

Quatorzième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Sherbrooke
22-23 Août 2013

MODÉLISATION D'UN JET DE BÉTON PROJETÉ À L'AIDE D'UN MODÈLE D'ÉLÉMENTS DISCRETS (DEM)

N. Ginouse^A, J-P. Picard-Fortin, M. Jolin

A Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université Laval, Québec, Canada.

RÉSUMÉ : L'avancement des connaissances scientifiques en béton projeté passe aujourd'hui par une meilleure compréhension des phénomènes de projection et de mise en place du matériau sur la paroi. Sur le plan expérimental l'exploration de tels phénomènes se trouve grandement limitée par les moyens humains et matériels importants qu'elle requiert. Dans ce contexte, une approche utilisant un modèle DEM (*Discrete Element Method*) pour simuler la projection du matériau frais à travers une lance est présentée dans ce document. Les résultats obtenus montrent qu'il est ainsi possible de générer un mélange de particules de mortier et de granulats à partir de la composition d'un mélange donné, et d'intégrer au modèle numérique le champ des vitesses du jet de particules mesuré en laboratoire. D'autres simulations complémentaires semblent être toutefois requises en vue d'étudier les phénomènes d'impact des particules sur la paroi à l'aide de ce modèle numérique.

1. INTRODUCTION

Le béton projeté est un procédé industriel consistant à mettre en place un mélange de béton ou de mortier frais sur une surface quelconque au moyen d'air comprimé. Sur le plan physique, cette technique de mise en place est contrôlée par différents phénomènes complexes intervenant durant la projection du matériau frais sous pression à travers la lance et lors de son impact sur la paroi. Expérimentalement, l'étude de ce procédé implique des moyens matériels et humains importants pouvant limiter l'exploration scientifique des phénomènes de projection et de mise en place lors de l'impact. Dans ce contexte, l'étude de ces phénomènes par des méthodes numériques s'avère une approche très intéressante. L'utilisation de modèles DEM (*Discrete Element Method*) s'est appliquée par la passée au cas du béton projeté et constitue à ce jour les bases de sa modélisation (Phan, 2002; Puri et Uomoto, 1999; Puri et Uomoto, 2002). Toutefois, ces mêmes travaux ont également montré qu'une approche expérimentale menée en parallèle à la modélisation reste la manière la plus sûre de développer des modèles numériques valides. Fort de cette analyse, une nouvelle approche reposant sur l'utilisation d'un modèle DEM et de données expérimentales obtenus au laboratoire du CRIB de l'Université Laval est présentée dans ce document.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les connaissances actuelles sur le béton projeté sont principalement alimentées par des règles de bonnes pratiques basées en grande partie sur les retours d'expériences des lanciers et des professionnels travaillant de près avec ce matériau, en inspection ou en conception de mélange.

En laboratoire, la conception des mélanges a fait l'objet d'un grand nombre de travaux (Jolin et Beaupré, 2004; Jolin, et al., 1999) dont l'objectif principal était d'optimiser leur formulation afin d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau en place. Cependant, très peu de travaux ont porté sur des *phénomènes* de mise en place du béton lors de sa projection (Armelin, 1997; Beaupré, 1994; Jolin, 1999; Phan, 2002) ainsi que sur le caractère durable du matériau une fois en place (Bolduc, 2009). Pour la mise en place dynamique du matériau lors de l'impact, Armelin (1997) décrit le processus d'incorporation d'un granulats dans un substrat frais par un modèle élasto-plastique dans lequel le rebond des granulats est dicté par un critère énergétique. Ce modèle semble être valide pour des impacts unitaires de granulats heurtant perpendiculairement la surface du substrat, mais ne tient pas compte entre autres des interactions entre les particules incidentes, de leur angle d'incidente, mais aussi de la distribution du champs de vitesse dans le jet. La vitesse des particules jouant un rôle prépondérant dans le processus de mise en place, il est donc important de tenir compte de sa distribution dans le jet. Alors que quelques travaux ont pu souligner l'influence du diamètre et de la densité sur la vitesse de particules projetés les unes après les autres (Armelin, 1997; Bindiganavile et Banthia, 2009), les récents travaux de Jolin et Ginouse (2012) mettent en lumière les caractéristiques du champ de vitesse incident à l'échelle du jet. La Figure 1 ci-dessous souligne par exemple l'existence de profils de vitesse associés à chacune des sections du jet, caractérisant la distribution spatiale des vitesses autour de l'axe.

