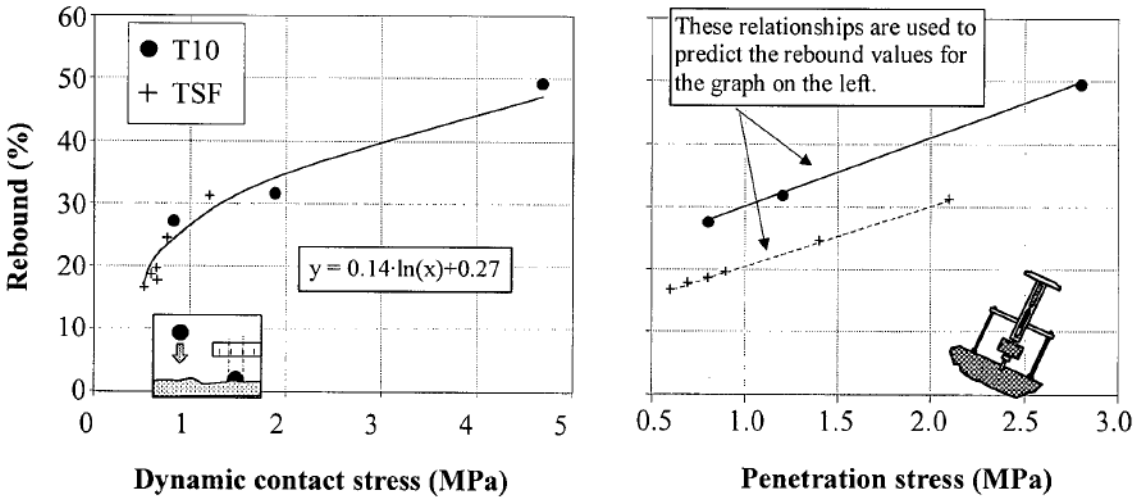


FIGURE 2.21 – Évolution du rebond en fonction de p_d (gauche) et p_s (droite) pour 2 mélanges différents (tiré de Jolin, 1999)

Malgré le faible nombre de points disponibles, il semblerait qu'il existe une dépendance unique entre le rebond et la contrainte de pénétration dynamique p_d, grâce à la formule trouvée par Jolin. Cela signifierait qu'il serait possible de prédire le pourcentage de rebond de n'importe quel mélange de béton projeté par voie sèche par la connaissance d'un seul paramètre : p_d (Jolin, 1999).

2.4.4 Nouvel essai de pénétration dynamique : la *catapulte*

Comme expliqué plus haut, il est impératif de développer d'autres méthodes de mesure afin de capturer le comportement transitoire rapide du substrat lors de la projection et d'évaluer ses propriétés dans son état *fluide*. C'est ce que Kim et al. (2024) ont réussi à faire.

Afin de vérifier et valider expérimentalement cette hypothèse de CF et de caractériser les propriétés dynamiques du substrat juste après la projection, un nouvel essai de pénétration dynamique a été mis au point à l'Université Laval par Kim et al. (2024). Ce test consiste en une

catapulte qui permet de projeter des billes métalliques sur le substrat directement après la projection. La particularité de ce test est sa capacité à projeter des billes 0,5 seconde après la fin de la projection. Ceci permet de capturer le comportement du substrat dans son état encore *fluide*, proche de son comportement réel pendant la projection qui lui permet de diminuer le rebond. Ce nouveau test de pénétration dynamique sera appelé *catapulte* dans le reste de ce document et la situation réelle au laboratoire est affichée sur la Figure 2.22.



Figure 2.22 – *Catapulte* fixée à un bras robotisé au laboratoire de béton projeté de l'Université Laval (Kim et al., 2024)

La vitesse des billes tirées par la *catapulte* a été mesurée par une caméra à haute vitesse. Afin d'obtenir une valeur précise, la vitesse a été mesurée 10 fois en étalant les mesures sur deux jours. Les mesures sont présentées au Tableau 2.4.

Jour 1	Jour 2
8,07 m/s	7,98 m/s
7,8 m/s	7,89 m/s
7,89 m/s	8,07 m/s
7,89 m/s	7,98 m/s
7,89 m/s	7,8 m/s

Tableau 2.4 – Mesures de la vitesse d'une bille (Kim et al., 2024)

Sur base de ces 10 mesures, la vitesse moyenne des billes est de 7,93 m/s (Kim et al., 2024). Ceci permet de connaître l'énergie cinétique de chaque bille projetée, leur vitesse et masse étant connues. Pour déterminer p_d, il suffit maintenant de déterminer le volume de pénétration des billes dans le substrat en fonction du moment auquel elles ont été projetées après la projection. Ce volume de pénétration s'obtient simplement par la mesure de la profondeur de pénétration maximale d'une bille dans le substrat (Section 2.4.5), celle-ci dépendant directement des propriétés dynamiques du matériau constituant ce substrat. Un des objectifs principaux du modèle numérique qui sera développé au Chapitre 3 sera d'essayer de trouver un ordre de grandeur de ces propriétés dynamiques pour la CF.

2.4.5 Validation de l'hypothèse de couche *fluide* grâce à la *catapulte*

Kim et al. (2024) ont réalisé des essais expérimentaux avec la *catapulte* en projetant des billes à différents instants après la fin de la projection. L'objectif est d'abord de déterminer la profondeur de pénétration des billes et ensuite de calculer et comparer la contrainte de pénétration dynamique à ces différents instants. La Figure 2.23 présente les résultats de leurs essais.

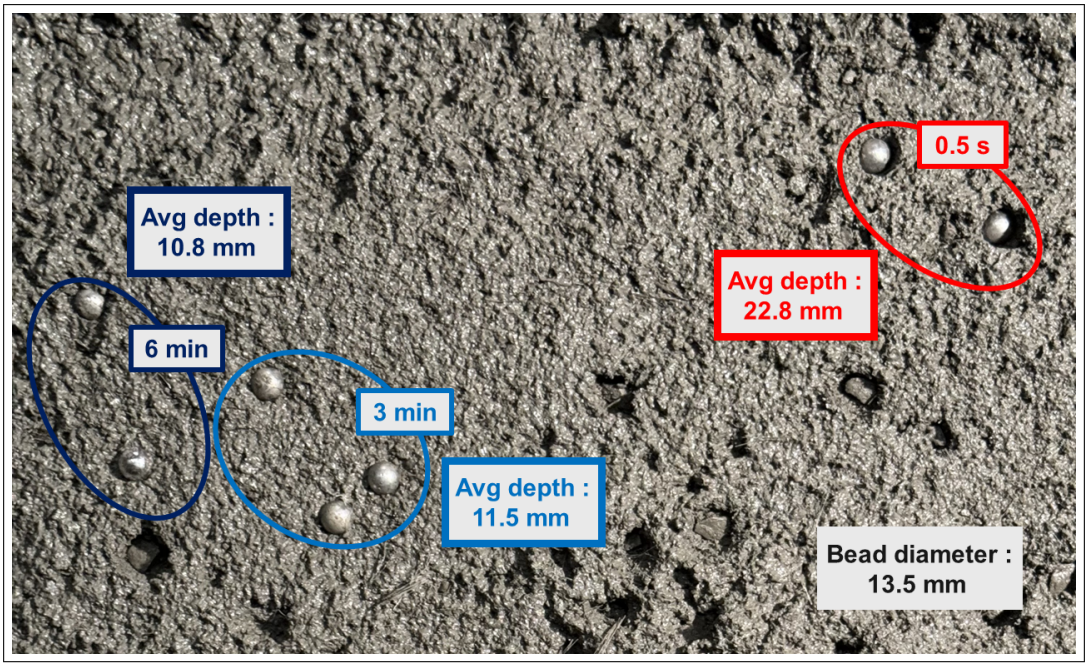


Figure 2.23 – Profondeurs de pénétration finales de billes projetées à différents instants après la projection (Kim et al., 2024)

La profondeur de pénétration des billes tirées après 0,5 seconde est plus grande que celles tirées après 3 ou 6 minutes. Ce résultat rejoint l'hypothèse faite concernant la CF dans laquelle la profondeur de pénétration des particules impactant cette couche est censée être plus grande. Les billes tirées après 0,5 seconde sont donc tirées au moment où le substrat est dans son état *fluide*. Les billes tirées après 3 et 6 minutes peuvent être assimilées au comportement élasto-

plastique du substrat.

Les valeurs de contrainte de pénétration dynamique sont reprises à la FIGURE 2.24. Les termes SF et AEA signifient respectivement fumée de silice et agent entraîneur d'air. Le terme entre parenthèses concerne la consistance du mélange : "wet" pour une consistance humide et "mid" pour une consistance moyenne se situant entre les consistances humide et sèche.

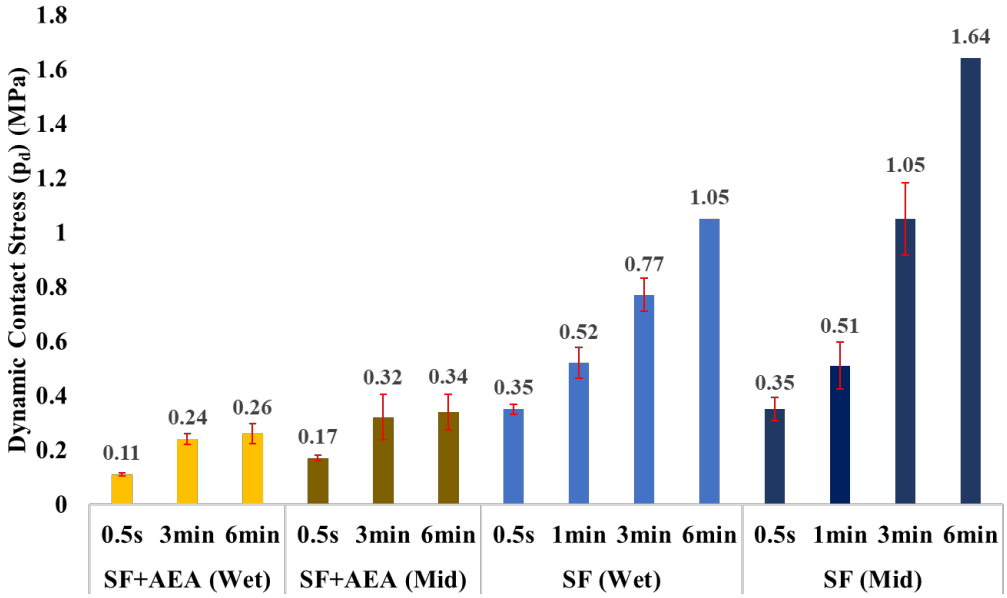


FIGURE 2.24 – Valeurs de p_d à différents instants pour plusieurs mélanges à différentes consistances (Kim et al., 2024)

La FIGURE 2.24 vient confirmer les profondeurs de pénétration obtenues précédemment. La contrainte de pénétration dynamique après 0,5 seconde est bien plus faible que celles après 3 et 6 minutes. Cette analyse reste correcte quelles que soient la consistance et le mélange projeté. Une consistance humide présente cependant des contraintes de pénétration dynamique inférieures à celles d'une consistance sèche.

Toutes ces observations au laboratoire permettent de confirmer l'existence d'une CF par l'intermédiaire de la mesure de contraintes de pénétration dynamique plus faibles. De plus, elles permettent de mettre en évidence un lien essentiel entre la contrainte de pénétration dynamique de la CF et le rebond.

2.5 Modèles analytiques de prédiction du rebond

2.5.1 Introduction

En plus de l'approche expérimentale, il est possible de modéliser les phénomènes de rebond par une approche plus théorique. Cette approche consiste à déterminer le rebond grâce aux équations du modèle physique d'Armelin (1997) (Section 2.2.2). Une série d'auteurs (Armelin, 1997 ; Armengaud, 2016 ; Laradh, 2020) ont essayé de prédire le rebond de cette façon. Cependant, la même incertitude concernant les propriétés du substrat dans son état *fluide* demeure pour chacun d'entre eux. Pour tous ces modèles, l'hypothèse de CF a donc été posée et prise en compte, ce qui explique l'obtention de résultats cohérents malgré la non prise en compte de la valeur réelle de la contrainte de pénétration dynamique p_d au niveau de la CF pendant la projection. Pour réussir à s'en sortir, les auteurs ont dû recourir à des facteurs pour calibrer leurs modèles par rapport aux résultats expérimentaux.

Les différents modèles de prédiction seront brièvement passés en revue afin d'expliquer leur fonctionnement général et leurs limitations. Il existe deux catégories de modèles analytiques à ce jour :

- modèles sur base d'une théorie à l'échelle d'une particule,
- modèles sur base d'une théorie à l'échelle du jet.

Les modèles sur base d'une théorie à l'échelle du jet sont les plus prometteurs en termes de caractérisation du rebond.

2.5.2 Théorie à l'échelle d'une particule

2.5.2.1 Méthode FORM (*First Order Reliability Method)*

Sur base de son modèle du rebond à l'échelle d'une particule (Section 2.2.2), Armelin (1997) tente d'évaluer la probabilité de rebond à l'échelle du jet de béton projeté sur base d'une méthode FORM, ou méthode d'analyse de fiabilité du premier ordre en français. Étant donné qu'il ne connaît pas les propriétés du substrat durant la projection, ces dernières constituent les variables aléatoires de son modèle (Armengaud, 2016).

À cause de la variabilité de ces paramètres d'entrée, le modèle ne permet pas une bonne estimation des pertes par rebond à l'échelle du jet. En effet, le rebond est fortement sous-estimé dans le modèle d'Armelin. Cependant, le modèle initial d'Armelin reste la référence incontournable en ce qui concerne le rebond d'une particule sur un substrat de béton frais.

2.5.2.2 Méthode de Monte-Carlo

Pour créer son modèle d'estimation du rebond à l'échelle du jet, Armengaud (2016) est repartie du modèle construit par Armelin (1997) en appliquant une méthode de type Monte-Carlo à la place de la méthode FORM. Une méthode de Monte-Carlo est un algorithme de calcul utilisé pour estimer les résultats possibles d'un événement incertain en utilisant un échantillonnage aléatoire répété. Comme pour le modèle d'Armelin (1997), la partie aléatoire concerne les propriétés du substrat pendant la projection. Pour ce modèle, elle remarque également des différences entre ses valeurs théoriques et expérimentales de rebond, sous-estimant elle aussi le rebond mais moins fortement que le modèle d'Armelin (1997). Ces différences viennent du délai entre la fin de la projection et la mesure des contraintes de pénétration dynamique pour le modèle théorique (Kim et al., 2024). Ce délai engendre : « un début de structuration de la pâte et des consistances mesurées ne traduisant pas la consistance du mélange au moment de la projection » (Armengaud, 2016).

Elle a ensuite proposé un "enrichissement" de ce modèle, qui ne sera pas développé, mais qui consiste en l'introduction d'un facteur "G" pour caler les résultats théoriques et expérimentaux. Pour ce modèle modifié, les calculs permettent de retrouver les valeurs de rebond mesurées expérimentalement. Comme pour le modèle qui va suivre, la concordance entre la théorie et l'expérimental n'a lieu qu'avec l'introduction d'un facteur qui tente de combler le manque d'informations sur les propriétés du substrat durant la projection. De tels résultats prometteurs, mais incorrects, ne doivent pas occulter la nécessité de mesurer ces propriétés.

2.5.3 Théorie à l'échelle du jet

2.5.3.1 Modèle énergétique à fréquence de masse

Ensuite, Laradh (2020) a étendu le modèle d'Armelin à l'échelle du jet en mettant au point un modèle de prédiction du rebond basé sur l'énergie cinétique incidente des particules. Son modèle consiste d'abord à déterminer la distribution d'énergie dans le jet de la même façon qu'à la Section 2.2.3.4 (Figure 2.12 par exemple).

Ensuite, il propose de décomposer le jet en plusieurs intervalles en considérant une particule fictive par intervalles dont la vitesse et la masse sont obtenues en fonction des distributions de vitesse et de masse expérimentales proposées par Ginouse (2014). Sur chacun de ces intervalles, il est donc possible de calculer l'énergie cinétique de la particule. Si les propriétés du substrat sont connues (p_d, p_s, σ_0 et ϵ_{pc}), il est possible de calculer les énergies de déformation élastique restituée W_2 et de décollement W_D sur chacun de ces intervalles. Avec ces informations, le pourcentage de rebond par intervalles peut être calculé. La Figure 2.25 illustre cette procédure.

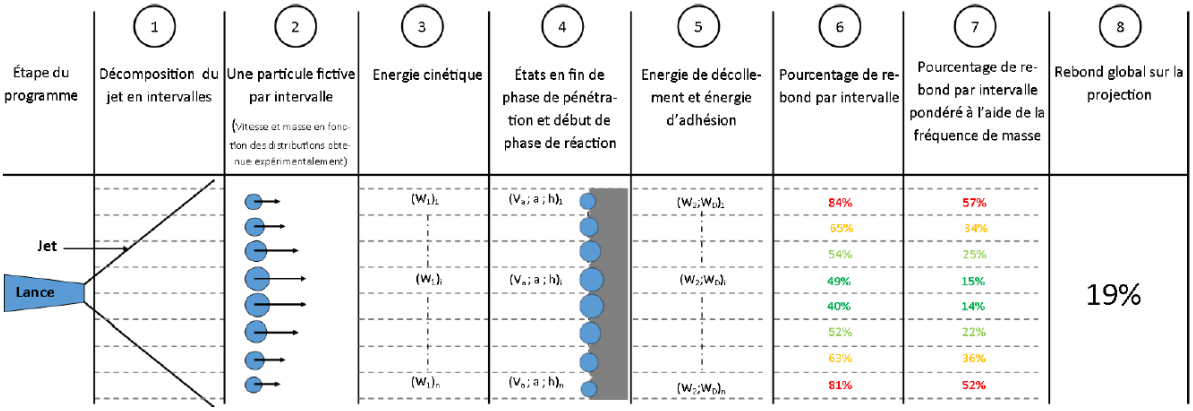


FIGURE 2.25 – Étapes du modèle de prédiction du rebond de Laradh (tiré de Laradh, 2020)

Cependant, Laradh (2020) ne prend pas en compte l'hypothèse de la CF dans son modèle. En effet, la valeur de p_d qu'il utilise pour caractériser son substrat dans la phase dynamique est bien trop grande (TABLEAU 2.5) et représente plutôt ce dernier dans son état élasto-plastique. Cela vient du fait que personne n'avait réussi à la mesurer à son époque. Il est nécessaire d'utiliser une valeur proche de celle mesurée par Kim et al. (2024) afin d'obtenir une estimation correcte du rebond. Cependant, les valeurs théoriques de rebond que Laradh (2020) obtient avec son modèle sont cohérentes avec ses valeurs de rebond expérimentales, ce qui est incohérent. Cela vient de l'étape 7 (FIGURE 2.25), dans laquelle il pondère le pourcentage de rebond par intervalles à l'aide d'un facteur. Ce facteur lui permet d'obtenir une bonne estimation du rebond, malgré le fait que son modèle original tendait à le surestimer, principalement à cause de la variabilité et de la non-connaissance des propriétés dynamiques du substrat de béton frais.

TABLEAU 2.5 – Propriétés du substrat utilisées par Laradh (2020)

Paramètre	**Valeur [MPa]**
p_s	0,5
p_d	10
σ_0	0,0055
ϵ_{pc}	0,002

Le modèle de Laradh (2020) est très prometteur en termes de prédiction du rebond. En lui injectant les bonnes valeurs de p_d et en prenant en compte l'influence de l'angle d'incidence au niveau de chaque intervalle, il devrait être possible d'obtenir une bonne estimation du rebond.

2.6 Modélisation numérique

2.6.1 Introduction

À ce jour, peu de travaux ont été effectués concernant la modélisation numérique des bétons projetés et encore moins à l'échelle du jet. En effet, modéliser l'entièreté du jet est un problème d'une complexité importante. C'est pour cela que la plupart des études portant sur le jet entier de béton projeté restent principalement expérimentales et se sont développées grâce aux avancées de Ginouse (2014). Compte tenu des difficultés matérielle, humaine et chronophage induites par la projection de béton en laboratoire, la modélisation numérique semble être une solution prometteuse vers une meilleure compréhension des phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés. Dans sa thèse, Armengaud (2016) a ouvert la voie vers la modélisation numérique en étudiant la pénétration d'une aiguille et l'impact d'une bille en verre sur un substrat de béton projeté. L'objectif est ici de repartir de ses résultats afin d'élaborer un modèle plus complet.

2.6.2 Objectifs du modèle d'Armengaud

Il est important de mentionner que le modèle numérique d'Armengaud (2016) n'a pas été mis au point afin de prédire le rebond d'une projection mais pour caractériser les propriétés du substrat en amont de la projection afin de les injecter dans un modèle de prédiction du rebond. Pour ce faire, elle a modélisé les essais de pénétration statique et dynamique afin d'obtenir des valeurs de p_s et p_d. L'essai statique est représenté par l'enfoncement d'une aiguille à embout plat à vitesse imposée et l'essai dynamique par l'impact d'une bille en verre de forme sphérique lancée avec une vitesse initiale sur le substrat. Au vu du sujet de ce travail, ce sont surtout les résultats de l'essai dynamique qui vont avoir un intérêt dans cette partie.

La Figure 2.26 donne un aperçu du modèle développé par Armengaud (2016).

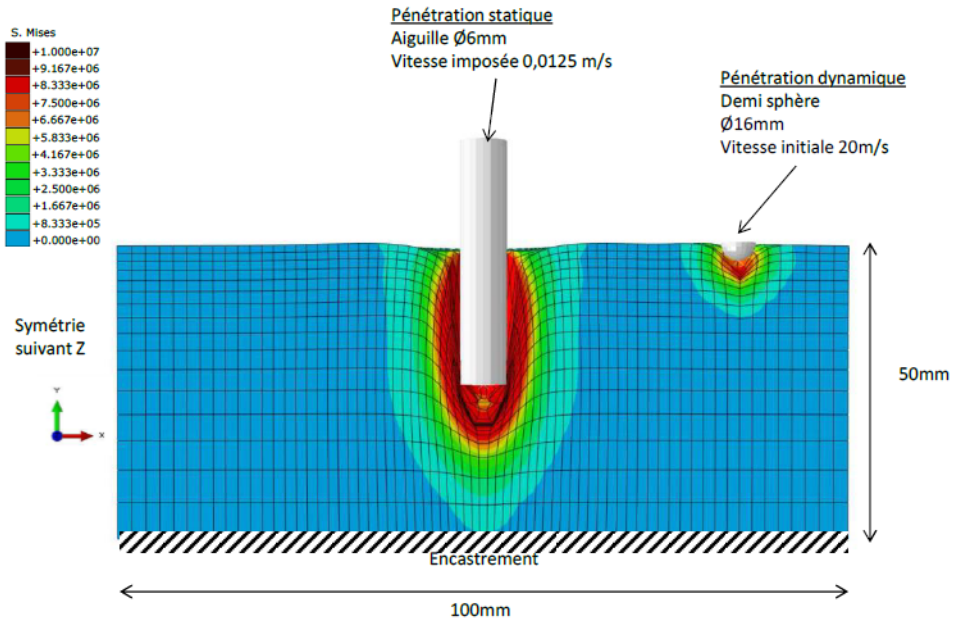


FIGURE 2.26 – Modèle aux éléments finis représentant le substrat de béton projeté (en bleu) et les essais de pénétration statique et dynamique (tiré de Armengaud, 2016)

Les propriétés des différents composants retrouvés sur la FIGURE 2.26, ainsi que la plage de variation utilisée par Armengaud (2016) pour le module de Young E et la limite d'élasticité f_y du substrat peuvent être retrouvées sur la FIGURE 2.27.

Aiguille

Diamètre (mm)	6
Hauteur (mm)	50
Vitesse de déplacement (m/s)	0,0125
Matériau	Indéformable

Sphère

Masse volumique (kg/m³)	2660
Diamètre (mm)	16
Vitesse initiale (m/s)	20
Matériau	Indéformable

Substrat

Masse volumique (kg/m³)	2300
Matériau Elasto plastique parfait	
Module d'Young (GPa)	[5x10^{-3} – 35]
Seuil Plastique (MPa)	[0,1 – 10]
Coefficient de poisson	0,3

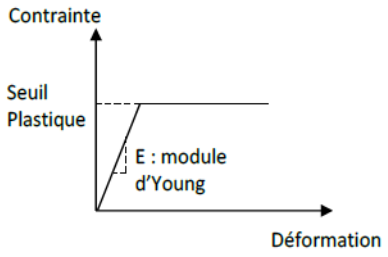


FIGURE 2.27 – Paramètres d'entrée du modèle (tiré de Armengaud, 2016)

Il faut souligner que la bille a été choisie en verre pour se rapprocher de la masse volumique d'un granulat qui vaut approximativement 2500 kg/m^3 (Armengaud, 2016).

2.6.3 Résultats obtenus

Les FIGURES 2.28 et 2.29 montrent les résultats obtenus par Armengaud (2016) en relation avec la contrainte de pénétration dynamique.

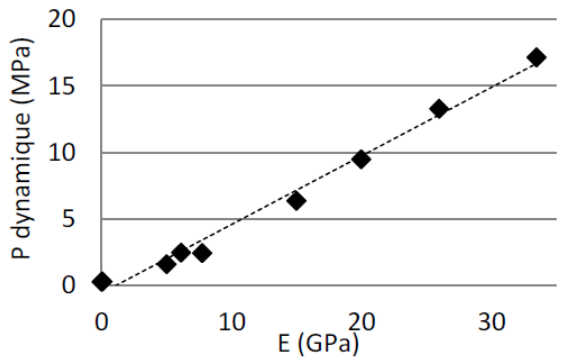


FIGURE 2.28 – p_d en fonction de E

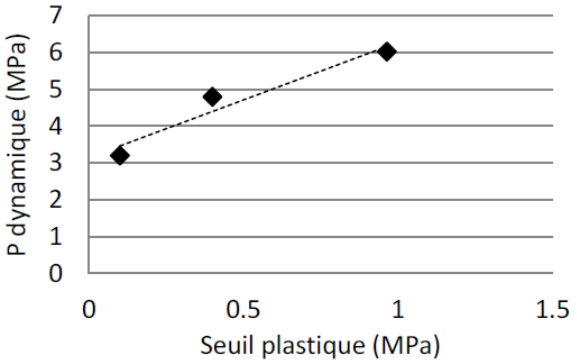


FIGURE 2.29 – p_d en fonction de f_y

Sur la FIGURE 2.28, il est possible de voir que p_d est directement proportionnelle au module de Young du substrat. Si la rigidité du substrat augmente, la contrainte de pénétration dynamique fait de même pour une limite d'élasticité fixée à 0,5 MPa. Le diamètre, la masse et la vitesse de la bille sont constantes. Sur la FIGURE 2.29, le même constat peut-être fait entre p_d et la limite d'élasticité, pour un module de Young fixé à 5 GPa.

Les valeurs de p_d obtenues par Armengaud (2016) sont bien supérieures à celles mesurées par Kim et al. (2024) en laboratoire. Les propriétés utilisées par Armengaud (2016) sont donc assimilables au comportement élasto-plastique du substrat. Il s'agit d'une bonne base pour la modélisation afin de déterminer les propriétés de la CE.

2.6.4 Conclusion

Tous les autres paramètres étant constants, p_d peut être reliée directement à la profondeur de pénétration maximale de la bille dans le substrat. En effet, cette dernière est directement proportionnelle à la capacité de déformation du substrat qui est elle-même liée à ses propriétés élasto-plastiques, sa rigidité et sa limite d'élasticité. La valeur de p_d dépend donc du module de Young E et de la limite d'élasticité f_y (Armengaud, 2016).

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Développement des objectifs

L'état de l'art a permis de mettre en lumière les différents concepts entourant la théorie du rebond dans les bétons projetés et, plus spécifiquement, le béton projeté par voie sèche. Les objectifs énoncés précédemment peuvent désormais être étoffés.

Évaluer l'efficacité d'un outil de modélisation numérique pour mieux comprendre les phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés.

1. Créer un modèle numérique représentant l'essai de pénétration dynamique de la *catapulte* de manière complète et intuitive ; permettant de représenter diverses situations à partir de cette situation simplifiée et pouvant être repris facilement par un autre utilisateur.
2. Représenter numériquement l'hypothèse de couche *fluide* vérifiée par Kim et al. (2024).
3. Valider la pertinence de ce modèle en le comparant aux quelques résultats d'essais expérimentaux disponibles, tels que les résultats de Kim et al. (2024).
4. Utiliser la modélisation numérique afin de caractériser les couches *fluide* et élasto-plastique en termes de propriétés "mécaniques".

Étendre ce modèle à des cas plus complexes en jouant sur l'angle d'incidence des particules, l'épaisseur de la couche *fluide* ainsi que la taille et la vitesse des particules.

1. Déterminer l'influence de l'angle d'incidence d'une particule sur le rebond et la déformation du substrat de manière numérique.

2. Faire varier l'épaisseur de la couche *fluide* pour estimer son influence sur le rebond et la déformation du substrat de manière numérique.
3. Déterminer l'influence de la taille des particules sur le rebond et la déformation du substrat de manière numérique.
4. Déterminer l'influence de la vitesse des particules sur le rebond et la déformation du substrat de manière numérique.

3.2 Développement du modèle numérique

Dans cette section, l'évolution de la création du modèle numérique est présentée étape par étape. Il est important de rappeler que le modèle numérique a pour objectif principal de représenter l'essai de pénétration dynamique de la *catapulte* (Kim et al., 2024). À chaque étape, il conviendrait d'effectuer une comparaison et une validation des résultats numériques sur base de résultats d'essais expérimentaux. Cependant, ceux-ci ne sont pas disponibles en grand nombre dans la littérature (Chapitre 2). Les seuls résultats valables sont ceux obtenus par Kim et al. (2024). Les résultats numériques obtenus par Armengaud (2016) constituent également une source d'informations mais ne peuvent être considérés comme une référence valide.

Le caractère exploratoire de ce projet est à la source de ces limitations en termes de validation expérimentale. Ceci amène aussi le lecteur à être critique vis-à-vis des résultats présentés ci-dessous. Il s'agit d'une des premières tentatives de modélisation numérique des phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés. Le modèle numérique est, certes, un modèle idéalisé et possède plusieurs limitations et hypothèses fortes qui seront développées par la suite. Néanmoins, il respecte les grandes lignes directrices du béton projeté et permet d'illustrer les phénomènes souhaités.

3.2.1 Clarification sur le substrat et limites principales du modèle

Le substrat et l'hypothèse de CF ont été successivement introduits dans l'état de l'art par les Figures 2.16 et 2.17. La première montre bien que la CF, comme le mot "couche" l'indique, ne se développe que sur une épaisseur limitée du substrat sous l'impact du jet de béton projeté. La deuxième observe la CF de face et montre que celle-ci possède un rayon qui va dépendre de la distribution de masse dans le jet. Sur cette Figure 2.17, l'utilisation du mot "zone" amène une certaine confusion quant au comportement réel de la CF. Une "zone" *fluide* impliquerait que la CF s'étend sur toute l'épaisseur du substrat, ce qui semble irréel, ou du moins demanderait une fréquence énergétique des particules beaucoup trop grande.

Ensuite, se pose la question de l'uniformité de l'épaisseur de cette CF. La Figure 2.16 montre une épaisseur variable et semble déjà plus proche de la réalité. C'est cette direction qu'il faut suivre. La Figure 2.17 est une représentation en deux dimensions du substrat et ne permet pas de visualiser la dimension perpendiculaire au plan de la figure. En première observation, les CF et CE sont bien séparées par la ligne représentant la fréquence énergétique critique. Ceci impliquerait que l'épaisseur de la CF est constante dans le cercle rouge, ce qui n'est évidemment pas le cas. En fonction de la stimulation du substrat par le jet, qui est plus importante au centre du substrat et décroît radialement, l'épaisseur et les propriétés "mécaniques" de la CF vont évoluer. En particulier, l'épaisseur de la CF va diminuer en s'éloignant du centre du jet.

Pour le moment, il n'a été question que d'épaisseur mais le même principe peut être appliqué pour les propriétés "mécaniques" du substrat et plus particulièrement de la CF. Celles-ci vont augmenter en s'éloignant du centre du jet, la fréquence énergétique étant plus faible. Le mot "mécaniques" se trouve entre guillemets pour souligner le caractère *fluide* de la CF. En effet, sur base du modèle d'Armelin (1997), la CF sera toujours représentée par un matériau élasto-plastique (Section 2.2.2) dans le modèle numérique, avec un module de Young et une limite d'élasticité. Ces propriétés sont des propriétés mécaniques des matériaux. Dans les faits cependant, ce caractère *fluide* est représenté par des propriétés "mécaniques" très faibles dans le modèle qui se rapprochent presque des propriétés rhéologiques de certains fluides. La confusion peut venir du fait que les propriétés mécaniques d'un solide sont utilisées pour représenter le comportement d'un fluide, ou du moins d'un matériau dont le comportement se situe entre celui d'un solide et d'un fluide.

Pour contrer ces hypothèses fortes, une représentation réelle du substrat peut être imaginée comme sur la Figure 3.1. La couleur rouge représente l'étendue de la CF et la couleur bleue la CE. Le dégradé de couleur montre bien l'évolution des propriétés et de l'épaisseur des différentes couches. Pour la CF, plus le rouge est vif, plus l'épaisseur est grande et les propriétés "mécaniques" faibles. En ce qui concerne la CE, considérons que chaque cercle concentrique possède les mêmes propriétés sur la totalité de l'épaisseur du substrat. Il ne faut donc pas parler d'épaisseur. Plus le bleu devient foncé et plus les propriétés mécaniques (sans "" cette fois) sont importantes, signifiant une augmentation de la rigidité.

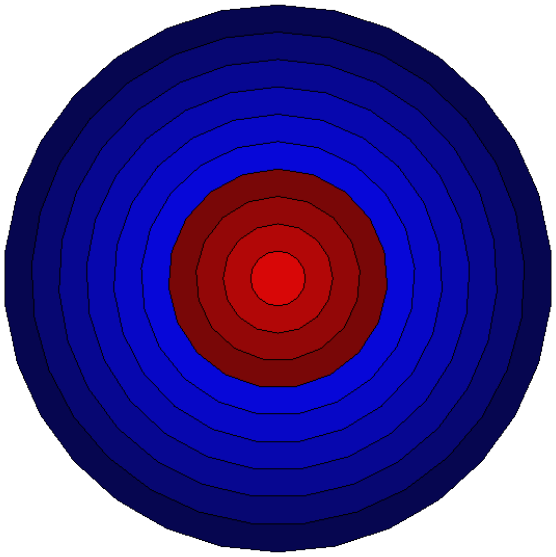


FIGURE 3.1 – Représentation réelle et idéale du substrat

Ceci permet d'arriver à la première limitation du modèle. Dans le modèle numérique développé ci-dessous, il n'a pas été possible de modéliser les différentes couches de cette manière. Pour cela, il aurait fallu se pencher plus en profondeur sur le jet incident et la distribution du débit massique. En effet, les variations de propriétés du substrat dépendent principalement de la distribution d'énergie dans le jet qui est fortement liée à la distribution de masse mais également à la distribution de vitesses. Cela aurait demandé la création d'un modèle beaucoup plus sophistiqué qui dépasse le cadre de ce travail. L'épaisseur de la CF dans le modèle numérique sera donc uniforme sur tout le cercle rouge (*Limitation n°1*). Pour les propriétés "mécaniques", la FIGURE 2.17 sera utilisée comme référence. Les propriétés n'évoluent pas avec le rayon du substrat et la variation de fréquence énergétique (comme sur la FIGURE 3.1), mais seront considérées constantes. Il existera donc une combinaison E - f_y pour l'ensemble de la CF et une combinaison E - f_y pour l'ensemble de la CE. Cette simplification permet au modèle de rester simple et de donner des résultats interprétables dans cette étude exploratoire.

Les explications apportées sur base de la FIGURE 3.1 concernent un jet fixe. Il ne faut cependant pas perdre d'esprit qu'en réalité le jet suit une trajectoire et ne reste pas fixe (FIGURE 2.19), ce qui va amener des considérations supplémentaires même si le principe est conservé. Et pour cause, un paramètre très important n'a pas été pris en compte : le temps. Le jet n'étant pas fixe, les propriétés et l'épaisseur de la CF évoluent avec la trajectoire de projection. Les propriétés des cercles concentriques à la FIGURE 3.1 sont donc dépendantes du temps et, plus particulièrement, du temps depuis le dernier passage du jet de particules. Ceci permet de rappeler l'importance de la transition rapide du substrat de son état élasto-plastique vers *fluide* et inversement. La deuxième limitation de ce travail concerne donc la prise en compte du temps : l'idéal aurait été de faire évoluer les propriétés du substrat et l'épaisseur de la CF en fonction

du temps et de la trajectoire planétaire. Le degré de complexité associé à cette considération étant vraiment important et dépassant le cadre de ce projet, il n'a pas été possible de traiter cet aspect dans ce travail exploratoire. Comme expliqué pour la première limitation, les propriétés des différentes couches et l'épaisseur de la CF sont donc considérées constantes dans le modèle et n'évoluent pas avec le temps (*Limitation n°2*). De plus, la situation modélisée correspond à une situation à jet fixe. Néanmoins, l'étude d'une seule particule (bille dans ce cas) qui touche une CF d'épaisseur et de rayon constants répond tout à fait à l'objectif qui est de reproduire l'essai de la *catapulte* de Kim et al. (2024).

3.2.2 Étape n°1 : tir d'une bille sur le substrat de béton frais à 90°

L'objectif de cette étape est de représenter l'impact d'une bille en acier lancée perpendiculairement sur le substrat de béton frais et de mesurer sa profondeur de pénétration. Il s'agit de la reproduction du test de la *catapulte* réalisé par Kim et al. (2024). Les résultats qu'ils ont obtenus en termes de profondeurs de pénétration de billes à différents instants serviront de référence expérimentale (Figures 2.23 et 2.24). Ces profondeurs permettront de calculer les contraintes de pénétration dynamique p_d associées.

3.2.2.1 Modélisation de la bille

Les propriétés de la bille sont présentées au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Propriétés de la bille

Matériau	ρ (kg/m^3)	E (GPa)	f_y (MPa)	ν (-)
Acier	7850	210	355	0,3

Dans cette première étape, la bille d'un diamètre de 13,5 mm sera projetée perpendiculairement sur le substrat de béton frais à une vitesse de 7,9 m/s, comme dans l'essai expérimental de Kim et al. (2024).

La modélisation et le maillage de la bille sont présentés à la Figure 3.2.

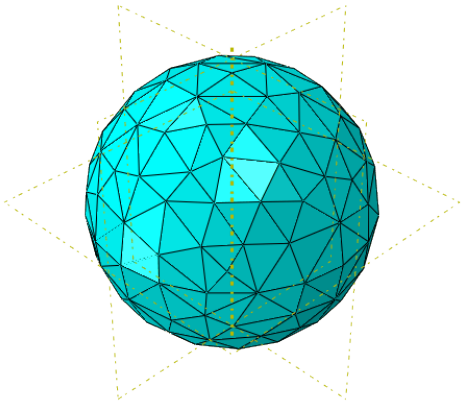


FIGURE 3.2 – Maillage de la bille

Pour être tout à fait complet, le maillage de la bille est composé de 1209 éléments. Les éléments utilisés sont des tétraèdres linéaires à quatre nœuds.

3.2.2.2 Modélisation du substrat

Avant de passer à la modélisation du substrat, la masse volumique ρ et le coefficient de Poisson ν du béton projeté resteront constants tout au long du développement du modèle numérique. Ces propriétés sont indiquées au TABLEAU 3.2.

