



HAL
open science

**Modélisation numérique du comportement des milieux
granulaires à partir de signaux pénétrométriques :
approche micromécanique par la méthode des éléments
discrets**

Quoc Anh Tran

► **To cite this version:**

Quoc Anh Tran. Modélisation numérique du comportement des milieux granulaires à partir de signaux pénétrométriques : approche micromécanique par la méthode des éléments discrets. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français. NNT : 2015CLF22561 . tel-01162624

HAL Id: tel-01162624

<https://theses.hal.science/tel-01162624>

Submitted on 11 Jun 2015

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

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

N° d'ordre : D. U 2561
EDSPIC : 660

UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THESE

Présentée par

Quoc Anh TRAN

Ingénieur Civil

PFIEV–Ecole Nationale Supérieure de Génie Civil d'Hanoï

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR D'UNIVERSITE
SPECIALITE : GENIE CIVIL**

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT DES MILIEUX GRANULAIRES À PARTIR DE SIGNAUX PÉNÉTROMÉTRIQUES - APPROCHE MICROMÉCANIQUE PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS DISCRETS

Soutenue publiquement le 24 Mars 2015 devant le jury

MM	G. Combe	Président–Rapporteur
	F. Radjai	Rapporteur
	G. Saussine	Examineur
	P. Breul	Directeur
	B. Chevalier	Codirecteur
	M.A. Benz	Invité

**NUMERICAL MODELING OF THE BEHAVIOR OF GRANULAR
MEDIA UNDER PENETROMETER TESTING – MICROMECHANICAL
APPROACH BY THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS**

Quoc Anh TRAN

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of civil engineering

**UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II
ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND**

supervisors:
Prof. Pierre BREUL
Dr. Bastien CHEVALIER

Location: Clermont–Ferrand, FRANCE

March 24, 2015

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, Pierre BREUL, Professeur à l'Université Blaise Pascal, Polytech Clermont–Ferrand pour m'avoir fait confiance, puis pour m'avoir guidé, encouragé, conseillé durant ma thèse. Je souhaite adresser mes sincères remerciements à Bastien CHEVALIER, Maître de conférences, co–directeur de thèse pour avoir initié et suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt et de passion.

Mes remerciements vont également à Gaël COMBE, Professeur à l'Université Grenoble Alpes et Farhang RADJAI, Directeur de recherche CNRS, Physique, Université Montpellier, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail et d'en être les rapporteurs. De même, je tiens aussi à remercier Gilles SAUSSINE, Docteur responsable de division direction de l'ingénierie, SNCF et Miguel Angel BENZ NAVARRETE, Docteur Génie Civil, Sol Solution pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse. Je voudrais remercier tous les membres du jury pour leurs discussions, commentaires, et conseils très intéressants et suggérer des nouvelles perspectives à ces travaux de cette thèse.

En outre, je voudrais ainsi exprimer ma reconnaissance la plus profonde et amicale à tous mes collègues au sein de l'axe MMS de l'Institut Pascal qui m'ont aidé de différentes façons et pour leur soutien, leur sympathie, leurs encouragements...

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à ma maman qui m'a encouragée pendant tous les moments où j'ai rencontré des difficultés.

Résumé

Dans la pratique actuelle du génie géotechnique, les essais de pénétration tels que les CPT, SPT, Panda sont largement utilisés pour caractériser mécaniquement les sols, au travers notamment d'une caractéristique de rupture appelée résistance de pointe. Par ailleurs, les dernières évolutions technologiques apportées aux essais de pénétration dynamique (Panda 3) permettent d'obtenir pendant chaque impact une courbe charge–enfoncement donnant la charge en pointe en fonction de l'enfoncement à partir de la mesure et du découplage des ondes générées durant l'essai. L'exploitation de cette nouvelle courbe fournit des informations non seulement sur la résistance de pointe dynamique mais également sur des paramètres mécaniques complémentaires mis en jeu pendant l'enfoncement de la pointe.

L'objectif de cette thèse est de développer un modèle numérique en 2D capable de reproduire les signaux pénétrométriques obtenus expérimentalement par essais de type statique ou dynamique. Ce modèle est basé sur la méthode des éléments discrets avec une loi de contact linéaire simple. Une fois le modèle validé, une étude paramétrique a été réalisée en jouant essentiellement sur les modes d'application de la sollicitation (vitesse d'impact ou de pénétration), la granulométrie du matériau ainsi que l'arrangement granulaire (variation de la densité). Outre l'influence de ces paramètres sur les signaux pénétrométriques et la résistance de pointe mesurée, une attention particulière est portée sur l'analyse micromécanique: dissipation d'énergie dans le milieu, évolution des chaînes de force, orientations des contacts. Cette analyse nécessite de développer des outils numériques spécifiques afin de mieux comprendre le mécanisme de l'enfoncement et tenter d'expliquer la réponse mécanique macroscopique obtenue.

L'effet de la vitesse n'influence significativement que sur les essais de pénétration statiques et dynamiques en régime d'écoulement dense. A vitesse d'enfoncement comparable, il n'y a aucune différence significative au niveau microscopique entre les deux modes de sollicitation statique et dynamique.

En ce qui concerne l'influence des caractéristiques du matériau, les résultats obtenus par le modèle numérique conformément aux celui réel lors que le frottement entre particules ou la compacité du milieu varie. Concernant la granulométrie, la variation de la courbe charge–enfoncement et la force de pointe dynamique augmente lorsque le diamètre moyen augmente.

Mots clés : Essai de pénétration in-situ, CPT, Panda, courbe charge–enfoncement, comportement des milieux granulaires, modélisation, DEM, analyse aux multi-échelles.

Abstract

In the field of in situ mechanical characterization of soils, penetration tests are commonly used. Penetration tests measure the properties of soils in the domain of large deformations. The tip resistances, deduced from pile driving theory, can be measured either in dynamic conditions (q_d) either in static conditions (q_c). Recently, the measurement technique in dynamic conditions has been improved and it is now possible to record the whole response of the soil during one impact in terms of tip force and penetration distance. The exploitation of this new curve provides information not only on dynamic tip resistance but also on additional mechanical parameters involved during the driving of the tip.

The objective of this work is to develop a numerical model in 2D able to reproduce the penetrometric record obtained experimentally by static or dynamic penetration tests. This model is based on the discrete element method with a simple linear contact model. After the validation of the model, a parametric study was performed essentially on the loading type (static or dynamic), the penetration rate, the particle size of the granular material and the arrangement (density variation). Besides the influence of these parameters on the penetrometer signals and the tip resistance, a particular attention was focused on micromechanical analysis: energy dissipation in the medium, force chain evolution, contact orientation. This analysis requires the development of specific numerical tools to better understand the penetration mechanism and try to explain the macroscopic mechanical response obtained.

The penetration rate influences significantly only in the dense flow regime on the static and dynamic penetration tests. There is no significant microscopic difference between static and dynamic penetration tests with similar penetration rates.

Regarding the influence of the characteristics of the material, the numerical results obtained conform to the real results when the particle friction or the compactness of the medium varies. Concerning the particle size, the dynamic signal variation and the dynamic tip force increases when the average particle diameter increases.

Keywords: In-situ penetration test, CPT, Panda, load–penetration curve, behavior of granular media, modeling, DEM, analysis for the multi-scale.

Table des matières

Table des matières	1
Liste des figures	5
Liste des tableaux	12
Notation	13
Introduction générale	15
Chapitre 1 : Les essais de pénétration	17
1.1. Généralités sur les essais de pénétration.....	18
1.1.1. <i>Essai de pénétration statique</i>	19
1.1.2. <i>Essai de pénétration dynamique</i>	22
1.1.3. <i>Essai de pénétration dynamique en laboratoire.</i>	26
1.1.4. <i>Corrélation entre résistances de pointe statique et dynamique</i>	27
1.1.5. <i>Conclusion</i>	27
1.2. Analyse des mécanismes de pénétration.....	28
1.2.1. <i>Théorie de la capacité portante</i>	28
1.2.2. <i>Théorie de l'expansion de cavité</i>	29
1.2.3. <i>Conclusion</i>	30
1.3. Modélisation numérique des essais de pénétration.....	31
1.3.1. <i>Méthode des éléments finis</i>	31
1.3.2. <i>Méthode des éléments discrets</i>	33
1.3.3. <i>Conclusion</i>	38
1.4. Intérêt de l'étude de l'essai de pénétration.....	39
Chapitre 2 : Modèle numérique de l'essai de pénétration	40
2.1. Méthode des éléments discrets	41
2.1.1. <i>Principe de la dynamique moléculaire</i>	41
2.1.2. <i>Lois de contact</i>	43
2.1.3. <i>Formes d'énergie</i>	44
2.2. Paramètres du modèle	46

2.2.1.	<i>Paramètres physiques</i>	46
2.2.2.	<i>Rigidité des particules</i>	46
2.2.3.	<i>Nombre inertiel</i>	48
2.2.4.	<i>Coefficient de frottement des particules</i>	49
2.2.5.	<i>Propriétés des parois</i>	49
2.3.	Création de l'échantillon	50
2.4.	Procédure de l'essai de pénétration	51
2.4.1.	<i>Essai en condition statique</i>	52
2.4.2.	<i>Essai en condition dynamique</i>	52
2.5.	Synthèse des paramètres du modèle	52
2.6.	Conclusion	53
Chapitre 3 : Essais de pénétration en conditions statique et dynamique		54
3.1.	Essai en condition statique	55
3.1.1.	<i>Essai à vitesse lente</i>	55
3.1.2.	<i>Essai à vitesse rapide</i>	56
3.1.3.	<i>Validation du confinement</i>	62
3.2.	Essai en condition dynamique	63
3.3.	Bilan énergétique pour un essai dynamique	65
3.4.	Conclusion	67
Chapitre 4 : Influence du mode de pénétration		68
4.1.	Effet de la vitesse d'enfoncement en condition statique	69
4.2.	Influence du mode de sollicitation en condition dynamique	72
4.2.1.	<i>Influence du mode d'injection de l'énergie</i>	72
4.2.2.	<i>Essais de pénétration avec différentes vitesses d'impactant</i>	76
4.3.	Comparaison de l'effet de la vitesse en conditions statique et dynamique	81
4.4.	Conclusion	84
Chapitre 5 : Etude du mécanisme de pénétration		85
5.1.	Mécanismes associés à la pénétration en condition statique lente	86
5.1.1.	<i>Agitation du milieu granulaire</i>	87
5.1.2.	<i>Evolution du nombre de coordination</i>	89
5.1.3.	<i>Chaines de forces</i>	89