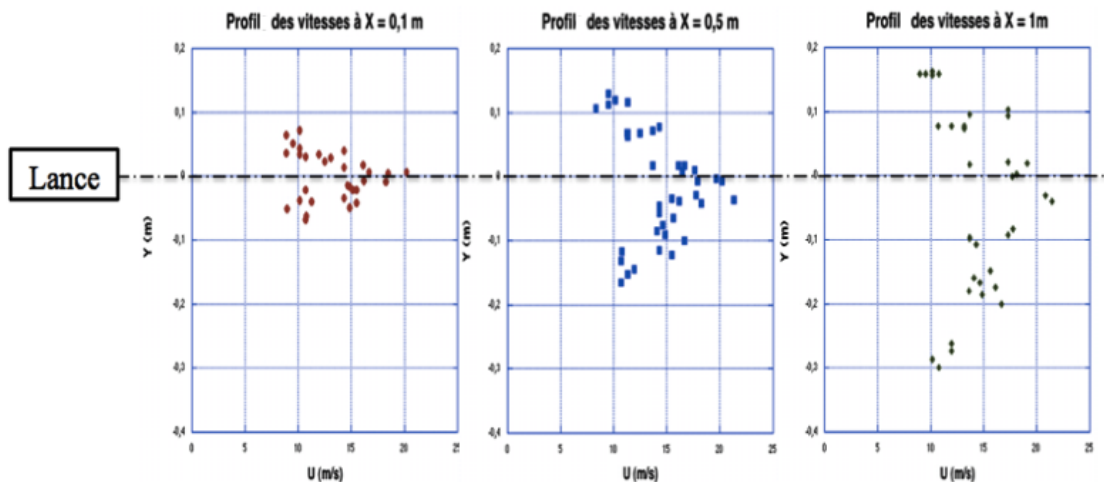


Figure 1. Distribution des vitesses autour de l'axe (profil de vitesse) en fonction de la distance par rapport à la sortie de la lance (Ginouse et Jolin, 2011).

Sur le plan mathématique, les profils de vitesse obtenus expérimentalement à l'aide d'un dispositif d'imagerie haute vitesse nous indique que le champ des vitesses se distribue en suivant une fonction du type Gaussienne. Nous verrons dans ce qui suit comment cette caractéristique a pu être intégrée à un modèle DEM pour simuler un jet de béton projeté.

Pour la modélisation à proprement dite du béton projeté, la méthode par éléments discrets (DEM) a été utilisée dans l'ensemble des travaux antérieurs portant sur le sujet. Développée initialement pour la simulation de systèmes granulaires, la méthode par éléments discrets (DEM) a été appliquée au cas du béton frais (Noor et Uomoto, 1999) et du béton projeté (Phan, 2002; Puri et Uomoto, 1999; Puri et Uomoto, 2002). La Figure 2 ci-dessous représente les deux modèles DEM principalement utilisés dans le cas du béton projeté pour modéliser le matériau frais.

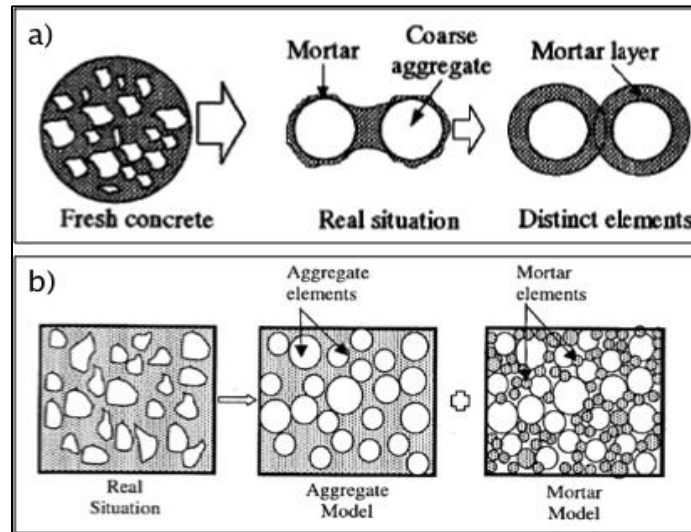


Figure 2. a) Modèle DEM avec un seul type de particule constituée d'un noyau en granulats enrobé d'une couche de mortier. Adaptée de Puri et Uomoto (1999). b) Modèle DEM avec deux types de particules, les particules de mortier et les granulats. Adaptée de Phan (2002).

Le modèle utilisé par Puri et Uomoto (1999) (voir Figure 2a) dans lequel un seul type de particule discrète composée d'un noyau de granulat enrobé de mortier est considéré, a donné lieu à des résultats numériques intéressants mais limités car ne tenant pas compte des contacts granulats-granulats. Dans le cas du modèle DEM utilisé par Phan (2002) (voir Figure 2b), composé de particules de mortier et de granulats ce type de contact a pu être pris en compte mais la validité des résultats numériques obtenus s'est trouvée limitée par la difficulté de générer des données expérimentales permettant d'intégrer la rhéologie du mortier aux paramètres DEM.

3. MÉTHODOLOGIE

La démarche entreprise consiste à modéliser le jet particule à partir d'un logiciel de modélisation DEM en utilisant toutes les connaissances disponibles à ce jour sur les phénomènes de projection en béton projeté. L'enjeu majeur fût donc d'intégrer ces connaissances notamment les données expérimentales au modèle numérique.