TABLEAU 3.2 – Propriétés du substrat

	Matériau	ρ (kg/m^3)	ν (-)
Couche *fluide*	Béton projeté *fluide*	2000	0,2
Couche élasto-plastique	Béton projeté rigide	2000	0,2

Le TABLEAU 3.2 permet de remarquer que la densité choisie pour représenter le béton projeté est un peu faible, la densité réelle se situant plutôt aux alentours de 2300-2400 kg/m^3. Ce choix rejoint la *limitation n°3* énoncée plus tard dans le CHAPITRE 4. Les problèmes de déformation excessive dans le logiciel ABAQUS sont accentués avec l'augmentation de la densité. Pour se prémunir de ces problèmes, une densité plus faible a été choisie.

Éléments constitutifs

Pour modéliser le substrat en respectant la FIGURE 2.16, il est nécessaire d'introduire un élément représentant la CF et possédant des propriétés "mécaniques" différentes du reste du substrat et, donc, de la CE. Cet élément aura une taille (rayon) (FIGURE 2.17) et une épaisseur

(Figure 2.16) inférieures à celles du substrat. Dans ce modèle, en se basant sur les observations de projections réelles à l'Université Laval, il a été choisi de fixer l'épaisseur du substrat de béton frais à 50 mm. Les rayons des CF et CE seront respectivement de 40 et 100 mm. La Figure 3.3 permet de visualiser le substrat qui a été modélisé dans ABAQUS en gardant le code couleur utilisé par Paquet (2021) afin de représenter les différentes couches. Il est bon de rappeler que ce qui est modélisé ici n'est que la partie du substrat située "sous le jet" et, donc, dans les limites du cône de projection (Figure 2.16).

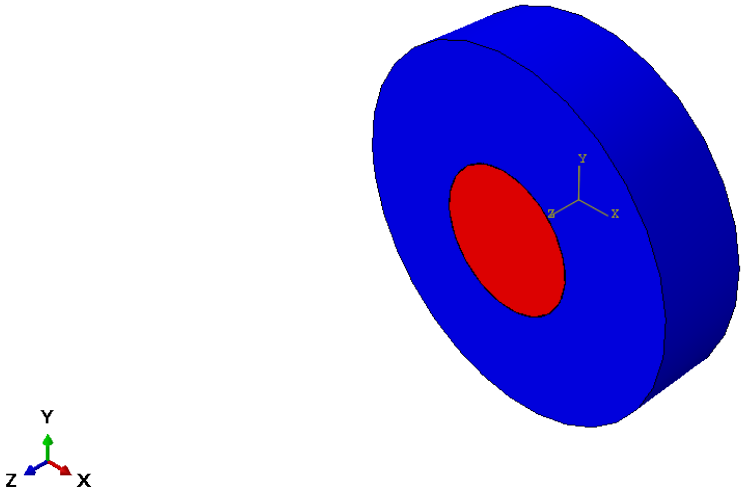


Figure 3.3 – Modélisation du substrat avec distinction entre les différentes couches (*fluide* en rouge et élasto-plastique en bleu)

Ensuite, il a fallu choisir une épaisseur de cette CF. Dans ce projet exploratoire, cette épaisseur a été choisie à 13,5 mm, ce qui correspond au diamètre de la bille projetée. La variation de cette épaisseur et son influence seront testées par la suite afin d'en analyser les implications sur le comportement et la déformation du substrat. La Figure 3.4 permet d'observer cette CF depuis le côté droit du substrat.

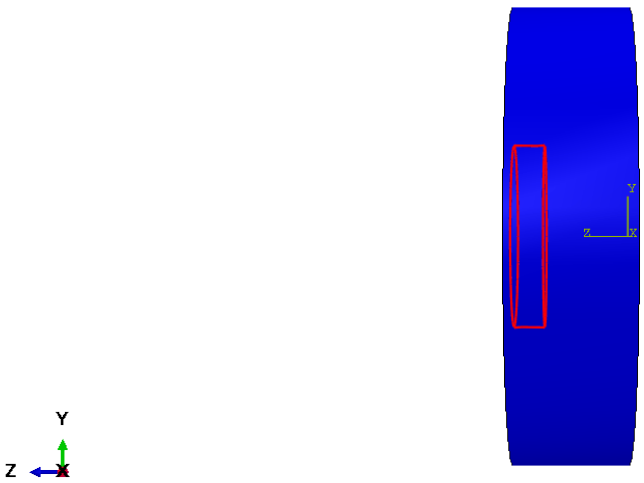


FIGURE 3.4 – Épaisseur de la CF dans le substrat - Vue latérale

Pour ne pas induire de confusion, il faut noter que le logiciel ABAQUS ne permet pas d'obtenir une vue latérale parfaite, mais induit une petite perspective qui peut troubler notre vision. La FIGURE 3.3 montre cependant que la planéité et le parallélisme des différents éléments sont bien respectés.

Il en est de même pour la FIGURE 3.5 qui permet cette fois d'observer l'épaisseur de la CE située derrière la CF. Il est important d'avoir en tête que le matériau se situant "derrière" la CF possède les mêmes propriétés que la CE. Cela va avoir un impact important sur les comportements de la bille et du substrat lors de la pénétration de la première citée.

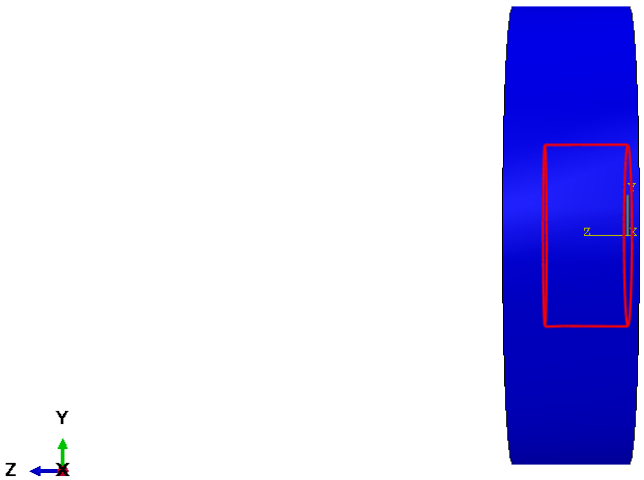


FIGURE 3.5 – Épaisseur de la CE dans le substrat - Vue latérale

Conditions limites, vitesse de la bille et maillage du substrat

Premièrement, il est bon de noter que la gravité est appliquée à l'ensemble du modèle, incluant la bille et le substrat.

Ensuite, le lien substrat-panneau de projection est modélisé par un encastrement. La Figure 3.6 permet d'observer cette condition d'appui et montre également la vitesse de la bille (représentée en blanc).

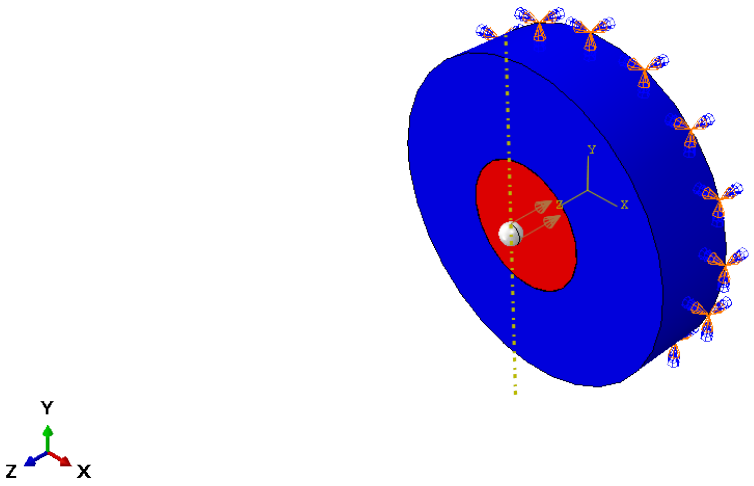


Figure 3.6 – Conditions limites et vitesse de la bille

Pour information, la bille est placée très près du substrat, à 10 mm précisément dans le modèle, afin de diminuer le temps de calcul. Ce n'est pas très intéressant de simuler la trajectoire de la bille dans l'air : cela consomme beaucoup de temps de calcul et amène peu d'informations. En réalité, la gravité et les frottements de l'air diminueraient légèrement la vitesse de la bille et l'angle d'impact ne serait pas exactement 90°. Pour s'affranchir de ces considérations, la bille est placée à 10 mm du substrat et deux hypothèses sont faites : la bille touche le substrat avec un angle de 90° et une vitesse de 7,9 m/s qui n'ont pas été altérés par son trajet à l'air libre.

Finalement, la Figure 3.7 indique le maillage choisi pour le substrat. Il a été choisi suffisamment fin afin d'obtenir des résultats précis mais pas trop fin afin de conserver un temps de calcul raisonnable. Le maillage choisi semble être un bon compromis entre ces deux considérations. De plus, la CF étant la zone d'importance, il a été choisi de la mailler plus finement que le reste de la CE "extérieure" pour les mêmes raisons d'optimisation de la combinaison temps-précision de calcul.

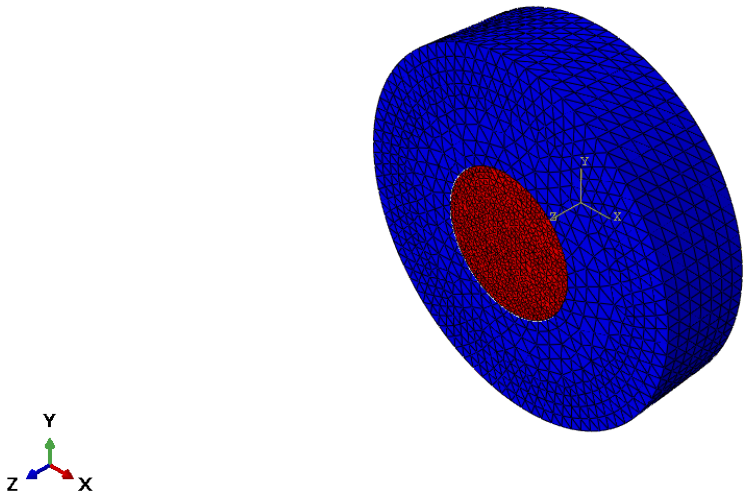


FIGURE 3.7 – Maillage du substrat

Le maillage complet du substrat comporte 66 919 éléments tétraèdres linéaires à quatre nœuds. Dans ABAQUS, les différentes couches sont liées entre elles par une contrainte de liaison qui met en commun leurs degrés de liberté en translation et en rotation et les rend égaux. Ce sont les nœuds du maillage qui sont liés entre eux, le substrat fonctionne donc comme une seule et même pièce.

3.2.2.3 "Choix" des propriétés de la couche élasto-plastique

Avant de faire varier les propriétés de la CF afin d'obtenir un comportement satisfaisant, il est important de fixer les propriétés mécaniques de la CE. En effet, lorsque la CF fait son "apparition" sous l'impact du flux de matériaux et sur une portion du diamètre et de l'épaisseur totale du substrat, le reste du substrat a eu le temps de repasser dans son état élasto-plastique "rigide".

Pour faire ce choix, il est possible de faire un lien avec deux sources citées dans le CHAPITRE 2. Le premier lien consiste à repartir des propriétés mécaniques minimales utilisées par Armengaud (2016) dans son modèle numérique (FIGURE 2.27). Par propriétés mécaniques, il est question du module de Young E et de la limite d'élasticité f_y. Les valeurs minimales utilisées par Armengaud sont les plus faibles de ses plages de variations :

$$\begin{cases} E = 5 \text{ MPa} \\ f_y = 0,1 \text{ MPa} \end{cases} \tag{3.1}$$

Il faut cependant être critique vis-à-vis de ces valeurs. Il n'est pas question de les choisir par pur hasard. C'est pourquoi elles ont été testées afin de vérifier les résultats obtenus. C'est à

ce moment-là que le deuxième lien entre en jeu, à savoir l'essai de pénétration dynamique de Kim et al. (2024). Sur la FIGURE 2.23, les billes tirées à 0,5 seconde sont associées au comportement de la CF et celles tirées à 3 et 6 minutes sont associées au comportement de la CE. Sur base de ces profondeurs et de celles obtenues avec le modèle numérique, il sera possible de valider les propriétés utilisées par Armengaud comme caractérisant le substrat dans son état élasto-plastique à 3 (et 6) minutes.

Pour faire tourner cette situation dans le modèle, il a été nécessaire d'effectuer quelques changements. La CF ne sera plus modélisée, celle-ci n'étant plus présente après 3 et 6 minutes, et le substrat est considéré entièrement élasto-plastique. La FIGURE 3.8 représente cette situation.

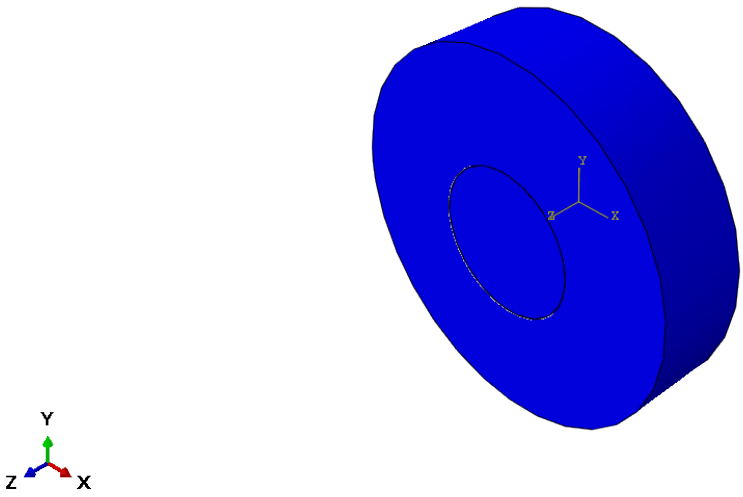


FIGURE 3.8 – Substrat entièrement élasto-plastique

Les deux cylindres utilisés pour représenter les CF et CE sont désormais remplacés par un seul représentant cette "couche" élasto-plastique centrale. En réalité, l'idéal aurait été de modéliser l'entièreté du substrat par un seul élément, sans passer par cette zone centrale. Cependant, pour garder l'esprit de la méthodologie employée dans le cas de la présence d'une CF et pour conserver le maillage plus fin au centre employé jusqu'ici, c'est cette solution qui a été retenue.

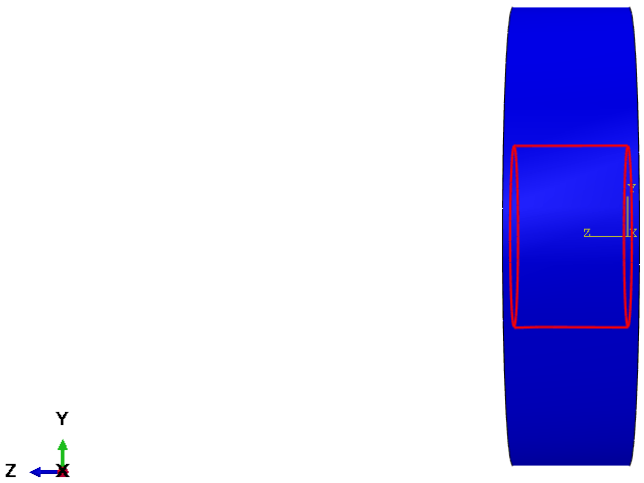


FIGURE 3.9 – Substrat entièrement élasto-plastique - Vue latérale

3.2.2.4 Recherche des propriétés de la couche *fluide*

Une fois que les propriétés de la CE ont été déterminées, il est temps de s'intéresser aux propriétés "mécaniques" de la CF. Même si Kim et al. (2024) ont ouvert la voie vers une caractérisation du substrat dans son état *fluide* (CF) grâce au test de la *catapulte*, les propriétés de cette couche restent en grande partie méconnues. Quelle est la valeur de son module de Young ? Quelle est la valeur de sa limite d'élasticité ? Faut-il parler en termes de propriétés "mécaniques" ou plutôt rhéologiques et, donc, parler de viscosité et de seuil de cisaillement ?

Un des objectifs principaux de ce mémoire étant de caractériser la CF en termes de propriétés grâce à la modélisation numérique, la marche à suivre consistera à simuler plusieurs combinaisons E - f_y pour la CF jusqu'à obtenir un comportement satisfaisant du substrat. L'hypothèse posée suggère qu'un tel comportement est obtenu lorsque la CE est suffisamment sollicitée/-déplacée lors de la pénétration de la bille dans la CF. Il est important de rappeler que cette étude est principalement phénoménologique et qu'à ce stade, il n'est pas possible de connaître avec précision le comportement attendu du substrat. Quatre combinaisons E - f_y seront simulées et une combinaison satisfaisante sera retenue pour la suite du développement du modèle numérique. Le choix de retenir une combinaison permet d'avoir une base lors de la simulation des cas particuliers, ce qui rendra l'analyse des résultats plus facile et plus compréhensible.

3.2.3 Étape n°2 : influence de l'angle d'incidence d'une bille sur le substrat

Maintenant que la combinaison de propriétés "satisfaisante" pour la CF est connue lorsque la bille est tirée avec un angle de 90°, il peut s'avérer intéressant d'observer l'influence d'une variation de l'angle sur la pénétration de la bille et le comportement du substrat. En conservant la combinaison "satisfaisante", cinq autres angles seront simulés en plus de la valeur à 90° :

Tableau 3.3 – Variation de l'angle de tir de la bille

Angle (°)
75
60
45
30
15

L'objectif est que la bille rencontre le substrat approximativement au même endroit pour n'importe quel angle de tir, c'est-à-dire au centre de la CF. Ceci permet de comparer la même situation. En gardant une distance de 10 mm par rapport au substrat, les angles les plus importants (30° et 15°) ne toucheront pas exactement le centre de la CF en premier lieu, ce qui n'est pas bien grave étant donné que l'impact se fait toujours sur la CF. Par un calcul trigonométrique, il est possible de calculer la nouvelle position verticale de la bille pour chaque angle, en supposant que la bille est toujours placée à une distance horizontale de 10 mm par rapport au substrat. Ces positions sont indiquées au Tableau 3.4.

Tableau 3.4 – Position verticale de la bille en fonction de l'angle de tir

Angle (°)	z (mm)	y (mm)
90	10	0
75	10	2,7
60	10	5,8
45	10	10
30	10	17,3
15	10	37,3

La Figure 3.10 illustre ceci.

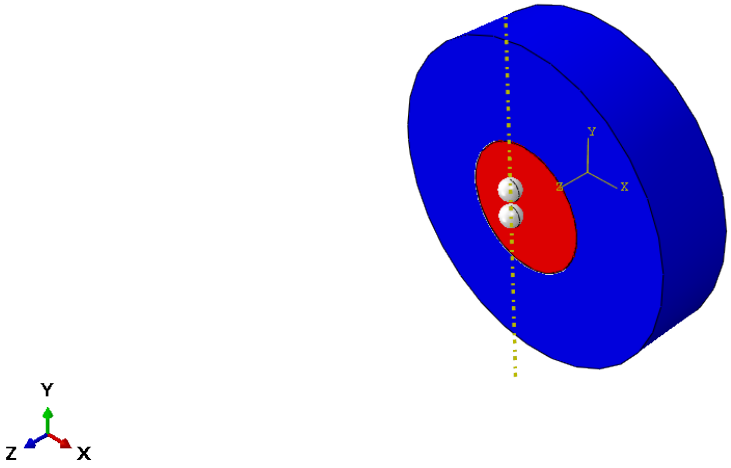


Figure 3.10 – Schéma d'une bille placée à 90° et à 30°

Pour conserver une vitesse d'impact de 7,9 m/s pour chaque angle, il est nécessaire de la décomposer en deux composantes dans ABAQUS. Un calcul trigonométrique permet d'obtenir cela au Tableau 3.5.

Tableau 3.5 – Vitesses selon z et y en fonction de l'angle d'incidence

Angle (°)	V_z (m/s)	V_y (m/s)
90	-7,9	0
75	-7,63	-2,05
60	-6,84	-3,95
45	-5,59	-5,59
30	-3,95	-6,84
15	-2,05	-7,63

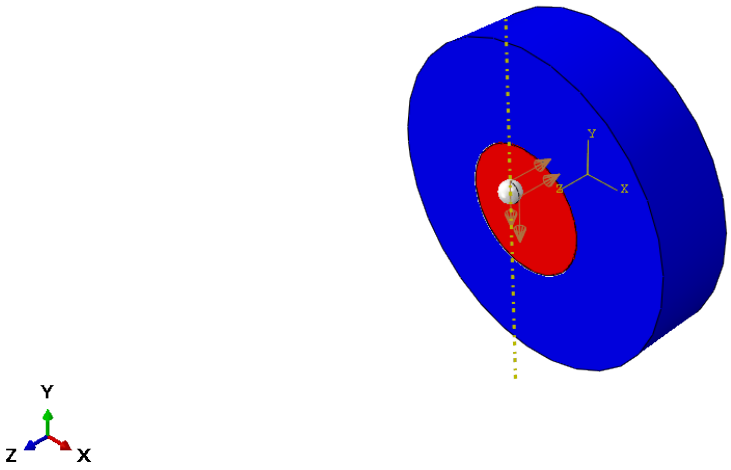


FIGURE 3.11 – Représentation des vitesses pour un angle de 30°

3.2.4 Étape n°3 : influence de l'épaisseur de la couche *fluide*

La dernière étape de développement du modèle numérique consiste à faire varier l'épaisseur de cette fameuse CF. Les deux premières étapes ont permis de mettre au point un modèle relativement complet permettant de tirer une particule perpendiculairement et avec un angle sur le substrat et d'y observer sa pénétration. Ce modèle permet d'"observer" le comportement des CF et CE de manière assez simple et constitue une base solide pour investiguer toutes sortes de cas. L'étape n°1 a permis de trouver différentes combinaisons de faibles propriétés "mécaniques" pour la CF, tout en fixant des propriétés de la CE raisonnables. Cette étape a permis d'observer la sollicitation et l'influence de la CE dans la réponse de la CF à la pénétration de la bille. En choisissant une certaine combinaison, l'étape n°2 a permis de faire varier l'angle de la bille pour en déterminer les effets.

Pour déterminer l'influence de l'épaisseur de la CF sur le comportement du substrat et la pénétration de la bille, il est intéressant de la faire varier autour de la valeur choisie initialement, à savoir 13,5 mm, le diamètre de la bille.

3.2.4.1 Couche *fluide* de 27 mm d'épaisseur

Tout d'abord, une augmentation de l'épaisseur de la CF sera considérée. Le choix s'est posé sur une épaisseur correspondant à deux fois le diamètre de la bille. La FIGURE 3.12 permet d'observer l'épaisseur de cette CF dans le modèle.

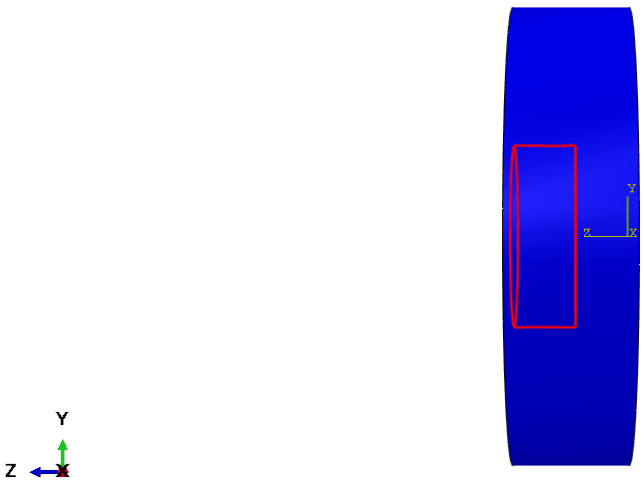


FIGURE 3.12 – Vue latérale de la CF de 27 mm d'épaisseur

3.2.4.2 Couche *fluide* de 6,75 mm d'épaisseur

Il peut être intéressant de réaliser la même opération, mais dans le sens contraire cette fois. L'épaisseur de la CF est réduite à la moitié du diamètre de la bille sur la FIGURE 3.13.

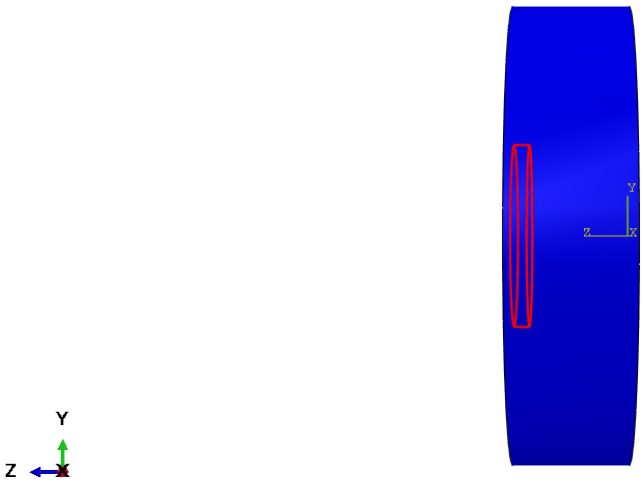


FIGURE 3.13 – Vue latérale de la CF de 6,75 mm d'épaisseur

Ces valeurs sont évidemment prises de manière arbitraire. Cependant, cela a du sens pour ce travail dont l'objectif est de borner le problème qui a été posé. Étant donné qu'il existe peu, voire pas, d'informations sur ce qui est réalisé, il est important de poser des limites sur les valeurs de différents paramètres. La réponse obtenue à la fin de ce travail ne sera pas la réponse finale car il y a encore des améliorations à offrir au modèle. Cependant, avec les informations

obtenues jusqu'à présent et le degré de précision du modèle, l'idée est de pouvoir poser des bornes qui seront réévaluées par la suite.

3.3 Cas particuliers

Il convient également d'investiguer l'influence d'autres paramètres sur le modèle.

3.3.1 Influence de la taille de la bille

Premièrement, l'influence de la taille de la bille peut être étudiée. Pour le moment, le diamètre de la bille est de 13,5 mm, ce qui est déjà une valeur assez élevée. Typiquement, la taille du plus gros granulat est aux alentours de 10 mm, cette valeur sera donc simulée également. Il convient aussi de simuler un granulat avec une taille beaucoup plus faible. Pour finir, les différents résultats seront comparés à l'aide de la contrainte de pénétration dynamique.

3.3.2 Influence de la vitesse de la bille

Finalement, différentes vitesses de la bille seront modélisées. L'objectif sera principalement de projeter la bille à hautes vitesses comme dans le test au pistolet à air comprimé d'Armengaud (2016) et dans la réalité du béton projeté. Dans son test, Armengaud utilise une vitesse de 20 m/s. En réalité, Ginouse (2014) a trouvé des vitesses allant jusqu'à 30 m/s pour les particules les plus rapides situées au centre du jet de béton projeté par voie sèche.

Chapitre 4

Résultats et analyse

4.1 Mesures numériques des paramètres

Comme expliqué précédemment, pour sa relation directe avec le rebond, la contrainte de pénétration dynamique p_d sera le paramètre principal utilisé pour comparer les résultats des différentes situations et combinaisons de propriétés qui vont suivre. Pour rappel, la p_d permet de représenter le caractère dynamique du phénomène de projection et est lié au rebond d'une particule. Plus la contrainte de pénétration dynamique est faible, plus le rebond est faible. Pour déterminer cette contrainte, il suffit de connaître la profondeur de pénétration maximale d'une bille projetée dans le substrat (Kim et al., 2024). Dans le modèle numérique, la mesure qui a été choisie pour représenter cette profondeur est la mesure du déplacement maximal des nœuds du substrat dans la direction perpendiculaire à son plan. La valeur du déplacement maximal du substrat sera appelée mesure n°1.

La mesure n°1 ne pourra pas être utilisée comme référence pour l'analyse des résultats à la Section 4.2.2. La mesure n°2 y sera introduite et développée.

4.2 Développement du modèle numérique

4.2.1 Étape n°1 : tir d'une bille sur le substrat de béton frais à 90°

La première étape consiste à tirer une bille en acier de 13,5 mm de diamètre à une vitesse de 7,9 m/s avec un angle de 90° sur le substrat.

4.2.1.1 "Choix" des propriétés de la couche élasto-plastique

Comme expliqué dans le Chapitre 3, la première combinaison de propriétés E - f_y simulée pour l'ensemble de la CE provient des valeurs minimales utilisées par Armengaud (2016) dans son modèle numérique. Cette première combinaison sera appelée combinaison A et possède les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} E = 5 \text{ MPa} \\ f_y = 0,1 \text{ MPa} \end{cases} \tag{4.1}$$

Les Figures 4.1, 4.2 et 4.3 donnent un aperçu des résultats qu'il est possible d'extraire du logiciel ABAQUS.

La Figure 4.1 permet d'observer la bille dans sa position la plus enfoncée dans le substrat et d'obtenir une visualisation directe de sa profondeur de pénétration maximale. Le déplacement des nœuds de la CE, la mesure d'intérêt (mesure n°1), est par contre moins évidente à observer.

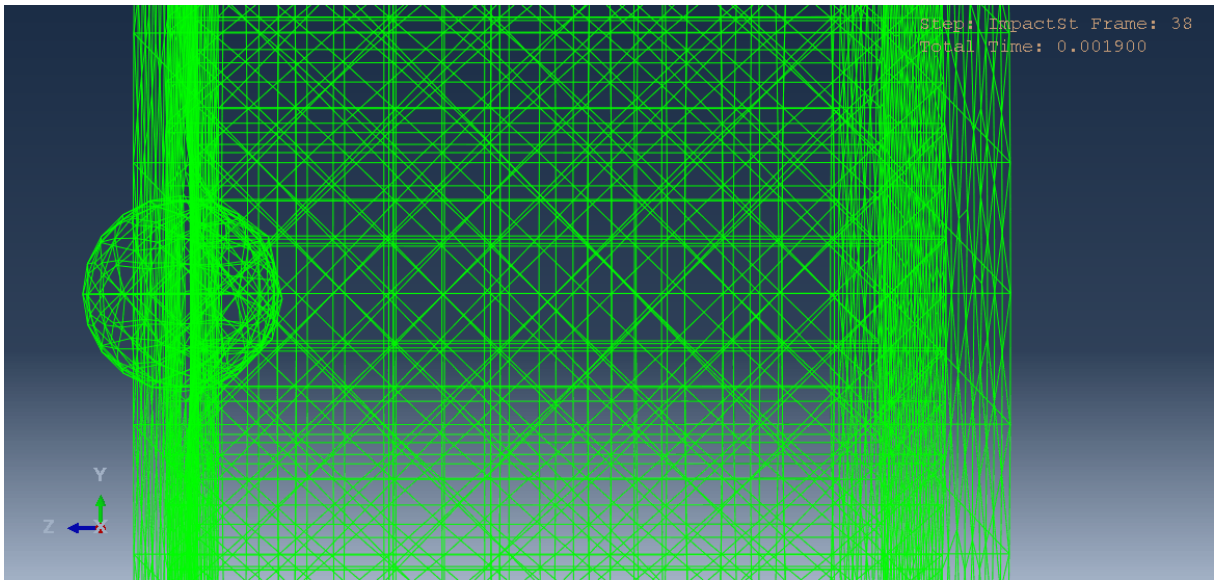


Figure 4.1 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - Combinaison A

La Figure 4.2 donne une meilleure vue afin d'observer le déplacement de cette couche. Sur cette Figure 4.2, la CE semble se déformer correctement lors de la pénétration de la bille. Les empreintes des billes catapultées après 3 et 6 minutes sur la Figure 2.23 peuvent servir de comparaison.

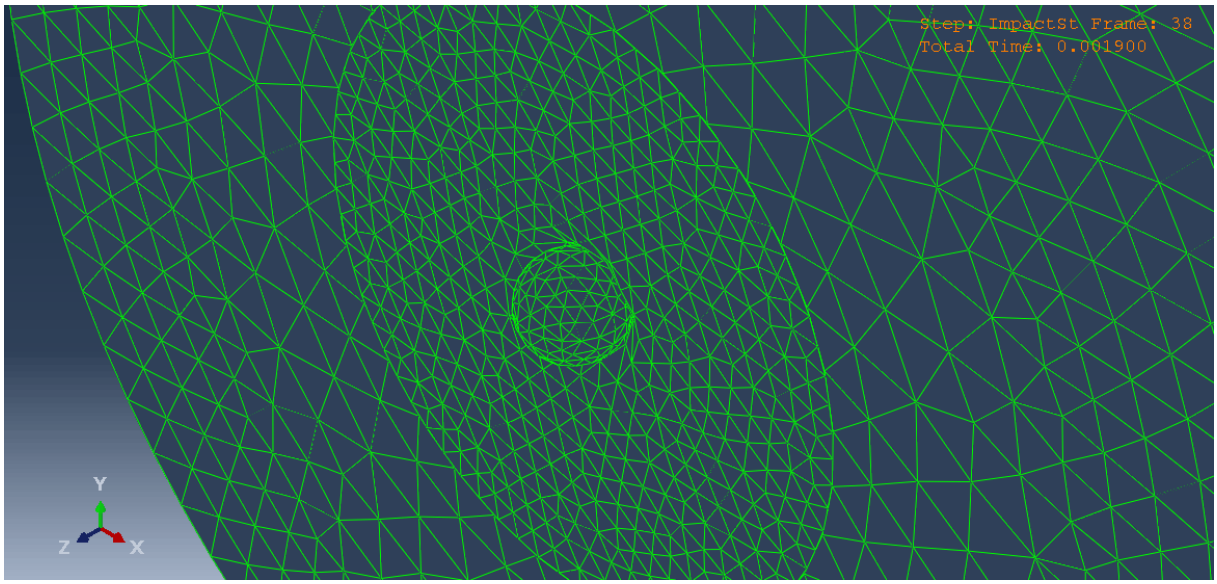


FIGURE 4.2 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - Combinaison A

Après une analyse visuelle, il est intéressant de regarder les valeurs de déplacement des nœuds de la CE. La FIGURE 4.3 donne le déplacement de tous les nœuds de cette couche, une courbe sur le graphique représentant un nœud.

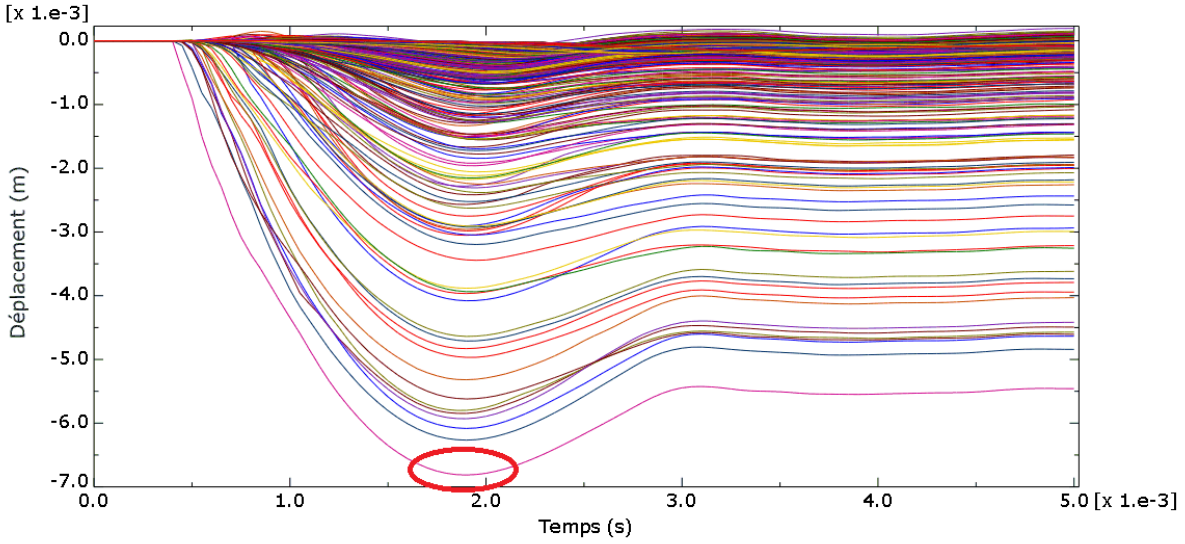


FIGURE 4.3 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison A

La valeur d'intérêt est le déplacement maximal de la CE et, donc, le déplacement du nœud le plus sollicité. Cette valeur correspond à la dernière courbe sur la FIGURE 4.3 (le déplacement maximal est entouré en rouge). Pour cette combinaison, le déplacement maximal de la CE est de 6,8 mm (TABLEAU 4.2). En comparaison avec les profondeurs de pénétration trouvées après 3 et 6 minutes par Kim et al. (2024) en réalité (FIGURE 2.23), les 6,8 mm paraissent satisfaisants et les propriétés associées seront choisies afin de représenter la CE dans la suite de ce

travail. Cela veut donc dire que, dans son modèle numérique, Armengaud (2016) avait réussi à trouver des propriétés plausibles afin de représenter le substrat dans son état élasto-plastique après 3 ou 6 minutes. Il faut souligner qu'un déplacement négatif correspond à l'enfoncement du substrat, l'axe z étant positif dans l'autre direction. Ceci permet de remarquer les faibles déplacements positifs sur la FIGURE 4.3 qui correspondent vraisemblablement à une expulsion de matériau hors du substrat lors de l'enfoncement de la bille telle qu'introduite sur la FIGURE 2.8. La pénétration de la bille étant relativement faible, l'expulsion de matériau est également faible et les déplacements positifs sont limités.

En plus de la combinaison A (mise en évidence en vert pour montrer qu'il s'agit de la combinaison choisie pour représenter la CE), deux autres combinaisons ont été simulées afin de vérifier la validité du modèle numérique et sont présentées au TABLEAU 4.1.

TABLEAU 4.1 – Propriétés mécaniques de la CE pour les différentes combinaisons

	Épaisseur (mm)	E (MPa)	f_y (MPa)
Combinaison A	50	5	0,1
Combinaison B	50	10	0,1
Combinaison C	50	50	0,1

Il est rappelé au TABLEAU 4.1 que la CE s'étend sur l'ensemble du substrat modélisé d'une épaisseur de 50 mm, il n'y a pas de CF dans cette situation. Les combinaisons B et C possédant un module de Young plus élevé que la combinaison A, un déplacement maximal plus faible de la CE est attendu. Le TABLEAU 4.2 apporte ces informations.

TABLEAU 4.2 – Déplacement maximal de la CE et contrainte de pénétration dynamique pour les différentes combinaisons

	δ_{CE} (mm)	p_d (MPa)	Δ_{p_d} (MPa)	Δ_{p_d} (%)
Combinaison A	6,8	0,48	/	/
Combinaison B	6,1	0,57	0,09	18,8
Combinaison C	4,6	0,91	0,43	89,6

Le déplacement maximal de la CE pour la combinaison B est bien inférieur à celui de la combinaison A, comme attendu. Il en est de même pour le déplacement de la combinaison C, qui est bien inférieur à celui des combinaisons A et B. Les valeurs de p_d concordent également avec l'augmentation de rigidité de la CE. En doublant la valeur du module de Young entre les combinaisons A et B, il se produit une augmentation de presque 20% de la contrainte de pénétration dynamique. Une augmentation du module de Young d'un facteur 10 entre les combinaisons A et C donne une augmentation de p_d d'environ 90%.

Pour information, les résultats numériques des combinaisons B et C se trouvent dans l'Annexe B.

4.2.1.2 Exemple d'un calcul complet de p_d

La contrainte de pénétration dynamique p_d étant utilisée pour comparer les différents résultats, le calcul de ce paramètre sera détaillé complètement une fois pour la combinaison A présentée ci-dessus.