5.1.4.	<i>Réseau de contacts et texture</i>	92
5.1.5.	<i>Conclusion</i>	96
5.2.	Influence de la vitesse en condition statique	97
5.2.1.	<i>Agitation du milieu granulaire</i>	98
5.2.2.	<i>Evolution du nombre de coordination</i>	99
5.2.3.	<i>Chaines de forces</i>	101
5.2.4.	<i>Réseau de contacts et texture</i>	104
5.2.5.	<i>Conclusion</i>	109
5.3.	Influence du mode d'application: conditions statique ou dynamique	110
5.3.1.	<i>Agitation du milieu granulaire</i>	112
5.3.2.	<i>Evolution du nombre de coordination</i>	114
5.3.3.	<i>Chaines de forces</i>	115
5.3.4.	<i>Conclusion</i>	120
5.4.	<i>Conclusion</i>	121
Chapitre 6 : Influence des caractéristiques du matériau sur l'essai de pénétration dynamique		122
6.1.	Influence du critère d'arrêt de calcul	123
6.2.	Influence du coefficient de frottement entre particules	126
6.2.1.	<i>Réponse mécanique macroscopique</i>	126
6.2.2.	<i>Evolution du nombre de coordination</i>	129
6.2.3.	<i>Analyse énergétique</i>	131
6.3.	Influence de la compacité.....	133
6.3.1.	<i>Réponse mécanique macroscopique</i>	133
6.3.2.	<i>Evolution du nombre de coordination</i>	136
6.3.3.	<i>Analyse énergétique</i>	137
6.4.	Influence de la granulométrie	139
6.4.1.	<i>Effet de la taille des particules</i>	142
6.4.2.	<i>Influence de la forme de la courbe granulométrique</i>	148
6.4.3.	<i>Influence de l'étalement granulométrique</i>	153
6.4.4.	<i>Conclusion</i>	158
6.5.	<i>Conclusions</i>	159

Conclusion.....	161
Perspectives	164
Annexe.....	165
Annexe 1. Essai de pénétration en condition statique: influence de la vitesse	167
Annexe 2. Essai de pénétration dynamique : influence du mode d'injection de l'énergie 169	
Annexe 3. Essai de pénétration dynamique : influence de la vitesse d'impactant.....	171
Annexe 4. Essai de pénétration dynamique : influence du frottement	175
Annexe 5. Essai de pénétration dynamique : influence de la compacité	179
Annexe 6. Essai de pénétration dynamique : influence de la granulométrie	183
Bibliographie	189

Liste des figures

Figure 1-1. Pénétrogrammes obtenus dans un milieu granulaire de teneur en eau et densité homogènes par un essai de pénétration dynamique de type PANDA	18
Figure 1-2. Essai de pénétration CPT (à gauche) et détails de pointes de pénétromètre (à droite).....	19
Figure 1-3. Influence de la vitesse de pénétration sur q_c dans les argiles (Bemben et Myers, 1974)	20
Figure 1-4. Principe de l'essai PANDA 2	23
Figure 1-5. Relation entre la résistance de pointe q_d et le poids volumique sec γ_d (à gauche) et principe du contrôle de compactage avec le PANDA (à droite).	24
Figure 1-6. Principe de l'essai PANDA 3®	24
Figure 1-7. Résultats Panda 3® obtenus pour un sable d'Allier sec à 2 états de densité différents (Benz et al., 2013).	25
Figure 1-8. Corrélation entre les modules E_{p3}^d et les modules triaxiaux $E_{triaxial}$ et œdométriques E_{oed} pour Sable d'Allier (à gauche) et Argile de Laschamps (à droit) (Benz et al., 2013).....	25
Figure 1-9. Réalisation de l'essai dans le moule de calibration (Llanca-Vargas, 2014).....	26
Figure 1-10. Mécanismes de pénétration pour des pénétrations profondes (Durgunoglu et Mitchell 1975)...	28
Figure 1-11. Schéma d'expansion de la cavité avec le rayon initial de cavité égale à 0 (à gauche) et schéma de calcul de la résistance de pointe (R Salgado & Prezzi, 2007).	30
Figure 1-12. Description des méthodes Eulérienne et Lagrangienne (Nguyen, n.d.).	31
Figure 1-13. Principe de (Armero & Love 2003)	32
Figure 1-14. Modèle de (M. Jiang et al., 2014).	34
Figure 1-15. Modèle de pénétration et chaînes des forces fortes actives (Tordesillas et al., 2014).....	34
Figure 1-16. Modèles de pénétration 3D utilisé par (Arroyo et al., 2010; Butlanska et al., 2013) (à gauche) et par (Mcdowell et al., 2012) (à droit).	35
Figure 1-17. Modèle proposé par (Benz, 2009; Escobar et al., 2013) avec une pointe modélisée en détaille par les particules en contact	36
Figure 1-18. Modèle proposé par (Quezada et al., 2014).	36
Figure 2-1. Schéma de principe de la méthode DM.	41
Figure 2-2. Déflexion h entre les deux particules	44
Figure 2-3. Modèle de contact linéaire	46
Figure 2-4. Fonction de distribution du niveau de rigidité mesuré lors d'un essai de pénétration statique avec une rigidité normale $K^n = 0.5 \text{ MN.m}^{-1}$	47
Figure 2-5. Création d'échantillon : 1 - expansion; 2 - relâchement des contraintes pour obtenir un $K_0 = 0,5$; 3 - mise en place du confinement vertical.	50
Figure 2-6. Modèles numériques de pénétration statique et dynamique et détail de la pointe.	51
Figure 2-7. Paramètres du modèle.	52

Figure 3-1. Evolution de la force de pointe F_c en fonction de la profondeur pour l'échantillon S_1 (à gauche) et densité de probabilité de F_c en condition statique pour 3 échantillons (à droite) (pour une vitesse d'enfoncement de 20 mm.s^{-1}	56
Figure 3-2. Evolution de la force de pointe F_c en fonction de la profondeur pour un essai pénétration en condition statique de 1250 mm.s^{-1} de vitesse de tige (à gauche) et évolution du nombre de coordination dans une zone rectangulaire de $5 \times 5 \text{ cm}$ autour de la pointe (à droite).	56
Figure 3-3. Contraintes principales majeures des particules lors d'une oscillation (entre 14 et 15 cm de profondeur).	57
Figure 3-4. Distribution des particules sans contact de l'ensemble de l'échantillon pour les profondeurs de 14.2, 14.6 et 14.8 cm.	58
Figure 3-5. Probabilité de densité de F_c pour les 4 configurations.	60
Figure 3-6. Signal pénétrométrique pour les modèles 3001 et 3002.	61
Figure 3-7. Signal pénétrométrique pour les modèles 6001 et 6002.	61
Figure 3-8. Signal pénétrométrique pour les modèles 3001 et 6001.	61
Figure 3-9. Signal pénétrométrique pour les modèles 3002 et 6002.	61
Figure 3-10. Pénétrogrammes et densité de probabilité pour les configurations 6002 et 60225.	62
Figure 3-11. Force d'impact F_I en fonction du temps.	63
Figure 3-12. Vitesse de l'impactant V_I en fonction du temps.....	63
Figure 3-13. Force opposée à la pointe en fonction de l'enfoncement.	64
Figure 3-14. Vitesse de la tige en fonction de son enfoncement.	64
Figure 3-15. Zone d'énergie dissipée par frottement pendant l'essai dynamique à vitesse 1250 mm.s^{-1} pour S_1	67
Figure 4-1. Signaux de pénétration statique en fonction de la vitesse d'enfoncement entre 5 et 15 cm de profondeur pour l'échantillon S_1	69
Figure 4-2. Probabilité de densité des forces de pointe F_c en fonction de la vitesse d'enfoncement entre 5 et 15 cm de profondeur pour les trois échantillons S_1, S_2, S_3	70
Figure 4-3. Force de pointe moyenne F_{cm} entre 5 et 15 cm de profondeur en fonction de la vitesse d'enfoncement pour les trois échantillons S_1, S_2, S_3	71
Figure 4-4. Vitesse de l'impactant pendant l'impact pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.	72
Figure 4-5. Force d'impact pendant l'impact pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.....	73
Figure 4-6. Energie injectée dans le système pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.	73
Figure 4-7. Courbe charge - enfoncement pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.	74
Figure 4-8. Force de pointe F_d pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.....	74
Figure 4-9. Zone de distribution d'énergie dissipée pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.	75
Figure 4-10. Vitesse maximale de la tige en fonction de la vitesse d'impactant.	76
Figure 4-11. Courbe charge - enfoncement pour différentes vitesses d'impactant.	77
Figure 4-12. F_d en fonction de la vitesse maximale de la tige.	78

Figure 4-13. Pourcentage de l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour trois vitesses de l'impactant 1250, 2500 et 5000 mm.s ⁻¹ pour l'échantillon S ₁	79
Figure 4-14. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un essai dynamique pour différentes vitesses à 9 mm d'enfoncement.....	79
Figure 4-15. Comparaison entre F _c et F _d à vitesse de sollicitation comparable.....	81
Figure 4-16. Ratio F _{dmax} /F _c en fonction du ratio Enf _{max} /D _m	82
Figure 4-17. Comparaison entre la force de pointe F _{d1250} et F _{dmax} pour les essais de pénétration dynamiques avec la vitesse d'impactant V _I > 1250 mm.s ⁻¹	83
Figure 5-1. Pénétrogramme pour l'essai pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	86
Figure 5-2. Distribution de la vitesse fluctuantes δVi des particules aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	87
Figure 5-3. Densité de probabilité de la vitesse de fluctuation δVi (à gauche) et température granulaire (à droite) aux différentes profondeurs.	88
Figure 5-4. Nombre de coordination mesuré dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration en condition statique avec vitesse d'enfoncement égale à 25 mm.s ⁻¹	89
Figure 5-5. Réseaux de contact normal aux différentes profondeurs (14 cm, 14.6 cm et 15 cm) pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.....	90
Figure 5-6. Evolution des chaînes de force entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	91
Figure 5-7. Nombres de contacts créés, détruits et persistants pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.....	92
Figure 5-8. Schéma de détermination de la force de contact (F _N et F _T) et de l'orientation de contact (α).....	93
Figure 5-9. Nombre de contacts en fonction de l'angle d'orientation pour différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement effectué sur l'échantillon S ₁	93
Figure 5-10. Densité de probabilité des forces de contact normales pour l'essai pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.....	94
Figure 5-11. Distribution de la mobilisation du frottement lors de l'essai de pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	94
Figure 5-12. Intensité de la force normale de contact en fonction de l'angle de contact aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	95
Figure 5-13. Intensité du frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement..	95
Figure 5-14. Pénétrogramme statique obtenu entre 14cm et 15 cm de profondeur pour les vitesses 25, 1250 et 5000 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	97
Figure 5-15. Densité de probabilité de la vitesse fluctuation δVi pour l'essai de pénétration statique 1250 et 5000 mm.s ⁻¹	98
Figure 5-16. Température granulaire moyenne entre 14 cm et 15 cm aux différentes vitesse d'enfoncement.98	