3.1. Architecture du modèle numérique

La modélisation du jet de béton projeté s'est faite à l'aide du logiciel EDEM® par lequel l'environnement de modélisation comprenant la lance et la chambre de projection ont été créés. Une fois l'environnement créé, les particules sont produites par un générateur de particules utilisant entre autres comme paramètres d'entrée les données du mélange frais ainsi que le débit de pompage, tous deux obtenus expérimentalement. Comme le montre la Figure 3 ci-dessous, une fois les particules créées et réparties dans la lance, celles-ci sont accélérées par un champ de forces appliqué sur la section de la lance et dont la distribution en intensité est fonction du champ de vitesse mesuré dans le jet. Un programme C++ a été développé à cet effet pour intégrer à la simulation numérique, le champ des vitesses obtenu expérimentalement.

Le détail des aspects du modèle numérique présentés dans la Figure 3 sont discutés dans ce qui suit.

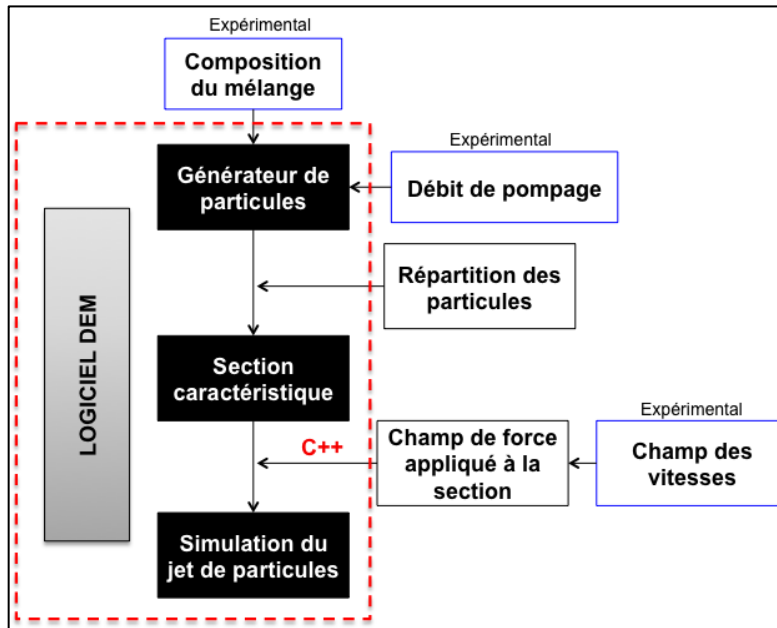


Figure 3. Structure du modèle numérique utilisé pour simuler un jet de béton projeté.

3.2. Générateur de particules

Tel que fait par Phan (2002), deux types des particules sont créées à l'intérieur de la lance, soit des particules de mortier et des granulats. En partant d'un mélange de béton frais dont la composition est connue (teneur en liant, teneur en eau, granulométrie), les particules de mortier et de granulats sont générées en suivant une granulométrie choisie et à une fréquence donnée qui est fonction du débit de pompage (voir Figure 4).

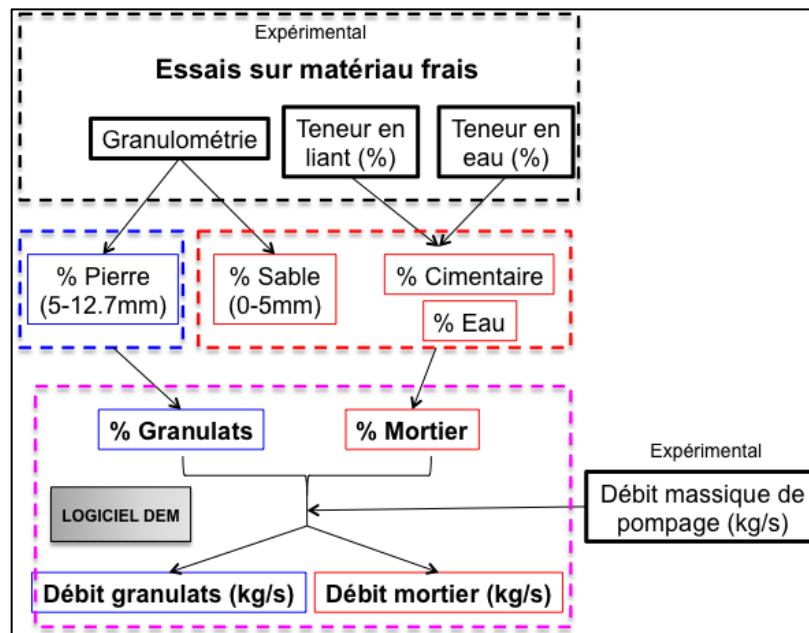


Figure 4. Génération des particules de mortier et de granulats à partir du mélange existant et du débit de pompage mesuré.