La première étape consiste à rassembler les propriétés de la bille en acier dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 – Propriétés de la bille

ρ (kg/m^3)	Vitesse (m/s)	D (mm)
7850	7,9	13,5

Ensuite, le volume et la masse de cette bille peuvent être calculés avant de déterminer son énergie cinétique incidente W_1 :

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{13,5}{2}\right)^3 = 1288\ mm^3 \tag{4.2}$$

$$m = \rho \cdot V = 7850 \cdot \frac{1288}{10^9} = 0,01\ kg \tag{4.3}$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,01 \cdot 7,9^2 = 0,316\ J \tag{4.4}$$

Pour obtenir la valeur finale de p_d, il faut calculer le volume de pénétration apparent de la particule dans le substrat V_a. Ce volume de pénétration peut être calculé sur base de la profondeur de pénétration maximale de la bille calculée par ABAQUS ($\delta_{CE} = 6,8\ mm$ pour la combinaison A). Celle-ci étant légèrement supérieure au rayon de la bille, l'équation (2.12) sera utilisée :

$$V_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^3}{3} + \pi \cdot R^2 \cdot (\delta_{CE} - R) \tag{4.5}$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{13,5}{2}\right)^3}{3} + \pi \cdot \left(\frac{13,5}{2}\right)^2 \cdot (6,8 - 6,75) \tag{4.6}$$

$$= 651\ mm^3 \tag{4.7}$$

Finalement, la valeur de p_d s'obtient grâce à l'équation (2.2) :

$$p_d = \frac{W_1}{V_a} = \frac{0,316}{651 \cdot 10^{-9}} = 484\,535 \text{ Pa} = 0,48 \text{ MPa} \tag{4.8}$$

4.2.1.3 Recherche des propriétés de la couche *fluide*

Maintenant que les propriétés de la CE sont fixées ($E = 5$ MPa et $f_y = 0,1$ MPa), il est temps de s'intéresser aux propriétés "mécaniques" de la CF. Pour rappel, cette couche possède une épaisseur arbitraire de 13,5 mm ce qui correspond au diamètre de la bille qui est toujours tirée avec une vitesse de 7,9 m/s et un angle de 90° par rapport au substrat. Il s'agit d'une étude exploratoire, il n'y a donc pas de bonne pratique à suivre pour déterminer ces propriétés. La marche à suivre choisie consistera à investiguer plusieurs combinaisons E - f_y jusqu'à trouver une combinaison satisfaisante qui sollicite suffisamment la CE située en arrière de la CF et permet d'obtenir une pénétration de la bille la plus profonde possible, au moins jusqu'à la CE.

Combinaison 1

Pour choisir la première combinaison, il suffit de repartir de la combinaison A choisie pour la CE. Le seul critère étant que les propriétés "mécaniques" de la CF doivent être plus faibles que celles de la CE, pour obtenir une rigidité plus faible qui se rapproche du comportement d'un matériau *fluide*.

En choisissant arbitrairement de diviser le module de Young par cinq et la limite d'élasticité par deux, voici la première combinaison qui sera simulée :

$$\begin{cases} E = 1 \text{ MPa} \\ f_y = 0,05 \text{ MPa} \end{cases} \tag{4.9}$$

Sur la Figure 4.4, une chose a changé par rapport à la situation où le substrat était entièrement élasto-plastique. Il est désormais possible de voir la délimitation entre les CF et CE au centre du substrat par l'intermédiaire d'une ligne rouge. Ceci va permettre d'observer à la fois la pénétration de la bille dans la CF et la réponse des CF et CE à cette pénétration. Premier fait intéressant : il est possible de remarquer une légère déformation de la CE en réponse à la pénétration de la bille dans la CF. Au niveau de la CF, celle-ci se comporte de la même manière que lors de la pénétration de la bille dans la CE pour la combinaison A (Figure 4.1), la seule différence étant la valeur des propriétés utilisées qui résulte en un enfoncement plus important lors de l'introduction de la CF sur la Figure 4.4.

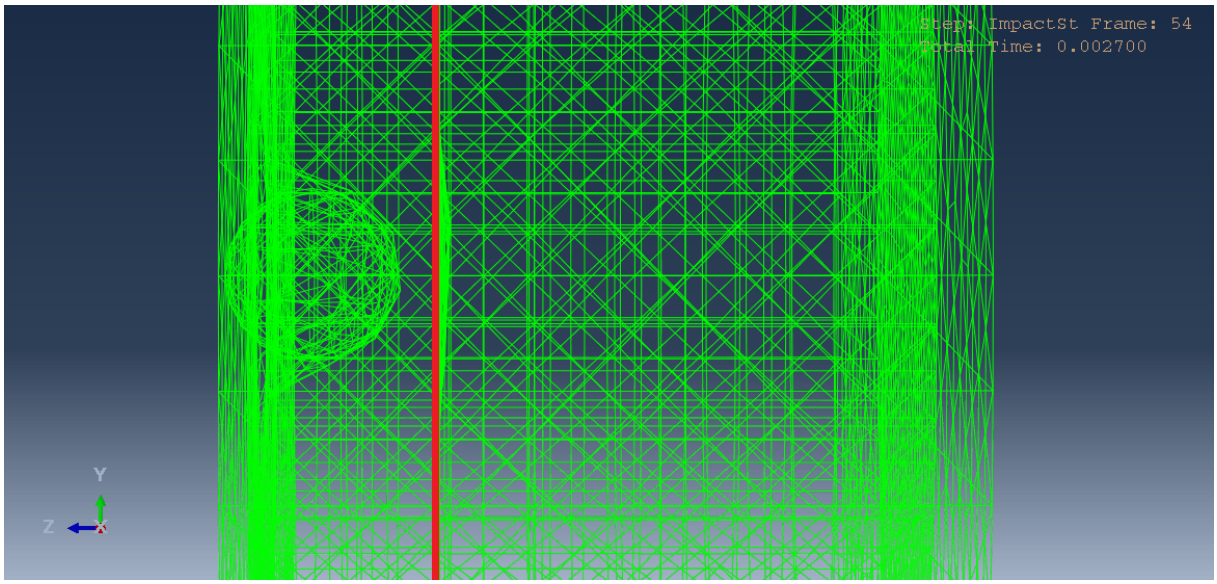


FIGURE 4.4 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 1

En complément à la FIGURE 4.4, la FIGURE 4.5 montre clairement que la bille a pénétré plus profondément du fait de la présence de la CF par rapport à la FIGURE 4.2.

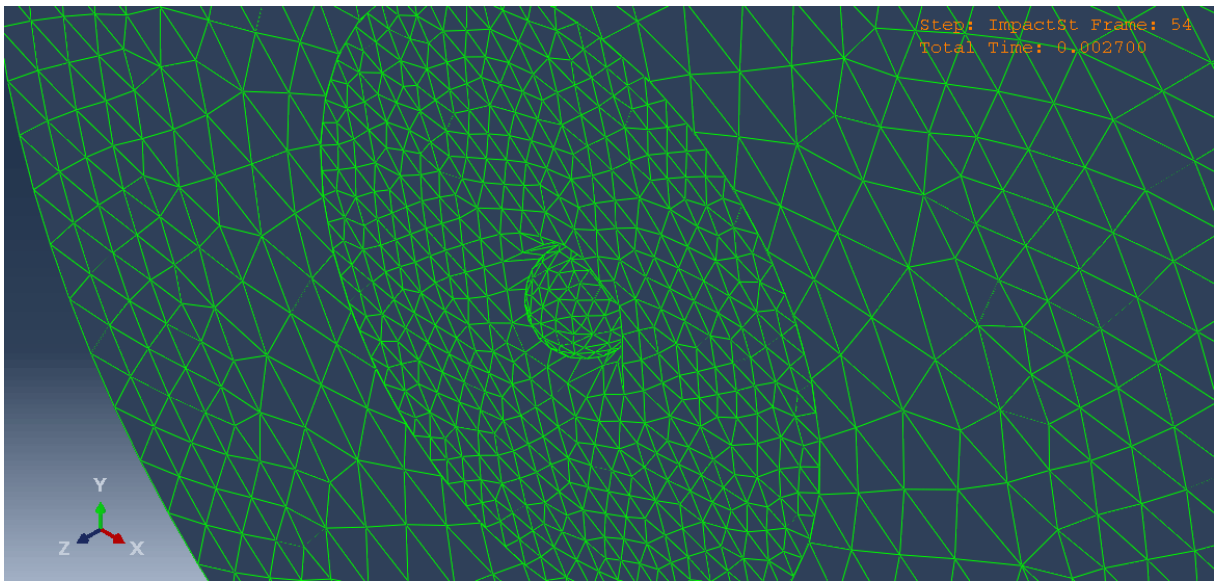


FIGURE 4.5 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 1

Cela se traduit également en termes de profondeurs de pénétration sur la FIGURE 4.6. La diminution des propriétés "mécaniques" associée à la présence de la CF a permis à la bille de pénétrer jusqu'à 10,7 mm à l'intérieur de la CF, soit une augmentation de près de 60% par rapport à la valeur de 6,8 mm trouvée précédemment (FIGURE 4.3). Le modèle parvient donc à reconnaître ce changement de propriétés et donne des résultats cohérents. Pour cette première combinaison simulée, le comportement du modèle et des différentes couches est appréciable

et constitue une base solide pour la suite. Maintenant qu'une pénétration de la bille plus importante et une réaction de la CE ont été observées, des combinaisons de propriétés de la CF encore plus faibles seront simulées pour atteindre une pénétration de la bille à minima de l'ordre de l'épaisseur de la CF.

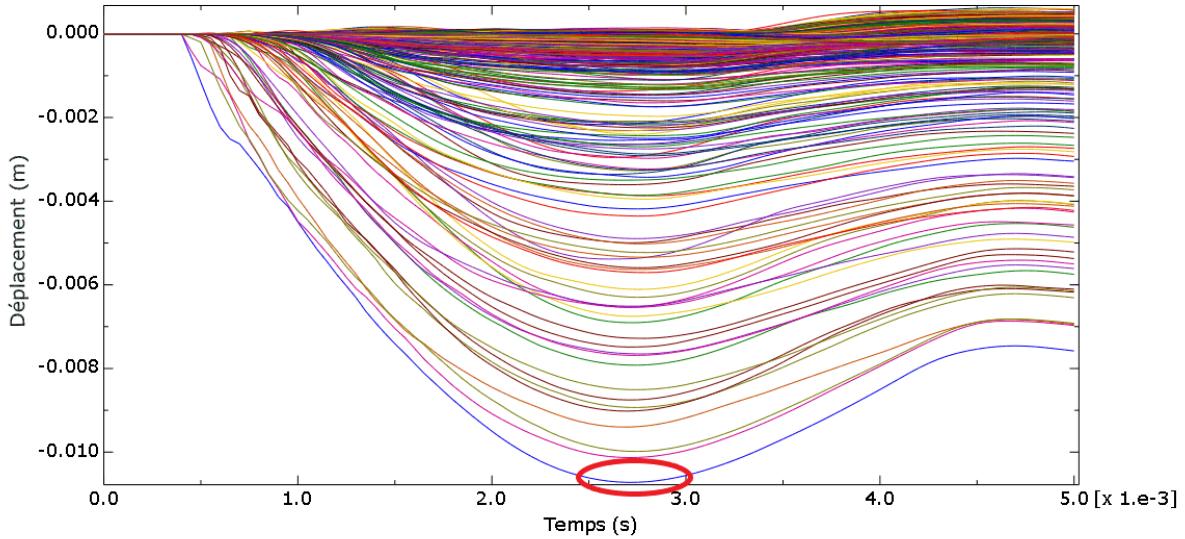


FIGURE 4.6 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 1

La FIGURE 4.7 représente le déplacement des nœuds de la CE sollicitée en fonction du temps. Ne sachant pas exactement ce qu'il se passe à ce niveau-là, une analyse ne sera pas effectuée. Cependant, il est quand même utile de retenir la valeur du déplacement maximal de cette couche : 1,1 mm.

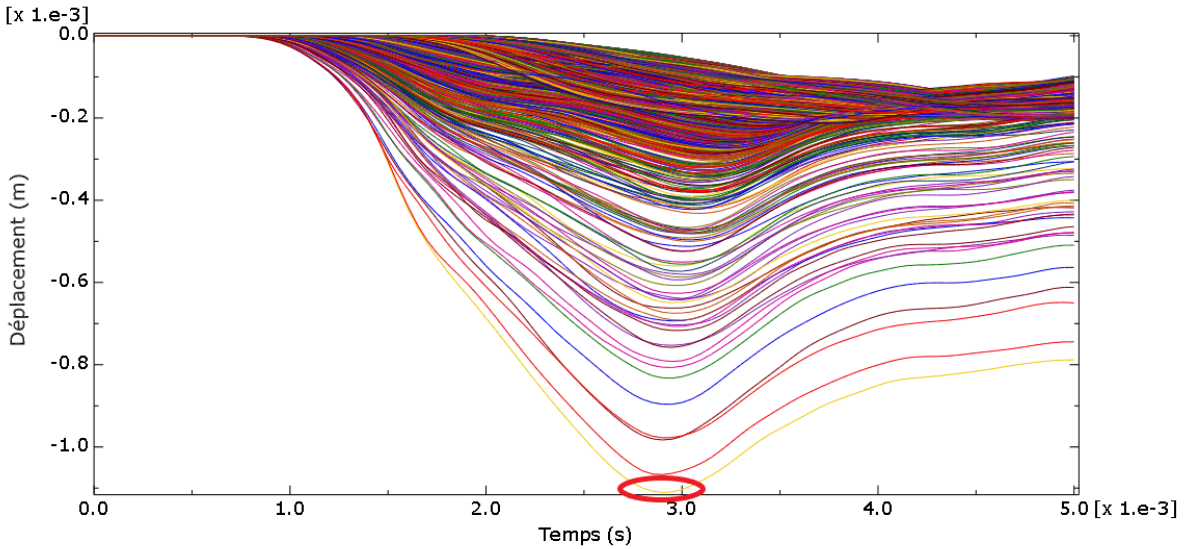


FIGURE 4.7 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison 1

Combinaison 2

Pour la deuxième combinaison, l'idée est de repartir de la combinaison 1 ("C1") et de diminuer le module de Young en le divisant par deux par exemple. La limite d'élasticité reste quant à elle constante :

$$\begin{cases} E = 0,5 \text{ MPa} \\ f_y = 0,05 \text{ MPa} \end{cases} \tag{4.10}$$

La combinaison 2 ("C2") offre peu d'informations supplémentaires et le comportement observé se rapproche très fortement de celui de la C1. La seule chose à noter est l'augmentation du déplacement maximal de la CF, passant de 10,7 mm à 12,1 mm, ce qui correspond à un accroissement de 13%. Cette valeur est indiquée sur la Figure 4.8.

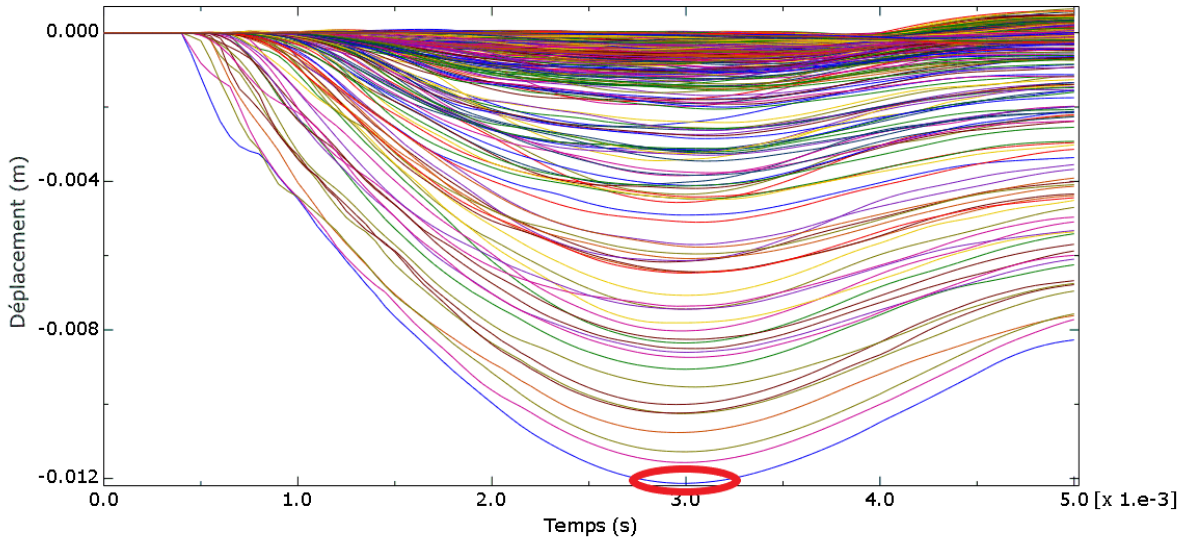


Figure 4.8 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 2

De plus, le déplacement maximal de la CE reste similaire à celui observé à la C1 et conserve une valeur de 1,1 mm (Annexe B). Il semblerait donc qu'une diminution du module de Young n'ait pas beaucoup d'influence sur le comportement général du modèle et de la CE, mais en a quand même sur la réponse de la CF et la pénétration de la bille.

Combinaison 3

La C2 a permis d'en apprendre davantage sur l'influence du module de Young. La combinaison 3 ("C3") va s'intéresser à la limite d'élasticité. Sur le même principe que la C2, l'idée sera de diminuer la limite d'élasticité de la C1 en la divisant par cinq tout en gardant le module de

Young constant :

$$\begin{cases} E = 1 \text{ MPa} \\ f_y = 0,01 \text{ MPa} \end{cases} \tag{4.11}$$

Par rapport à la C2, la FIGURE 4.9 apporte déjà plus d'informations. Il est possible de voir que la diminution de la limite d'élasticité a permis à la bille de pénétrer plus profondément dans la CF jusqu'à la CE. Cette pénétration plus profonde s'accompagne d'une réaction de la CE plus importante et, donc, d'un déplacement plus important (2,1 mm). Une autre information concerne le volume de la CF déplacé par la bille. Sur la FIGURE 4.9, celui-ci semble plus étendu et désordonné que dans les combinaisons précédentes. Cependant, il n'est pas facile de tirer plus d'informations de cette figure.

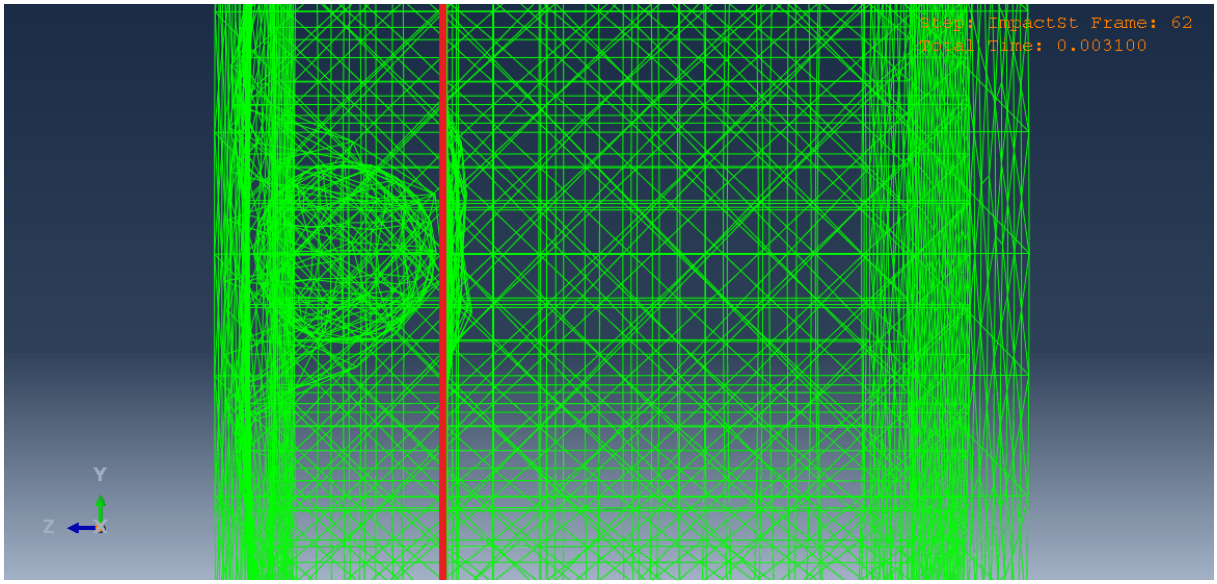


FIGURE 4.9 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 3

La FIGURE 4.10 permet d'observer ce qu'il se produit en surface et vient rejoindre l'analyse déjà effectuée. Là où la déformation de la CF était localisée au voisinage du diamètre de la bille dans les C1 et C2, elle s'étend maintenant sur un rayon plus grand en déformant même des nœuds de la CF qui ne sont pas directement impactés par la bille. Dans les C1 et C2, ces nœuds étaient également soumis à une certaine contrainte à cause de la pénétration de la bille mais la limite d'élasticité était trop grande pour qu'ils se déforment. Dans cette C3, l'abaissement de la limite permet à ces nœuds de se déformer. Il est possible d'observer une sorte de "mouvement d'ensemble" de la CF sous l'impact de la bille.

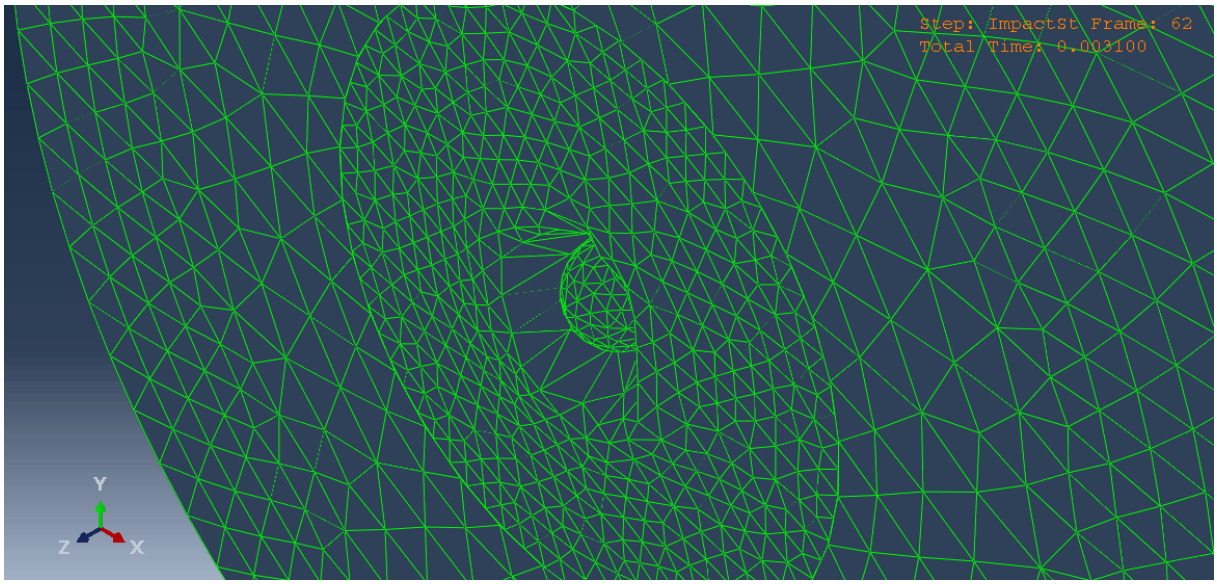


FIGURE 4.10 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 3

La FIGURE 4.11 met en évidence le plus grand déplacement de la CF observé sur les FIGURES 4.9 et 4.10. Celui-ci a une valeur de 13,6 mm et consiste en une augmentation de 27% par rapport à la C1. De plus, elle permet d'attirer notre attention sur un élément qui était moins perceptible sur les FIGURES 4.9 et 4.10. Il est possible d'observer des déplacements positifs plus importants que dans les C1 et C2 qui peuvent traduire une expulsion de matériau à cause de la *fluidité* accrue du matériau composant la CF.

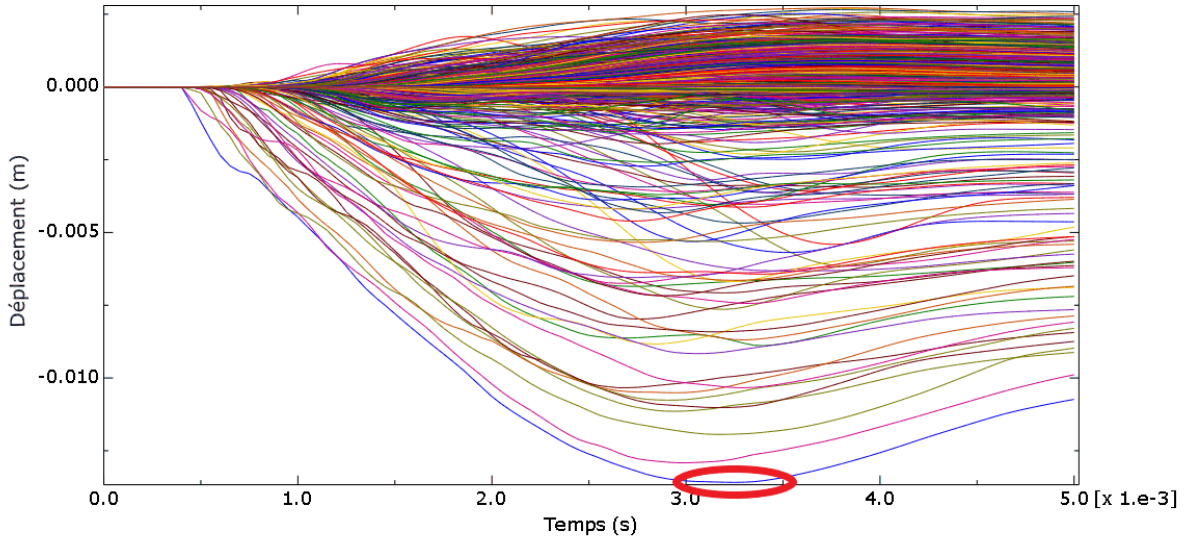


FIGURE 4.11 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 3

Une limite d'élasticité "trop" faible amène donc un comportement particulier du modèle, qui ne s'avère pas incorrect pour autant. Il est intéressant d'avoir pu remarquer cette influence de f_y sur le modèle. Néanmoins, pour les raisons énoncées ci-dessus, il a été décidé de ne

pas conserver cette combinaison comme étant la combinaison "satisfaisante" malgré un bon comportement de la CE et une profondeur de pénétration maximale de la bille importante.

Combinaison 4

La quatrième et dernière combinaison consiste à se baser sur les enseignements des trois premières afin d'établir la combinaison "satisfaisante" qui sera choisie pour continuer le développement du modèle numérique. La C2 montre qu'une diminution du module de Young résulte en un plus grand déplacement de la CF sans modifier celui de la CE. Pour la C3, un abaissement de la limite d'élasticité mène aussi à un plus grand déplacement de la CF mais également de la CE. Cependant, cette combinaison met aussi en évidence que l'utilisation d'une limite d'élasticité trop faible peut générer un comportement du modèle un peu "chaotique" et difficile à interpréter.

La combinaison 4 ("C4") visera donc à se préserver de ce comportement "chaotique" en choisissant une limite d'élasticité supérieure à celle utilisée dans la C3 mais, tout de même, inférieure à la valeur des C1 et C2. Il a été choisi de diviser la valeur de f_y utilisée dans les C1 et C2 par deux. Pour le module de Young, la valeur utilisée dans la C2 sera choisie :

$$\begin{cases} E = 0,5 \text{ MPa} \\ f_y = 0,025 \text{ MPa} \end{cases} \tag{4.12}$$

Le comportement observé à la Figure 4.12 est, comme attendu, similaire à celui des C1 et C2, en intégrant la profondeur de pénétration de la bille et la sollicitation de la CE telles que trouvées dans la C3.

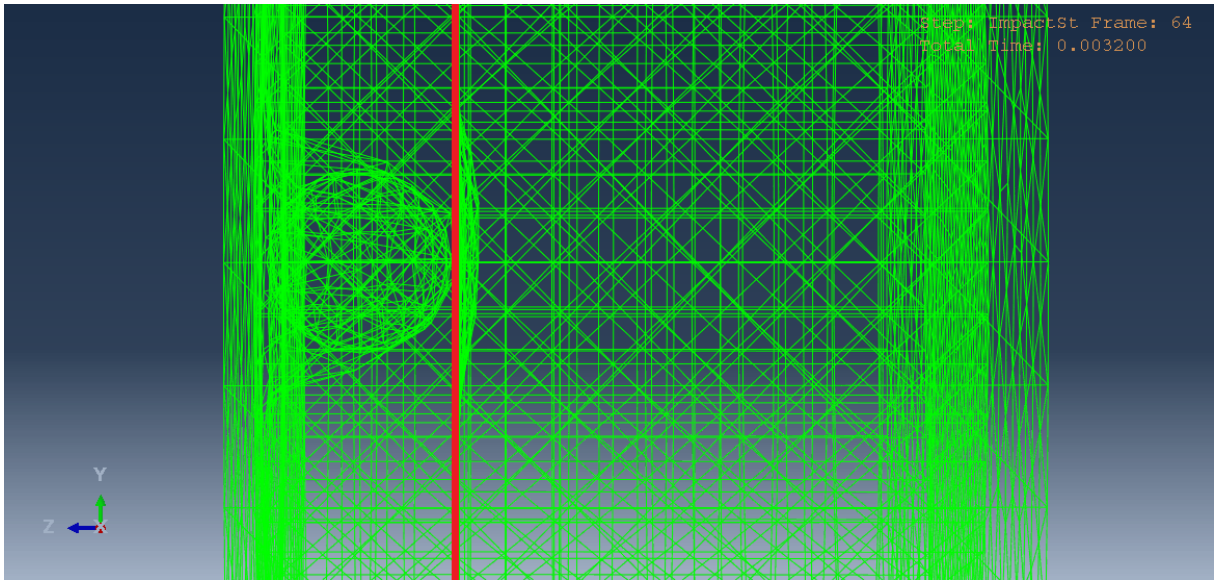


Figure 4.12 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 4

La FIGURE 4.13 indique le déplacement maximal de la CF qui a la même valeur que dans la C3, à savoir 13,6 mm. Le déplacement maximal de la CE est de l'ordre de 1,7 mm, ce qui est bien inférieur à la valeur de 2,1 mm obtenue à la C3.

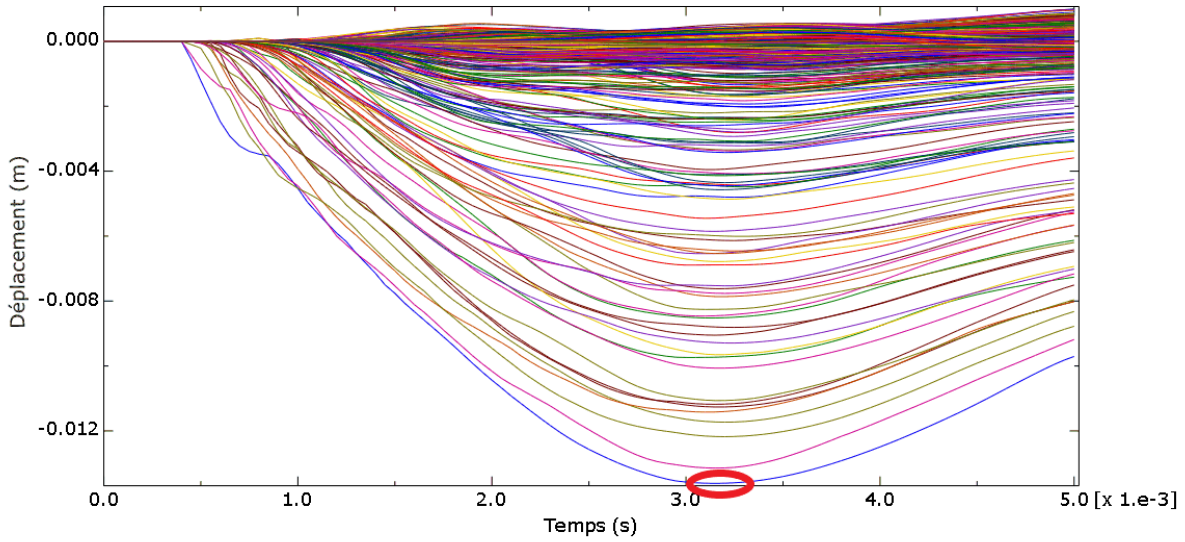


FIGURE 4.13 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - Combinaison 4

En jouant avec les propriétés "mécaniques" de la CF, il a été possible d'arriver au même déplacement que la C3 mais sans ce "mouvement d'ensemble" particulier. Cette combinaison paraît satisfaisante et sera conservée pour la suite du développement du modèle numérique.

Conclusion

Le TABLEAU 4.4 reprend les différentes combinaisons E - f_y de la CF qui ont été simulées et le TABLEAU 4.5 les déplacements des différentes couches associés à ces combinaisons.

TABLEAU 4.4 – Propriétés "mécaniques" de la CF pour les différentes combinaisons

	Couche *fluide*		Couche élasto-plastique	
	E (MPa)	f_y (MPa)	E (MPa)	f_y (MPa)
Combinaison 1	1	0,05	5	0,1
Combinaison 2	0,5	0,05	5	0,1
Combinaison 3	1	0,01	5	0,1
Combinaison 4	0,5	0,025	5	0,1

Tableau 4.5 – Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour les différentes combinaisons

	δ_{CF} (mm)	p_d (MPa)	δ_{CE} (mm)
Combinaison 1	10,7	0,26	1,1
Combinaison 2	12,1	0,22	1,1
Combinaison 3	13,6	0,19	2,1
Combinaison 4	13,6	0,19	1,7

Il est important de souligner que le calcul de p_d est réalisé avec le déplacement maximal de la CF, le déplacement de la CE n'étant pas considéré pour le calcul de ce paramètre.

Limitation n°3

Au cours du développement de cette étape et lors du choix des différentes combinaisons, un problème a fait son apparition. Lors de l'introduction de propriétés "mécaniques" très faibles, plus faibles que celles utilisées dans les différentes combinaisons de l'étape n°1, le logiciel n'était pas en mesure de terminer la simulation. En faisant quelques recherches sur cette "erreur" lors de la simulation, il s'est avéré qu'il s'agissait d'un problème de déformation excessive des éléments du maillage dans le logiciel. Cette déformation étant supérieure à la vitesse de propagation de l'information dans l'outil de modélisation numérique ABAQUS, ce dernier n'était pas en mesure d'effectuer les calculs. En effet, ce logiciel n'a pas été conçu pour modéliser des éléments *fluides* et il ne paraît pas anodin qu'il ait certaines difficultés lorsqu'on lui en introduit. Il s'agit là d'une considération importante à garder en tête qui signifie qu'une limite a peut-être été atteinte en termes de performance du logiciel pour représenter un matériau *fluide*, en tout cas pour la finesse du maillage et pour le modèle tel qu'il a été conçu. Il est sûrement possible d'aller plus loin en réalisant par exemple un maillage d'une finesse bien plus grande ce qui demanderait un temps de calcul bien plus important qui dépassait le cadre de ce projet. D'autres pistes d'amélioration du modèle seront proposées dans le Chapitre 5 et constitueront un bon point de départ pour les projets futurs.

Cette considération est à garder en mémoire pour l'étape n°3 et le cas particulier traitant de l'influence de la vitesse de la bille où des problèmes similaires ont été rencontrés.

4.2.2 Étape n°2 : influence de l'angle d'incidence d'une bille sur le substrat

La prochaine étape consiste à étudier l'influence de la variation de l'angle d'incidence de la bille projetée sur le substrat. L'angle d'incidence est défini comme l'angle de la bille projetée par rapport au substrat, la valeur optimale étant 90°. Dans cette partie, l'épaisseur de la CF

ainsi que la vitesse et la taille de la bille n'ont pas changé par rapport à l'étape n°1. La C4 est utilisée pour caractériser la CF.

La problématique de l'angle d'incidence dans les bétons projetés est primordiale car elle génère des rebonds supplémentaires. Pour l'étudier de manière complète, il est important de distinguer les différentes composantes à l'origine de la création d'un angle entre la particule (bille) et le substrat. Les composantes principales sont au nombre de 3 :

1. Composante fondamentale liée aux limites d'expansion du jet (Siccardi, 2018).
2. Composante humaine liée au lancier.
3. Composante in-situ liée à l'angle de la surface de réception.

Si la première composante semble être inévitable mais reste un facteur qu'il est possible d'améliorer en optimisant les géométries de lances, les deux autres peuvent être évitées. La deuxième composante part du principe qu'un lancier ne peut projeter en continu avec un angle parfait de 90°, celui-ci restant humain. Il y a inévitablement la création d'un angle et une probabilité de rebond plus forte. Pour s'affranchir de la composante humaine, le remplacement du lancier par un robot est une bonne solution (Section 2.3.3.5). Cependant, l'influence de la deuxième composante peut bien évidemment être réduite par l'intermédiaire de formations de qualité offertes au lancier. La troisième composante relève cependant un peu du hasard. En fonction du chantier, il se pourrait très bien que la surface réceptrice possède déjà un angle avec la verticale. Dans le pire des cas, tous ces angles peuvent s'additionner.

Pour la suite, une question importante se pose. En supposant que les composantes n°2 et n°3 ne sont pas présentes, quelle serait la valeur minimale théorique de l'angle d'incidence d'une particule lié à la composante n°1 ? Pour y répondre, il faut repartir des résultats obtenus par Siccardi (2018) sur les limites d'expansion du jet de béton projeté en fonction du type de lance utilisée (Figure 2.10). Sur la Figure 2.10, il est possible de calculer l'angle de tir maximal sur base des différentes distances pour une lance de type Spirolet ("SP") en voie sèche. L'angle de tir correspond à l'angle de la particule par rapport à l'axe de la lance. L'angle d'incidence s'obtient facilement à partir de l'angle de tir :

$$\alpha_i = 90° - \alpha_t \tag{4.13}$$

Pour une lance située à 1,2 m du substrat et pour la particule la plus éloignée du centre du jet verticalement (0,3 m), l'angle de tir maximal est le suivant :

$$\alpha_{t,max} = \arctan\left(\frac{0,3}{1,2}\right) = 14° \tag{4.14}$$

Ce qui correspond à un angle d'incidence minimal d'environ :

$$\alpha_{i,min} = 90° - 14° = 76° \tag{4.15}$$

En théorie donc, l'angle d'incidence minimal d'une particule de béton projeté par voie sèche ne devrait pas dépasser 75° pour la composante fondamentale uniquement. Il s'agit de la première valeur qui sera simulée dans cette étape n°2. Ceci correspond à une situation idéale où les composantes n°2 et n°3 sont éliminées. Cependant, l'introduction du facteur humain (composante n°2) peut encore diminuer cet angle d'incidence qui pourrait atteindre des valeurs de l'ordre de 60° et moins. En rajoutant l'effet de la troisième composante aux deux dernières, il ne serait pas impossible d'observer des angles allant jusqu'à 45°. Deux autres valeurs encore plus faibles seront étudiées dans ce projet exploratoire : 30° et 15°.

Sur les Figures 4.14 et 4.15, le comportement du modèle change très peu pour un angle d'incidence de 75°, la profondeur de pénétration maximale de la bille passant seulement de 13,6 mm à 13 mm.