Figure 5-17. Evolution du nombre de coordination dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration statique aux trois vitesses de l'enfoncement 25, 1250 et 5000 mm.s ⁻¹	99
Figure 5-18. Nombre de coordination moyen entre 5 et 30 cm de profondeur dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration statique aux différentes vitesses de l'enfoncement.....	100
Figure 5-19. Evolution des chaines de forces entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique à 1250 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	102
Figure 5-20. Evolution des chaines de forces entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique à 5000 mm.s ⁻¹ de vitesse d'enfoncement.	103
Figure 5-21. Pourcentage moyen de contacts persistants entre 14 cm et 15 cm aux différentes vitesses d'enfoncement.....	104
Figure 5-22. Nombre de contacts en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.....	105
Figure 5-23. Nombre de contacts en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.....	105
Figure 5-24. Densité de probabilité de la force de contact normale pour l'essai de pénétration statique.	106
Figure 5-25. Densité de probabilité du frottement effectif lors de l'essai de pénétration statique.	106
Figure 5-26. Intensité de la force de contact normal en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.	107
Figure 5-27. Intensité de la force de contact normal en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.	107
Figure 5-28. Intensité de frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.	108
Figure 5-29. Intensité de frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.	108
Figure 5-30. Pénétrogramme pour les essais de pénétration aux trois régimes de vitesse de la tige 100, 1250 et 5000 mm.s ⁻¹	110
Figure 5-31. Température granulaire en fonction de l'enfoncement pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse 100, 1250 et 5000 mm.s ⁻¹	112
Figure 5-32. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse 100, 1250 et 5000 mm.s ⁻¹	114
Figure 5-33. Evolution des chaines de forces fortes pour les essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 100 mm.s ⁻¹	116
Figure 5-34. Evolution des chaines de forces fortes pour les essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 1250 mm.s ⁻¹	117
Figure 5-35. Evolution des chaines de forces fortes au début des essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 5000 mm.s ⁻¹	118
Figure 5-36. Evolution des chaines de forces fortes à la fin des essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 5000 mm.s ⁻¹	119
Figure 6-1. Comparaison des signaux pénétrométriques de 5 essais dynamiques consécutifs au sein de l'échantillon S ₁ pour deux valeurs du critère de stabilisation différentes (10 ⁻² et 10 ⁻³).....	123

Figure 6-2. Evolution du nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les 5 essais dynamiques consécutifs avec l'échantillon S ₁ et pour deux valeurs du critère de stabilisation différentes (10 ⁻² et 10 ⁻³).	124
Figure 6-3. Force de pointe dynamique avec les différents critères de stabilisation.	124
Figure 6-4. Courbes charge-enfoncement pour un essai dynamique et pour différents coefficients de frottement des particules $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00	126
Figure 6-5. Exemple de signaux composant les trois fréquences dominantes $f = 1, 2$ et 5 Hz.	127
Figure 6-6. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques consécutifs réalisés dans l'échantillon S ₁ pour différents coefficients de frottements des particules $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00	127
Figure 6-7. Force de pointe F _d en fonction du frottement.	128
Figure 6-8. Fonction de connectivité P _k déterminée dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre à l'état initial pour les différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00	129
Figure 6-9. Ratio de Z/Z ₀ déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs avec l'échantillon S ₁ pour les différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00	130
Figure 6-10. Chaines de forces fortes juste après le choc pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant et pour différentes valeurs de frottement $\mu = 0.05, 0.25$ et 1.00	130
Figure 6-11. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour les différents frottements $\mu = 0.05, 0.25$ et 1.00 à 9 mm d'enfoncement pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant.	131
Figure 6-12. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminée dans l'échantillon pour différents frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00	132
Figure 6-13. Courbes charge-enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs dans un échantillon avec trois états de compacité différents : lâche, moyen et dense.	134
Figure 6-14. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour chaque état de compacité dense, moyen et lâche	134
Figure 6-15. Force de pointe F _d moyenne de 15 essais dynamiques pour chaque l'état de compacité.	135
Figure 6-16. Champs de déplacement des particules pour différentes compacités pour un coup dynamique à 1250 mm.s^{-1}	135
Figure 6-17. Chaines de forces fortes juste après l'impact (enfoncement = 2 mm) pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant et pour différents états de compacité: dense, moyen et lâche.	136
Figure 6-18. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre en fonction de la compacité.	137
Figure 6-19. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour différents états de compacité pour un coup dynamique à 1250 mm.s^{-1}	138
Figure 6-20. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminée dans l'échantillon pour chaque état de compacité: lâche, moyen et dense.	138
Figure 6-21. Courbes granulométriques étudiées.	140
Figure 6-22. Fonction de connectivité P _k déterminée dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre à l'état initial pour les différentes granulométries	141
Figure 6-23. Courbes granulométriques Granulo1, 2 et 3	142
Figure 6-24. Pénétrogrammes de 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s^{-1} pour l'échantillon S ₁ et pour 3 granulométries avec différents nombres de particules: N _p = 2 500, 10 000 et 40 000.	143

Figure 6-25. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour l'échantillon S ₁ et pour chaque granulométrie correspondant aux différents nombres de particule N _P = 2 500, 10 000 et 40 000.	144
Figure 6-26. Résistance de pointe F _d moyenne pour 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons différents S ₁ , S ₂ et S ₃ de mêmes caractéristiques en fonction du nombre de particules N _P = 2500, 10000 et 40000.	145
Figure 6-27. Nombre de coordination pour 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'échantillon S1 pour différents nombres de particules N _P = 2 500, 10 000 et 40 000.	145
Figure 6-28. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour différents nombres de particules N _P = 2500, 10000 et 40000 pour un coup dynamique à 1250 mm.s ⁻¹ de vitesse d'impactant.	146
Figure 6-29. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs pour différents nombres de particules: N _P = 2 500, 10 000 et 40 000.	147
Figure 6-30. Courbes granulométriques Granulo2, 4 et 5.	148
Figure 6-31. Pénétrogrammes de 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour l'échantillon S ₁ et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.	149
Figure 6-32. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs réalisés dans l'échantillon S ₁ pour les granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.	149
Figure 6-33. Force de pointe moyenne de 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons différents S ₁ , S ₂ et S ₃ et pour les granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.	150
Figure 6-34. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs effectués pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.	151
Figure 6-35. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5 et pour l'échantillon S ₁	152
Figure 6-36. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un coup dynamique avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ effectués dans l'échantillon S ₁ et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.	152
Figure 6-37. Courbes granulométriques Granulo2, 6 et 7.	153
Figure 6-38. Pénétrogrammes de 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ effectués dans l'échantillon S ₁ et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.	154
Figure 6-39. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour un échantillon et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.	155
Figure 6-40. Force de pointe moyenne des 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ effectués dans l'échantillon S ₁ et pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.	155
Figure 6-41. Evolution du nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs dans un échantillon et pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.	156
Figure 6-42. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs réalisés dans un échantillon pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.	157

Figure 6-43. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un coup dynamique avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon S₁ et pour les trois granulométries Granulo2 et Granulo6..... 157

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Paramètres du modèle.....	37
Tableau 3-1. Configurations testées pour différentes conditions limites	54
Tableau 3-2. Force de pointe moyenne entre 5 cm et 30 cm de profondeur F_{cm} et écart type obtenus pour les 4 configurations à une vitesse de 1250 mm.s^{-1} pour trois échantillons.	59
Tableau 3-3. Bilan énergétique pour l'échantillon S_1 à vitesse d'impactant de 1250 mm.s^{-1}	66
Tableau 4-1. Nombre inertiel en fonction de la vitesse d'enfoncement pour l'essai de pénétration statique en utilisant l'Equation 2-19.....	70
Tableau 4-2. Bilan d'énergie moyen pour 5 essais dynamiques successifs pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.....	75
Tableau 4-3. Bilan d'énergie moyen pour 5 essais dynamiques successifs en fonction de la vitesse d'impact 78	
Tableau 6-1. Bilan énergétique en terme de frottement à 9 mm d'enfoncement pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1}	131
Tableau 6-2. Compacités de l'assemblage en fonction du frottement.	133
Tableau 6-3. Bilans énergétiques pour différentes valeurs de compacité pour 5 essais dynamiques successifs à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant effectués sur l'échantillons S_1	137
Tableau 6-4. Courbes granulométries étudiées.	139
Tableau 6-5. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s^{-1} effectués dans l'échantillon S_1 pour différents nombres de particules: $N_P = 2500, 10\ 000$ et $40\ 000$	146
Tableau 6-6. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s^{-1} effectués dans l'échantillon S_1 et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.....	151
Tableau 6-7. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s^{-1} effectués dans l'échantillon S_1 et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.....	156