Comme l'indique la Figure 4, les particules de mortier regroupent le sable et la pâte de ciment du mélange frais. Le temps de calcul et notamment le temps d'itération limite le diamètre minimal des particules de mortier. Dans le cas présent, celles-ci suivent une courbe granulométrique linéaire allant de 1mm à 4.75mm tel qu'illustré dans la Figure 5.b). Les granulats grossiers (pierre) sont quant à eux conservés par le modèle DEM pour générer des particules possédant la même granulométrie (voir Figure 5. a)&b)).

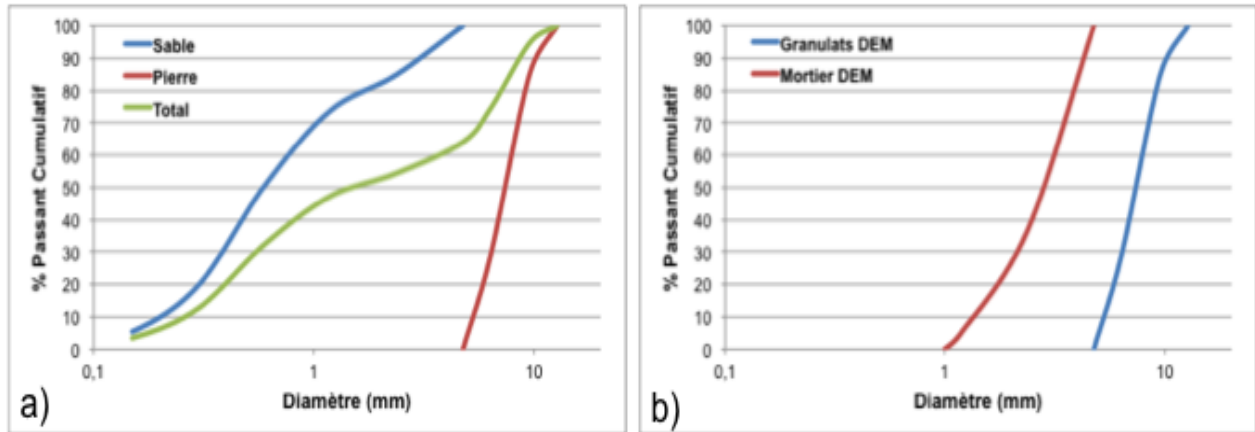


Figure 5. a) Courbes granulométriques du matériau frais. b) Courbes granulométriques des granulats et particules de mortier générées par le modèle DEM.

Une fonction *Random* génère les granulats selon 3 classes de diamètre (12.7-9.5mm, 9.5-6.35mm, 6.35-4.75mm) de manière à reproduire la granulométrie initiale. Pour le mortier, une seule classe de diamètre de particule (4.75-1mm) est créée à l'aide de la fonction *Random*. Pour chaque classe de diamètre choisie, la fonction *Random* génère de manière aléatoire des particules de différentes tailles. La fréquence à laquelle sont produites les particules doit être fournie au logiciel. Pour ce faire, il suffit de décomposer le débit de pompage (kg/s) total mesuré en laboratoire à l'aide des proportions des constituants du mélange obtenue par les essais sur matériau frais.

Afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions dans la lance lors du pompage, le modèle considère l'existence d'un noyau central plus riche en granulat entouré d'une couronne de mortier tenant le rôle de couche de lubrification tel qu'avancé par la littérature dans le cas du procédé par voie humide (Jolin, et al., 2006). Pour permettre la génération des particules de mortier dans la couronne, la couche de lubrification est prise égale à 2mm d'épaisseur (voir Figure 6 b)). La répartition des particules de mortier dans la section d'écoulement est ainsi obtenue en utilisant la relation avancée par (Chapdelaine, 2007) et illustré dans la Figure 6 a).

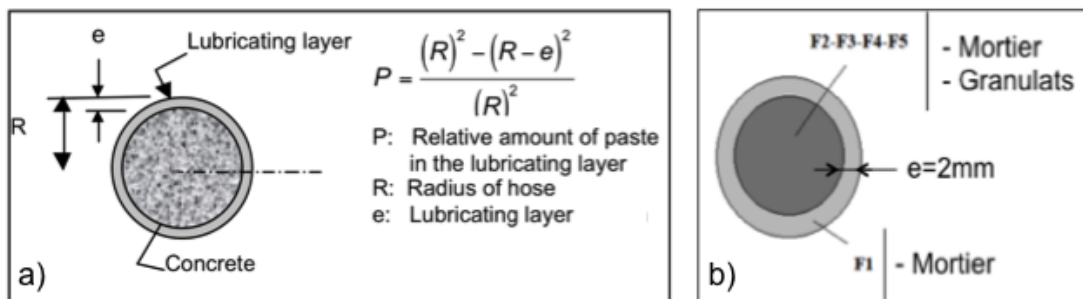


Figure 6. a) Distribution de la pâte de ciment dans la section d'écoulement du béton frais lors du pompage. Adapté de (Chapdelaine, 2007). b) Répartition des particules de mortier et de granulats dans modèle DEM à l'aide des fonctions *Factory F1, F2, F3, F4 et F5*.