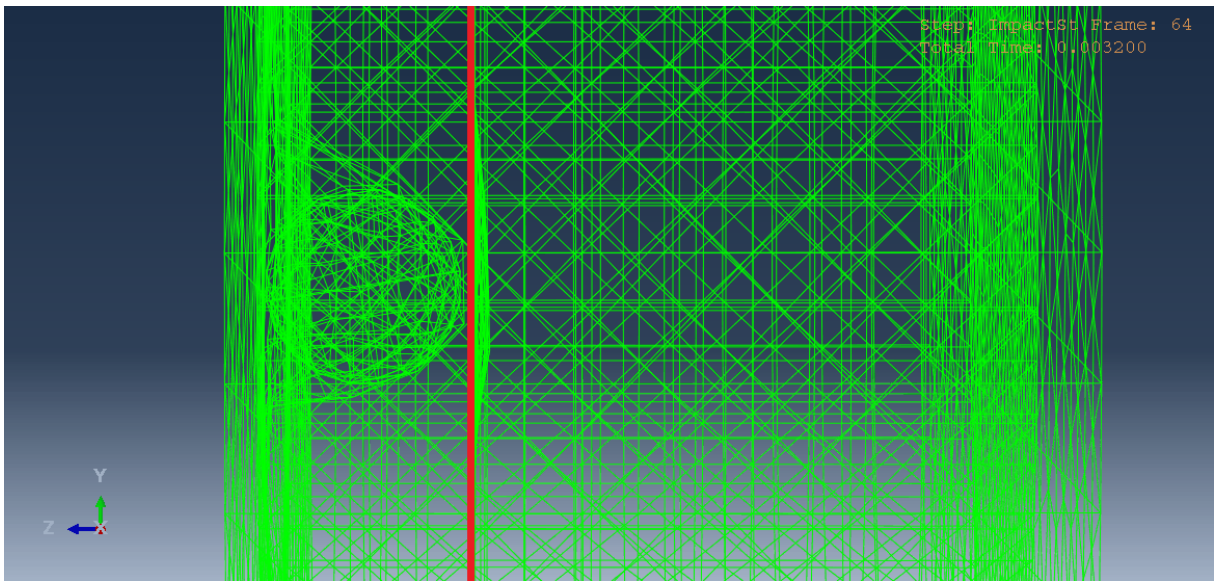


Figure 4.14 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 75°

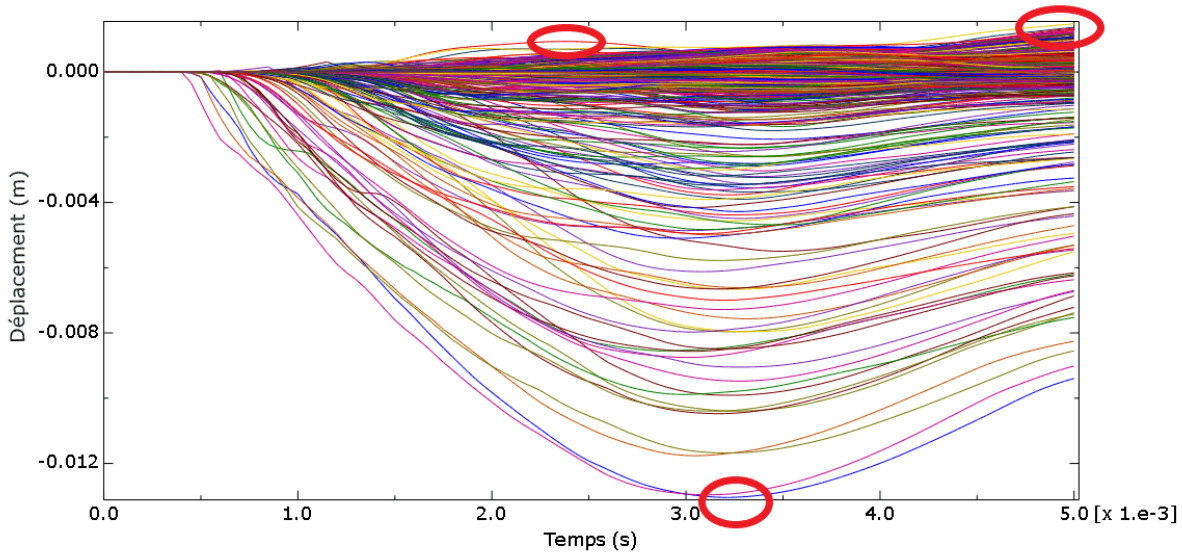


FIGURE 4.15 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 75°

Il n'est pas nécessaire d'afficher les résultats numériques obtenus pour chaque angle, l'objectif étant simplement d'observer l'effet d'un angle d'incidence inférieur à 75° sur la pénétration de la bille et de déterminer une tendance. Pour ce faire, les résultats numériques obtenus pour une bille projetée à 45° par rapport au substrat seront présentés aux FIGURES 4.16, 4.17 et 4.18. Les résultats concernant les autres angles se trouvent dans l'ANNEXE B.

La première chose à remarquer sur la FIGURE 4.16 est une pénétration inférieure de la bille par rapport au cas à 90°. La deuxième chose, la plus importante, est le volume de la CF déplacé par la particule, qui explique en partie la première observation. Dans la situation à 90° (FIGURE 4.12), le volume déplacé correspond approximativement au volume de la bille, l'angle d'impact étant optimal pour la pénétration de la bille et l'énergie cinétique idéalement transférée. Ici, l'introduction d'un angle affecte la pénétration de la bille car elle doit déplacer un volume de matériau plus important à son entrée dans la CF. Aussi, il est utile de remarquer que la CE n'est quasiment pas sollicitée, la bille ne pénétrant pas assez profondément dans la CF.

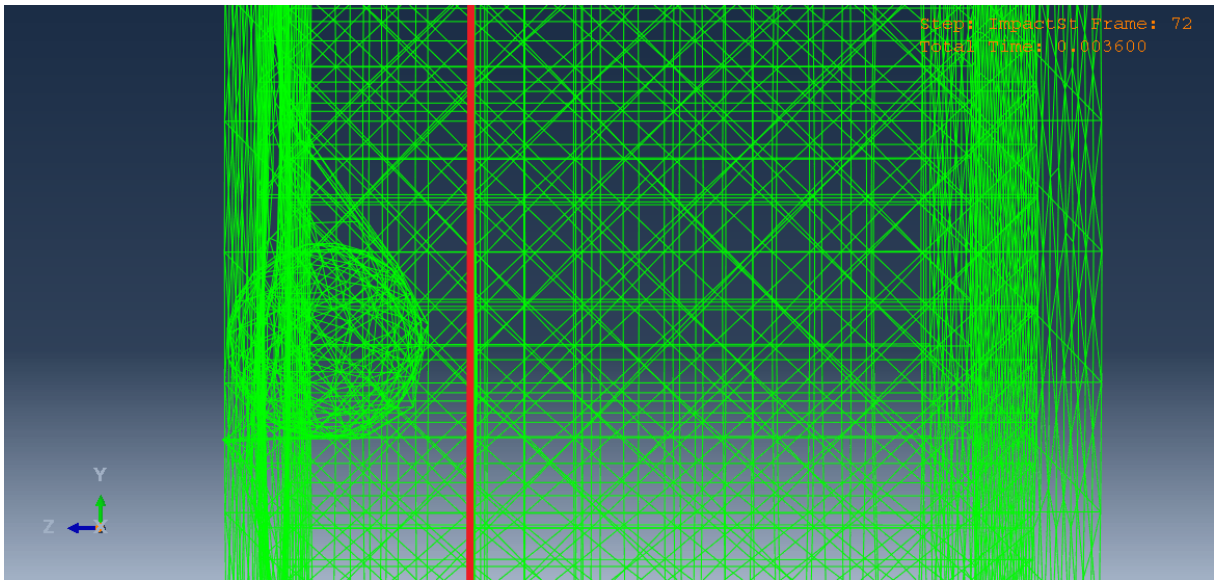


FIGURE 4.16 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 45°

La FIGURE 4.17 permet d'avoir une vue plus claire du volume déplacé par la bille.

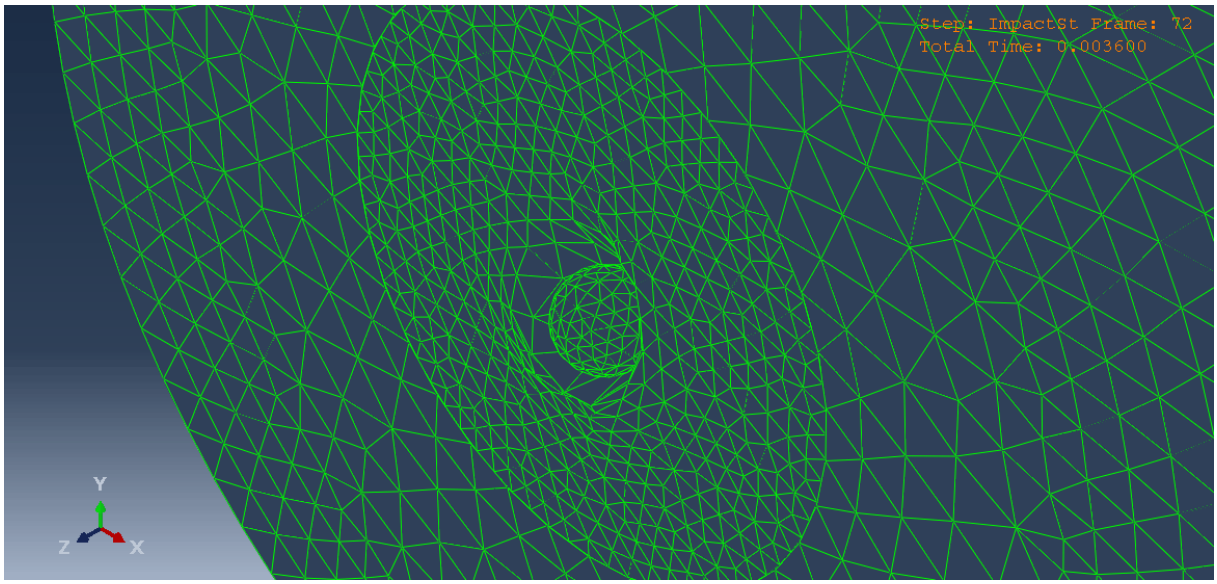


FIGURE 4.17 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 45°

La FIGURE 4.18 confirme le déplacement inférieur de la CF avec une bille tirée à 45° obtenant une valeur maximale de 10,6 mm, ce qui représente une diminution de 22% par rapport à la valeur obtenue à 90°. De plus, la partie supérieure de la FIGURE 4.18 met en évidence des déplacements positifs importants qui n'étaient pas présents sur la FIGURE 4.13. Il s'agit là encore d'une preuve de l'augmentation de volume déplacé, à l'extérieur de la CF cette fois, qui fait perdre de l'énergie cinétique à la bille lorsqu'elle pénètre dans le substrat. Dans la situation à 90°, presque la totalité de l'énergie cinétique incidente de la bille était utilisée afin de la faire

pénétrer dans la direction perpendiculaire au plan du substrat. Avec un angle, une partie de cette énergie est dissipée afin de déplacer un volume plus important de matériau du substrat, laissant moins d'énergie à la bille pour pénétrer perpendiculairement au plan du substrat. C'est cette dissipation d'énergie qui résulte en une profondeur de pénétration plus faible lorsqu'on passe d'un angle d'incidence de 90° à une valeur plus faible. Une question qui se pose maintenant est la quantité d'énergie nécessaire et "perdue" pour déplacer un certain volume en fonction de l'angle d'incidence.

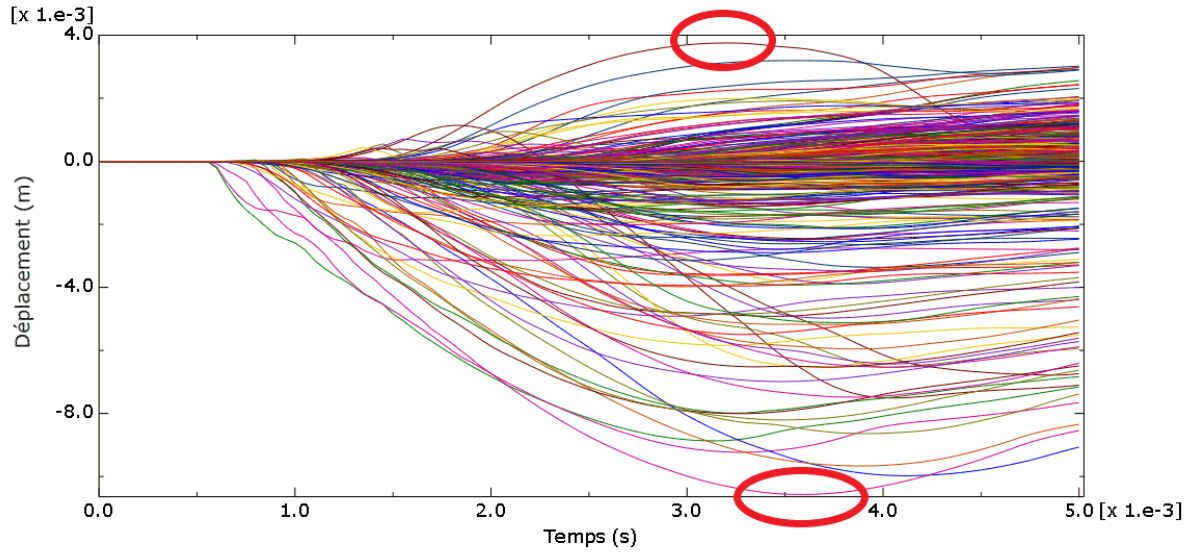


FIGURE 4.18 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 45°

Le TABLEAU 4.6 reprend les résultats obtenus en simulant les cinq angles choisis et met en évidence la diminution du déplacement maximal de la CF et de la sollicitation de la CE avec la diminution de l'angle d'incidence par rapport à la situation à 90°.

TABLEAU 4.6 – Déplacement maximal des CF et CE pour les différents angles

Angle (°)	Combinaison	Vitesse (m/s)	δ_{CF} (mm)	$\Delta_{\delta_{CF}}$ (mm)	$\Delta_{\delta_{CF}}$ (%)	δ_{CE} (mm)
90	4	7,9	13,6	/	/	1,7
75	4	7,9	13	-0,6	-4,5	1,4
60	4	7,9	12,2	-1,4	-10,0	0,8
45	4	7,9	10,6	-3,0	-22,0	0,4
30	4	7,9	7,6	-6,0	-44,0	0,2
15	4	7,9	4,6	-9,0	-66,0	0,2

Par ailleurs, l'augmentation du volume déplacé par la particule avec la diminution de l'angle d'incidence soulève une interrogation quant à la pertinence d'utiliser la contrainte de pénétration dynamique (équation (2.2)) afin de comparer les résultats des différents angles. Cette équation a été développée dans le cadre du modèle d'Armelin (1997) qui suppose que la bille est projetée avec un angle de 90° par rapport au substrat (SECTION 2.2.2). La contrainte de

pénétration dynamique n'a donc plus de sens physique dans ce cas. L'énergie cinétique de la bille W_1 ne variant pas, c'est au niveau du volume de pénétration apparent de la bille dans le substrat V_a que cela pose un problème. En effet, ce dernier dépend du rayon de la bille et de sa profondeur de pénétration maximale qui perd son sens lorsque la bille est projetée avec un angle et génère un déplacement de volume de matériau plus important que le cas à 90°. Il est donc nécessaire de s'intéresser à une autre mesure afin de comparer les résultats obtenus en faisant varier l'angle d'incidence.

4.2.2.1 Mesure n°2 : mesure de la dissipation d'énergie cinétique liée au déplacement d'un volume de matériau pour différents angles

Comme expliqué plus haut, l'introduction d'un angle d'incidence résulte en un transfert moins efficace de l'énergie cinétique au substrat (à la CF dans ce cas), une partie de cette énergie étant consommée pour déplacer un volume de matériau plus important que dans le cas à 90°. Ceci a tendance à augmenter le rebond. Toute l'énergie cinétique n'est donc plus concentrée pour faire pénétrer la particule le plus profondément possible. L'idée derrière la mesure qui va être présentée est de réussir à quantifier l'énergie cinétique dissipée afin de déplacer un plus grand volume de matériau pour différentes valeurs d'angle.

Pour ce faire, dans le cas avec un angle, il faut se baser sur le déplacement maximal de la CF (δ_{CF}) connu pour différentes valeurs d'angle (Tableau 4.6). Ce déplacement maximal correspond alors à la portion d'énergie cinétique utilisée par la bille pour pénétrer le plus profondément possible. Ensuite, l'idée va être de s'affranchir de l'angle d'incidence et de revenir au cas dans lequel la bille est projetée à 90°. Dans le modèle numérique, il est alors possible de retrouver la valeur exacte d'énergie cinétique permettant de retrouver ce même déplacement maximal dont il est question ci-dessus, en jouant sur la vitesse. L'énergie cinétique déterminée correspond alors uniquement à la portion utilisée pour faire pénétrer la bille et non déplacer le substrat dans le cas d'un angle. En soustrayant cette valeur à la valeur de référence à 90°, il est possible de déterminer la quantité d'énergie cinétique dissipée pour déplacer un volume plus important de matériau.

4.2.2.2 Conclusion

Les résultats pour les différents angles sont présentés au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 – Dissipation d'énergie cinétique de la bille associée au déplacement du substrat pour différentes valeurs d'angle d'incidence

Angle (°)	Combinaison	Vitesse modifiée (m/s)	Énergie cinétique (J)	Δ_{EC} (J)	Δ_{EC} (%)
90	4	7,9	0,32	/	/
75	4	7,3	0,27	-0,05	-16
60	4	6,6	0,22	-0,10	-31
45	4	5,6	0,16	-0,16	-50
30	4	3,8	0,07	-0,25	-78
15	4	2,2	0,02	-0,30	-94

Ce tableau et principalement la dernière colonne sont d'une importance capitale, tant cette dernière met en évidence la "perte" d'énergie liée à la présence d'un angle lors de la projection. Un angle de 75° montre déjà une perte d'énergie d'environ 15%. Cela signifie que les particules situées les plus en périphérie du jet possèdent 15% moins d'énergie que les particules situées au centre. Cette considération permet d'appuyer le fait que la CF se développe dans la partie centrale de l'empreinte du jet, les particules en périphérie ne possédant pas assez d'énergie pour l'activer. Ceci concerne uniquement la composante fondamentale, donc la situation idéale dans laquelle la projection est réalisée à l'aide d'un robot.

Ensuite, les pertes d'énergie associées aux angles de 60° et 45° présentent des valeurs extrêmement faibles. En considérant que l'introduction de la composante humaine fait passer l'angle d'incidence à une valeur de 60°, ce n'est pas moins de 30% de l'énergie cinétique qui est "perdue". Cela représente environ un tiers de l'énergie totale qui n'est pas utilisée efficacement. Cette observation est encore appuyée par la valeur à 45°, représentant une perte d'énergie à hauteur de la moitié de l'énergie initiale (50%). De telles pertes permettent de souligner l'importance de continuer les efforts en matière d'automatisation de la mise en place. La combinaison d'un bras robotisé et de la trajectoire planétaire permettent de réduire la valeur de l'angle d'incidence au maximum afin de diminuer fortement le rebond.

4.2.3 Étape n°3 : influence de l'épaisseur de la couche *fluide*

La dernière étape de création du modèle numérique consiste à faire varier l'épaisseur de la CF initialement choisie à 13,5 mm. La vitesse et la taille de la bille n'ont pas changé par rapport aux deux premières étapes. La combinaison de référence est toujours la C4.

4.2.3.1 Couche *fluide* de 27 mm d'épaisseur

Une épaisseur correspondant au double du diamètre de la bille est d'abord étudiée et les résultats numériques sont présentés aux Figures 4.19, 4.20 et 4.21.

Sur la FIGURE 4.19, la ligne rouge permet toujours de marquer la délimitation entre les deux couches et met en évidence l'épaisseur plus importante de la CF dans ce cas-ci. En termes de comportement général du modèle, peu de choses sont à relever par rapport au cas de base. La première analyse qui peut être faite est la sollicitation quasiment nulle de la CE du fait de la profondeur limitée de la bille dans la CF.

La seconde est l'augmentation de la profondeur de pénétration de la bille pour une CF plus épaisse. Cette profondeur dépasse le diamètre de la bille alors qu'elle l'atteignait tout juste dans la situation avec une épaisseur de la CF égale au diamètre de la bille. Ceci amène une nouvelle question quant aux limitations du modèle numérique : existe-t-il une limitation en termes de pénétration de la bille et de déplacement de la CF à cause de la présence de la CE ? Rien ne sert de donner une explication réelle à cette question pour l'instant, une piste de réponse sera abordée par la suite et rejoindra fortement la *limitation n°3* introduite plus haut.

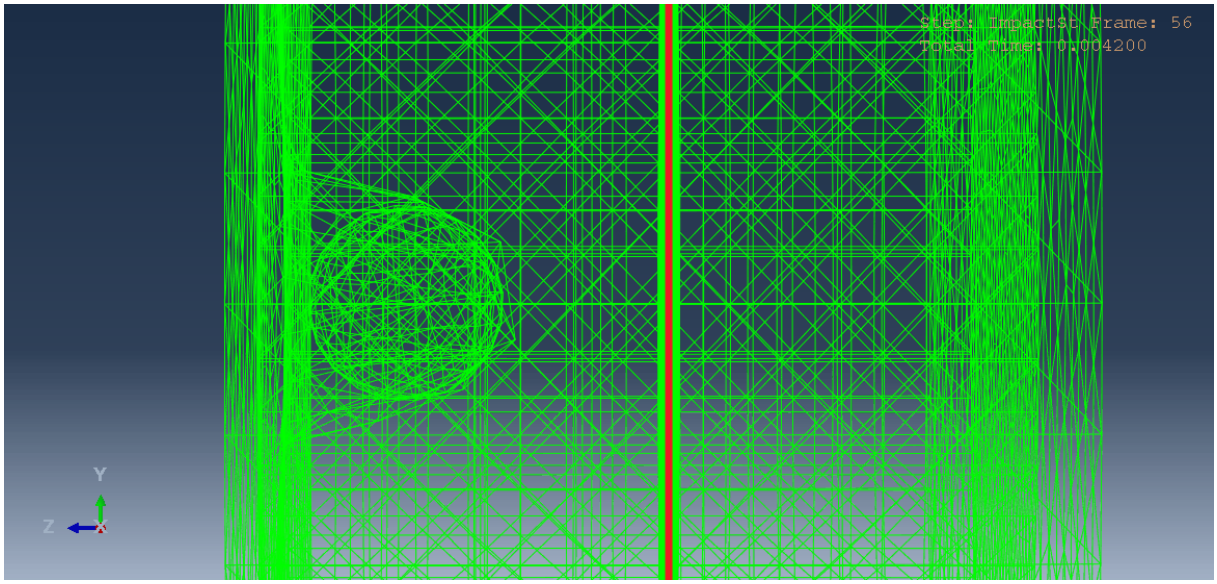


FIGURE 4.19 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 27 mm d'épaisseur

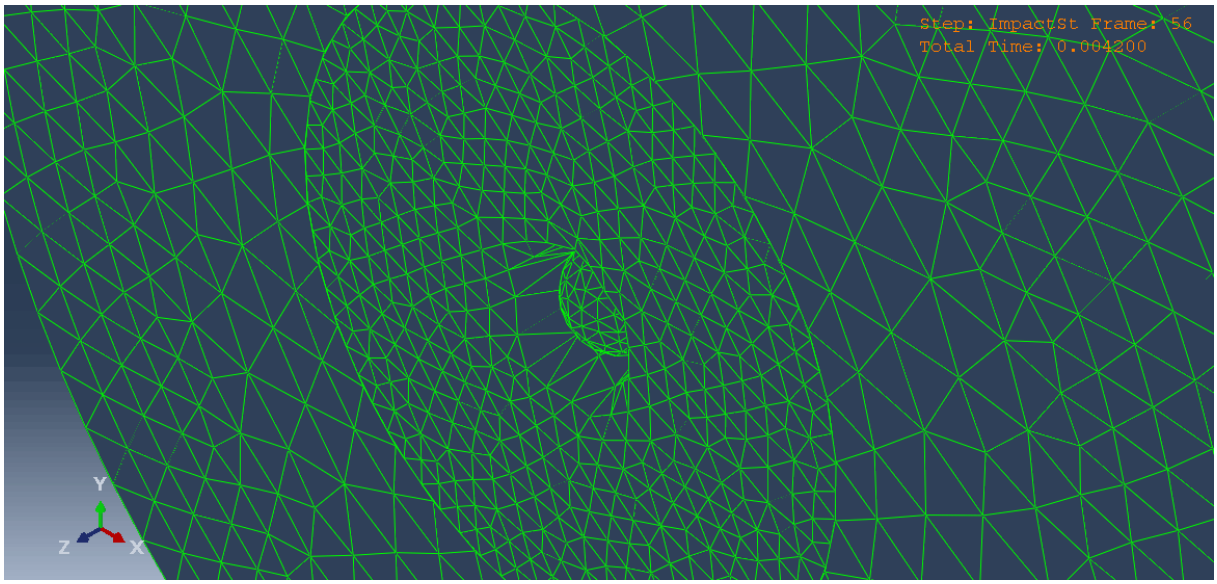


FIGURE 4.20 – Déplacement maximal des nœuds de la CF de 27 mm d'épaisseur

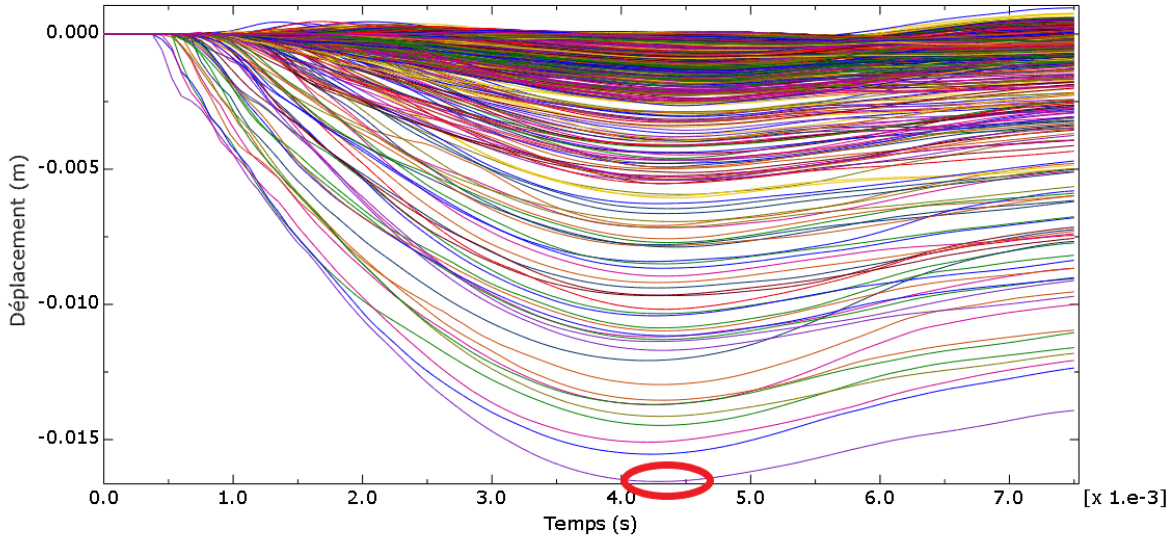


FIGURE 4.21 – Déplacement des nœuds de la CF de 27 mm d'épaisseur en fonction du temps

Après analyse des FIGURES 4.19, 4.20 et 4.21, la conclusion principale est l'augmentation de la profondeur de pénétration maximale de la bille par rapport au cas de référence. Le TABLEAU 4.8 met en évidence cette augmentation et la diminution de la valeur de p_d associée à hauteur de 21%.

TABLEAU 4.8 – Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour une CF de 27 mm d'épaisseur

Épaisseur CF (mm)	Combinaison	δ_{CF} (mm)	p_d (MPa)	Δ_{p_d} (MPa)	Δ_{p_d} (%)	δ_{CE} (mm)
13,5	4	13,6	0,19	/	/	1,7
27	4	16,6	0,15	-0,04	-21	0,3

4.2.3.2 Couche *fluide* de 6,75 mm d'épaisseur

Avant toute chose, il est important de conseiller au lecteur d'être particulièrement critique et de prendre du recul par rapport aux résultats présentés dans cette section. Dans la même idée que précédemment, l'épaisseur de la CF va maintenant être réduite à la moitié du diamètre de la bille.

Combinaison 4

Comme pour les autres étapes, la combinaison de référence (C4) a été simulée en premier lieu. L'erreur mentionnée dans la *limitation n°3* a de nouveau fait son apparition, empêchant le logiciel de donner des résultats pour cette combinaison.

Combinaison 2

Le premier réflexe a été de simuler une autre combinaison déterminée dans l'étape n°1. Le choix s'est porté vers la C2 pour déterminer si l'augmentation de la limite d'élasticité permettait de régler le problème ou non. Lors du passage de la C4 à la C2, le module de Young est constant et la valeur de la limite d'élasticité est doublée. Malheureusement, cette tentative ne fut pas plus fructueuse que la précédente.

Conclusion 1

Les deux premières tentatives n'ayant pas abouti, le Tableau 4.9 reprend les combinaisons traitées et rappelle les valeurs de leurs propriétés "mécaniques".

Tableau 4.9 – Déplacement maximal des CF et CE pour une CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaisons non valides

Épaisseur CF (mm)	Combinaison	E (MPa)	f_y (MPa)	δ_{CF} (mm)	δ_{CE} (mm)
6,75	4	0,5	0,025	Erreur	Erreur
6,75	2	0,5	0,05	Erreur	Erreur

Après une parenthèse sur le problème rencontré, les autres combinaisons de l'étape n°1 seront simulées pour montrer comment le résoudre et appuyer les hypothèses posées ci-dessous.

Limitation n°3 bis

Il ne s'agit pas d'une quatrième limitation, l'erreur intervenant dans le modèle étant la même qu'à la *limitation n°3*. La variation de l'épaisseur de la CF et, plus particulièrement, sa diminution apportant simplement des éléments supplémentaires. Comme expliqué lors de la tentative

avec la C2, il est supposé que l'erreur ne provient pas d'une limite d'élasticité f_y trop faible, son augmentation ne changeant rien au problème rencontré. Cette supposition sera confirmée un peu plus loin. La deuxième hypothèse se tourne vers le dernier paramètre restant : le module de Young. En faisant l'hypothèse que la valeur de E est trop faible (Tableau 4.9) pour que le logiciel fonctionne correctement, une autre limite du modèle numérique semble être atteinte. Cette hypothèse rejoint la *limitation n°3* évoquée plus haut, un module de Young plus faible correspondant globalement à un matériau plus *fluide*.

De plus, l'augmentation du module de Young fait partie des solutions qui reviennent constamment lors des recherches effectuées pour résoudre ce problème. En restant pragmatique, la conclusion de cette limitation est que le module de Young possède une limite inférieure dans le modèle numérique qui varie pour un maillage, une épaisseur de CF et une limite d'élasticité donnés. Bien sûr, le problème peut être tourné dans l'autre sens : il existe une épaisseur minimale de la CF pour un maillage et une combinaison de propriétés bien définis.

Limitation n°4

Cette quatrième limitation est à prendre avec des pincettes tant elle est basée sur une observation pure et simple du comportement du modèle et tente d'expliquer le problème rencontré dans les *limitation n°3* et *limitation n°3 bis* en se concentrant sur l'épaisseur de la CF. Malgré le faible module de Young utilisé dans les C4 et C2, cela fonctionnait avec une CF d'une épaisseur de 13,5 mm. Pourquoi cela ne fonctionne-t-il plus lorsque l'épaisseur de la CF diminue ? Car il s'agit bien du seul paramètre qui a été modifié. Il semblerait que pour une épaisseur de CF donnée, il existe une borne inférieure en termes de propriétés "mécaniques" de la CF qui peut se traduire par une limite de *fluidité* du matériau (cfr. *Limitation n°3*). La borne supérieure n'existe pas vraiment étant donné que la solution principale à l'erreur rencontrée consiste à augmenter le module de Young et donc la rigidité du matériau (cfr. *Limitation n°3 bis*).

Cependant, quel est le problème avec cette réduction d'épaisseur de la CF ? Il est compliqué d'apporter une réponse sans se brûler les ailes au passage. Un premier élément de réponse a été apporté dans la *limitation n°3 bis*, un module de Young trop faible supposant un matériau trop *fluide* pour le logiciel. Mais pourquoi ce matériau n'est-il pas trop *fluide* dans le cas d'une épaisseur de la CF plus importante ? L'hypothèse apportée concerne la proximité de la CE, mais ne peut, en aucun cas, être considérée comme absolument correcte. Il se pourrait que la proximité (au voisinage du changement de couche) dans le modèle d'éléments aux propriétés différentes, d'une part *fluides* dans la CF et puis "rigides" dans la CE pose des problèmes de déformation et de calcul. Il n'y a aucune transition entre ces propriétés dans le modèle numérique, le changement se faisant de manière brusque. Encore une fois, il y aurait donc une limite inférieure de combinaison de propriétés en fonction de l'épaisseur de la CF et de la proximité

ou non de la CE de ces éléments qui se déforment énormément. La parenthèse étant terminée, la conclusion consistera de nouveau à mettre en évidence qu'il existe des bornes dans le modèle en fonction des choix effectués.

Combinaison 1

Pour confirmer l'hypothèse posée sur le module de Young dans la *limitation n°3 bis*, il paraît intéressant d'augmenter sa valeur pour déterminer si cela résout le problème rencontré dans le logiciel. Le passage de la C2 à la C1 permet de doubler le module de Young tout en gardant la limite d'élasticité constante. Cette fois, le logiciel parvient à donner des résultats similaires à ceux obtenus précédemment sur les Figures 4.22 et 4.23.

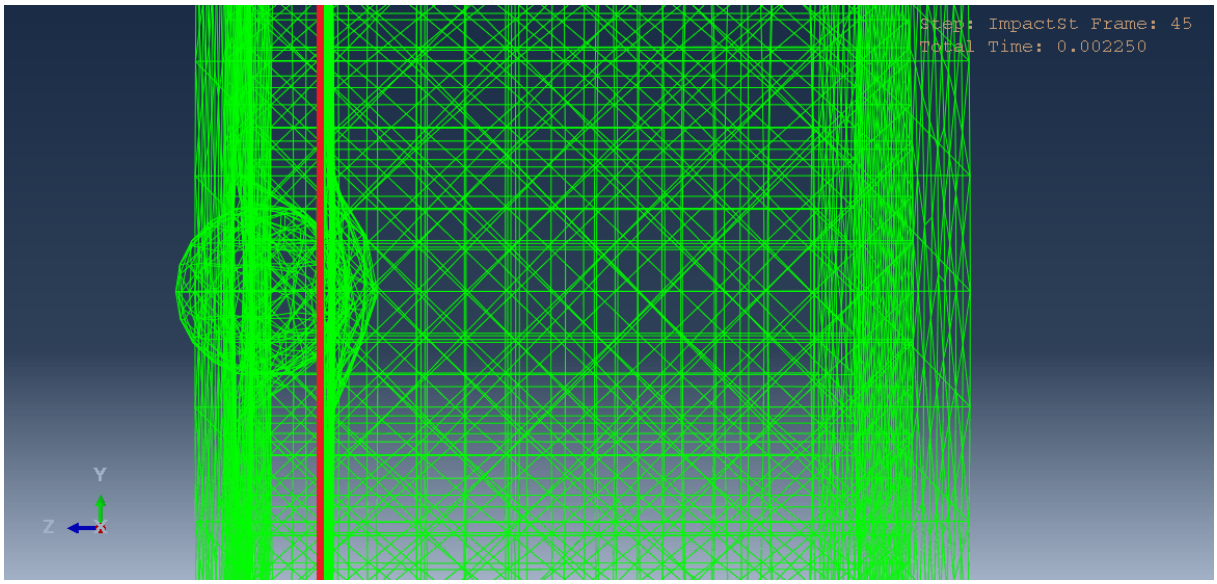


Figure 4.22 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 1

Sur la Figure 4.22, la ligne rouge montre à quel point l'épaisseur de la CF est plus faible. Ceci implique que la CE est beaucoup plus sollicitée lors de la pénétration de la bille et son déplacement est plus grand.

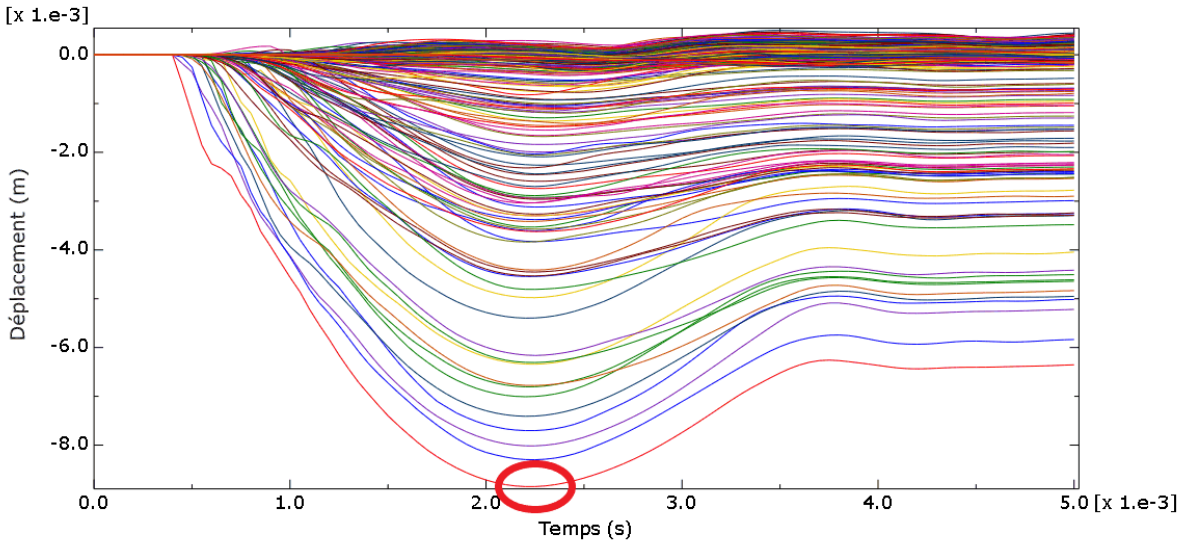


FIGURE 4.23 – Déplacement des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur en fonction du temps - Combinaison 1

Combinaison 3

Il peut être également intéressant de simuler la C3 avec une épaisseur de la CF de 6,75 mm. En effet, le passage de la C1 à la C3 permet de diviser la limite d'élasticité par cinq en gardant le module de Young constant, permettant d'obtenir une f_y inférieure à celles utilisées pour les C4 et C2 ci-dessus. Si le modèle fonctionne, cela permettra de confirmer que la limite d'élasticité a moins d'influence que le module de Young. Les résultats sont présentés aux FIGURES 4.24 et 4.25.

Comme pour la combinaison précédente (C1), le déplacement de la CE sur la FIGURE 4.24 est plus importante que dans le cas de référence considérant une épaisseur de la CF de 13,5 mm (FIGURE 4.9).

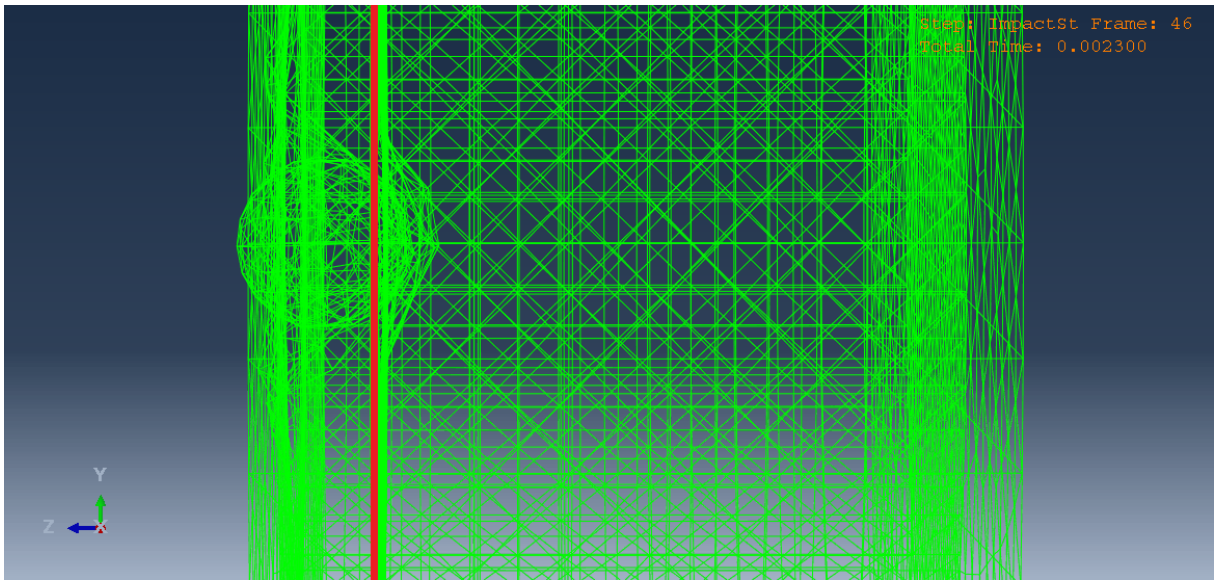


FIGURE 4.24 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 3

Pour information, la FIGURE 4.25 permet d'observer les mêmes phénomènes qu'à l'étape n°1 lors de l'utilisation de la C3. Ceux-ci ne seront pas redéveloppés.