Notation

Notation	Unité [-]	Définition
α	°	Angle de contact
φ	-	Compacité du milieu granulaire
σ_m	Pa	Contrainte principale majeure
σ_{ij}	Pa	Tenseur de contrainte d'une particule
E_K	J	Energie cinétique
E_S	J	Energie de déformation
E_I	J	Energie d'impact
E_F	J	Energie dissipée par frottement
E_C	J	Energie du confinement
E_{PT}	J	Energie potentielle de la tige
E_{PP}	J	Energie potentielle des particules
Enf_{res}	m	Enfoncement résiduel d'un essai dynamique
Enf_{max}	m	Enfoncement maximal d'un essai dynamique
h	m	Déflexion entre deux particules
ρ	Kg.m ⁻³	Densité des particules
U	m	Déplacement d'une particule
D_{pointe}	mm	Diamètre de la pointe
D_{tige}	mm	Diamètre de la tige
D_{max}	m	Diamètre maximal des particules
D_{50}	m	Diamètre médian des particules
D_{min}	m	Diamètre minimal des particules
D_m	m	Diamètre moyen des particules
F_I	N	Force d'impact
F_c	N	Force de pointe obtenue pour un essai de pénétration en condition statique
F_d	N	Force de pointe obtenue pour un essai de pénétration dynamique
F_{dres}	N	Force de pointe calculée par la courbe charge – enfoncement, à l'enfoncement résiduel
F_{dmax}	N	Force de pointe calculée par la courbe charge – enfoncement, à l'enfoncement maximal
$F_{dpalier}$	N	Force de pointe calculée par la moyenne du palier de la courbe charge – enfoncement
μ	-	Frottement entre particules
μ_{pointe}	-	Frottement entre particule et pointe
H	m	Hauteur de l'échantillon
L	m	Largeur de l'échantillon

κ	-	Niveau de rigidité des particules
Z	-	Nombre de coordination
I	-	Nombre inertiel
K_0	-	Rapport entre contraintes horizontale et verticale
P_k	-	Proportion des particules ayant k contact
q_c	MPa	Résistance de pointe calculée par l'essai de pénétration en condition statique
q_d	MPa	Résistance de pointe calculée par l'essai de pénétration dynamique
K_n	N.m⁻¹	Rigidité normale du contact
K_s	N.m⁻¹	Rigidité tangentielle du contact
k_n	N.m⁻¹	Rigidité normale de particule
k_n^w	N.m⁻¹	Rigidité normale de paroi
k_s	N.m⁻¹	Rigidité tangentielle de particule
k_s^w	N.m⁻¹	Rigidité tangentielle de paroi
t_I	s	Durée d'impact
V_I	m.s⁻¹	Vitesse d'impactant
V_{Tige}	m.s⁻¹	Vitesse de tige

Introduction générale

Dans la pratique actuelle du génie géotechnique, l'usage des essais de caractérisation in-situ est très répandu. Parmi ces essais, les essais de pénétration tels que les CPT, SPT, Panda sont largement utilisés pour caractériser mécaniquement les sols, au travers notamment d'une caractéristique de rupture appelée résistance de pointe. Cependant, ce type d'essai ne se limite pas à la seule caractérisation mécanique puisqu'il est par exemple possible d'identifier des relations entre densité sèche (γ_d) et résistance de pointe q_d pour un matériau et un état hydrique donnés. Or l'exploitation de ces essais et relations, notamment pour les milieux granulaires grossiers, peut présenter une forte variabilité. Au-delà de la taille des particules de sols, de nombreux travaux montrent que la résistance de pointe dépend de paramètres tels que le mode d'application de la sollicitation, de la nature du matériau ou encore des conditions dans lesquelles ils se trouvent en termes de saturation ou de consolidation.

Par ailleurs, les dernières évolutions technologiques apportées aux essais de pénétration dynamique (Panda 3) permettent d'obtenir pendant chaque impact une courbe donnant la charge en pointe en fonction de l'enfoncement à partir de la mesure et du découplage des ondes générées durant l'essai. L'exploitation de cette nouvelle courbe fournit des informations non seulement sur la résistance de pointe dynamique mais également sur des paramètres mécaniques complémentaires mis en jeu pendant l'enfoncement de la pointe.

Ainsi, afin de mieux comprendre les mécanismes se déroulant durant l'essai et l'influence des paramètres de l'essai sur la réponse et afin de pouvoir mieux exploiter les résultats obtenus notamment par l'essai de pénétration dynamique de type Panda 3, le déroulement du processus de pénétration doit être étudié à l'échelle microscopique.

Cependant, l'étude expérimentale des mécanismes de pénétration nécessite des techniques complexes à mettre en place et coûteuses. En ce sens, la modélisation est complémentaire de l'approche expérimentale. A tout le moins, la modélisation peut permettre d'explicitier de manière qualitative les mécanismes réels. Du fait de la maîtrise des paramètres de la modélisation, il est possible de réaliser des études paramétriques précises permettant de mieux appréhender ces mécanismes.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique permettant de reproduire qualitativement les signaux pénétrométriques obtenus expérimentalement dans des conditions d'essai statique mais aussi dynamique. Dans ce modèle, toutes les données telles que les paramètres mécaniques, les conditions aux limites, le mode d'application de la sollicitation sont identifiées. Une fois le modèle mis au point, l'étape suivante consiste à réaliser une étude paramétrique en jouant essentiellement sur les modes d'application de la sollicitation (vitesse d'impact ou de pénétration), la granularité du matériau ainsi que l'arrangement granulaire (variation de la densité). Outre l'influence de ces paramètres sur les signaux pénétrométriques et la résistance de pointe, une attention particulière sera portée sur l'analyse micromécanique: dissipation d'énergie dans le milieu, évolution des chaînes de force, orientations des contacts. Cette dernière partie nécessite de développer des outils numériques spécifiques pour l'analyse

microscopique afin de mieux comprendre le mécanisme de l'enfoncement et tenter d'expliquer la réponse mécanique macroscopique obtenue.

Ce manuscrit de thèse se décompose en six chapitres suivis d'une conclusion générale.

Nous proposons au lecteur dans le premier chapitre, une synthèse sur les essais in-situ de pénétration qui sont largement utilisés en géotechnique pour caractériser la résistance mécanique à la rupture des sols. Nous insisterons particulièrement sur deux types plus étudiés d'une part l'essai de pénétration statique de type CPT et d'autre part, l'essai de pénétration dynamique léger à énergie variable de type Panda. Les travaux d'analyse théorique et de modélisation numérique des essais de pénétration sont également abordés en vue de choisir une méthode efficace permettant de modéliser l'essai de pénétration et d'exploiter les phénomènes en jeux lors de pénétration et notamment à l'échelle microscopique.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons tout d'abord le principe de la Méthode des Eléments Discrets. Ensuite nous décrirons le modèle numérique utilisé ainsi que l'identification des paramètres physiques du modèle qui a été retenu.

L'objectif du troisième chapitre est d'étudier la sensibilité du modèle pour des vitesses d'enfoncement importantes. L'effet des conditions aux limites du modèle sur l'essai de pénétration en condition statique sera également étudié afin de finaliser le modèle numérique. Ensuite, la modélisation de l'essai de pénétration dynamique sera présentée. La fin du chapitre sera consacrée à l'étude de la dissipation d'énergie au cours d'un essai de pénétration.

Nous présenterons dans le quatrième chapitre une étude paramétrique permettant d'étudier l'influence de la vitesse d'enfoncement, du mode de sollicitation ainsi que du mode d'injection d'énergie pour les essais de pénétration statique et dynamique sur la résistance de pointe obtenue. Nous nous intéresserons également à la comparaison entre résistance de pointe obtenue par l'essai de pénétration statique et essai dynamique.

Nous poursuivrons dans le cinquième chapitre avec l'analyse à l'échelle microscopique des simulations présentées dans le chapitre précédent. L'objectif du chapitre sera de mieux comprendre le mécanisme de pénétration et de tenter d'expliquer les résultats macroscopiques obtenus. Les paramètres tels que température granulaire, nombre de coordination ou chaînes de force forte seront examinés.

Enfin, le sixième chapitre sera consacré à l'influence des caractéristiques du matériau telles que le frottement inter-particulaire, la compacité ou encore la granulométrie. Cette étude sera menée uniquement sur l'essai de pénétration dynamique.

Chapitre 1 : Les essais de pénétration

Le premier objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse sur les essais de pénétration qui sont largement utilisés en géotechnique pour caractériser le paramètre de rupture des sols. Parmi l'ensemble des essais de pénétration existants (**DPT**, **SPT**, **CPT**...), l'étude se focalisera sur deux types plus particulièrement étudiés dans le cadre de ce travail. D'une part, sur l'essai de pénétration statique (**CPT**) (*EN ISO 22476-1, 2007*) puisque son utilisation est largement répandue à travers le monde et d'autre part, sur l'essai de pénétration dynamique léger à énergie variable (**PANDA**) (*NF P 94-114, 1990; NF P 94-115, 1990*) puisqu'il constitue le modèle de pénétromètre utilisé dans ce travail.

Les paramètres influençant la résistance de pointe (q_c ou q_d) tels que le mode de sollicitation du sol, la vitesse de pénétration ou la nature du matériau seront discutés (**section 1.1**) et les relations liants ces caractéristiques sont abordées à la section **1.1.4**. Le principe de l'essai de pénétration dynamique est présenté dans la section **1.1.2**.

Le deuxième but de ce chapitre est de choisir une méthode numérique adaptée pour reproduire les signaux de pénétration (pénétrogramme et courbe de charge en fonction de l'enfoncement) obtenus par les essais de pénétration **CPT** et **PANDA** afin d'étudier les caractéristiques de cet essai à l'échelle microscopique. Pour ce faire, la section **1.2** présente les différentes théories d'analyse des mécanismes de pénétration et la section **1.3** présente une synthèse des travaux de simulations numériques existants relatives à l'essai de pénétration. L'analyse des avantages et des inconvénients de chaque méthode sera présentée.

1.1. Généralités sur les essais de pénétration

L'essai pénétrométrique consiste à fonder un pieu à échelle réduite muni d'une pointe conique dans le sol. On en distingue deux grandes familles : les pénétromètres statiques et les pénétromètres dynamiques. Tandis que la tige est enfoncée de manière quasi-statique par vérinage statique dans le cas du pénétromètre statique, le fonçage se fait par battage avec énergie contrôlée ou variable dans le pénétromètre dynamique.

Aujourd'hui, les essais de pénétration tels que **SPT**, **DPT**, **CPT** ou **PANDA** sont largement utilisés pour déterminer la stratigraphie d'un site et fournir des paramètres mécaniques des sols utiles pour les calculs de géotechnique. En effet, à partir du pénétrogramme, qui représente la résistance en fonction de la profondeur, il est possible de détecter la stratigraphie du sol. De plus, sous certaines conditions, il est possible d'estimer d'autres paramètres mécaniques tels que le module d'Young (*Lunne, Robertson, & Powell, 1997*) ou l'angle de frottement interne (*Robertson & Campanella, 1983*).