Comme le souligne la Figure 6 b), la répartition des particules de mortier et de granulat dans la lance est gérée par des fonctions *Factory* permettant de générer chacune des classes de particules dans les zones d'intérêt choisies (i.e. noyau central, couche de lubrification). La fonction F1 gère la production de particules de mortier de 1mm de diamètre dans la couche de lubrification. Les autres fonctions F2 à F5

gèrent quant à elles la création des autres particules de mortiers et des 3 classes de granulats dans le noyau central.

3.3. Modèle de contact

Le logiciel propose plusieurs modèles pour gérer les contacts *Granulat-Granulat*, *Granulat-Mortier* et *Mortier-Mortier*. Dans le cas présent, le modèle de contact utilisé est le modèle Hertz-Mindlin illustré dans la Figure 7 ci-dessous.

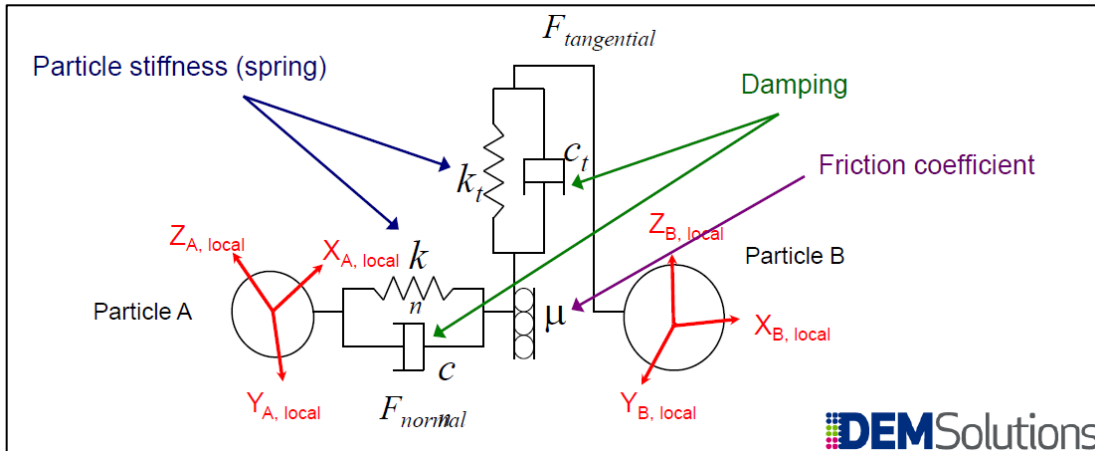


Figure 7. Modèle de contact Hertz-Mindlin utilisé pour gérer le contact entre les particules mises en jeu.

Ce modèle permet de tenir compte du frottement, de l'amortissement visqueux ainsi que de la force élastique mises en jeu lors du contact entre les particules. Cependant pour tenir compte de l'adhésion entre les particules de mortier, un modèle linéaire de cohésion a été couplé au modèle de Hertz-Mindlin. Ce couplage permet de gérer la cohésion du mélange et ainsi évaluer son influence sur la projection du matériau. Ces deux modèles de contact permettent ainsi d'intégrer la composante élasto-plastique et l'adhésion entre un granulat et une particule de mortier (i.e. substrat) tel avancée par Armelin (1997) ainsi que la composante visqueuse utilisée par Phan (2002).

Pour valider le modèle de contact choisi, un essai d'affaissement est simulé avec les mêmes particules générées à partir du mélange frais. Il s'agit ici d'une simulation préliminaire permettant de valider les paramètres DEM avant la simulation du jet de particules. Un nouvel environnement de simulation comprenant entre autres un cône d'Abrams fût créé et l'affaissement obtenu par la simulation confronté à la valeur expérimentale. Si les valeurs ne concordent pas, les paramètres de contact sont ajustés et une nouvelle simulation est réalisée. Une fois les paramètres DEM ajustés, la simulation numérique du jet est lancée.

4. RÉSULTATS

Les résultats présentés dans ce qui suit portent sur un mélange de béton projeté par voie humide commercialisé et utilisé dans la pratique. Bien que le détail des différents constituants du mélange n'était pas connu, les essais réalisés en laboratoire à l'état frais (voir Figure 4.) ont fourni suffisamment d'informations au modèle numérique pour générer le mélange particulaire associé.

4.1. Générateur de particules

Une fois les données du mélange rentrées dans le logiciel et la simulation lancée, il est possible d'analyser les différentes zones de l'environnement de simulation en définissant des volumes d'intérêt. Dans le cas du générateur de particules, le volume intérieur de la lance a été choisi comme région d'intérêt pour l'analyse de mélange généré. En représentant la composition massique du mélange créé par le modèle DEM et celle obtenue initialement en laboratoire, la Figure 8 met en évidence la fidélité du générateur de particules numérique à reproduire un mélange réel.