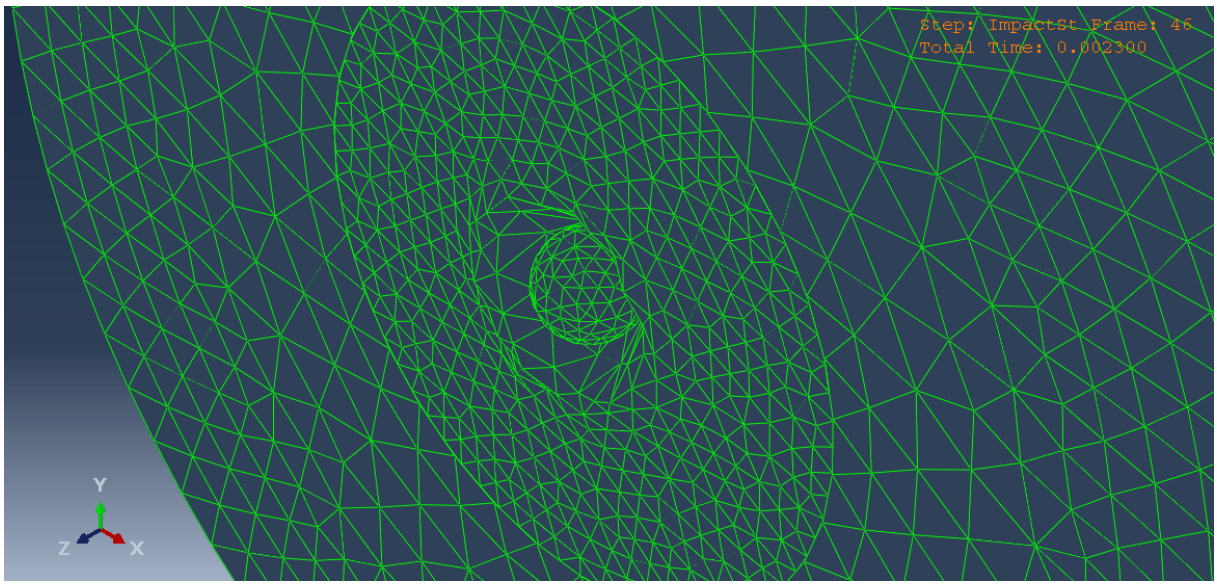


FIGURE 4.25 – Déplacement maximal des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 3

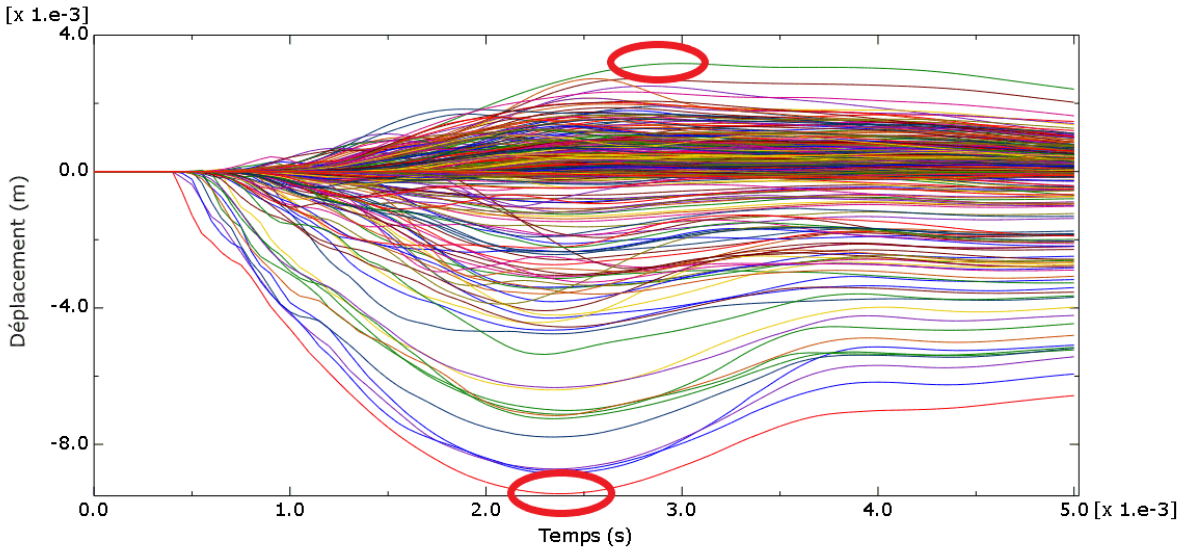


FIGURE 4.26 – Déplacement des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur en fonction du temps - Combinaison 3

Conclusion 2

TABLEAU 4.10 – Déplacement maximal des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique pour une CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaisons valides

Épaisseur CF (mm)	Combinaison	E (MPa)	f_y (MPa)	δ_{CF} (mm)	p_d (MPa)	δ_{CE} (mm)
13,5	1	1	0,05	10,7	0,26	1,1
6,75	1	1	0,05	8,8	0,34	4
13,5	3	1	0,01	13,6	0,19	2,1
6,75	3	1	0,01	9,4	0,31	4,7

4.3 Cas particuliers

Dans les trois étapes développées ci-dessus, le point d'attention s'est principalement posé sur les propriétés du substrat, en conservant l'énergie cinétique constante. Pour faire le lien entre ces deux choses et la contrainte de pénétration dynamique qui constitue notre point de repère par rapport au rebond, il faut repartir de l'équation ci-dessous (équation (2.2)) :

$$p_d = \frac{W_1}{V_a} \tag{4.16}$$

Pour rappel, Jolin (1999) explique que deux choses sont nécessaires à l'obtention d'un faible rebond : une grande énergie cinétique W_1 et une faible contrainte de pénétration dynamique p_d. Si la première condition peut paraître contre-intuitive en regardant l'équation (4.16) de manière purement mathématique, une faible valeur de p_d traduisant un faible rebond, la profondeur de pénétration maximale de la bille (et son rayon) se cache dans la valeur de V_a (équations

(2.11) et (2.12)) et compense cette grande énergie cinétique. Pour en revenir aux trois étapes initiales du modèle, le seul terme qui variait dans l'équation (4.16) était donc le volume de pénétration apparent V_a, lié aux propriétés du substrat et dépendant uniquement de la profondeur de pénétration maximale de la bille, le rayon de celle-ci restant constant. L'interprétation était simple : plus la profondeur de pénétration δ est importante, plus V_a est grand, plus p_d et le rebond sont faibles, et ce, inversement.

Pour les deux cas particuliers ci-dessous, la variation de la taille (masse) et de la vitesse de la bille modifient désormais l'énergie cinétique ce qui signifie que les deux termes de l'équation (4.16) varient. En effet, l'énergie cinétique fait varier la profondeur de pénétration maximale de la bille et, donc, le volume de pénétration apparent, même pour des propriétés du substrat fixées. Pour la variation de la taille de la bille, il faut souligner que le volume de pénétration apparent de la bille va également varier avec le rayon qui n'est maintenant plus constant.

4.3.1 Influence de la taille de la bille

Dans ce premier cas particulier, l'épaisseur de la CF est prise à 13,5 mm et la vitesse de la bille est constante et d'une valeur de 7,9 m/s comme précédemment. Avant de procéder à l'analyse, il est utile de rappeler que selon Armelin (1997) et Jolin (1999) : plus la taille d'un granulat augmente et plus la probabilité de rebond augmente, signifiant que p_d augmente également.

4.3.1.1 Bille de 10 mm de diamètre

Typiquement en béton projeté, la taille du plus gros granulat se situe aux alentours de 10 mm de diamètre. Cette taille étant assez proche de celle utilisée depuis le début du développement du modèle (13,5 mm), le comportement général du modèle est approximativement le même. Les seules différences concernent la profondeur de pénétration maximale de la bille et la sollicitation de la CE (Tableau 4.11), mais elles sont liées.

Sur la Figure 4.27, il est possible de voir que la profondeur de pénétration maximale d'une bille d'un diamètre de 10 mm est inférieure à celle d'une bille de 13,5 mm de diamètre ; 10,6 mm au lieu de 13,6 mm. La bille possédant un diamètre plus faible, sa masse et donc son énergie cinétique sont plus faibles, tout en considérant que la vitesse reste constante. Cette diminution d'énergie cinétique ne permet pas à la bille de pénétrer aussi profondément dans la CF. Cette réduction permet d'expliquer pourquoi la CE est moins déplacée.

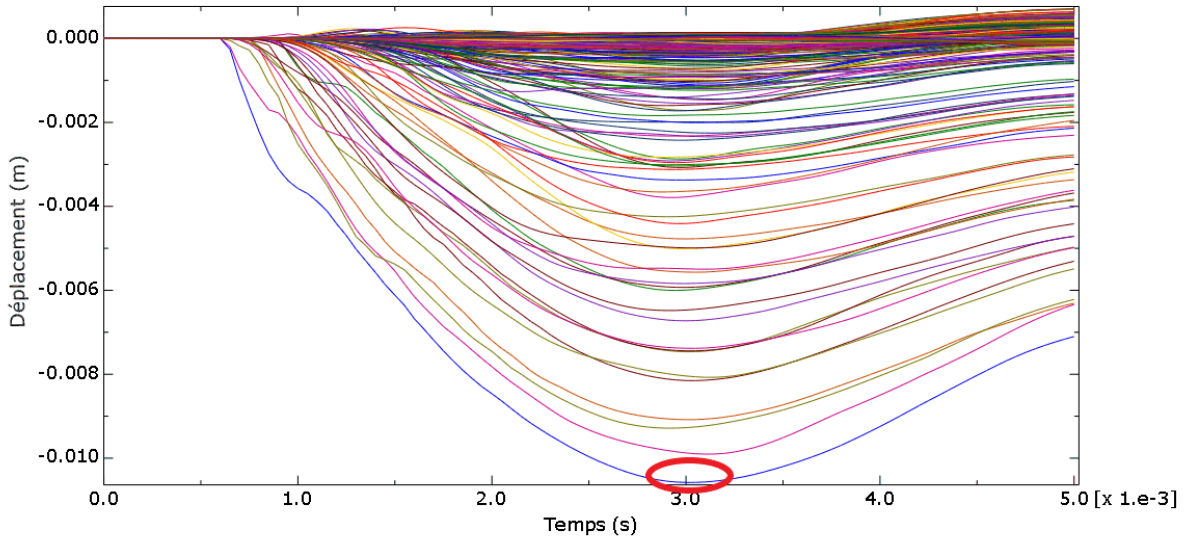


FIGURE 4.27 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 10 mm de diamètre

4.3.1.2 Bille de 5 mm de diamètre

En réduisant encore la taille de la bille à 5 mm de diamètre, les mêmes conclusions peuvent être tirées sur base des FIGURES 4.28 et 4.29 : l'enfoncement de cette bille est encore plus faible.

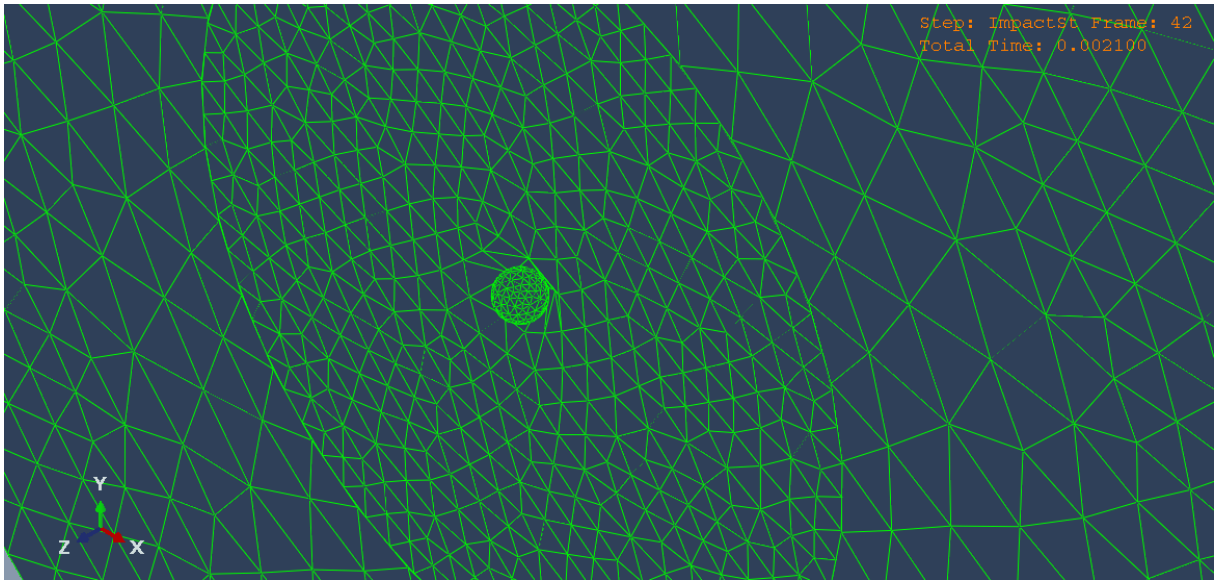


FIGURE 4.28 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 5 mm de diamètre

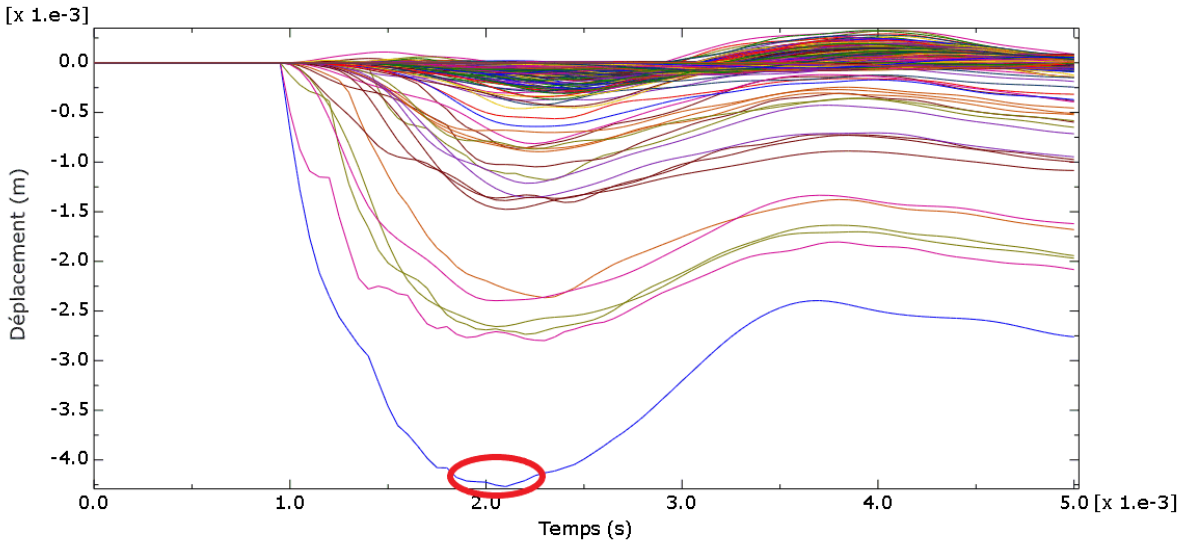


FIGURE 4.29 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 5 mm de diamètre

4.3.1.3 Conclusion

Le TABLEAU 4.11 reprend les résultats obtenus pour les différentes tailles de bille.

TABLEAU 4.11 – Déplacements des CF et CE et contrainte de pénétration dynamique en fonction du diamètre de la bille

Diamètre (mm)	Combinaison	δ_{CF} (mm)	p_d (MPa)	Δ_{p_d} (MPa)	Δ_{p_d} (%)	δ_{CE} (mm)
13,5	4	13,6	0,19	/	/	1,7
10	4	10,6	0,18	-0,01	-5	0,3
5	4	4,3	0,24	0,05	26	0,05

Pour conclure, en se basant sur la bille de 10 mm de diamètre, l'augmentation de la taille de la bille pour passer à un diamètre de 13,5 mm augmente légèrement la valeur de p_d et, donc, du rebond. Ceci permet de rejoindre la conclusion posée par Armelin (1997) et Jolin (1999).

Pour la bille de 5 mm maintenant, le résultat obtenu en termes de p_d est trompeur. En effet, celui-ci suggère qu'une diminution de la taille d'une particule a tendance à augmenter le rebond, ce qui vient à l'encontre de l'hypothèse posée plus haut. Ce n'est pas le cas en réalité. Ici, une seule particule est projetée à la fois, là où la réalité du béton projeté consiste en un jet formé d'une multitude de particules de différentes tailles. Les plus petites particules ont tendance à moins rebondir à cause de l'énergie des plus grosses particules qui vont les enfoncer dans le substrat.

4.3.2 Influence de la vitesse de la bille

Pour ce dernier cas, la taille de la bille est constante et possède un diamètre de 13,5 mm. À hautes vitesses de projection, la même erreur de déformation excessive que citée plus haut apparaît dans le modèle numérique (cfr. *Limitation n°3*) et ne permet pas d'obtenir de résultats. Pour contourner ce problème, il a été choisi d'utiliser le substrat dans son état entièrement élasto-plastique, comme au début de l'étape n°1, afin de s'affranchir des grandes déformations liées aux faibles propriétés "mécaniques" de la CF. Il n'y a donc pas de CF dans ce cas particulier, l'objectif étant simplement d'observer l'influence de la variation de vitesse de la bille sur le rebond.

Les résultats pour les différentes vitesses simulées sont présentés aux Figures 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 et 4.34. Il n'est pas nécessaire de les développer en détails, tant le comportement est attendu.

4.3.2.1 Bille projetée à une vitesse de 5 m/s

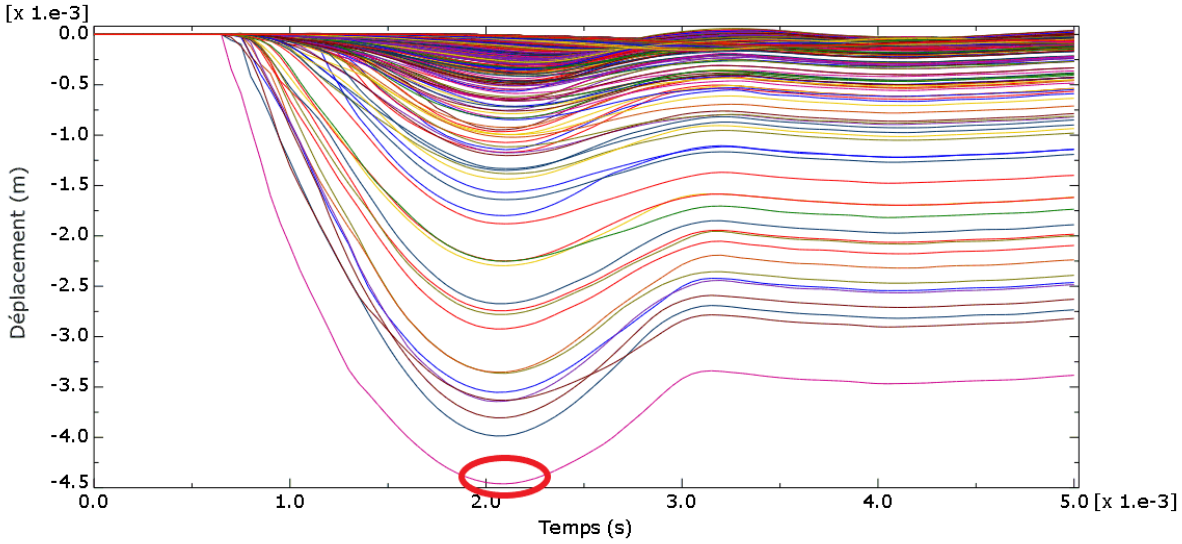


Figure 4.30 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 5 m/s

4.3.2.2 Bille projetée à une vitesse de 20 m/s

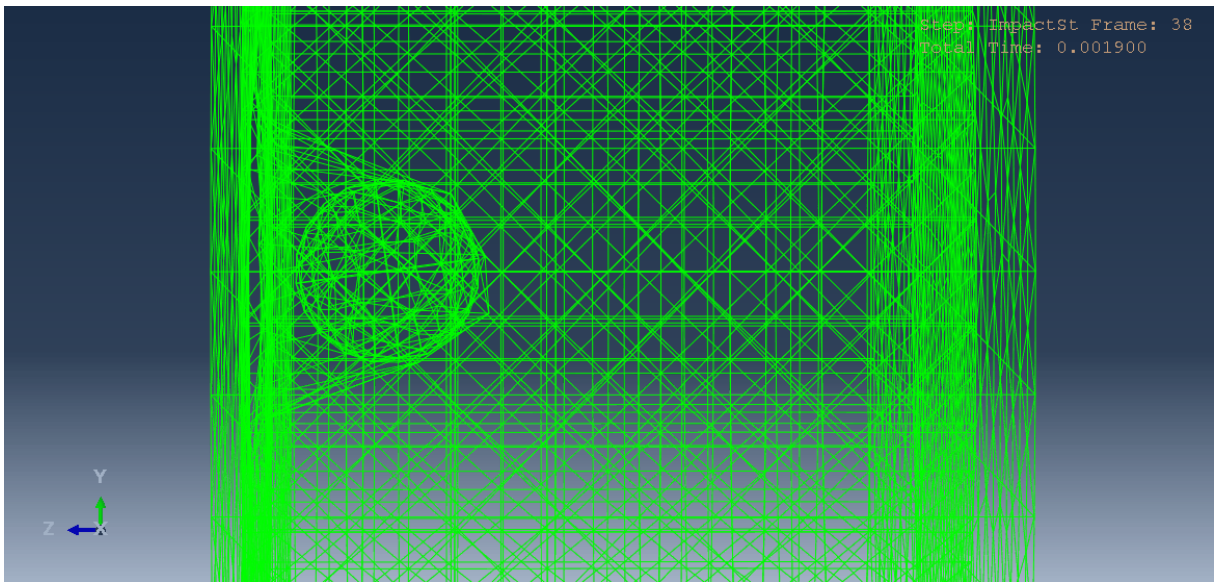


FIGURE 4.31 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - 20 m/s

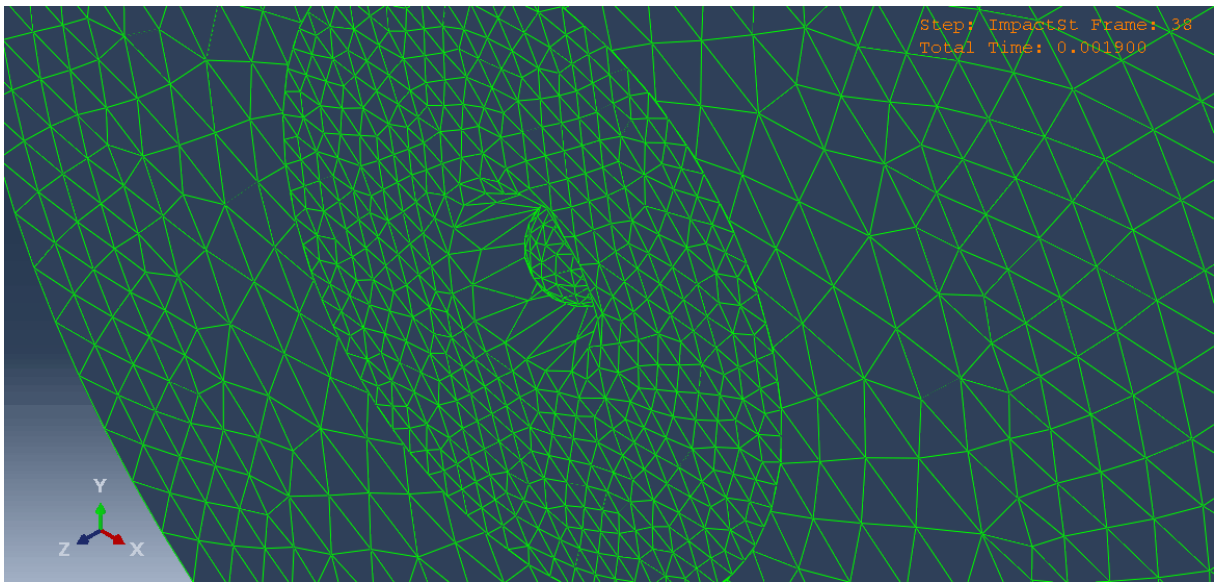


FIGURE 4.32 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - 20 m/s

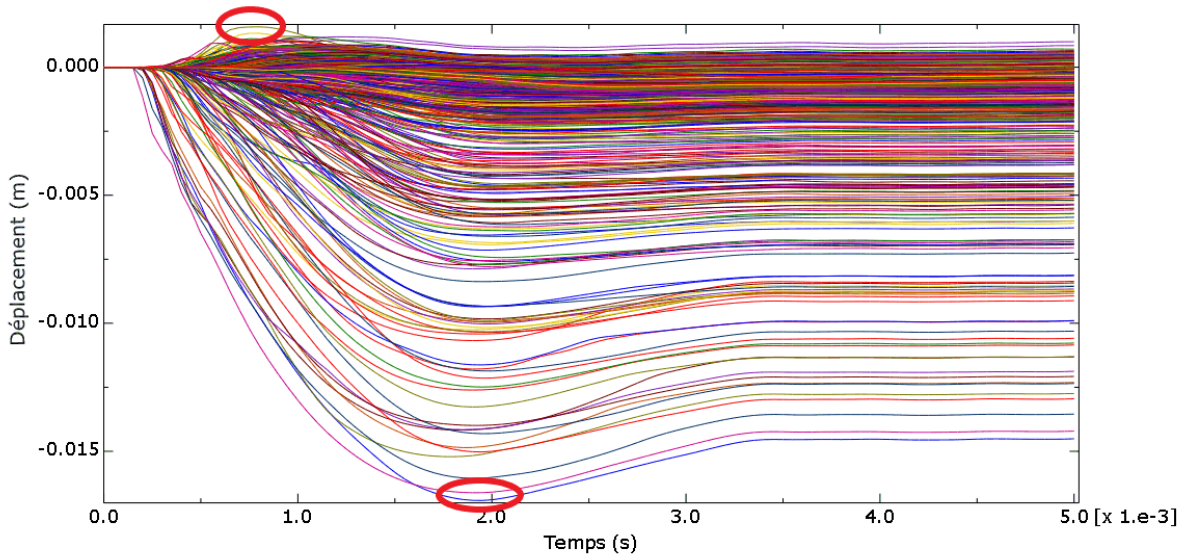


FIGURE 4.33 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 20 m/s

4.3.2.3 Bille projetée à une vitesse de 30 m/s

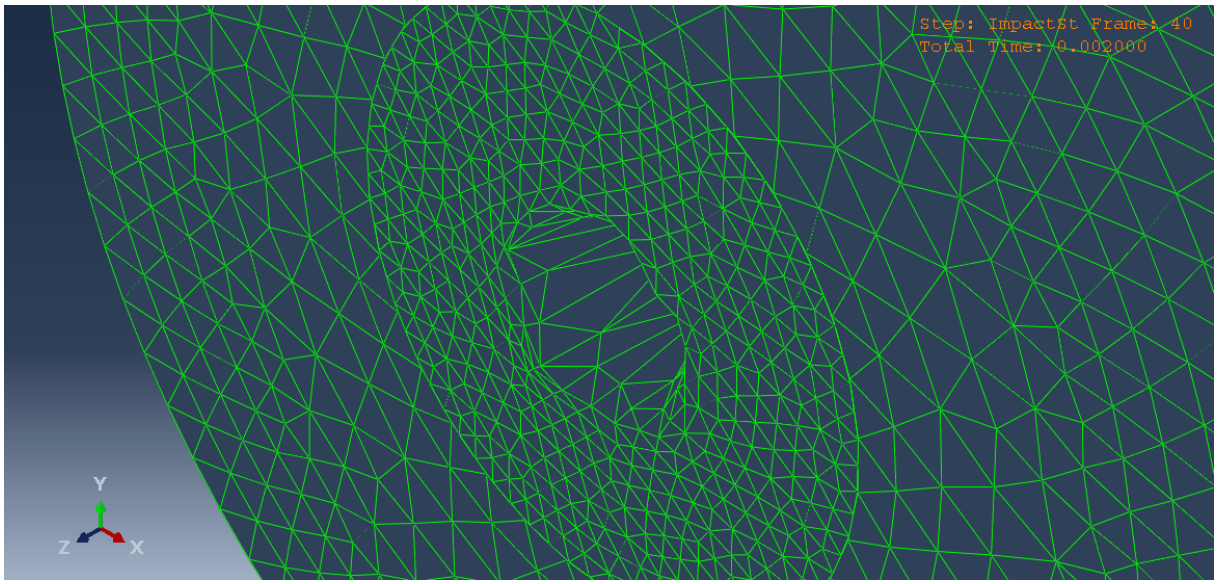


FIGURE 4.34 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - 30 m/s

4.3.2.4 Conclusion

Le TABLEAU 4.12 reprend les résultats obtenus pour les différentes vitesses de bille.

Tableau 4.12 – Déplacement de la CE et contrainte de pénétration dynamique en fonction de la vitesse de la bille

Vitesse (m/s)	Épaisseur CE (mm)	Combinaison	δ_{CE} (mm)	p_d (MPa)	Δ_{p_d} (MPa)	Δ_{p_d} (%)
5	50	A	4,5	0,38	-0,10	-21
7,9	50	A	6,8	0,48	/	/
20	50	A	16,9	0,96	0,48	100
30	50	A	24,4	1,44	0,96	200

Dans ce cas particulier, l'analyse est plus rapide que pour le précédent. Le rayon de la bille restant constant, le seul paramètre qui varie est sa vitesse. Pour rappel, l'énergie cinétique est proportionnelle à la vitesse au carré (équation (2.1)). Une augmentation de la vitesse entraîne donc une augmentation de l'énergie cinétique W_1, et inversement. Sur base de l'équation 2.2, une telle augmentation de W_1 entraîne une augmentation de la contrainte de pénétration dynamique p_d et, donc, du rebond. Cependant, W_1 n'est pas le seul terme qui varie dans l'équation (2.2). En donnant une vitesse (et donc une énergie cinétique) plus importante à la bille, celle-ci pénètre plus profondément dans le substrat et la valeur de la profondeur de pénétration maximale (δ) augmente. Celle-ci a un impact direct sur le volume de pénétration apparent V_a qui augmente à son tour. Une telle augmentation de V_a entraîne une diminution de p_d et, donc, du rebond. Cependant, la variation de la vitesse au carré dans l'équation de l'énergie cinétique possède plus de poids que la variation de la profondeur de pénétration dans l'équation du volume de pénétration apparent.

Sur base de l'explication précédente, il peut être conclu que, de manière générale, l'augmentation de la vitesse de la bille en acier a tendance à augmenter la contrainte de pénétration dynamique et le rebond associé. Cette augmentation est confirmée par les résultats présentés au Tableau 4.12.

Dans le cas particulier précédent, l'analyse n'était pas directe en raison de l'influence moins grande de la variation de la masse sur l'énergie cinétique et de la variation du rayon de la bille. L'augmentation de l'énergie cinétique étant moins importante, l'effet sur la contrainte de pénétration dynamique est moins probant et V_a vient contrebalancer cette équation.

Chapitre 5

Conclusion

Avant de passer aux conclusions générales, il est important de mentionner que ce qui a été réalisé en termes de modélisation numérique pour le béton projeté par voie sèche pourrait très bien être reproduit pour la voie humide en prenant en compte ses spécificités.

5.1 Conclusions générales

Pour en revenir aux objectifs principaux de ce travail de recherche, l'objectif de base visant à développer un modèle numérique représentant l'essai de la *catapulte* de Kim et al. (2024) et validant leurs observations expérimentales a été rempli. Ce travail a également permis de représenter et d'appuyer l'hypothèse de couche *fluide* de manière numérique.

En validant les observations énoncées plus haut, ce modèle numérique a rendu possible une première caractérisation des couches élasto-plastique et, surtout, *fluide* en termes de propriétés "mécaniques" en fin de projection, juste après l'arrêt de la stimulation du substrat par le jet de particules. De telles valeurs à l'état frais n'avaient pu être déterminées jusqu'à présent, les méthodes de mesure étant trop lentes pour capturer le caractère *fluide* de cette couche avant sa transition rapide en un matériau rigide. Le Tableau 5.1 permet d'obtenir un aperçu de l'ordre de grandeur du module de Young et de la limite d'élasticité des différentes couches déterminées grâce au modèle numérique. Ces propriétés traduisent un comportement du substrat et de pénétration de la bille tout à fait satisfaisants pour cette étude exploratoire.

Tableau 5.1 – Propriétés mécaniques satisfaisantes des différentes couches

	E (MPa)	f_y (MPa)
Couche élasto-plastique	5	0,1
Couche *fluide*	0,5	0,025

Un autre point névralgique de cette étude consistait en l'introduction d'un angle d'incidence dans le modèle, dans le but de déterminer son influence sur le rebond d'une particule. Grâce au modèle numérique, il a été possible de remarquer qu'une particule projetée avec un angle pénétrait moins profondément dans le substrat et déplaçait un volume de matériau plus important que si elle était projétée à 90°. Cette observation a permis d'apporter une conclusion selon laquelle l'énergie cinétique de la particule est moins bien transférée au substrat lorsqu'elle est lancée avec un angle, une partie de cette énergie étant dissipée sous forme d'énergie de déformation latérale et non perpendiculaire au plan du substrat. Pour un angle d'incidence de 60° qui pourrait être associé à une projection manuelle réalisée par un lancier, la perte d'énergie cinétique s'élève à environ 30% de la valeur trouvée à 90°. Cependant, d'autres cas de situations pourraient encore diminuer cet angle : le lancier remplit un coin qui est une zone critique, la surface de projection n'est pas parfaitement verticale, etc. L'accumulation de plusieurs situations défavorables pourrait mener à de très faibles angles, pour lesquels la perte d'énergie pourrait s'élever à plus de 50%. Une telle valeur est énorme et aurait beaucoup de conséquences sur le rebond. L'effet de l'angle lors d'une projection à la main est donc d'une importance capitale (Tableau 4.7) et une séquence mal optimisée pourrait avoir des conséquences désastreuses sur la quantité de rebond. Il suffit d'imaginer une situation où les problèmes de création d'angle ne permettent pas l'activation de la couche *fluide* et où le substrat se retrouve dans son état élasto-plastique tout au long de la projection. Ces situations soulignent l'importance de l'automatisation de la mise en place pour l'optimisation des phénomènes de rebond dans les bétons projetés. Et pour cause, la combinaison de l'utilisation d'un robot et d'une trajectoire planétaire permetttent d'obtenir une réduction d'environ 50% du rebond par rapport à une projection manuelle (Schaeffer, 2023).

Une autre problématique d'intérêt concerne l'épaisseur de la couche *fluide*. Celle-ci dépend de la fréquence énergétique des particules qui frappent le substrat. En effet, une fréquence critique d'activation est requise pour faire apparaître cette couche *fluide* et ensuite en définir l'épaisseur. Pour aller plus loin et faire un lien avec le paragraphe précédent, la perte d'énergie associée à la présence d'un angle lors d'une projection aurait une influence défavorable sur l'activation et l'épaisseur de la couche *fluide*, celle-ci s'en trouverait fortement réduite. Une diminution de l'épaisseur de la couche *fluide* est à éviter, le modèle numérique prouvant qu'une épaisseur doublée permet de diminuer la contrainte de pénétration dynamique d'environ 20%. Dans le sens contraire, une diminution de l'épaisseur de 50% peut mener à des augmentations de p_d variant entre 30 et 60% ce qui est assez impressionnant.

Finalement, les deux cas particuliers traitant de l'influence de la taille et de la vitesse de la bille ont permis de confirmer encore la validité du modèle en validant des résultats connus. La taille et la vitesse de la bille sont proportionnelles à la contrainte de pénétration dynamique.

5.2 Limites du modèle numérique

Le modèle qui a été développé dans le cadre de cette étude exploratoire n'est pas parfait mais permet de borner le problème posé et de poser les bases nécessaires au développement de projets futurs concernant la modélisation numérique des phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés. Il est donc important d'adopter un regard critique et de prendre un peu de temps pour discuter des hypothèses et limitations qui l'empêchent de représenter exactement la réalité. Certaines de ces limitations ont déjà été discutées en détails dans les Chapitres 3 et 4.

5.2.1 Limites liées au comportement du béton projeté par voie sèche

5.2.1.1 *Limitation n°1*

La première limitation du modèle numérique concerne l'évolution des propriétés des couches *fluide* et élasto-plastique et de l'épaisseur de la couche *fluide* dans l'espace. Dans la réalité, ces deux considérations décroissent radialement en suivant l'évoluion de la fréquence énergétique des particules et la distribution de masse. Pour une question de simplicité, l'épaisseur de la couche *fluide* sera constante et une combinaison de propriétés sera utilisée pour représenter l'entièreté de chaque couche.

5.2.1.2 *Limitation n°2*

La seconde limitation du modèle numérique concerne l'évolution des propriétés des couches *fluide* et élasto-plastique et de l'épaisseur de la couche *fluide* dans le temps. Le caractère transitoire rapide du substrat pose des problèmes quant à la caractérisation des deux considérations précédentes dans le temps. Au vu du niveau de complexité engendré par cette limitation, l'évolution en fonction du temps n'est pas considérée. Le modèle vise à isoler un seul "instant" de la mise en place, c'est-à-dire l'impact d'une seule particule sur une couche *fluide* bien définie.

5.2.2 Limites fondamentales du logiciel de modélisation numérique

Le développement du modèle numérique a permis de mettre en évidence une limite (*Limitation n°3*) sur les performances du logiciel ABAQUS à représenter un matériau *fluide*. En effet, la diminution excessive des propriétés "mécaniques" et en particulier le module de Young possèdent une borne inférieure. Pour résoudre ce problème, voici les solutions qui ont été utilisées dans ce modèle :

- Diminuer la densité du béton projeté par voie sèche.

- Augmenter les propriétés "mécaniques" pour qu'elles ne soient pas trop faibles et, principalement, le module de Young.

Pour être complet, voici d'autres limites fondamentales qui ont été observées lors de l'élaboration du modèle numérique :

- Il n'existe pas de forces d'adhésion dans le modèle, la particule va toujours rebondir. C'est pourquoi il a fallu s'intéresser à la profondeur de pénétration maximale pour déterminer un lien avec le rebond.
- Le "trou" formé par la particule lorsqu'elle pénètre dans le substrat ne correspond pas vraiment à la forme cylindrique constatée en réalité.
- La couche *fluide* possède un effet "membrane" qui retient la particule lors de sa pénétration et ne lui permet pas de s'enfoncer plus loin dans le substrat. Cette limite est une des plus importantes du modèle, des pistes de solutions seront présentées ci-dessous.

5.3 Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail exploratoire permettent de conclure quant à la nécessité de pousuivre les efforts de recherche en matière de modélisation numérique des phénomènes de rebond des particules dans les bétons projetés par voie sèche.