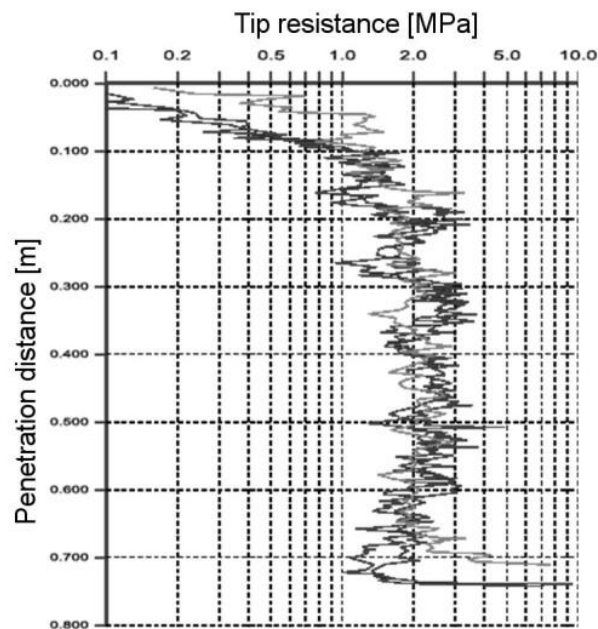


Figure 1-1. Pénétrogrammes obtenus dans un milieu granulaire de teneur en eau et densité homogènes par un essai de pénétration dynamique de type PANDA

Des études diverses (*Gourvès, Oudjehane, & Zhou, 1997; Gourvès & Richard, 1995*) ont montré que dans un milieu granulaire de densité et de teneur en eau homogènes, la résistance en pointe statique et dynamique devient constante au-delà d'une certaine profondeur appelée profondeur critique (**Figure 1-1**). Lors du fonçage de la tige, on observe deux comportements. Au début de la pénétration, le sol est refoulé de part et d'autre de la pointe et le volume remanié remonte vers la surface et augmente au fur et à mesure que le pénétromètre s'enfonce. On observe alors une augmentation de la résistance en pointe. Ensuite, quand la tige atteint la profondeur critique, le volume de sol remanié autour de la pointe ne peut plus remonter jusqu'à la surface, il se stabilise et la résistance devient donc constante. Cela est vrai sur de faibles profondeurs (de l'ordre de **0.3 m** d'après la **Figure 1-1**). D'après (*Cassan, 1988*), la profondeur critique est une fonction croissante de la densité. Sur des profondeurs

plus importantes, il existe une augmentation linéaire du signal avec la profondeur selon une certaine pente.

1.1.1. Essai de pénétration statique

Le pénétromètre statique, plus connu sous le nom générique anglo-saxon de **CPT** (Cone Penetration Test), a été mis au point à partir de 1932 par Buisman et Barentsen (cité par *Lunne et al., 1997*). La tige, formée d'une pointe conique fixée sur un train de tige est enfoncée dans le sol statique. La vitesse de pénétration recommandée dans la plupart des normes nationales et dans la norme européenne est égale à **20 mm.s⁻¹** avec une tolérance de **± 5 mm.s⁻¹** (*EN ISO 22476-1, 2007*). A cette vitesse, il est admis qu'on reste en conditions drainées dans le sable et en conditions non drainées dans les argiles. Le ratio entre la force totale en pointe et la section projetée donne la résistance de pointe statique (**q_c**).



Figure 1-2. Essai de pénétration CPT (à gauche) et détails de pointes de pénétromètre (à droite)

Les dispositifs d'essais de pénétration statique **CPT** peuvent être classés en trois groupes : les pénétromètres mécaniques, les pénétromètres électriques et les piézocônes. En incorporant des modules de mesure, le **CPT** permet de mesurer des paramètres supplémentaires, comme par exemple le frottement latéral moyen (**f_s**), la pression interstitielle (**CPTu**)... Il existe d'autres types de pénétromètres munis de pointes spéciales permettant de mesurer des paramètres tels que la température ou la conductivité électrique (*Lunne et al., 1997*).

D'après (*Lunne et al., 1997*), avant d'analyser les données, il est important de comprendre et de tenir compte des erreurs potentielles qui influencent la mesure de la résistance de pointe. Ces auteurs ont montré les facteurs pouvant influencer la mesure de l'essai **CPT**. Par exemple, la contrainte effective horizontale in-situ (**σ'_{h0}**) et la pression interstitielle ont un effet non négligeable sur la résistance de pointe (**q_c**) et le frottement latéral moyen (**f_s**).

Les mesures réalisées avec le **CPT** sont influencées d'une part par les paramètres du matériau (la compressibilité, la cimentation, la taille des particules) et d'autre part par les paramètres de l'équipement et de la procédure de l'essai **CPT** (taille du cône, forme du cône et vitesse de pénétration et mode d'application) (*Lunne et al., 1997*).

La compressibilité du sol influence significativement les caractéristiques du matériau. Une grande valeur de compressibilité du sol a tendance à être associée à une faible valeur de la résistance de pointe (**q_c**). Lors de la cimentation entre les particules, la compressibilité des particules diminue. Ainsi, la résistance de pointe augmente (*Lunne et al., 1997*).

Lorsque la taille des particules devient une fraction importante du diamètre de la pointe, le comportement du milieu granulaire est considéré comme un assemblage de particules rigides. Plus la taille des particules est importante, plus la compressibilité diminue. Ainsi, la résistance de pointe peut augmenter brusquement.

Concernant les facteurs d'influence de l'équipement et de la procédure de l'essai **CPT**, il faut noter que la réalisation d'essais de pénétration non normalisé ne doit pas être encouragée. Par contre, dans certains cas, des informations importantes peuvent être obtenues en s'écartant de la procédure normalisée afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu lors de la procédure de pénétration : taille et forme de pointe, vitesses de pénétration. Par exemple: La forme et le diamètre de la pointe influencent aussi la résistance de pénétration statique. Afin de diminuer l'influence des conditions aux limites dans les essais de laboratoire mais aussi pour augmenter la sensibilité à détecter des couches minces, un cône dont la taille est plus petite que celle normalisée (**10 cm²**) est utilisé (Baldi, Bellotti, Ghionna, Jamiolkowski, & Lo Presti, 1991; Torstensson, 1975). A l'inverse, (Muromachi, 1981) a utilisé un cône de grande taille pour augmenter la précision de mesure sur des sols très mous. D'après (Tcheng, 1962), en milieu très serré, on observe une augmentation de la résistance de pointe (q_c) entre le pénétromètre de **45 mm** et un pieu de **320 mm** d'environ **23 %**. Une étude réalisée par (Lunne et al., 1997) dans des argiles raides surconsolidées a conclu qu'il n'y a pas une différence significative au niveau de la résistance de pointe entre une pointe de **5 cm²** et une autre de **10 cm²**.

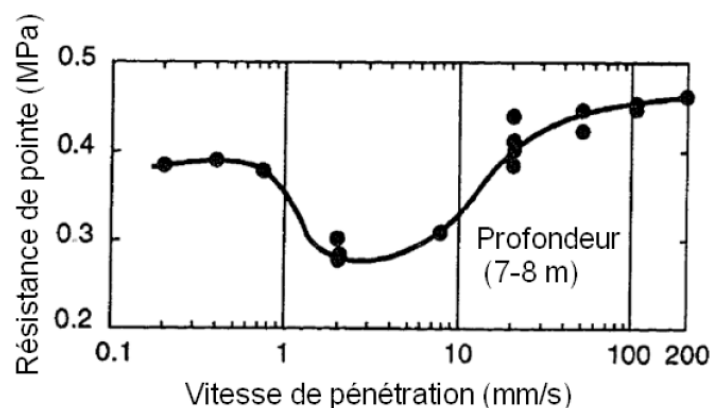


Figure 1-3. Influence de la vitesse de pénétration sur q_c dans les argiles (Bemben et Myers, 1974)

L'influence du mode d'application (statique ou dynamique) sur la résistance de pointe est discutée dans les travaux de (Sasaki, Koga, Itoh, Shimazu, & Kondo, 1985; Tokimatsu, 1990) afin d'analyser le phénomène de liquéfaction. Le cône est enfoncé dans le sol avec une vibration de **200 Hz**. Lorsque la résistance de pointe mesurée par cette méthode (q_{cd}) est inférieure à celle mesurée par l'essai de pénétration statique (q_c), on observe un effet de liquéfaction.

L'influence de la vitesse de pénétration est aussi analysée pour mieux comprendre le comportement du matériau en s'écartant de la vitesse de pénétration normalisée. Par exemple, lors de l'utilisation d'un cône non normalisé, la vitesse de pénétration doit être changée pour tenir compte de la différence de la vitesse de déformation. En augmentant la vitesse de pénétration, il est possible d'obtenir un aperçu du comportement des sols pour des conditions

non drainées, partiellement drainées et complètement drainées pour un sol déterminé. Dans la littérature, une étude sur l'effet de la vitesse de pénétration a été effectuée pour les sables et les argiles par (Danziger, F.A.B, & Lunne, 1997). Ils ont supposé que la valeur de la résistance de pointe q_c minimale pourrait se produire aux différentes vitesses et en fonction de paramètres tels que le rapport de surconsolidation (**OCR**), la teneur en argile ou la teneur en eau. (Bemben & Myers, 1974) ont réalisé des tests à une même profondeur dans des argiles légèrement surconsolidées en utilisant neuf vitesses de pénétration comprises entre **0.2** et **200 mm.s⁻¹**. Pour des vitesses de pénétration très petites, q_c est principalement de nature drainée. Lorsque la vitesse de pénétration augmente, q_c diminue à cause de la diminution des contraintes effectives et les forces visqueuses compensent la réduction des efforts, la courbe passe alors par un minimum. Ensuite, les forces visqueuses tendent à dominer le processus et q_c augmente de nouveau (**Figure 1-3**). Les tests dans les sables indiquent que pour des vitesses de pénétration plus petites que **20 mm.s⁻¹**, il y a une faible influence sur q_c . Pour des vitesses plus grandes, q_c augmente à cause de la dilatance et de la pression interstitielle négative (Juran & Turnay, 1989; Rocha Filho, 1982; Te Kamp, 1982).

1.1.2. Essai de pénétration dynamique

Dans l'essai de pénétration dynamique, la tige est enfoncée par battage dans le sol avec une énergie fixe ou variable. Dans le premier cas, le mouton tombe en chute libre d'une hauteur fixée et l'énergie de battage reste donc constante. Dans le deuxième cas, l'enfoncement de la tige est effectué par un marteau qui crée un choc en tête de la tige. En France, les appareils d'essai font l'objet d'une norme qui les classe en pénétromètres dynamiques de type A (NF P 94-114, 1990) ou en pénétromètres dynamiques de type B (NF P 94-115, 1990).