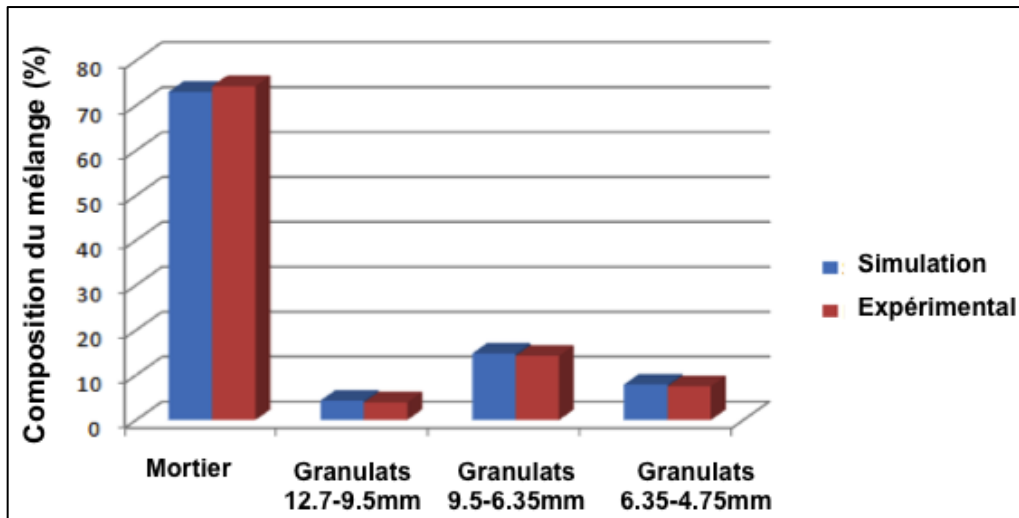


Figure 8. Composition (%massique) du mélange obtenu en laboratoire et à l'aide du générateur de particules.

Comme cela a déjà été mentionné précédemment, la proportion massique de mortier dans le mélange est calculée en regroupant le sable et la pâte de ciment frais. En connaissant les proportions massiques représentées dans la Figure 8, le débit de chacune des classes de particules est déterminé en fonction du débit de pompage. Dans le cas présent, le débit de pompage mesuré en laboratoire est de 2.8 kg/s dont environ 70% s'avère être du mortier.

4.2. Validation du modèle de contact

Comme cela a été le cas dans les travaux de Phan (2002), la validation des paramètres matériaux et notamment du mortier a été une étape difficile à réaliser. La cohésion granulat-mortier et mortier-mortier ainsi que la valeur du module de cisaillement de particules de mortier étaient les paramètres DEM à ajuster. Tel que mentionné précédemment, un essai d'affaissement au cône d'Abrams a été simulé avec le mélange considéré et ce afin d'ajuster les paramètres du modèle. La première simulation de l'essai d'affaissement est illustrée dans la Figure 9. Le résultat numérique obtenu était faible devant l'affaissement mesuré en laboratoire. Ce résultat s'explique notamment par une valeur du paramètre de cohésion pris trop faible pour cette première simulation. Malheureusement par manque de temps d'autres simulations complémentaires n'ont pas pu être réalisées dans le cadre du projet. Cependant, la projection du mélange considéré a pu être simulé en gardant les paramètres DEM initiaux. Une illustration du jet de particules généré est présentée dans la Figure 10 ci-dessous.

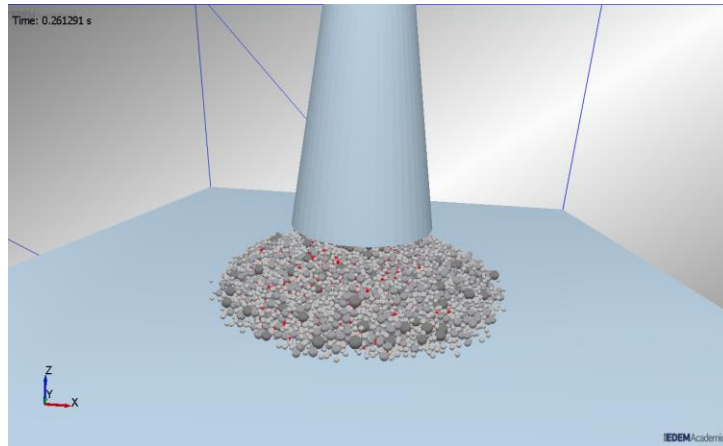


Figure 9. Simulation préliminaire d'un affaissement au cône d'Abrams. Tiré de (Picard-Fortin, et al., 2012).

Dans cette simulation le champ de vitesse des particules en sortie de lance a été imposé par un champ de force appliqué à la section d'écoulement et tenant compte des mesures de vitesse obtenues expérimentalement à l'aide d'une caméra haute vitesse.