5.3.1 Pistes d'améliorations du modèle numérique

5.3.1.1 Raffinement du maillage

Pour résoudre le problème lié à la *imitation n°3*, il est possible d'envisager d'autres solutions. Parmi celles-ci, le raffinement du maillage semble être la plus prometteuse. Dans cette étude exploratoire, le maillage a été choisi suffisamment fin pour les objectifs fixés et le temps disponible à la réalisation de ce travail. Cependant, pour représenter un matériau encore plus *fluide*, il est primordial de réaliser un maillage très dense formé d'éléments de petite taille. Ce type de maillage demande un temps de calcul conséquent et ne s'applique que pour des projets de plus longue durée. Une piste d'optimisation temps-précision de calcul pour des projets de plus courte durée pourrait imaginer de réduire la taille de la couche *fluide* afin qu'elle soit légèrement plus grande que la taille de la bille ou la particule projetée. Cela permettrait déjà d'obtenir une information conséquente au sujet de la pénétration de la bille dans la couche *fluide*.

5.3.1.2 Effet "membrane"

Il est nécessaire de réussir à contourner l'effet "membrane" mentionné ci-dessus pour optimiser le modèle et aller plus loin dans l'analyse. Pour ce faire, il est impératif que les éléments

du maillage puissent se briser au fur et à mesure que la particule pénètre dans le substrat et se reforment par la suite. Un tel comportement peut être atteint par l'utilisation de modèles d'endommagements, de rupture afin que les élements du maillage se brisent et se reforment continuellement, entraînant un remaillage constant et une lourdeur de calculs accrue. Cette augmentation du temps de calcul associée à celle d'un maillage plus raffiné montrent l'importance de disposer d'outils puissants et précis pour arriver à une représentation la plus réelle possible des phénomènes de rebond.

5.3.2 Introduction de fibres dans le modèle

En ce qui concerne les perspectives non liées au modèle numérique déjà développé, un point intéressant pourrait être l'introduction de fibres. Même s'il n'en a pas été question dans cette première approche, les fibres sont très importantes dans l'industrie du béton projeté et sont utilisées dans bon nombre de mélanges. L'étude du comportement des fibres au rebond par la modélisation numérique permettrait d'en apprendre davantage sur un phénomène connu uniquement par l'intermédiaire de résultats expérimentaux. De plus, les fibres sont très orientées dans les bétons projetés à cause des particules incidentes qui viennent les frapper lors de la projection. L'influence de la taille et de la forme de ces fibres constituent également un autre point d'intérêt, une fibre pouvant être modélisée par un cylindre en première approche.

Bibliographie

ACI PRC-506-22. (2022). Shotcrete-Guide, ACI Committee Report : 1-52.

Armelin, H. S. (1997). *Rebound and Toughening Mechanisms in Steel Fiber Reinforced Dry-mix Shotcrete.* (Ph. D. Thesis), University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Armengaud, J. (2016). *Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche.* Université Paul Sabatier-Toulouse III.

Beaupré, D. (1994). *Rheology of high performance shotcrete.* [Ph.D.]. University of British Columbia.

Beaupré, D., & Mindess, S. (1996). *Fundamentals of wet-mix shotcrete.* Sprayed Concrete Technology (ed. Simon Austin), Chapman and Hall, London, pp. 252-262.

Bérubé, S. (2018). *Étude des lances en béton projeté : Effets sur les vitesses et la distribution des particules.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Bindiganavile, V. (2007). *Parametric Studies on Fiber Rebound in Dry-Mix Shotcrete.* In R. N. Kraus et al., eds. Sustainable construction materials and technologies. UW Milwaukee CBU, pp. 209–219.

Cimbéton. (2019, septembre). *Mise en œuvre des bétons projetés.* Infociments.
https ://www.infociments.fr/betons/mise-en-oeuvre-des-betons-projetes

Courard, L. (1985). *Utilisation de mortiers projetés à base de résine pour la réparation des bétons.* Master Thesis, Université de Liège.

Courard, L. (2008). *Maintenance, entretien et réparation des constructions en béton.* Notes de cours provisoires 2008-2009, GCIV0133 – GCIV0622, Université de Liège.

Dionne-Jacques, S. I. (2023). *Le rebond en béton projeté par voie sèche : Influence de la rhéologie et de l'énergie sur le comportement de la surface réceptrice.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Fleury, A. (2023, décembre). *Quel bilan carbone pour le béton et la construction ?* Carbo Academy.
https ://www.hellocarbo.com/blog/reduire/quel-bilan-carbone-pour-le-beton-et-la construction

/# : :text=En%20chiffres%2C%20ce%20sont%2014,le%20premier%20%C3%A9tant%20l'eau.

Gagnon, A., & Siccardi, P. (n.d.). Culture Structure. Le béton projeté.

Gagnon, A. (2017). *Développement de mélanges de béton projeté à valeurs environnementales ajoutées.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Ginouse, N. (2014). *Étude fondamentale du processus de mise en place en béton projeté.* (Ph.D.), Université Laval, Québec.

Ginouse, N., & Jolin, M. (2015). *Investigation of spray pattern in shotcrete applications.* Construction and Building Materials, 93, 966-972.

Hu, C. (1995). *Rhéologie des bétons fluides.* [Phdthesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées]. https ://pastel.hal.science/tel-00523283

Jolin, M. (1999). *Mechanism of placement and stability of dry process shotcrete.* (Ph. D. Thesis), University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Jolin, M., Beaupré, D., & Lemay, J-D. (2016). *Guide pour les lanciers de béton projeté, Version 2.0.* CRIB & Université Laval, Québec.

Jolin, M. (2016, mai 3). *Le béton projeté : Aujourd'hui et demain.* 23e Colloque sur la Progression de la Recherche Québécoise sur les Ouvrages d'Art, Québec, QC, Canada. http ://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1183229/06_Beton_projete_expertise_quebecoise.pdf

Kim, J., Jolin, M., & Monfort, M. (2024, 3 mars). *Shotcrete Placement – Report on Recent Research from Rheology to Robotics.* [Conférence]. Shotcrete Convention & Technology Conference, Austin (Texas). https ://web.cvent.com/event/d0bba0e1-90d9-42fc-9cab-af3a1ba64849/websitePage :383c0d57-4e08-47ea-9bd1-b813584a6c2b

Laradh, A. (2020). *Mise en place, énergie et rebond dans le béton projeté.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Morgan, D. R., & Bernard, E. S. (2017). *A Brief History of Shotcrete in the Underground Industry.* Shotcrete Magazine 19(4) : 24-29.

Paquet, S. (2021). *Caractérisation du béton projeté par voie sèche : Une approche rhéologique et énergétique.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Parker, H.W. (1977). *A Practical New Approach to Rebound Losses*, in. ACSE and ACI SP-54, Shotcrete for Ground Support, Detroit,pp. 149-187.

Powers, T.C. (1968). *The Properties of Fresh Concrete.* John Wiley & Sons, Inc., New York.

Puri, U.C. & Uomoto, T., (1999). *Properties of shotcrete (10) Nozzlings versus rebound loss in shotcrete.* Seisan-Kenkyu, 51(4), pp.153–156.

Schaeffer, J. (2023). *Automatisation du procédé de béton projeté : contrôle du rebond et vision numérique.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Siccardi, P. (2018). *Influence de la lance en projection de béton : Homogénéité et Rebond.* (M.Sc.), Université Laval, Québec.

Tattersall, G. H., & Banfill, P. F. G. (1983). *The Rheology of Fresh Concrete.* Pitman Advanced Publishing Program. pp. 10.

Teichert, P. (2002). *Carl Akeley - A tribute to the founder of shotcrete.* Shotcrete Magazine 4(3) : 10-12.

Yoggy, G. D. (2000). *The history of shotcrete : Part 1.* Shotcrete Magazine 2(4) : 28-29.

Yoggy, G. D. (2001). *The history of shotcrete : Part 2.* Shotcrete Magazine 3(2) : 22-23.

Annexes

Annexe A

Distributions du flux massique pour le béton projeté par voie humide

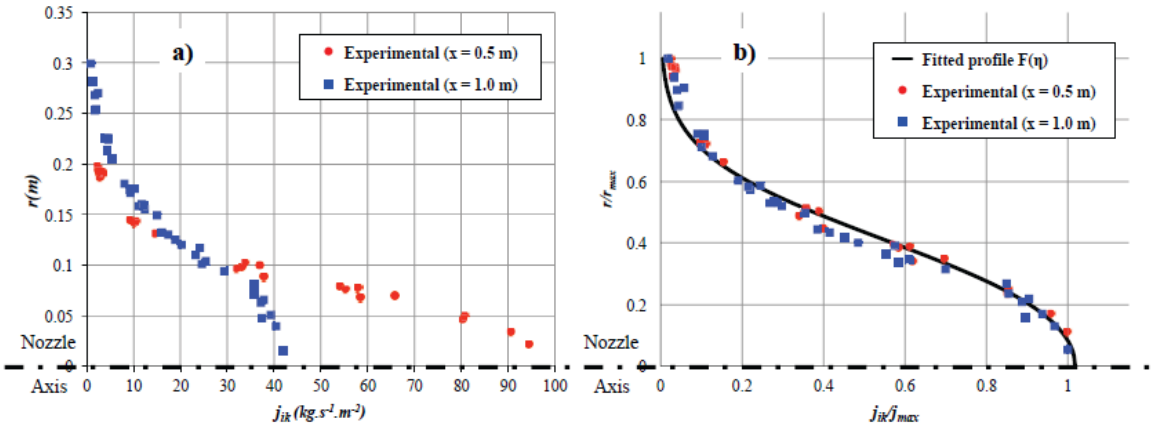


FIGURE A.1 – Distributions du flux massique simple (a) et normalisé (b) en fonction de la distance au centre du jet (tiré de Ginouse & Jolin, 2015)

Annexe B

Résultats numériques

Étape n°1 : tir d'une bille sur le substrat de béton frais à 90°

"Choix" des propriétés de la couche élasto-plastique

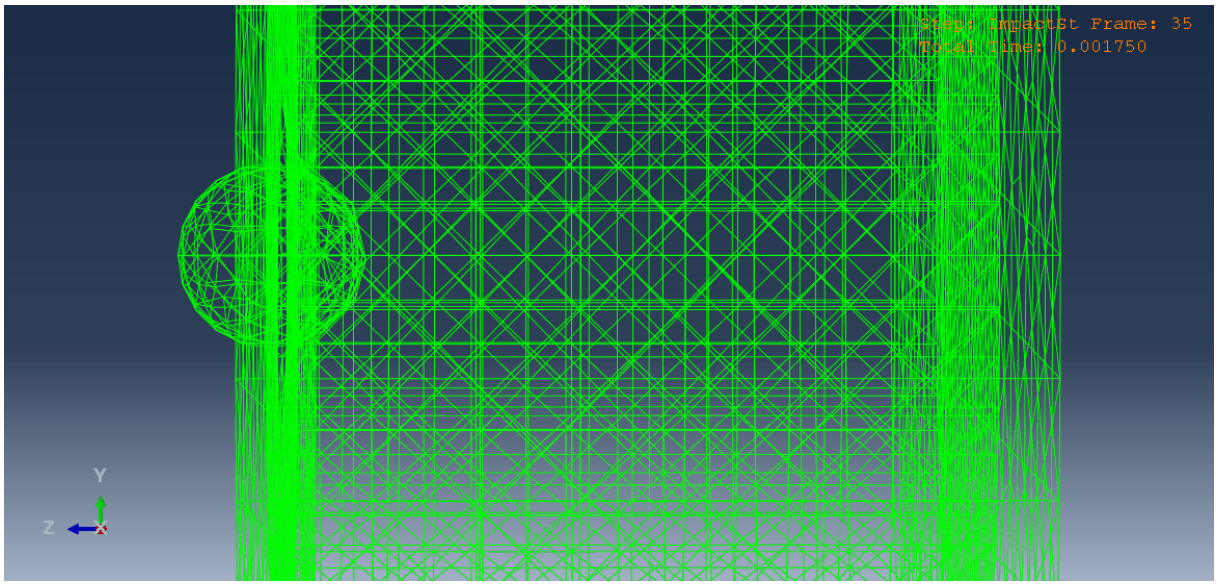


FIGURE B.1 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - Combinaison B

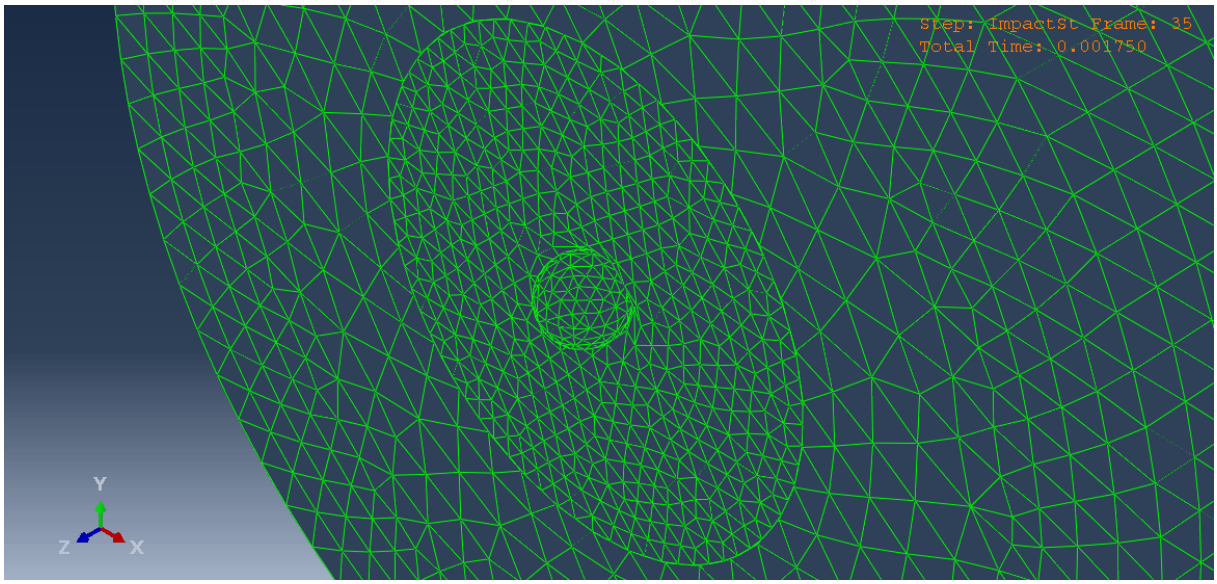


FIGURE B.2 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - Combinaison B

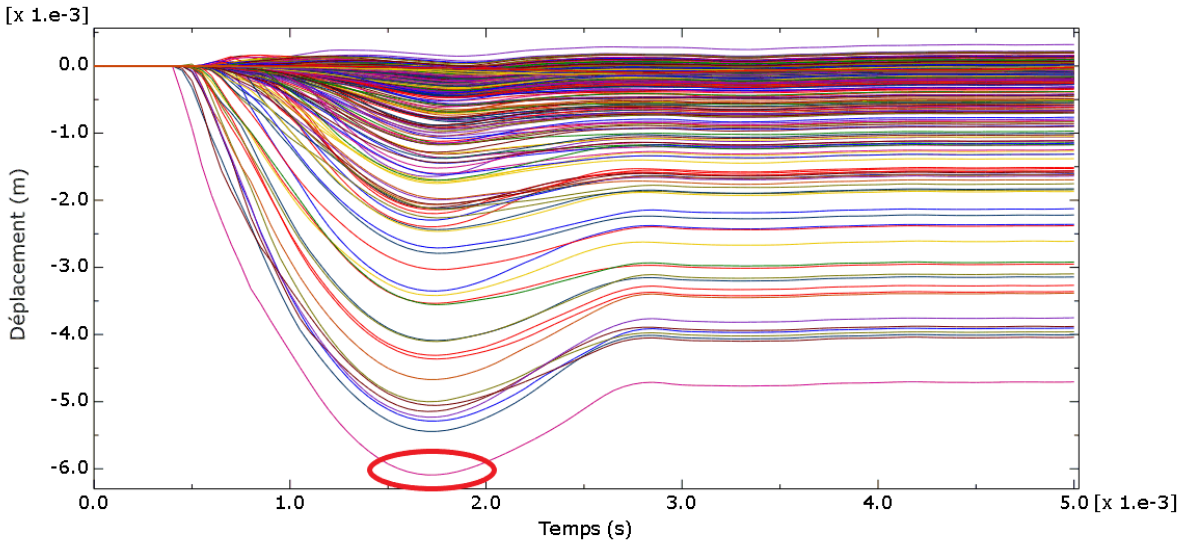


FIGURE B.3 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison B

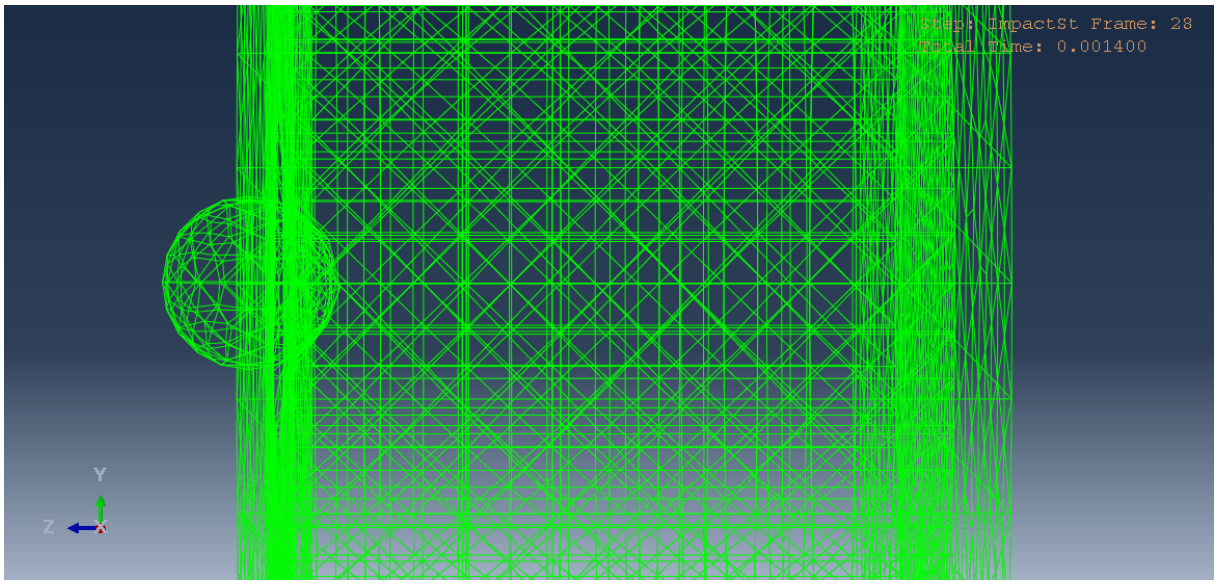


FIGURE B.4 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - Combinaison C

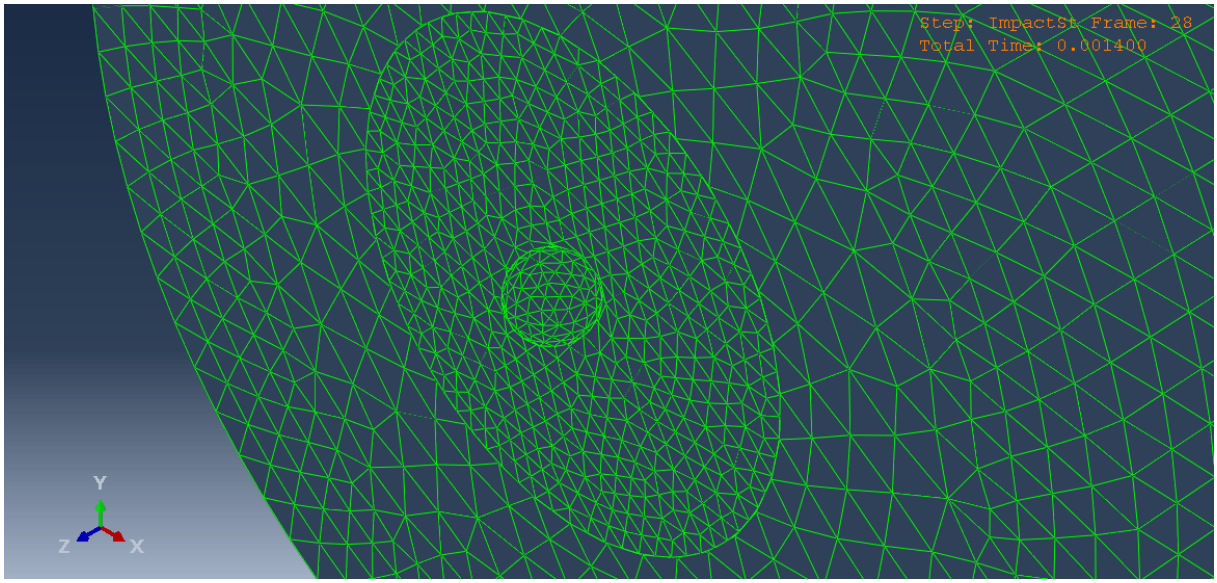


FIGURE B.5 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - Combinaison C

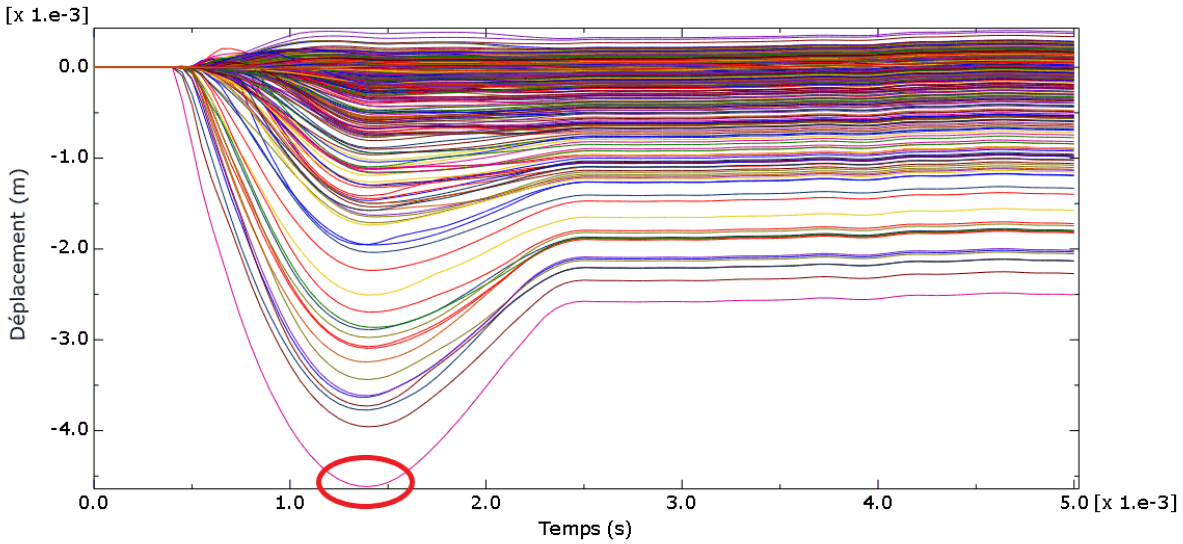


FIGURE B.6 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison C

Recherche des propriétés de la couche "fluide"