D'après (Frazer, 1971), il est possible d'obtenir la résistance de pointe (q_d) en fonction de la profondeur et l'énergie d'impact grâce aux formules dites « de battage dynamique ». Il existe de nombreuses formules de battage dynamique (formule de Hiley, formule des Hollandais), cependant la formule des Hollandais est la plus largement utilisée.

En considérant que le choc est parfaitement inélastique et que les déformations élastiques du pénétromètre et du sol sont négligées, la formule des Hollandais permet de calculer la résistance en pointe par la formule suivante :

$$q_d = \frac{1}{A} \frac{MgH}{\varepsilon} \frac{P}{M+P} \quad \text{Equation 1-1}$$

avec :

M : masse de battage (kg),

P : masse entraînée (tige et pointe) (kg),

H : hauteur de chute (m),

ε : enfoncement résiduel (m),

A : section de pointe,

Le pénétromètre dynamique léger à énergie variable **PANDA** a été créé en **1989** par R. Gourvès (Gourvès, 1991). Le principe de l'appareil consiste à enfoncer dans le sol une tige munie d'une pointe de **2 cm²**, **4 cm²** ou **10 cm²** de diamètre avec un marteau normalisé. Pour chaque coup de marteau donné sur la tige, un terminal reçoit deux informations en même temps : l'enfoncement et l'énergie d'impact. La résistance de pointe (q_d) est calculée instantanément par la formule des Hollandais et est mémorisée (**Figure 1-4**). On obtient à la fin de l'essai le pénétrogramme (**Figure 1-1**). En améliorant la qualité des mesures de résistance en pointe utilisant la formule de battage des Hollandais, (Chaigneau, 2001) a mis en évidence une surestimation de q_d due à l'hypothèse du comportement plastique parfait du sol. Cette valeur dépend en effet de la valeur de l'enfoncement pour chaque coup. D'après lui, l'enfoncement par coup doit être compris entre **2 mm** et **20 mm** pour limiter cette surestimation à environ **10%** dans le calcul de résistance de pointe.

Le **PANDA** a été conçu comme un outil permettant de réaliser des sondages en surface jusqu'à **6 m** de profondeur, dans des endroits d'accès difficile, dans différentes orientations et avec une bonne répétabilité du signal collecté. De plus, le temps d'exécution du sondage est

court. En outre, il est capable de caractériser des sols dont la taille maximale des grains est d'environ de **50 mm**.

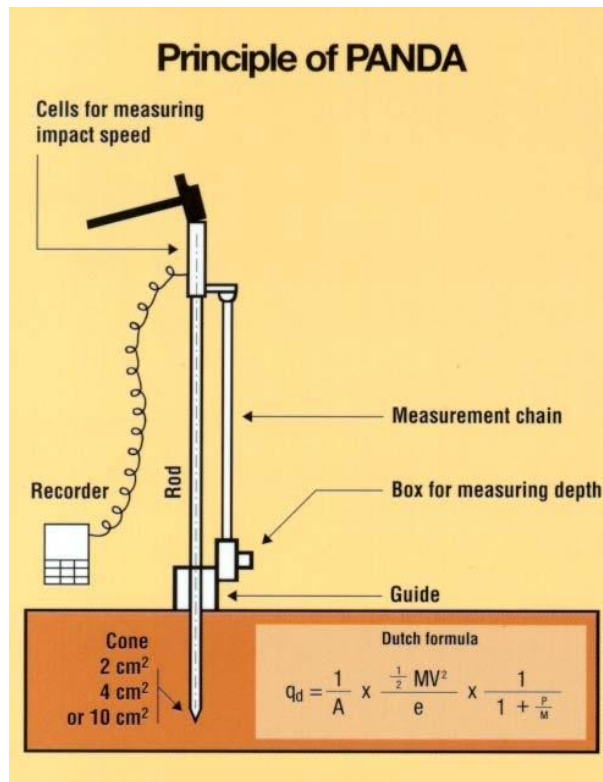


Figure 1-4. Principe de l'essai PANDA 2

Une des applications les plus utilisées est le contrôle de compactage, basé sur la relation qui existe entre la résistance de pointe et la densité sèche pour un matériau donné et dans un état hydrique déterminé ($\gamma_d = f(q_d, w)$). Le contrôle de compactage est réalisé alors par comparaison entre le pénétrogramme de contrôle obtenu in situ et les courbes de la résistance de pointe de référence (q_R) et de tolérance (q_L) (Chaigneau, Bacconnet, & Gourvès, 2000) (Figure 1-5).

Actuellement, il existe une banque de données d'une trentaine de sols qui a été réalisée à l'Institut Pascal depuis plusieurs années (Chaigneau, 2001). A partir des données sur les matériaux enregistrés, on peut estimer les caractéristiques des matériaux non présents dans la banque de données. De plus, l'exploitation des données de la banque permet de relier paramètres de nature et d'assemblage du sol et réponse mécanique à une sollicitation donnée ou de corrélérer des caractéristiques mécaniques.

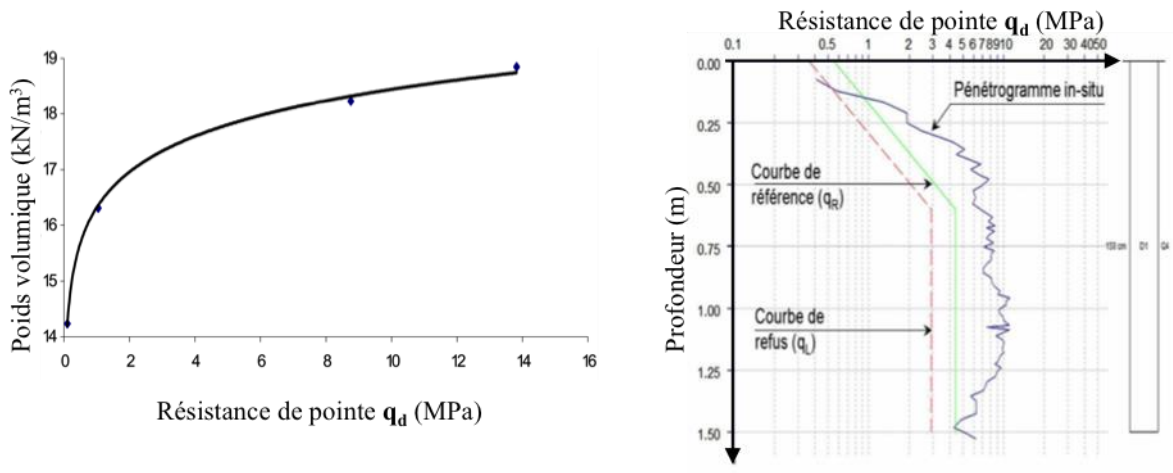


Figure 1-5. Relation entre la résistance de pointe q_d et le poids volumique sec γ_d (à gauche) et principe du contrôle de compactage avec le PANDA (à droite).

Plus récemment, (Benz, 2009) a développé un nouvel appareil appelé **PANDA 3** (Figure 1-6). A partir de la mesure et du découplage des ondes créées dans l'appareil suite à l'impact du marteau sur la tête de battage, il est possible d'obtenir pour chaque impact une courbe de chargement en fonction de l'enfoncement de la pointe σ_p - s_p . L'exploitation de cette courbe permet de déterminer en fonction de la profondeur des paramètres de résistance de pointe q_d , et de déformation du milieu étudié, telle que la célérité des ondes et le module pénétrométrique E_{p3}^d (Benz et al., 2013).

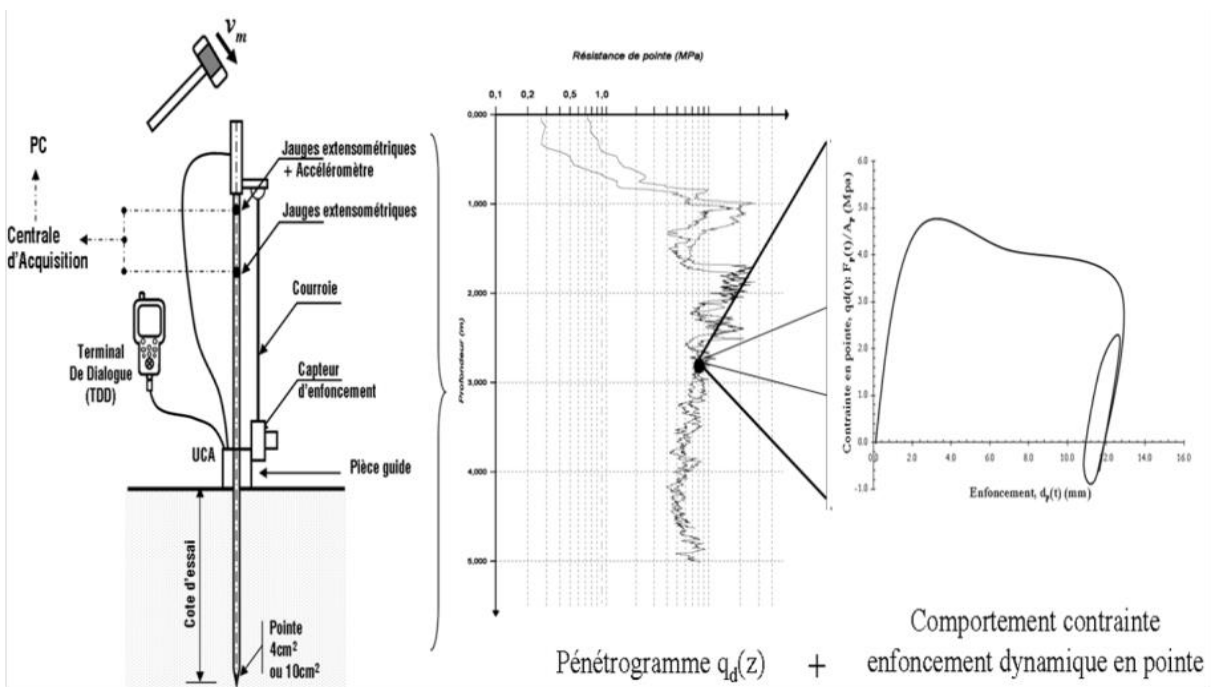


Figure 1-6. Principe de l'essai PANDA 3®

La validation du **PANDA 3** proposée par (Benz et al., 2013) pour différentes conditions du sol (état de serrage et état hydrique) montre une bonne répétabilité des mesures ainsi que leur bonne adéquation avec les valeurs de la littérature (Figure 1-7). Ces tests ont été réalisés en moule de calibration pour un sable (sable d'Allier) et une argile (argile de Laschamps).