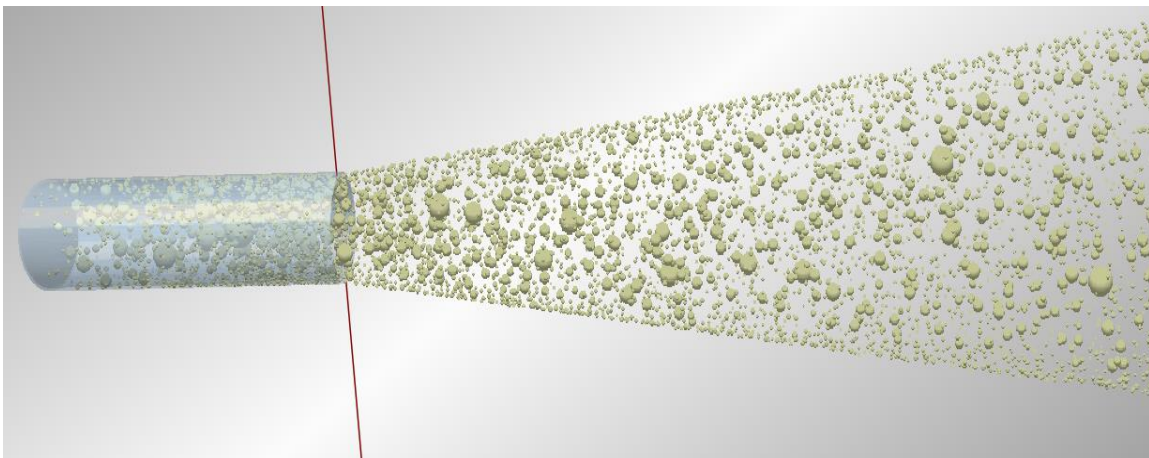


Figure 10. Jet de particules obtenu à l'aide du modèle DEM.

Les profils de vitesse obtenus avec le mélange considéré en procédé par voie humide ont été intégrés au modèle numérique à l'aide d'un programme C++. C'est le caractère conservatif de la forme des profils de vitesse mis en évidence par Ginouse et Jolin (2011) qui a permis d'imposer à la lance la forme des profils de vitesses. À noter également que l'angle de dispersion du jet présenté dans la Figure 10 a été un des paramètres d'entrée du modèle DEM permettant de délimiter le jet de particules. La valeur de cet angle a été obtenue expérimentalement à partir de l'analyse de la vidéo haute vitesse du jet.

4.3. Analyse des profils de vitesse dans le jet

Comme pour le générateur de particule, un volume d'intérêt situé à 75 cm de la sortie de la lance a été défini pour l'analyse du profil de vitesse des particules à cette section du jet. Le profil de vitesse numérique obtenu à l'aide du logiciel est présenté dans la Figure 11 ci-dessous.

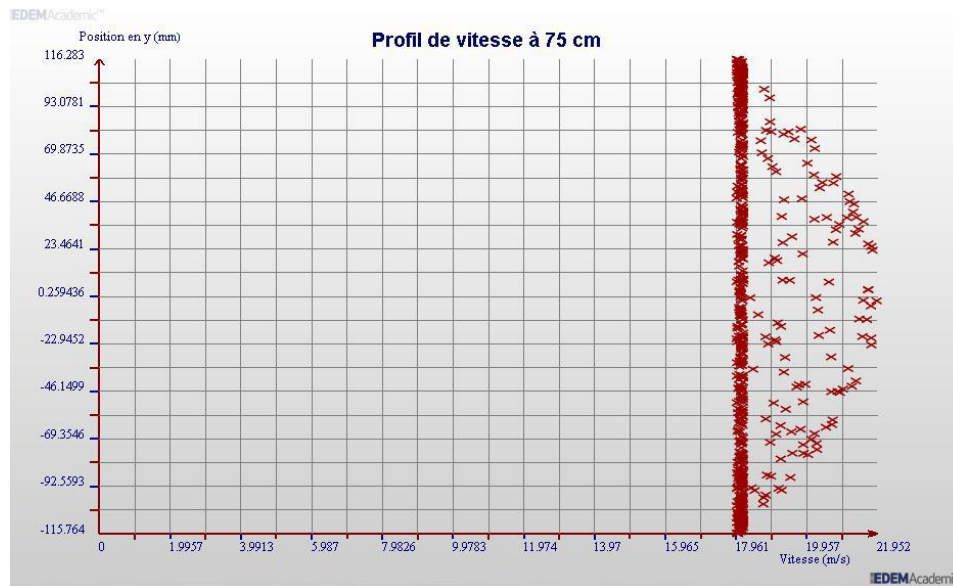


Figure 11. Profil de vitesse (vitesse en abscisse, position radiale en ordonnée) obtenu par simulation DEM à 75 cm de la sortie de la lance.