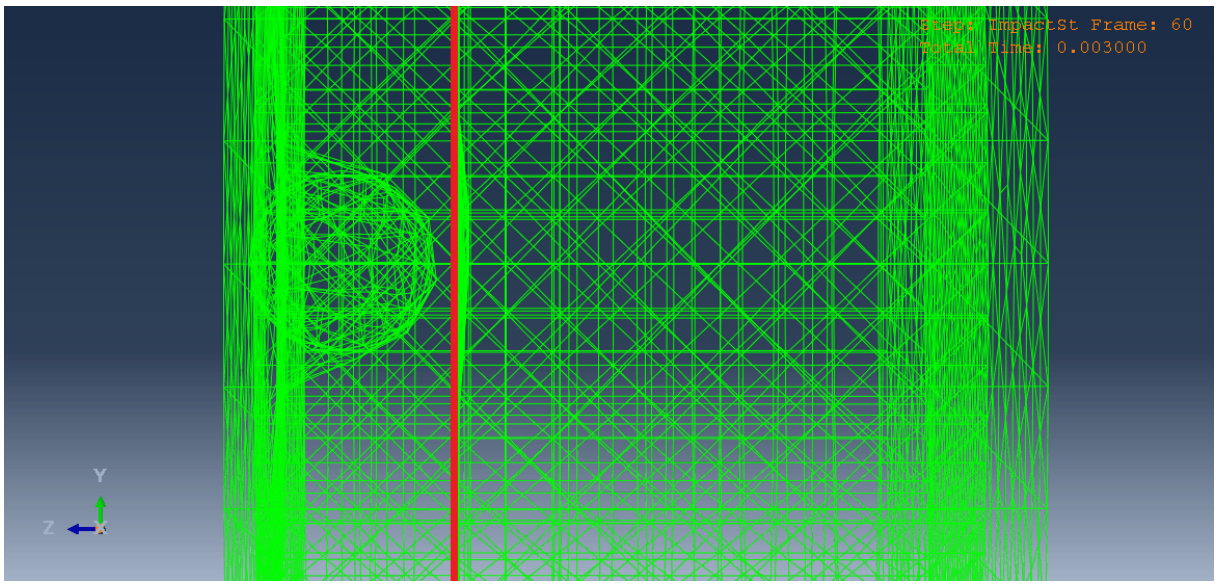


FIGURE B.7 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - Combinaison 2

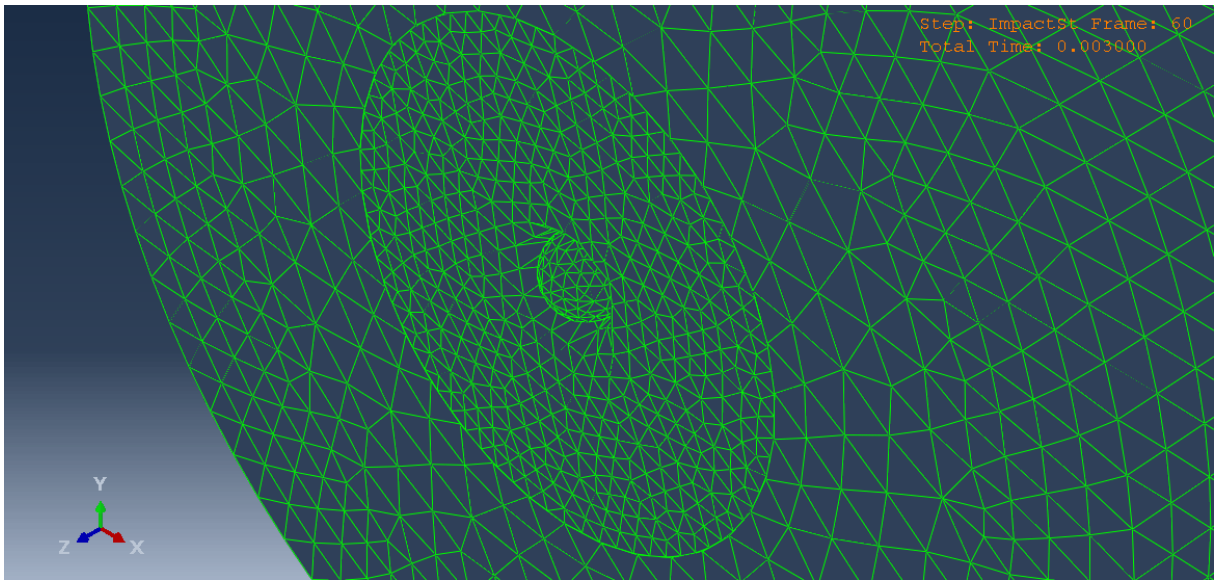


FIGURE B.8 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 2

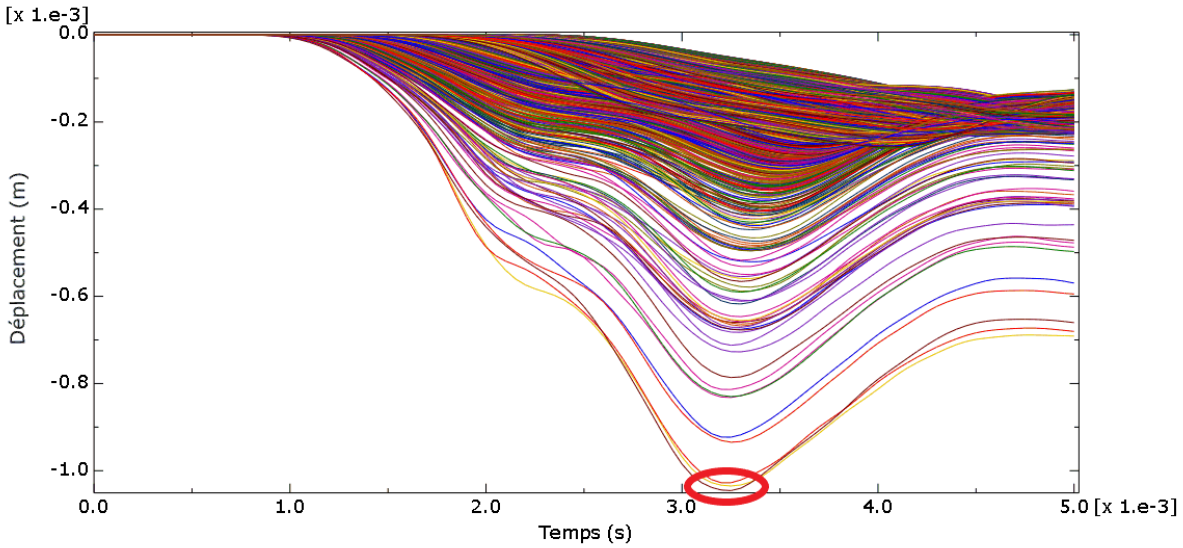


FIGURE B.9 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison 2

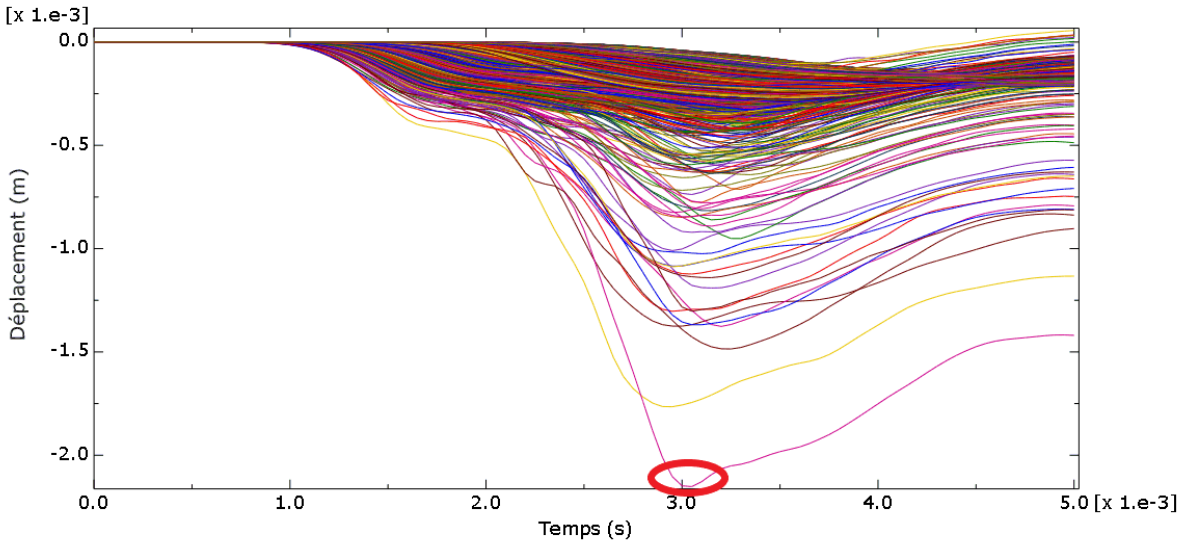


FIGURE B.10 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison 3

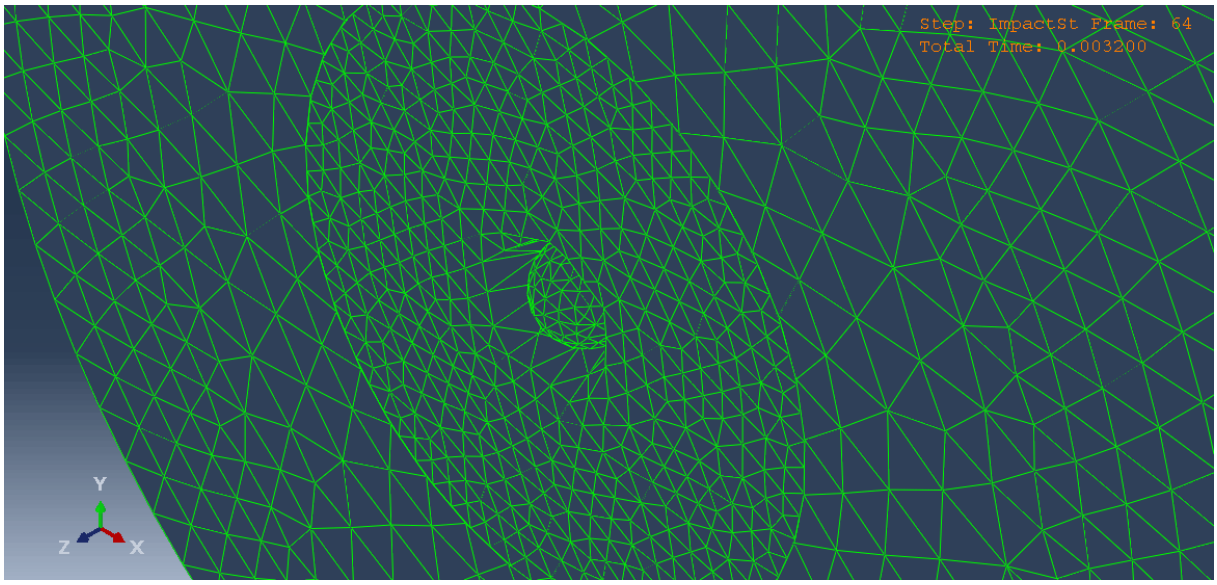


FIGURE B.11 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - Combinaison 4

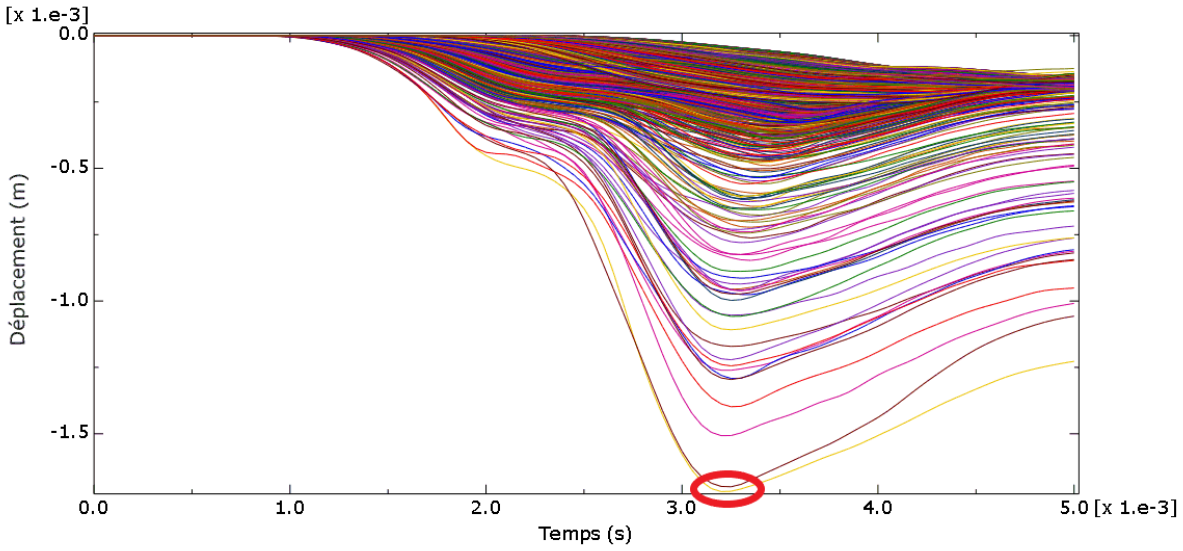


FIGURE B.12 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - Combinaison 4

Étape n°2 : influence de l'angle d'incidence d'une bille sur le substrat

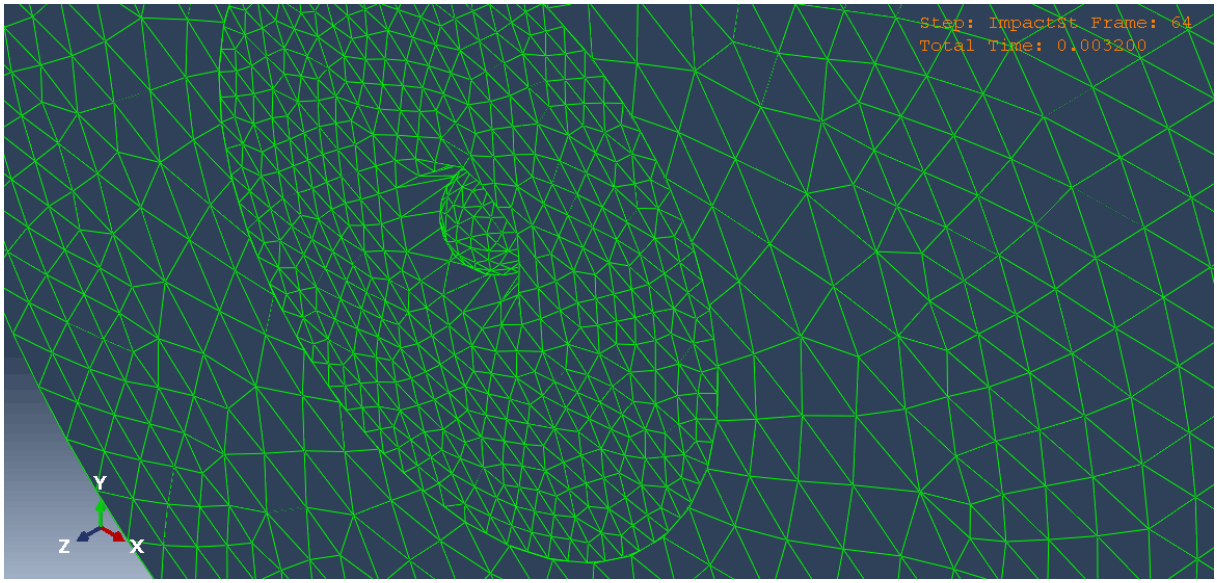


FIGURE B.13 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 75°

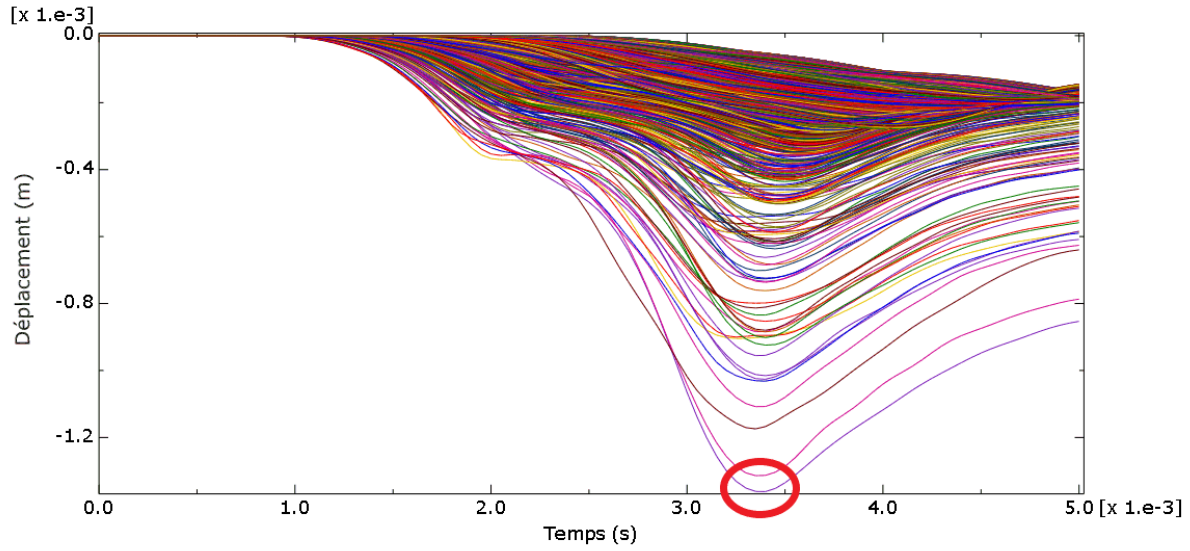


FIGURE B.14 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 75°

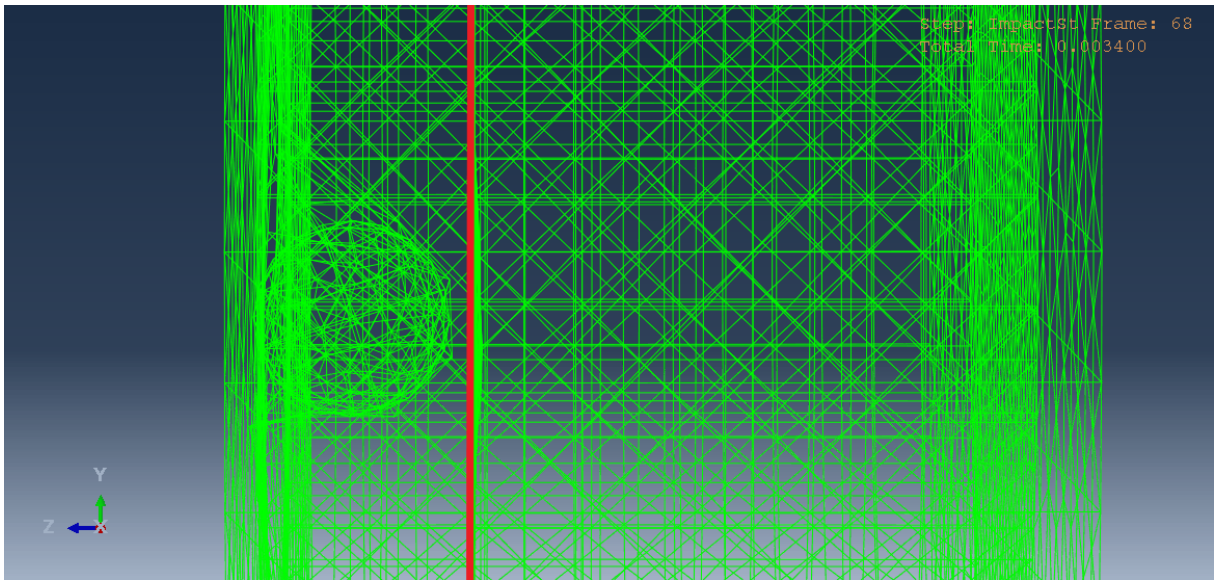


FIGURE B.15 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 60°

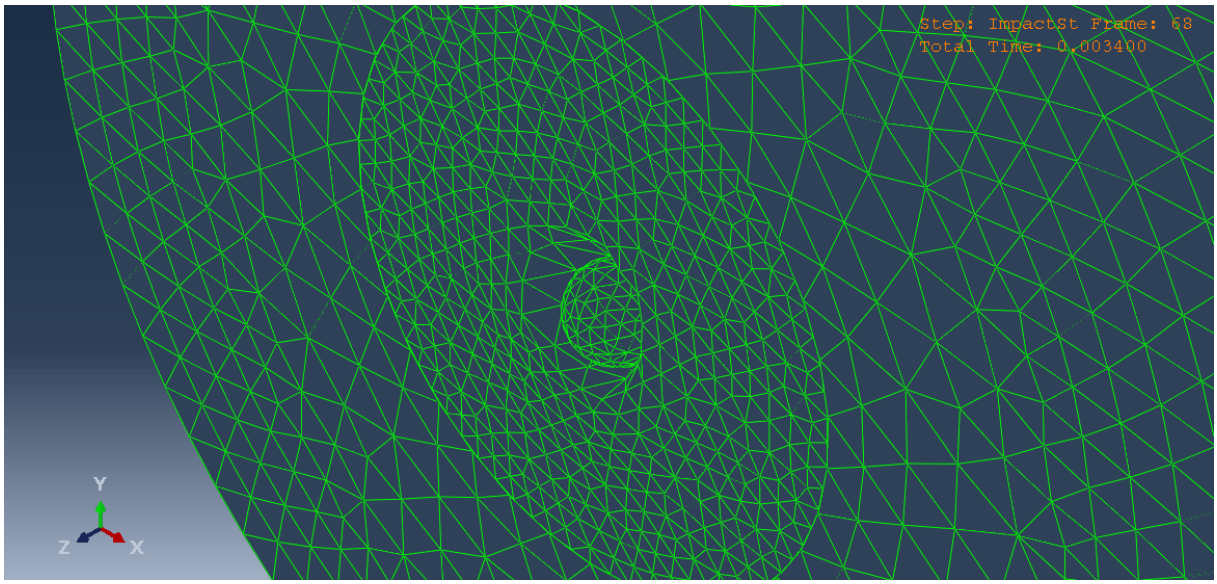


FIGURE B.16 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 60°

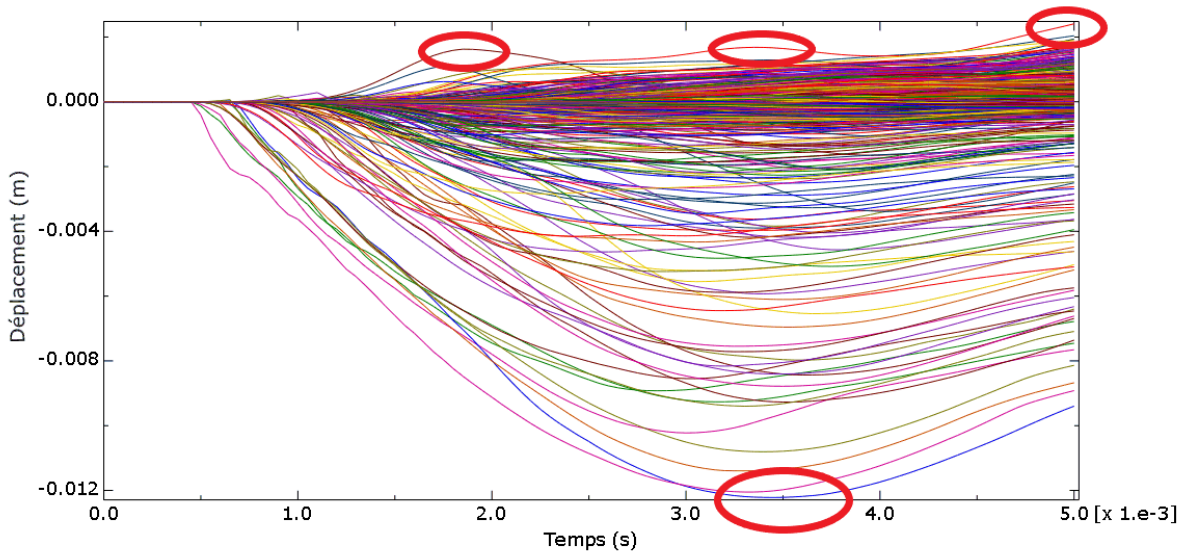


FIGURE B.17 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 60°

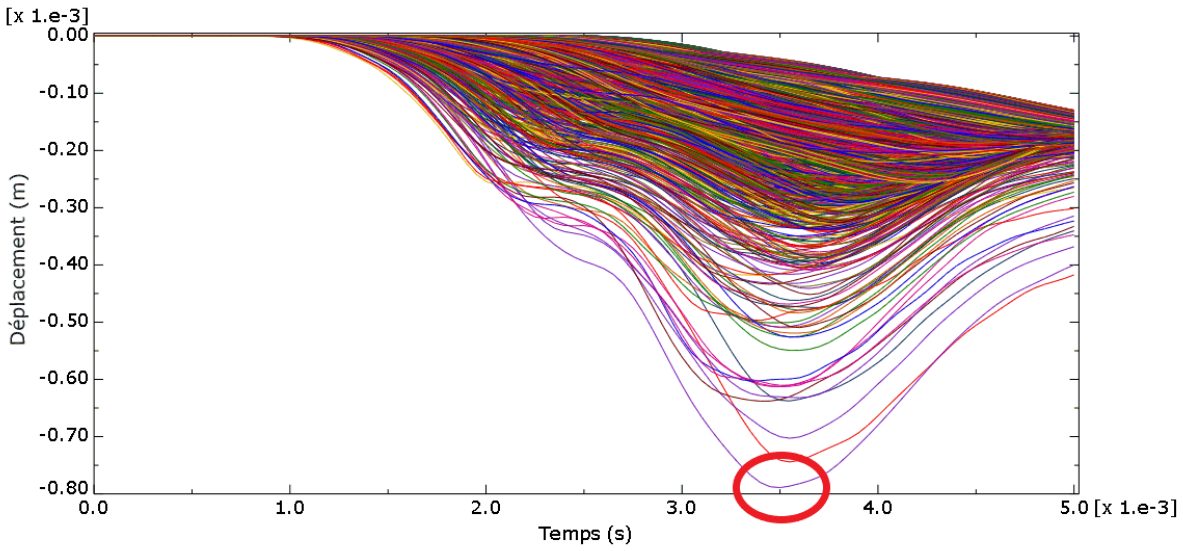


FIGURE B.18 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 60°

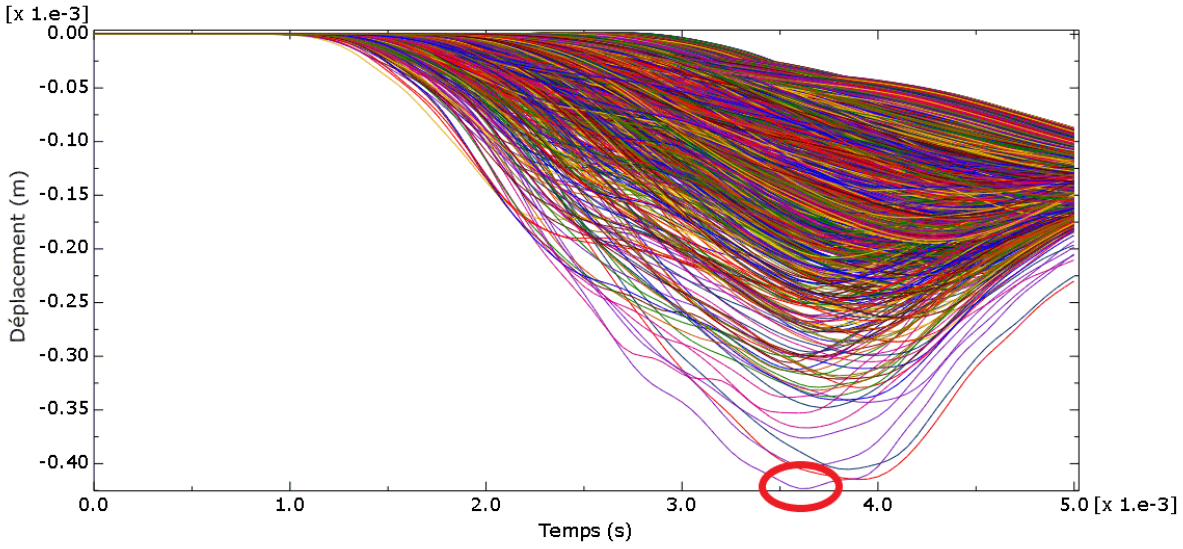


FIGURE B.19 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 45°

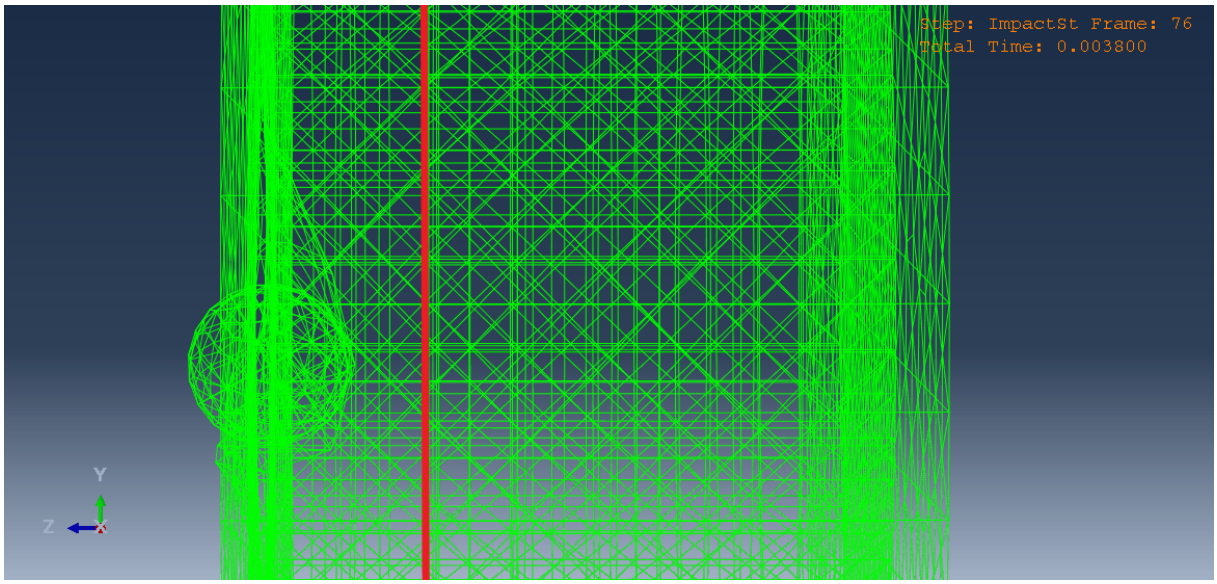


FIGURE B.20 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 30°

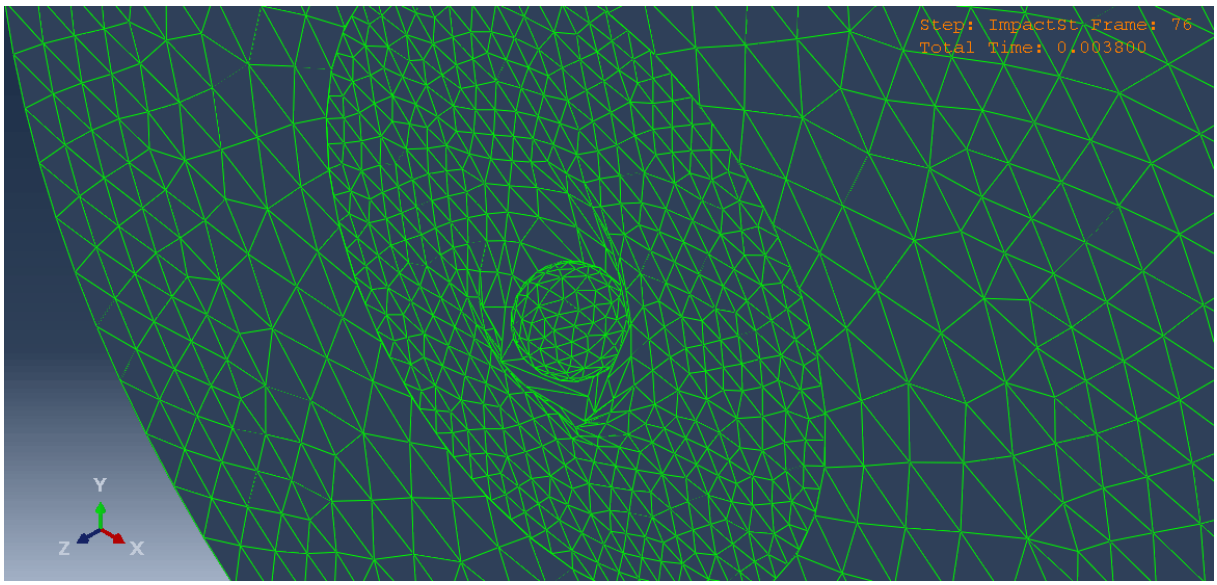


FIGURE B.21 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 30°

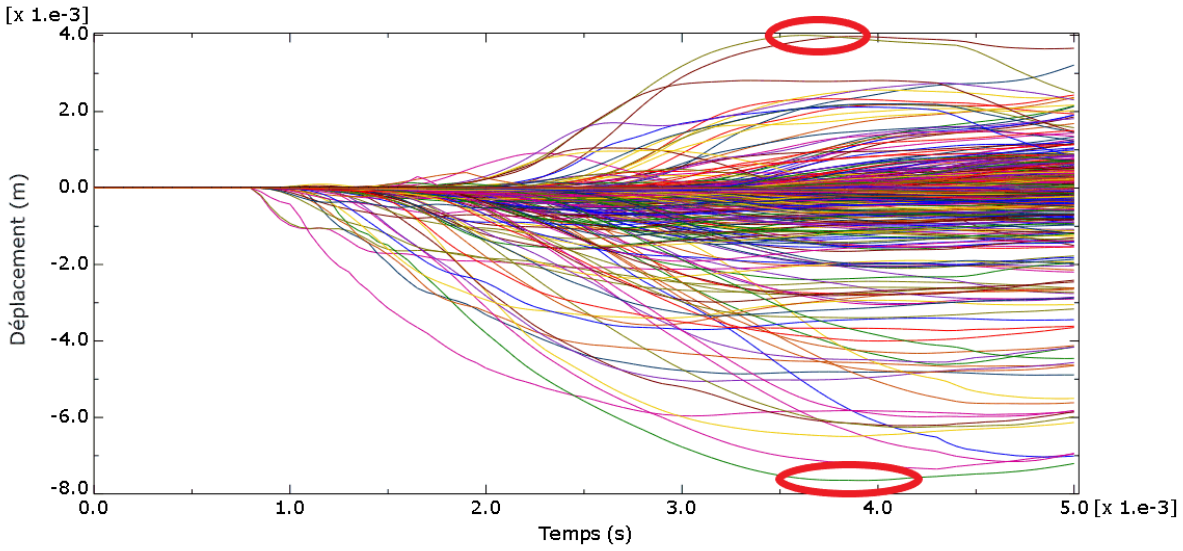


FIGURE B.22 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 30°

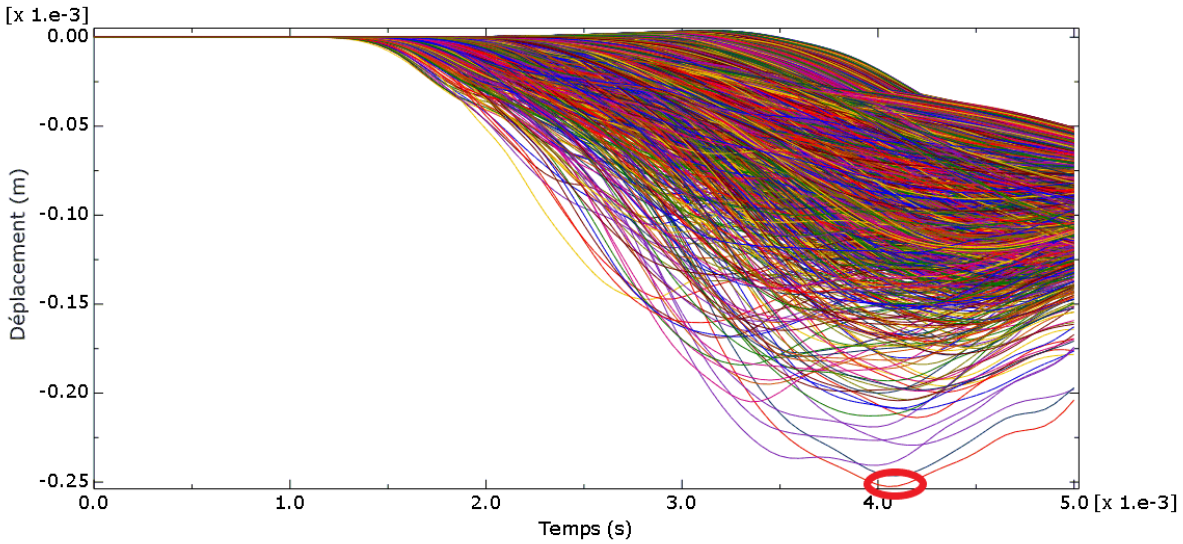


FIGURE B.23 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 30°

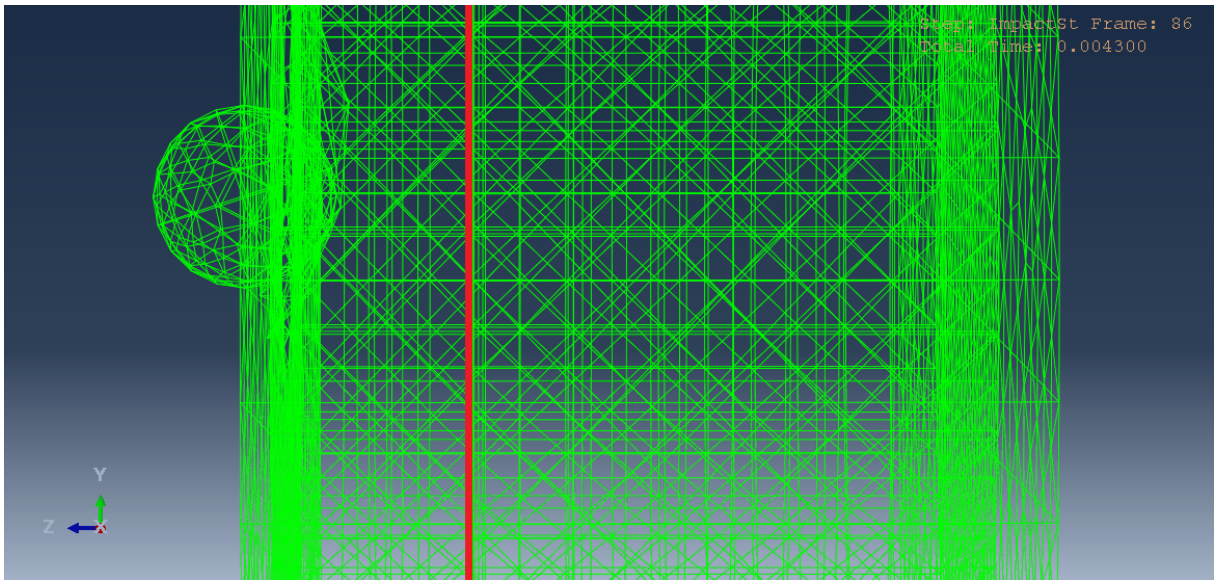


FIGURE B.24 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 15°

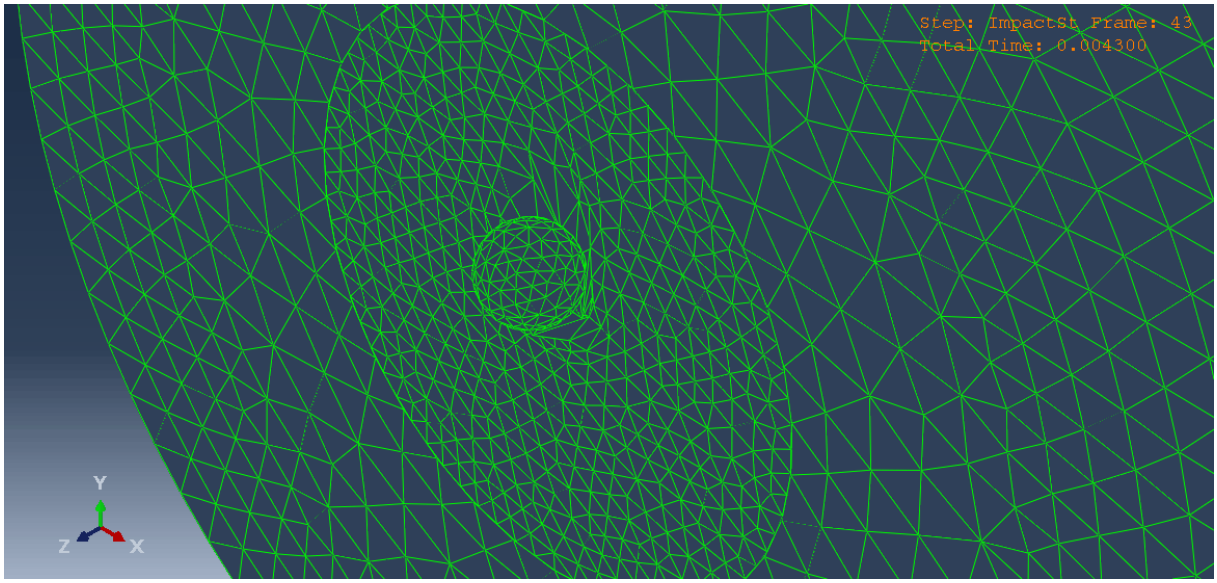


FIGURE B.25 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 15°

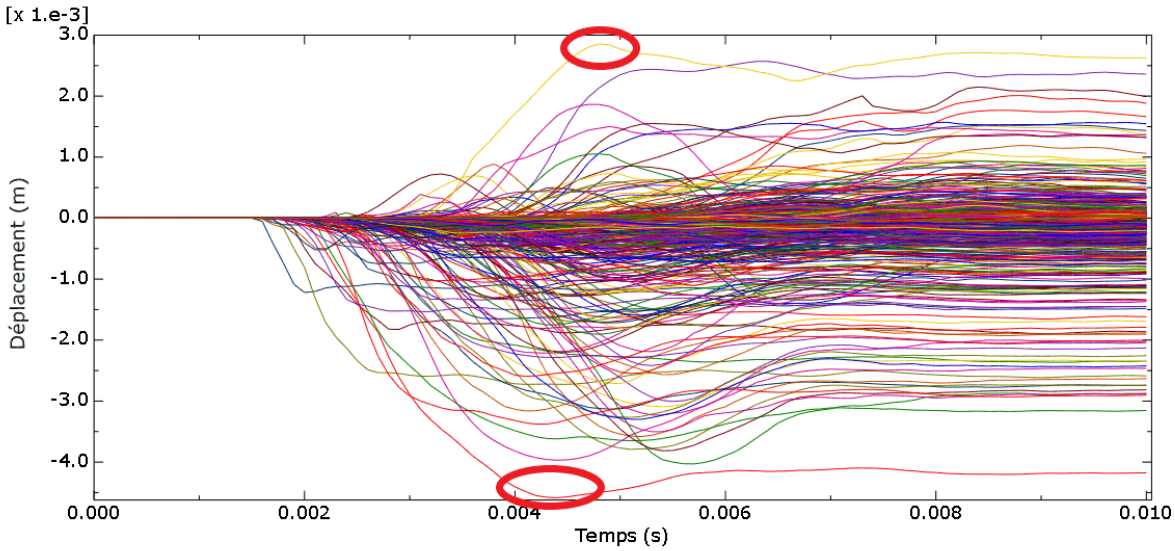


FIGURE B.26 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 15°

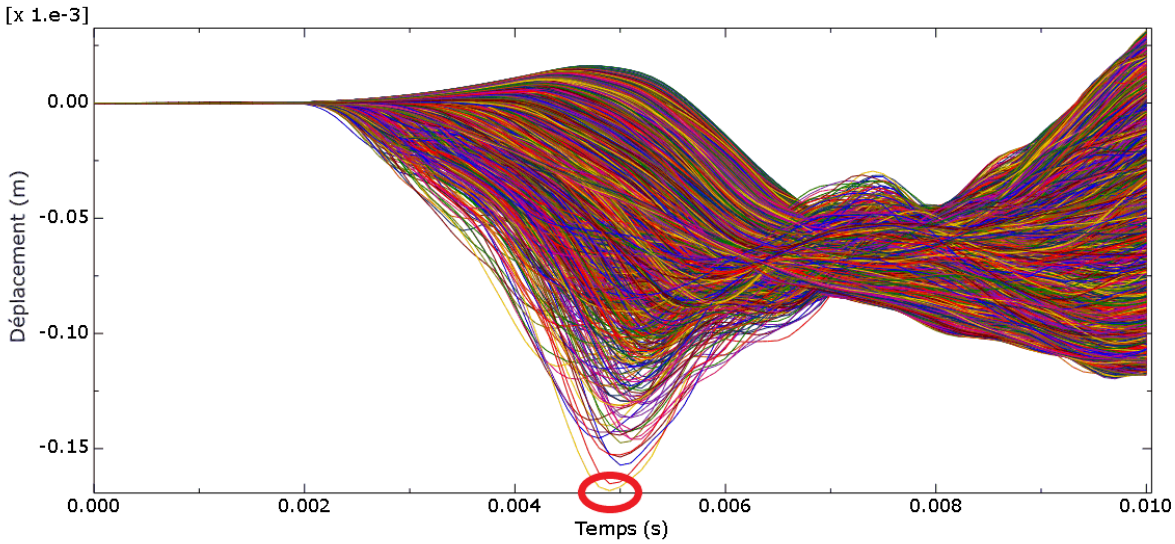


FIGURE B.27 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 15°

Méthode de mesure n°2 : mesure de la perte d'énergie cinétique liée au déplacement d'un volume de matériau pour différents angles

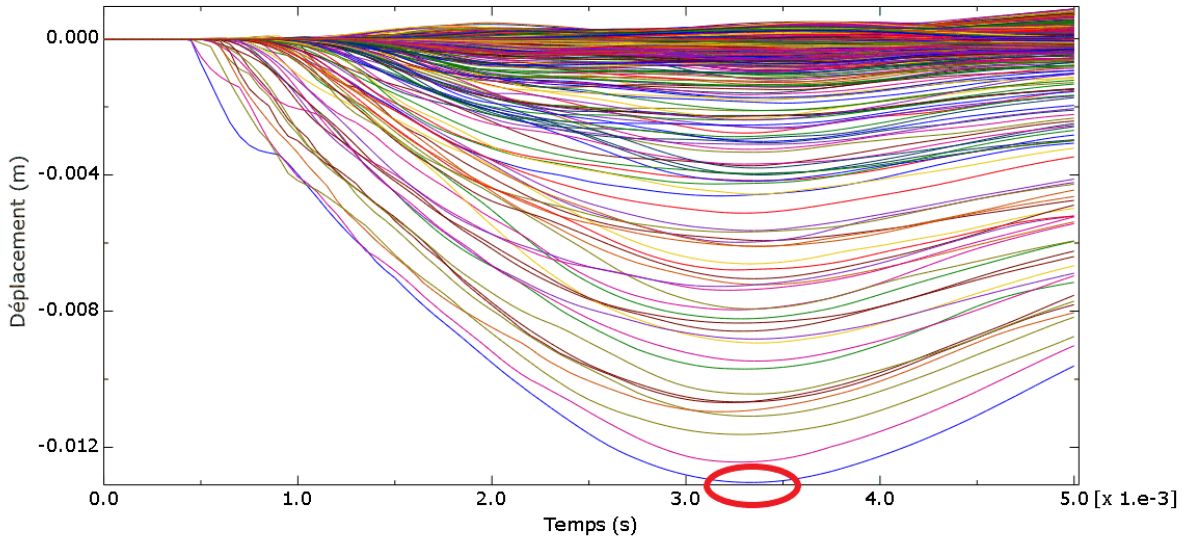


FIGURE B.28 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 75°

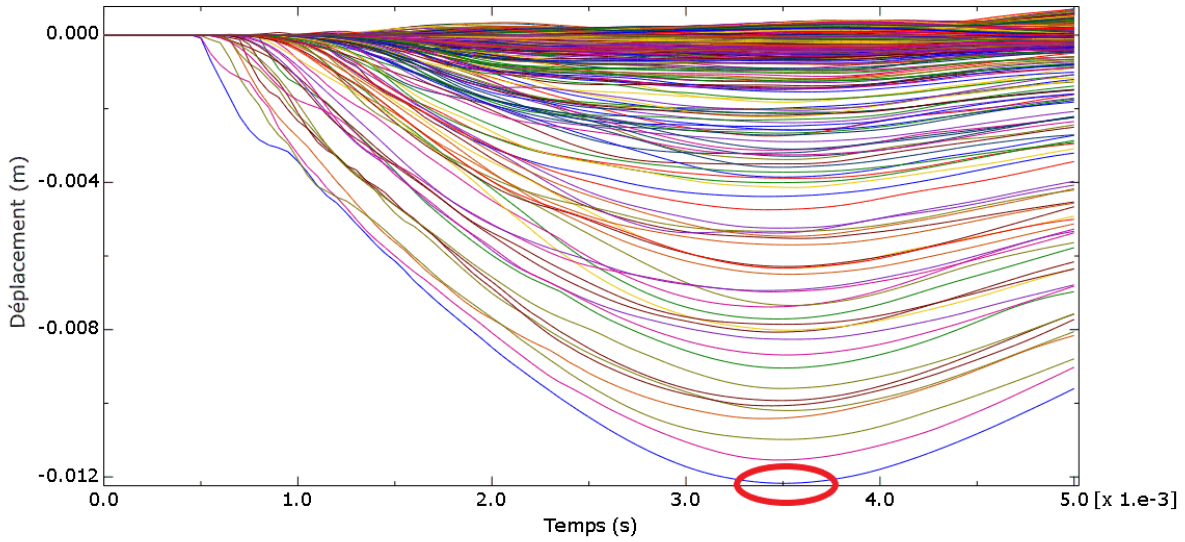


FIGURE B.29 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 60°

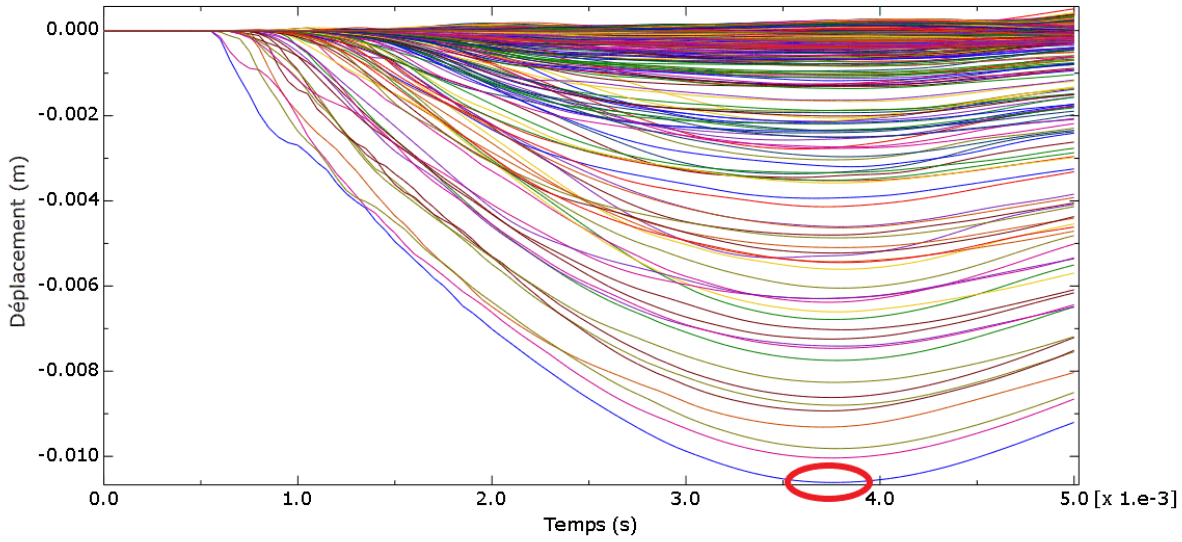


FIGURE B.30 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 45°

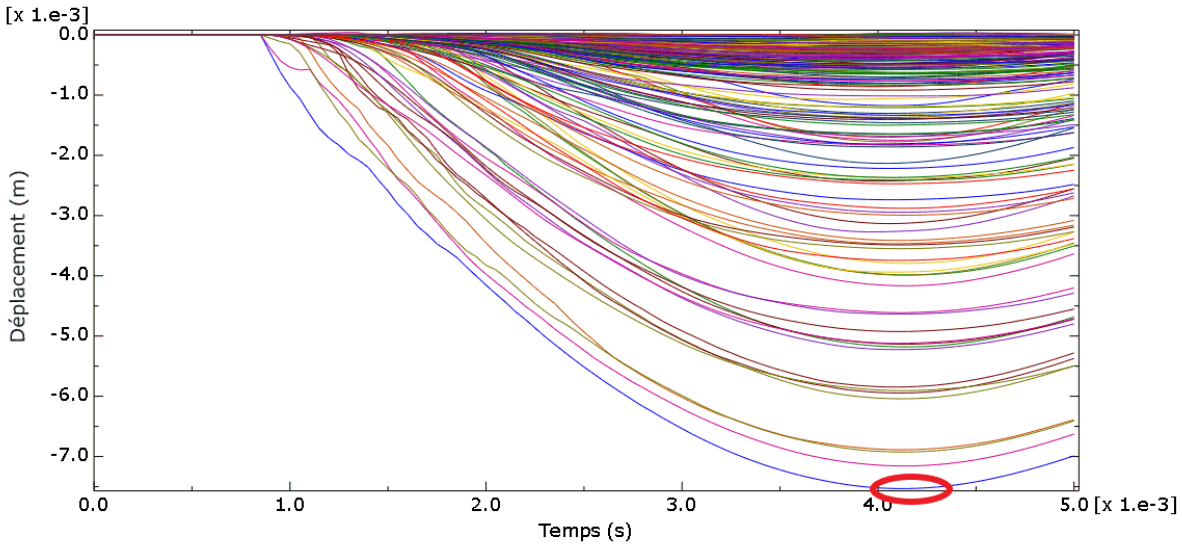


FIGURE B.31 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 30°

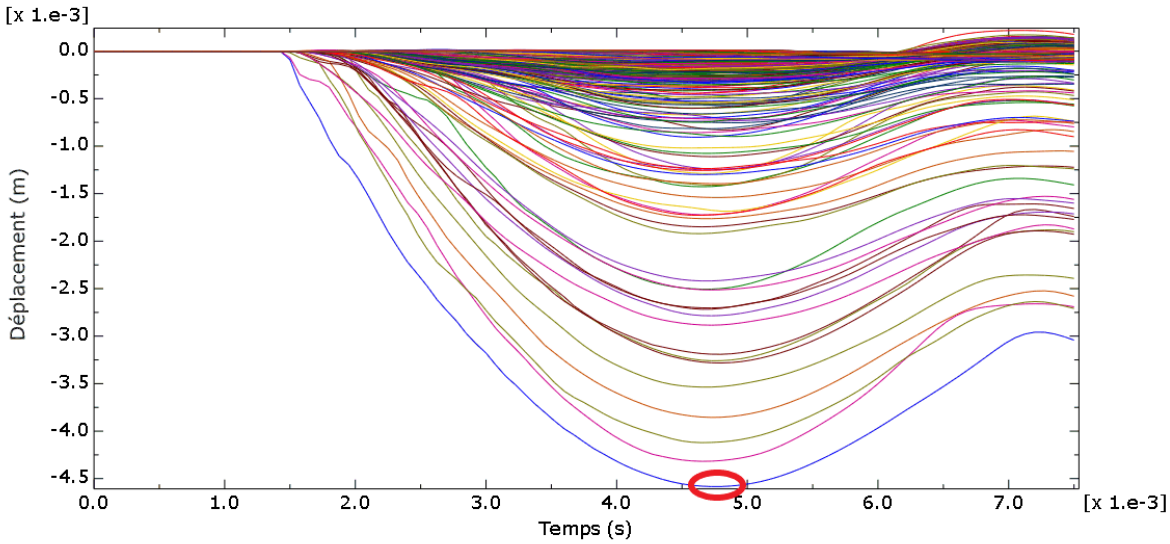


FIGURE B.32 – Déplacement des nœuds de la CF en fonction du temps - 15°

Étape n°3 : influence de l'épaisseur de la couche fluide

Couche "fluide" de 27 mm d'épaisseur

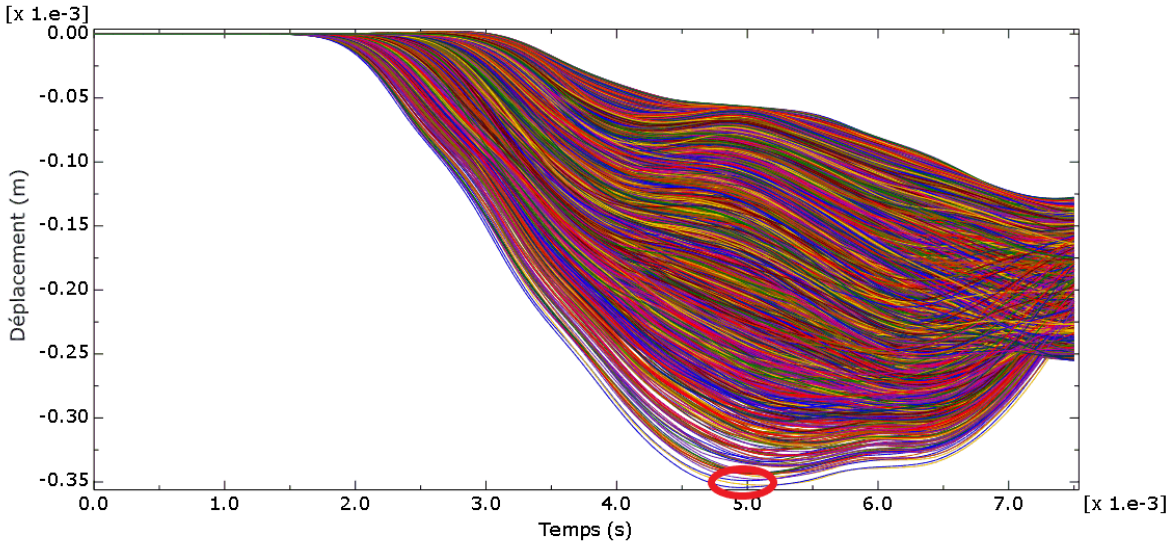


FIGURE B.33 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - CF de 27 mm d'épaisseur