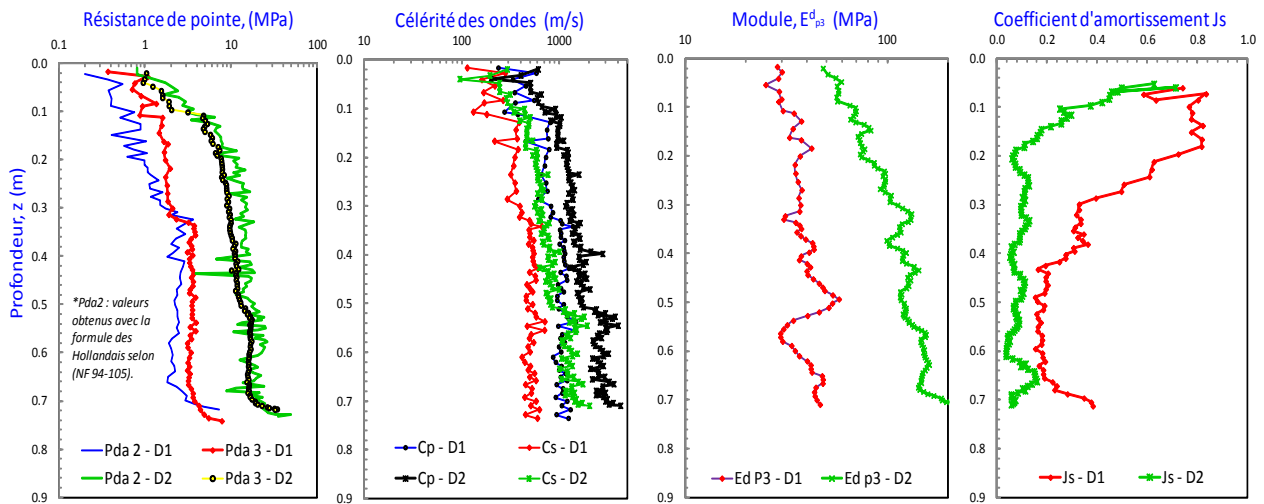


Figure 1-7. Résultats Panda 3® obtenus pour un sable d'Allier sec à 2 états de densité différents (Benz et al., 2013).

De plus, une bonne corrélation a été obtenue entre les modules obtenus avec le pénétromètre E_{p3}^d et ceux obtenus à partir d'essais de chargement œdométrique E_{oed} (Figure 1-8). Actuellement, le PANDA 3 est un outil opérationnel sur le terrain, mais il est nécessaire de réaliser des études complémentaires permettant d'obtenir une meilleure interprétation des paramètres extraits de la courbe charge-enfoncement.

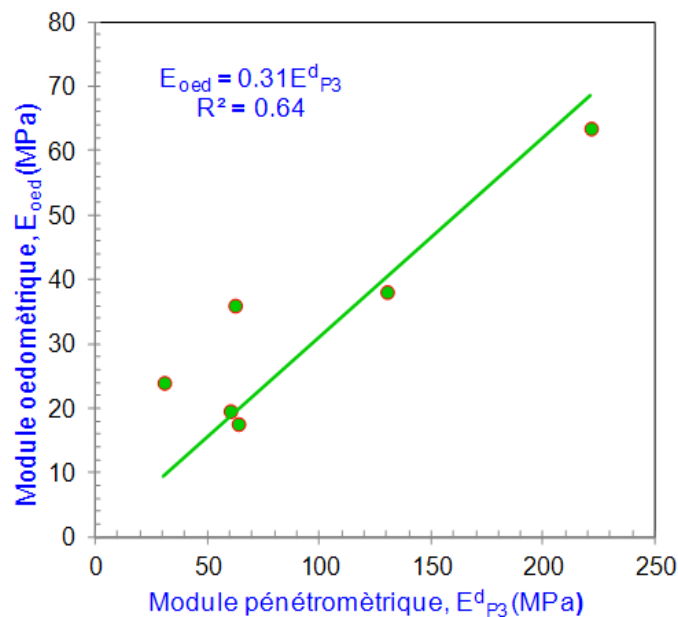


Figure 1-8. Corrélation entre les modules E_{p3}^d et les modules triaxiaux $E_{triaxial}$ et œdométriques E_{oed} pour Sable d'Allier (à gauche) et Argile de Laschamps (à droite) (Benz et al., 2013).

1.1.3. Essai de pénétration dynamique en laboratoire.

En laboratoire, les essais de pénétration dynamique sont réalisés en chambre d'étalonnage de **80 cm** de haut pour **37.5 cm** de diamètre (**Figure 1-9**) pour des matériaux étudiés (par exemple: sable d'Allier, Argile de Laschamps, Limon CNR, Criqueboeuf – grave et etc...) qu'on a bien maîtrisé ses paramètres physiques, surtout par la présence d'eau – teneur en eau (**w**) et par la compacité (*Benz et al., 2013; Chaigneau, 2001; Llanca-Vargas, 2014*).



Figure 1-9. Réalisation de l'essai dans le moule de calibration (Llanca-Vargas, 2014).

La procédure de création d'un moule consiste à un compactage statique en **n** couches successives de manière telle que la hauteur finale du moule rempli du matériau atteigne **80 cm** de hauteur. Une faible vitesse de compactage (**0.1 mm.s⁻¹**) a été utilisée en suivant un protocole assurant l'homogénéité en densité de chaque couche étudié.

Une fois les éprouvettes fabriquées, trois essais pénétrométriques de type **PANDA** sont réalisés dans chaque moule.

1.1.4. Corrélation entre résistances de pointe statique et dynamique

Qu'ils soient statiques ou dynamiques, les pénétromètres fournissent une caractéristique mécanique liée à la rupture du sol : la résistance de pointe q_c ou q_a . Dans le souci d'établir des corrélations entre ces résistances, de nombreux travaux ont été proposés. On peut citer notamment ceux de (Minasny, 2012; Sun et al., 2011). Cependant, il n'est pas toujours facile de les appliquer puisque ces deux valeurs correspondent à des conditions de chargement très différentes. En pratique, un bilan des corrélations existantes entre les termes q_a et q_c est présenté dans le travail de (Benz, 2009). Dans le travail de (Sun et al., 2011), une comparaison d'énergie entre l'essai dynamique et l'essai statique **SCP** (Static Cone Penetrometer) a été présentée. Il a été observé que le travail de pénétration déterminé dans un intervalle de profondeur donné par l'essai dynamique est toujours supérieur à celui déterminé dans l'essai statique **SCP**. D'après ces auteurs, cela peut être dû à une surestimation de l'énergie quand on ne prend pas en compte le terme d'énergie perdue à cause de la vibration de la tige. De plus, il existe plusieurs facteurs influençant la mesure de q_a comme par exemple la vitesse d'enfoncement, le degré de saturation, le frottement latéral. Ainsi, il n'est pas facile de comparer q_c et q_a .

1.1.5. Conclusion

Nous avons présenté dans la section 1.1 deux types d'essai de pénétration utilisés en pratique pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des sols : les essais de pénétration statique **CPT** et dynamique **PANDA**.

Pour l'essai de pénétration **CPT**, la mesure de la résistance de pointe (q_c) est notamment influencée par l'état de contrainte, l'état hydrique, le matériau ou le mode d'application. De plus, par rapport à l'essai **CPT** normalisé, une augmentation de taille de la pointe ou de la vitesse d'enfoncement peut augmenter la résistance de pointe (q_c).

Pour l'essai de pénétration dynamique, le **PANDA** a été présenté comme un appareil léger et pratique pour caractériser le matériau granulaire en surface. L'évolution de cet appareil et ses applications pratiques ont été aussi présentées. Les caractéristiques du sol telles que la résistance de pointe (q_a), la densité sèche (par corrélation) sont déterminées rapidement et facilement par le **PANDA**. Plus récemment, avec les nouveaux développements réalisés permettant de mieux mesurer l'énergie transmise à la pointe et dissipée dans le sol, on peut enregistrer une courbe de charge en fonction de l'enfoncement pour chaque l'impact (dernière version **PANDA 3**). Cette courbe contient des informations riches à propos des caractéristiques du sol tels que : la célérité des ondes, le module dynamique (E^d_{p3}) et l'amortissement de Smith (Benz, 2009; Benz et al., 2013) .

Bien que les caractéristiques mécaniques du sol soient bien mesurées par le **CPT** ou le **PANDA**, l'explication des phénomènes en jeu et la mise en évidence des paramètres influençant le mécanisme de pénétration demeure un sujet non trivial. Par ailleurs, en vue de pouvoir exploiter correctement les mesures obtenues avec le **PANDA 3**, il est nécessaire de pouvoir mieux interpréter la courbe charge-enfoncement et d'identifier les paramètres l'influencent. Ainsi, il est nécessaire de mener des études complémentaires pour une meilleure

interprétation de ces phénomènes. Nous allons aborder dans la section suivante les différentes approches (analytiques ou numériques) existantes pour l'analyse du mécanisme de pénétration statique ou dynamique.

1.2. Analyse des mécanismes de pénétration

On présente les différentes approches analytiques existantes pour la description du phénomène de pénétration.

1.2.1. Théorie de la capacité portante

L'analyse de la capacité portante en termes de résistance de pointe a été une des premières méthodes employées. Cette méthode est une analyse simple et rapide pour l'interprétation de la capacité portante du pieu. La **Figure 1-10** montre des exemples de mécanismes de rupture utilisés pour analyser les problèmes de pénétration en grandes déformations (*Durgunoglu & Mitchell, 1975*).