Les points sur le graphique représentent les valeurs de vitesse de particule obtenues à une coordonnée donnée de la section considérée. Le nuage de points représenté dans la Figure 11 met en évidence le caractère 3-D du champ de vitesse analysé à cette section du jet. En effet, le volume d'intérêt choisi analyse la vitesse de l'ensemble des particules situé dans le plan contenant cette section. De part l'axisymétrie du jet, les vitesses se superposent selon leur position dans la section, formant ainsi le nuage de point. Un grand nombre de particules de mortier se trouvant en périphérie du jet, il est ainsi normal d'obtenir un grand nombre de valeur de vitesses à la base du profil représenté dans la Figure 11. Enfin, il est également important de noter que l'enveloppe des points décrit une courbe de type Gaussienne organisée autour d'une vitesse maximale au centre de la section tel mesuré expérimentalement par Ginouse et Jolin (2011) et intégré au modèle.

5. CONCLUSION

Au regard ce qui a été présenté dans ce document les éléments suivants ont été mis en évidence :

- Les bases d'une modélisation des phénomènes de projection utilisant la méthode par éléments discrets ont été établies. La démarche proposée a ainsi permis d'intégrer au modèle numérique des données expérimentales relatives au mélange frais ainsi qu'au champ des vitesses mesuré en sortie de la lance.
- Un mélange de particules de mortier et de granulats a été généré dans la lance en respectant les mêmes proportions massiques du mélange frais réel. La distribution spatiale du matériau dans la lance en une couche de mortier entourant un noyau central de mortier et de granulats a également été considérée afin de reproduire les conditions de pompage mentionnées par la littérature.
- Une procédure d'ajustement des paramètres DEM et de validation des modèles de contact choisis a été établie. Celle-ci utilise une simulation préliminaire d'un essai d'affaissement dont le résultat est comparé à l'affaissement mesuré en laboratoire. Par manque de temps, la validité de cette procédure n'a pas pu être vérifiée.
- Toutefois, un jet de particules du mélange considéré a pu être simulé par le logiciel. Les profils de vitesse obtenus sont en accord avec les mesures effectuées en laboratoire et valident par la même occasion le programme C++ développé pour intégrer le champ des vitesses expérimental au modèle numérique.

Sur les bases de cette étude la validation des modèles de contact devra être une des étapes importantes à réaliser dans de futurs travaux portant sur l'étude des phénomènes d'impact du jet de particules sur la paroi à l'aide du même outil numérique.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), l'entreprise Matériaux King et Compagnie, ainsi que le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) pour leur contribution financière dans le projet de recherche.

7. RÉFÉRENCES

- Armelin, H.S. (1997) *Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete*, Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- Beaupré, D. (1994) *Rheology of High Performance Shotcrete*, Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- Bindiganavile, V. et Banthia, N. (2009) Effect of Particle Density on Its Rebound in Dry-Mix Shotcrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21: 58-64.
- Bolduc, L.-S. (2009) *Étude des propriétés de transport du béton projeté*, M.Sc. thesis, Université Laval, Québec.
- Chapdelaine, F. (2007) *Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton*, Ph.D. thesis, Université Laval, Québec.
- Ginouse, N. et Jolin, M. (2011) Étude fondamentale de la mise en place du béton projeté, *Proceedings of the Progrès dans le domaine du béton 2011*, 28 Novembre 2011, Boucherville, QC, Canada,
- Jolin, M. (1999) *Mechanism of placement and stability of dry process shotcrete*, Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- Jolin, M. et Beaupré, D. (2004) Effects of Particle-Size Distribution in Dry Process Shotcrete, *ACI Materials Journal*, 101: 131-135.
- Jolin, M., Beaupré, D. et Mindess, S. (1999) Tests to characterise properties of fresh dry-mix shotcrete, *Cement and Concrete Research*, 29: 753-760.
- Jolin, M., Chapdelaine, F., Gagnon, F. et Beaupré, D. (2006) Pumping Concrete: A Fundamental and Practical Approach, *Proceedings of the SHOTCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT X*, R. M. Dudley and W. P. Harvey, 215: 28.
- Jolin, M. et Ginouse, N. (2012) Recent Research in Wet-Mix Shotcrete at Laval University, *Proceedings of the 3rd Brazilian Congress on Tunnels and Underground Structures*, March 20th to 22nd, 2012, São Paulo, Brazil,
- Noor, M.A. et Uomoto, T. (1999) Numerical Simulation of Fresh Concrete (1): Three-Dimensional Discrete Element Model for Fresh Concrete, *SEISAN KENKYU*, 51: 169-172.
- Phan, Q.H.D. (2002) *3-D Simulation using Distinct Element Method for prediction of shotcrete shootability*, Ph.D. thesis, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Picard-Fortin, J.-P., Ginouse, N. et Jolin, M. (2012) Discrete modelling of a stream of shotcrete, *2012 EDEM Academic Poster Contest (1st place win)*, 2012,
- Puri, U.C. et Uomoto, T. (1999) Numerical modeling—A new tool for understanding shotcrete, *Materials and Structures*, 32: 266-272.
- Puri, U.C. et Uomoto, T. (2002) Characterization of Distinct Element Modeling Parameters for Fresh Concrete and its Application in Shotcrete Simulations, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14: 137-144.