Couche "fluide" de 6,75 mm d'épaisseur

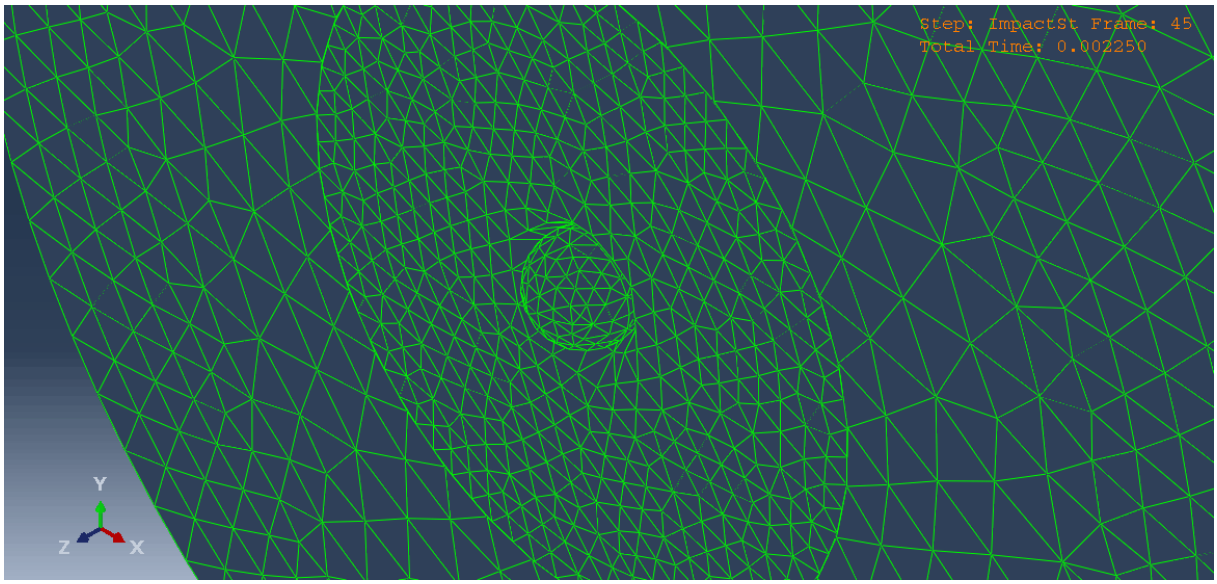


FIGURE B.34 – Déplacement maximal des nœuds de la CF de 6,75 mm d'épaisseur - Combinaison 1

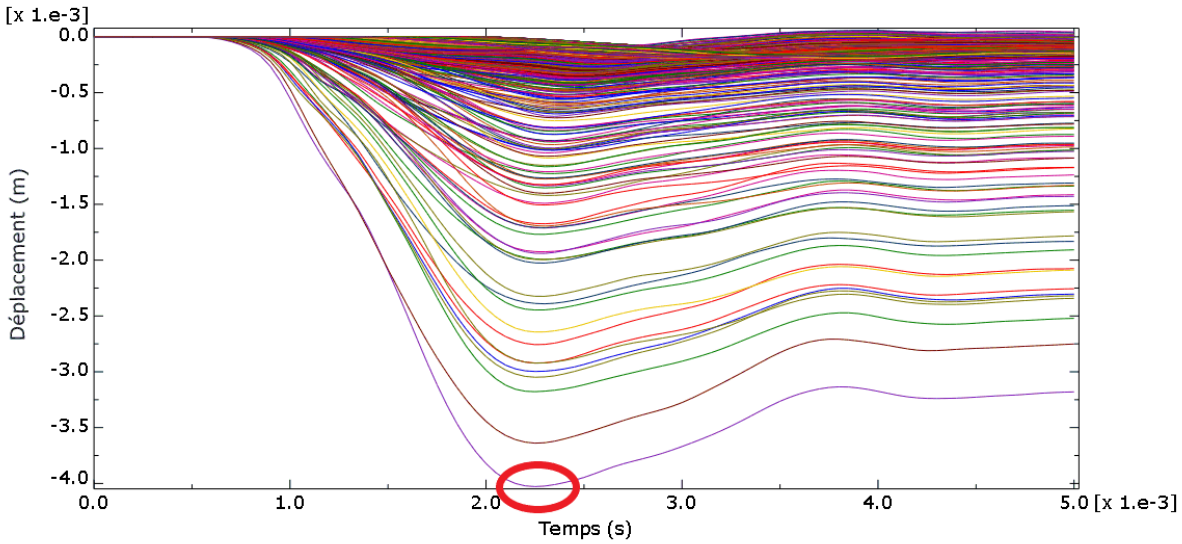


FIGURE B.35 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - CF de 6,75 mm d'épaisseur et Combinaison 1

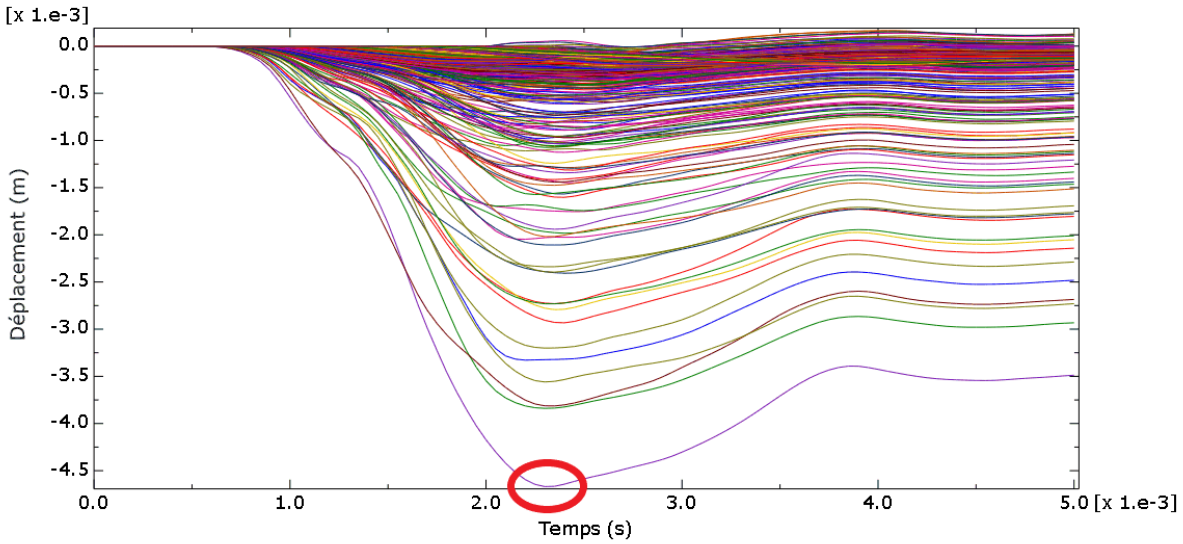


FIGURE B.36 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - CF de 6,75 mm d'épaisseur et Combinaison 3

Influence de la taille de la bille

Bille de 10 mm de diamètre

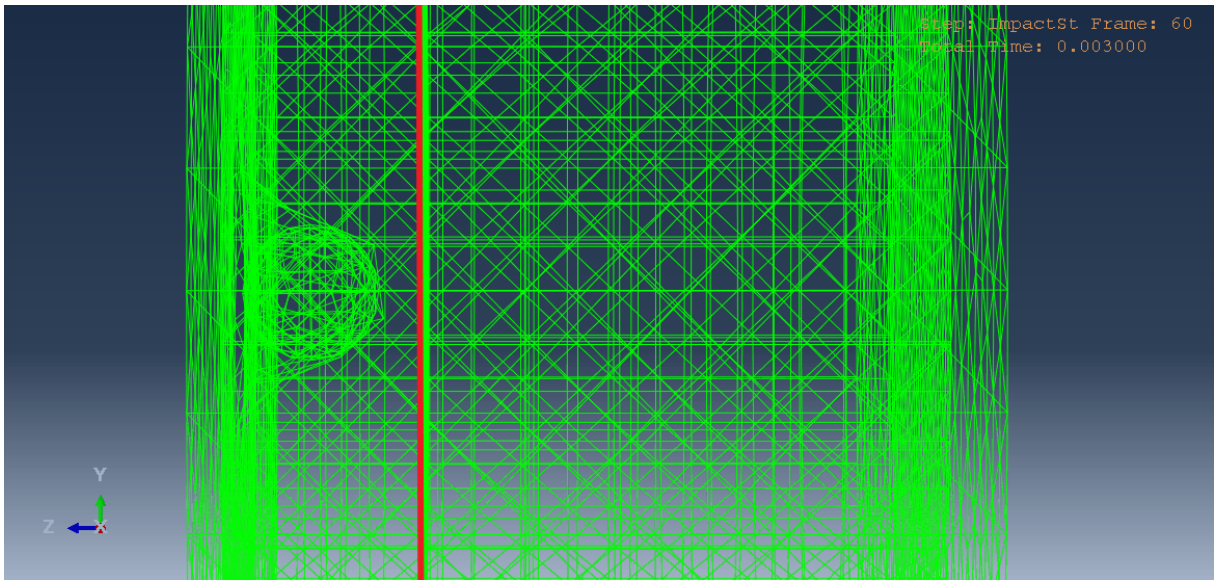


FIGURE B.37 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 10 mm

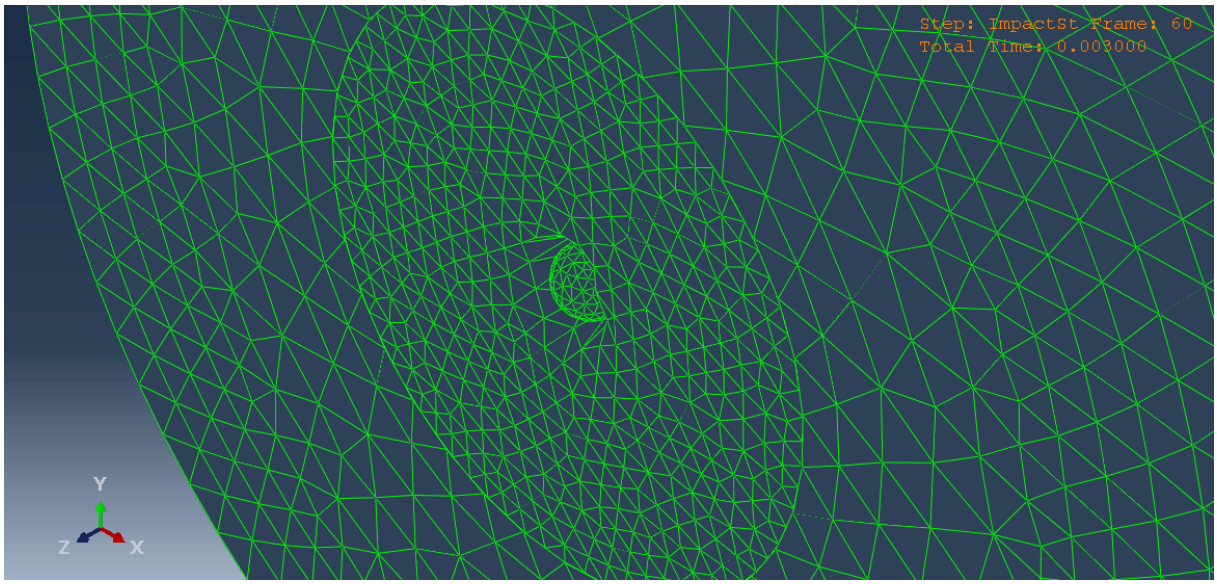


FIGURE B.38 – Déplacement maximal des nœuds de la CF - 10 mm

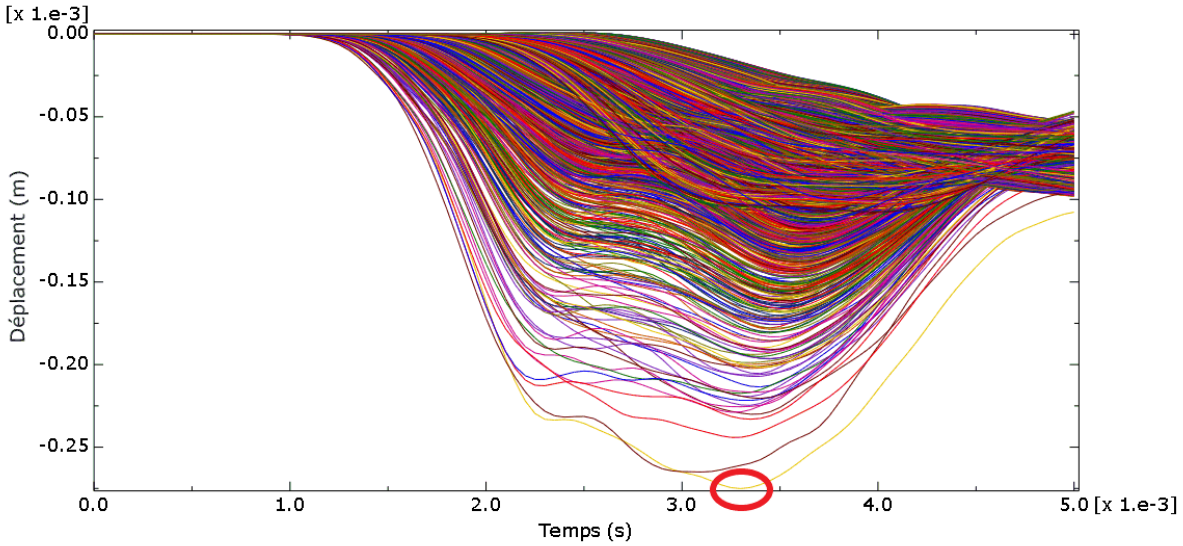


FIGURE B.39 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 10 mm

Bille de 5 mm de diamètre

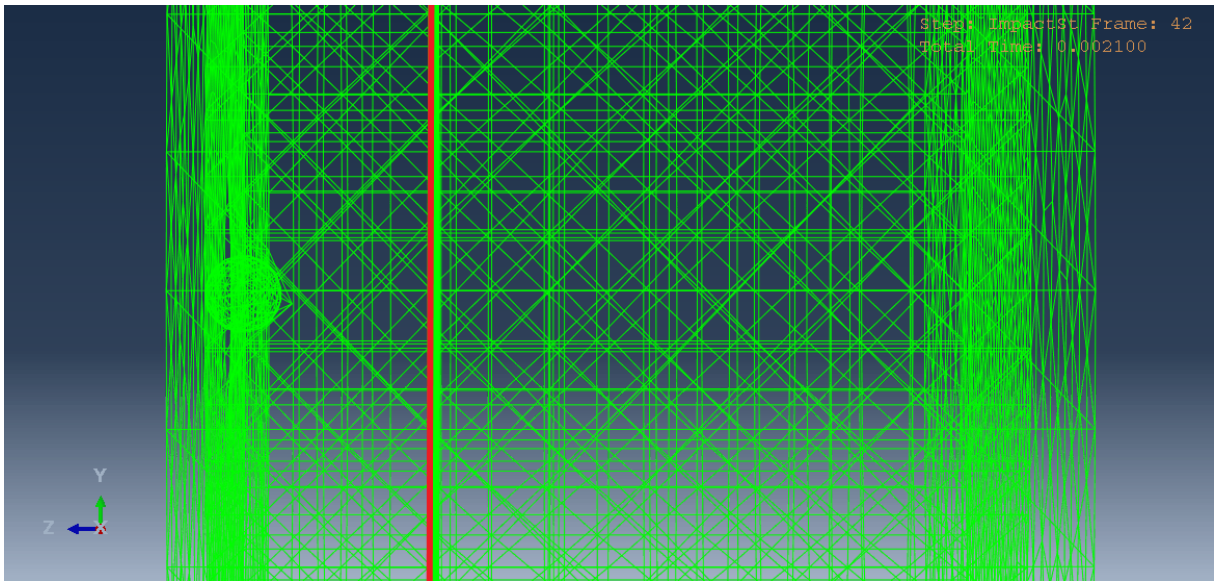


FIGURE B.40 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CF - 5 mm

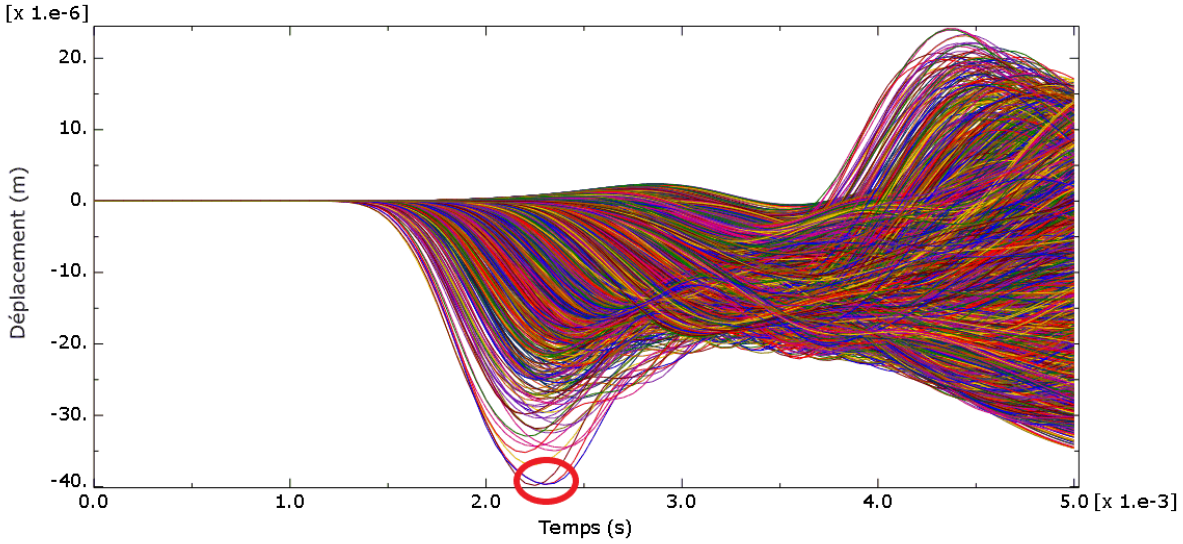


FIGURE B.41 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 5 mm

Influence de la vitesse de la bille

Bille projetée à une vitesse de 5 m/s

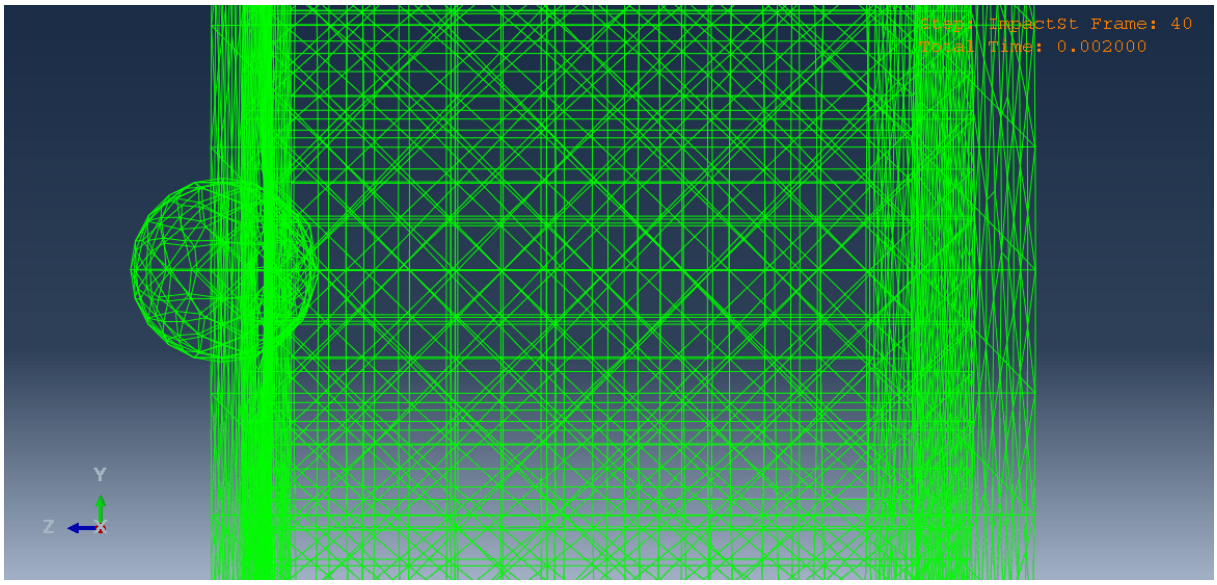


FIGURE B.42 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - 5 m/s

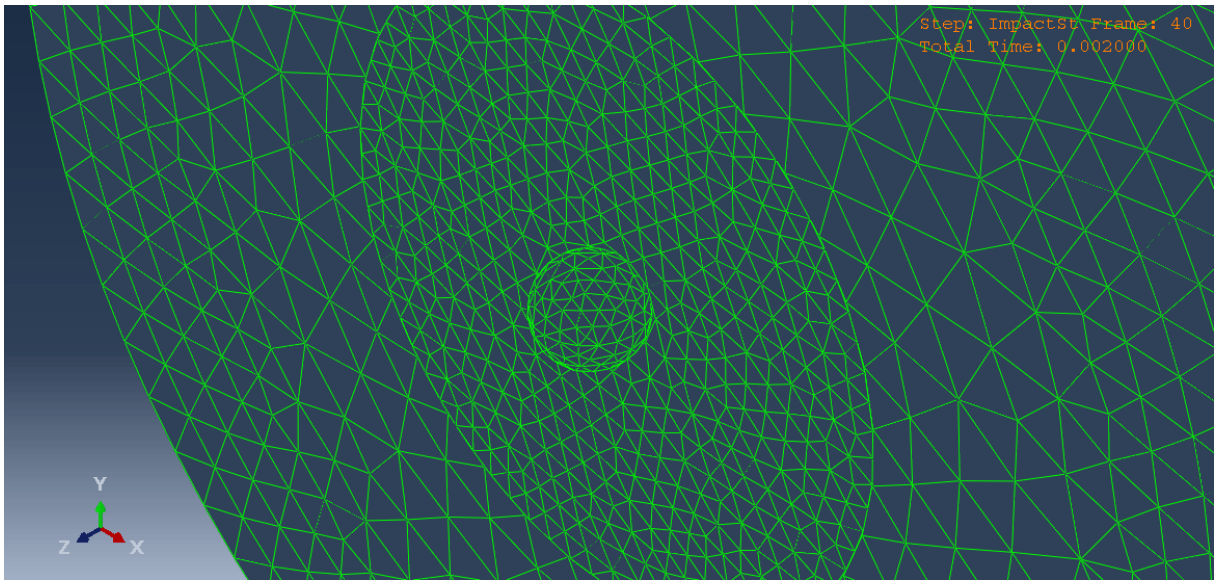


FIGURE B.43 – Déplacement maximal des nœuds de la CE - 5 m/s

Bille projetée à une vitesse de 30 m/s

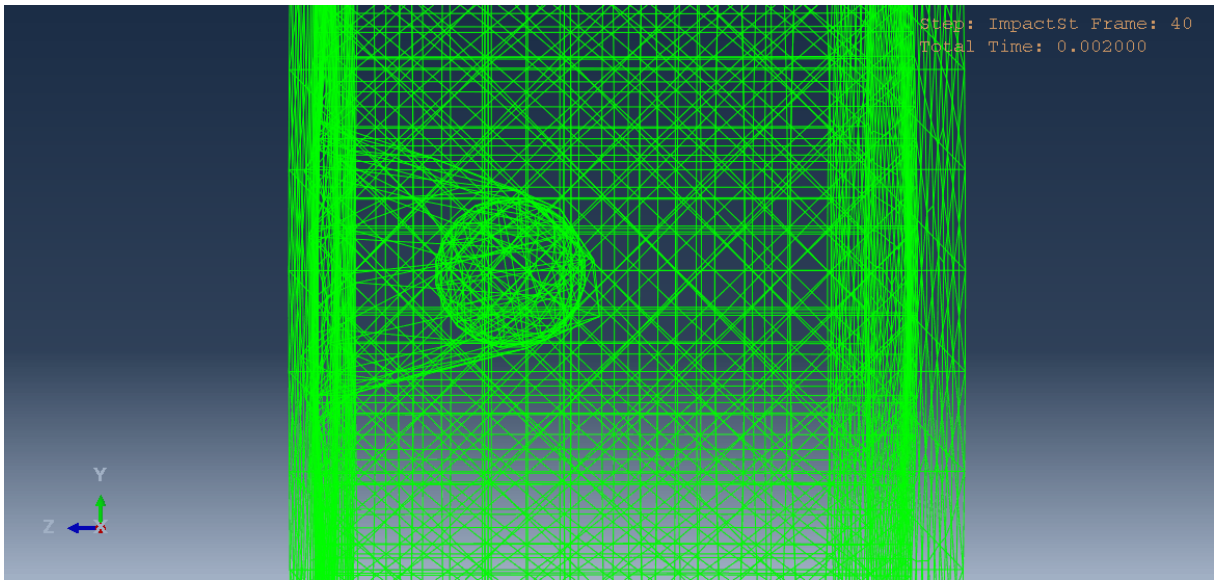


FIGURE B.44 – Vue latérale de la profondeur de pénétration maximale de la bille dans la CE - 30 m/s

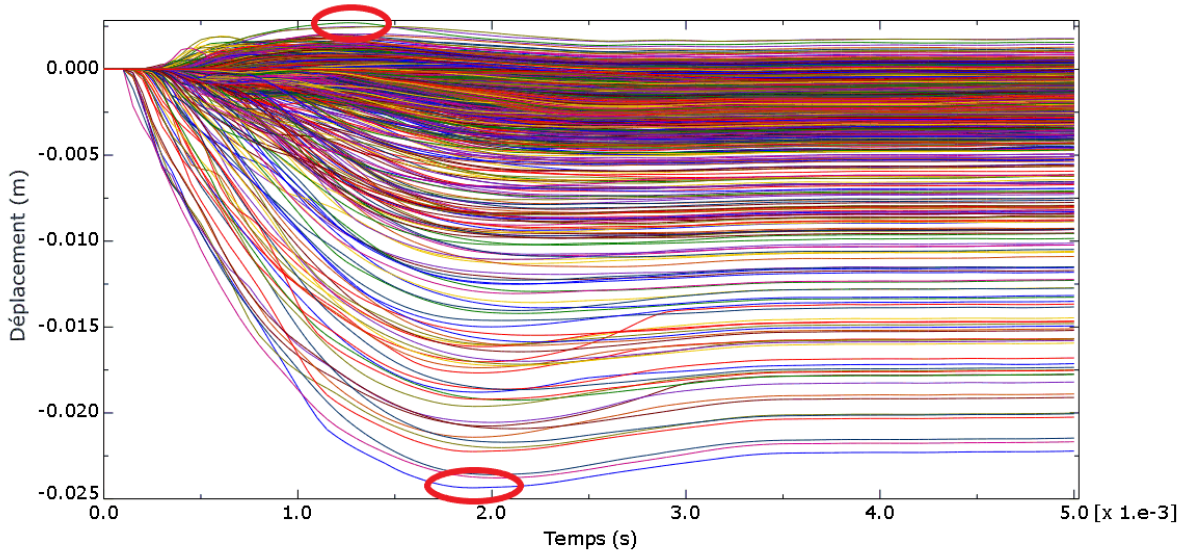
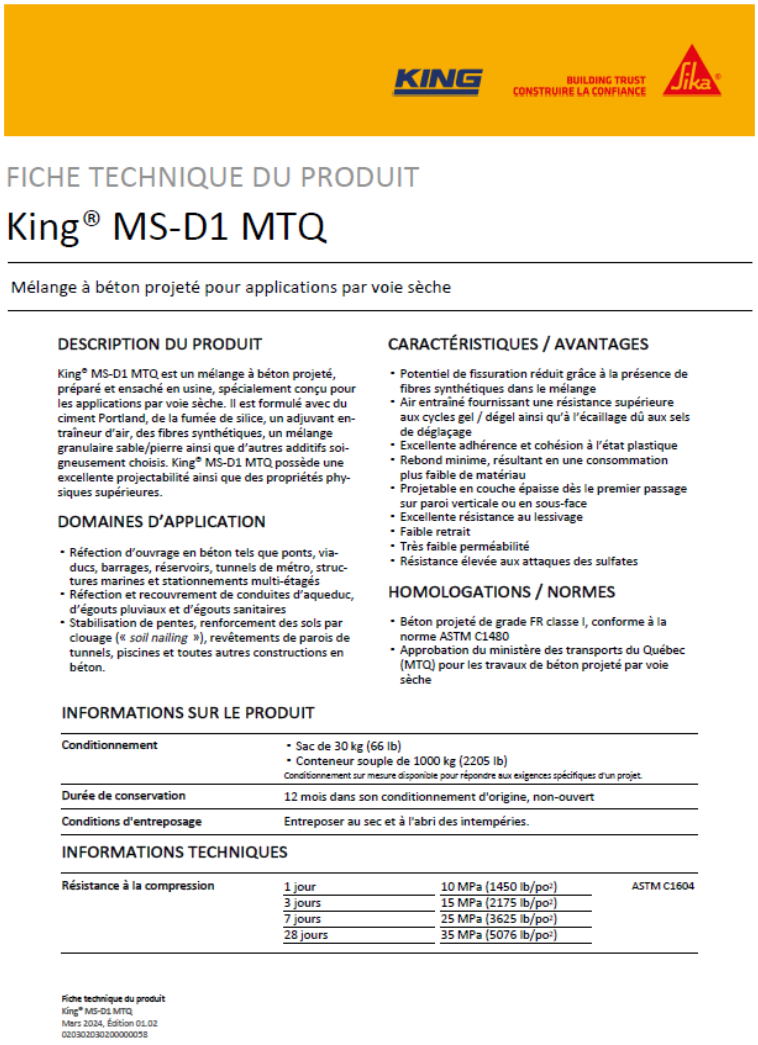


FIGURE B.45 – Déplacement des nœuds de la CE en fonction du temps - 30 m/s

Annexe C

Fiche technique d'un mélange de béton projeté pour applications par voie sèche



KING

BUILDING TRUST
CONSTRUIRE LA CONFIANCE

FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

King® MS-D1 MTQ

Mélange à béton projeté pour applications par voie sèche

DESCRIPTION DU PRODUIT

King® MS-D1 MTQ est un mélange à béton projeté, préparé et ensaché en usine, spécialement conçu pour les applications par voie sèche. Il est formulé avec du ciment Portland, de la fumée de silice, un adjuvant entraîneur d'air, des fibres synthétiques, un mélange granulaire sable/pierre ainsi que d'autres additifs soigneusement choisis. King® MS-D1 MTQ possède une excellente projectabilité ainsi que des propriétés physiques supérieures.

DOMAINES D'APPLICATION

- Réfection d'ouvrage en béton tels que ponts, viaducs, barrages, réservoirs, tunnels de métro, structures marines et stationnements multi-étagés
- Réfection et recouvrement de conduites d'aqueduc, d'égouts pluviaux et d'égouts sanitaires
- Stabilisation de pentes, renforcement des sols par clouage (« *soil nailing* »), revêtements de parois de tunnels, piscines et toutes autres constructions en béton.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Potentiel de fissuration réduit grâce à la présence de fibres synthétiques dans le mélange
- Air entraîné fournissant une résistance supérieure aux cycles gel / dégel ainsi qu'à l'écaillage dû aux sels de déglaçage
- Excellente adhérence et cohésion à l'état plastique
- Rebond minime, résultant en une consommation plus faible de matériau
- Projetable en couche épaisse dès le premier passage sur paroi verticale ou en sous-face
- Excellente résistance au lessivage
- Faible retrait
- Très faible perméabilité
- Résistance élevée aux attaques des sulfates

HOMOLOGATIONS / NORMES

- Béton projeté de grade FR classe I, conforme à la norme ASTM C1480
- Approbation du ministère des transports du Québec (MTQ) pour les travaux de béton projeté par voie sèche

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Conditionnement	• Sac de 30 kg (66 lb) • Conteneur souple de 1000 kg (2205 lb) Conditionnement sur mesure disponible pour répondre aux exigences spécifiques d'un projet.	
Durée de conservation	12 mois dans son conditionnement d'origine, non-ouvert	
Conditions d'entreposage	Entreposer au sec et à l'abri des intempéries.	

INFORMATIONS TECHNIQUES

Résistance à la compression	1 jour	10 MPa (1450 lb/po²)	ASTM C1604
	3 jours	15 MPa (2175 lb/po²)	
	7 jours	25 MPa (3625 lb/po²)	
	28 jours	35 MPa (5076 lb/po²)	

FIGURE C.1 – FT SIKA 1

Résistance à la flexion	28 jours	6.5 MPa (940 psi)	ASTM C78
Retrait	**RETRAIT DE SÉCHAGE UNIAXIAL** 650 µm		ASTM C157
Perméabilité aux ions chlorures	**PÉNÉTRABILITÉ AUX IONS CHLORES** 700 Coulombs		ASTM C1202
Porosité	**VOLUME D'AIR** 6 % ± 2 %		ASTM C457
	FACTEUR D'ESPACEMENT MAXIMAL 300 µm		ASTM C457
	ABSORPTION 6,0 %		ASTM C642
	VOLUME MAXIMUM DES VIDES PERMÉABLES 15,0 %		ASTM C642
Résistance au gel-dégel	100 % Excellent facteur de durabilité		ASTM C666
Résistance au sel	**RÉSISTANCE EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉGLAÇAGE** 0,1 kg/m² (0,02 lb/pi²)		ASTM C672

MODE D'EMPLOI

Rendement	• Environ 0,014 m³ (0,5 pi³) / sac de 30 kg (66 lb) • Environ 0,45 m³ (16,5 pi³) / conteneur souple de 1000 kg (2205 lb) Le rendement actuel peut légèrement varier selon les conditions de chantier.

VALEURS DE BASE DU PRODUIT

Toutes les valeurs indiquées dans cette Fiche technique du produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

RESTRICTIONS

- Le King® MS-D1 MTQ ne doit pas être appliqué lorsque la température ambiante, du substrat et du m atériau est inférieure à 5 °C (40 °F) ou supérieure à 35 °C (95 °F).
- Les caractéristiques physiques finales du béton projeté en place sont fortement reliées aux techniques d'application. Par conséquent, avant même le début du projet, il est primordial de s'assurer que l'équipement et le personnel impliqués soient qualifiés afin d'obtenir un produit fini respectant les propriétés recherchées.

ENVIRONNEMENT, SANTÉ ET SÉCURITÉ

L'utilisateur doit lire les fiches de données de sécurité (FDS) correspondantes les plus récentes avant d'utiliser tout produit. La FDS fournit des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination sécuritaire des produits chimiques et contient des données physiques, écologiques, toxicologiques et d'autres données relatives à la sécurité.

INSTRUCTIONS D'APPLICATION

PRÉPARATION DE SURFACE

Toute surface destinée à entrer en contact avec le King® MS-D1 MTQ doit être exempte de toute trace de saleté, d'huile, de graisse ou d'autres substances étrangères susceptibles de nuire à l'adhérence du béton. Enlever tout béton altéré ou détérioré et s'assurer que la surface d'application soit suffisamment rugueuse. Dégager derrière les barres d'armature corrodées un espacement minimal de 25 mm (1 po). Le périmètre de la surface à réparer doit être délimité à l'aide d'un trait de scie à béton à une profondeur minimum de 20 mm (¾ po). Nettoyer la section à réparer avec de l'eau potable et saturer la surface en prenant soin d'enlever toute eau stagnante (condition de surface SSS).

APPLICATION

Appliquer le King® MS-D1 MTQ selon le guide ACI 506, « *Guide to Shotcrete* ».

PERFORMANCE OPTIMALE

- Pour les températures défavorables, suivre les recommandations de l'ACI pour le bétonnage à températures basses ou élevées.
- Pour les applications à basses températures, utiliser le King® MS-D3.

FIGURE C.2 – FT SIKA 2

MÉTHODE DE MURISSEMENT

Le mûrissement est essentiel à l'optimisation des propriétés physiques du béton et à la réduction du retrait plastique. A cet effet, une cure humide doit être effectuée et débuter dès la prise initiale du béton, tel que spécifié par le guide ACI 308 « *Guide to Curing Concrete* » et ce, pour une durée minimale de sept (7) jours. Alternativement, appliquer une cure humide de 24 heures et appliquer un produit de cure à base d'eau en conformité avec la norme ASTM C309. La cure du béton est particulièrement important lorsque l'assèchement de la surface est rapide, par exemple par temps chaud, sec ou venteux.

NETTOYAGE

Nettoyer tous les outils et l'équipement après utilisation avec de l'eau. Une fois durci, le produit ne peut être retiré que mécaniquement.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter qu'en raison de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la fiche technique du produit local pour connaître les données exactes du produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations contenues dans le présent document et tout autre conseil sont donnés de bonne foi sur la base des connaissances et de l'expérience actuelles de Sika concernant les produits lorsqu'ils sont correctement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux applications et aux produits expressément mentionnés dans le présent document et sont basées sur des tests de laboratoire qui ne remplacent pas les tests pratiques. En cas de modification des paramètres de l'application, tels que les changements de substrats, etc., ou en cas d'application différente, consultez le service technique de Sika avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans le présent document ne dispensent pas l'utilisateur des produits de les tester pour l'application et l'usage prévus. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent toujours se référer à la version la plus récente de la fiche technique locale du produit concerné, dont des copies seront fournies sur demande ou en consultant notre site Internet à www.sika.ca.

FIGURE C.3 – FT SIKA 3