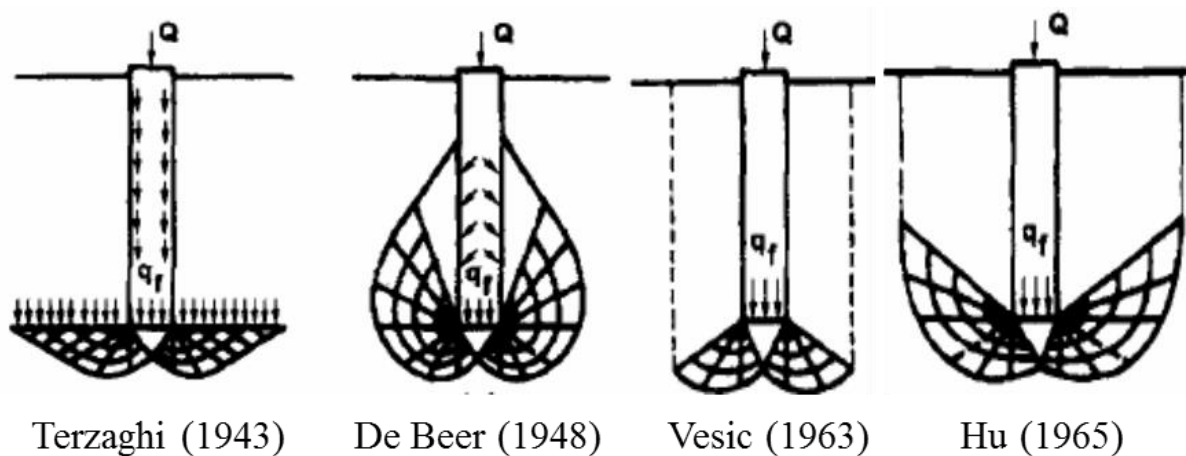


Figure 1-10. Mécanismes de pénétration pour des pénétrations profondes (*Durgunoglu et Mitchell 1975*)

Dans cette approche, deux hypothèses sont utilisées :

- la déformation du sol autour du cône est négligée,
- l'influence du mécanisme d'enfoncement sur l'état de contrainte initiale du sol en pointe est négligée. En effet, la contrainte horizontale développée autour de la pointe augmente lors du fonçage de la tige.

D'après cette analyse, la résistance en pointe est calculée par la formule suivante :

$$q(z) = s_c c N_c + s_q \sigma_{v,0} N_q + s_\gamma \left(\frac{1}{2} \gamma B \right) N_\gamma \quad \text{Equation 1-2}$$

avec :

- | | | |
|----------------|---------------------|---|
| c | $[\text{N.m}^{-2}]$ | : cohésion |
| $\sigma_{v,0}$ | $[\text{N.m}^{-2}]$ | : contrainte verticale initiale à la profondeur z |
| γ | $[\text{N.m}^{-3}]$ | : poids volumique du sol |

z	[m]	: profondeur
B	[m]	: largeur de la fondation
N_i	[-]	: facteurs de capacité portante ($i = c, q, \gamma$)
s_i	[-]	: facteurs de forme ($i = c, q, \gamma$)

Cependant, cette méthode permet seulement de calculer la résistance de pointe en se basant sur des hypothèses fortes et d'établir le mécanisme de rupture à faible profondeur en négligeant la compressibilité du sol (*M. J. Jiang, Yu, & Harris, 2006*). Ainsi, l'application de la théorie de la capacité portante est de moins en moins utilisée pour l'interprétation de la résistance de pointe.

Par la suite, c'est plutôt la théorie de l'expansion de cavité qui a été développée (*Yu & Mitchell, 1998*). L'analyse de l'expansion de la cavité, étant donné un modèle de comportement du sol, peut être faite avec précision : elle prend en compte la compressibilité (ou la dilatance) des sols, ainsi que l'influence des contraintes autour du manchon durant la pénétration (*Ali, 2010*).

1.2.2. Théorie de l'expansion de cavité

L'analyse dite de l'expansion de cavité qui est apparue dans le cadre de tentatives pour résoudre les problèmes de pénétration a été mise en évidence par (*Bishop, Hill, & Mott, 1945*). Il a observé que la pression requise pour créer un trou profond dans un milieu élasto-plastique est proportionnelle à celle nécessaire pour l'expansion d'une cavité de même volume et sous les mêmes conditions. Ensuite, des travaux réalisés par (*Baligh, 1976; Vesic, 1972*) ont essayé d'exprimer la caractéristique importante de sol telle que la relation de non-linéarité entre contrainte-et déformation de façon relativement simple...

La génération suivante d'analyses est apparue dans les années 1980, 1990 et 2000 avec notamment, une théorie générale de la résistance à la pénétration permettant de calculer la résistance à la pénétration pour le sable propre et non cimenté (*R Salgado, Mitchell, & Jamiolkowski, 1997; R Salgado & Randolph, 2001*). Les prévisions de cette théorie ont été largement testées et validées avec succès par des mesures réalisées en chambres d'étalonnage. Une évolution de cette théorie a été proposée par (*R Salgado & Prezzi, 2007*). D'après leurs travaux, la résistance de pénétration est calculée à partir de la pression limite de la cavité en considérant l'angle de frottement de l'interface réelle entre le cône et le sol. Ils ont présenté également des abaques permettant d'estimer la valeur de la résistance de pointe à partir des paramètres d'état et mécaniques du sol (densité, contrainte de confinement, angle de frottement interne) (**Figure 1-11**)

En général, il existe deux types de cavités : une cavité peut avoir soit un rayon initial fini soit un rayon initial nul. Si la cavité a un rayon initial nul, la cavité est créée au cours de l'analyse, et la pression de cavité calculée est appelée « pression limite de la cavité ». Dans le deuxième cas, lorsque le rayon initial de cavité est fini, une pression de cavité est définie en fonction de son rayon ou de la zone de déformation de la cavité ; la pression limite de cavité correspond à l'asymptote de pression dans cette zone. Pour calculer la résistance de pointe,

nous nous intéressons à la première solution où une cavité a été créée dans le sol et qui n'existait pas auparavant.

Concernant la forme de la cavité, un débat existe dans la littérature à propos de la forme sphérique ou cylindrique de la cavité. Certains travaux recommandent de calculer directement la pression de la cavité dans sa forme sphérique. D'après (*Rodrigo Salgado, 2013*), la résistance de pénétration est fortement influencée par le frottement latéral dans les essais effectués en chambre d'étalonnage. Ainsi, l'expansion de la cavité cylindrique peut être une meilleure approximation du processus de pénétration de la pointe.

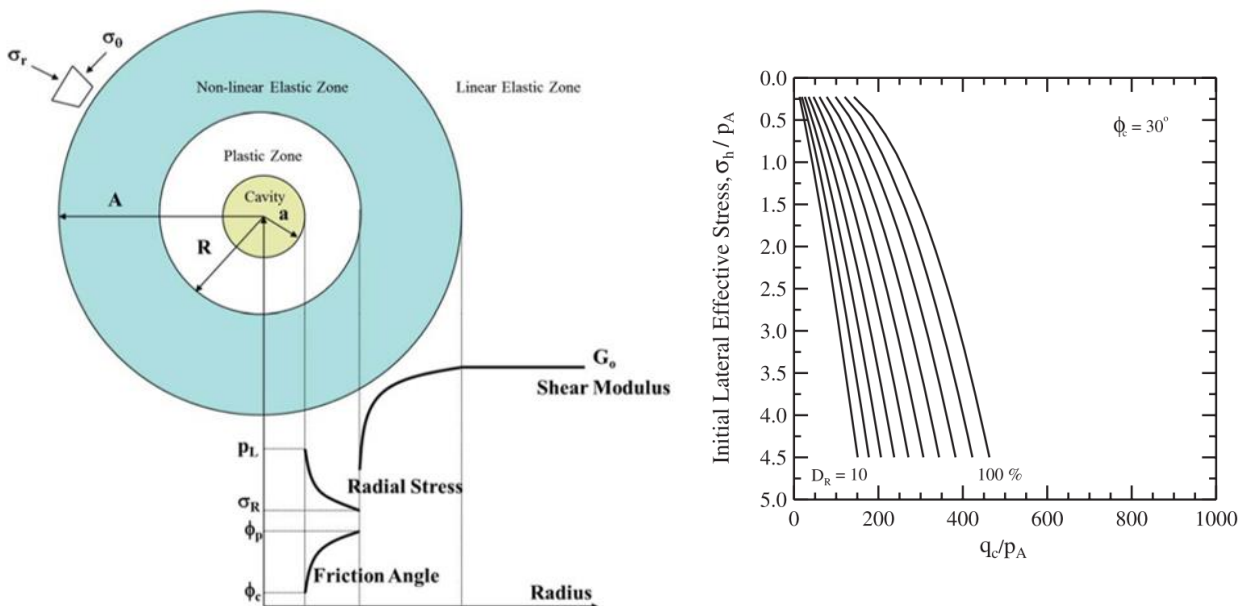


Figure 1-11. Schéma d'expansion de la cavité avec le rayon initial de cavité égale à 0 (à gauche) et schéma de calcul de la résistance de pointe (R Salgado & Prezzi, 2007).

1.2.3. Conclusion

Dans la section 1.2, les théories de la capacité portante et de l'expansion de cavité ont été présentées. Ces approches permettent d'expliquer en partie le fonctionnement mécanique des essais de pénétration mais n'apportent pas de nouveaux éléments sur les mécanismes réels se développant dans le sable et l'argile lors de la pénétration. D'après (*M. J. Jiang et al., 2006*), il est très compliqué de développer des méthodes rigoureuses d'analyse du mécanisme de pénétration dans les sables en raison des caractéristiques de dilatance du sable soumis au cisaillement, c'est pourquoi, les méthodes numériques peuvent permettre une meilleure compréhension du processus de pénétration. Ainsi, dans la section suivante, nous allons présenter une synthèse sur les travaux de simulation numérique des essais de pénétrations.

1.3. Modélisation numérique des essais de pénétration

On présente les différentes modélisations numériques existant pour la description du phénomène de pénétration. Elles font appel aux méthodes des éléments finis et des éléments discrets.

1.3.1. Méthode des éléments finis

Les méthodes des éléments finis peuvent être classées en deux groupes selon que l'analyse qu'elles proposent se fait en petites déformations ou en grandes déformations. L'enfoncement d'un pénétromètre étant essentiellement un problème en grandes déformations et mettant en jeu un glissement important à l'interface entre le sol et le pénétromètre, nous nous intéressons dans cette partie qu'à la méthode des éléments finis en grandes déformations.

Normalement, l'analyse par éléments finis est réalisée soit par une formulation lagrangienne du problème - les nœuds sont associés à des points matériels et l'analyse suit ces points matériels - soit par une formulation eulérienne - les nœuds sont fixés en des points de l'espace et les points matériels se déplacent à travers le maillage (**Figure 1-12**). Si les déformations sont importantes, la formulation de Lagrange conduit à une grande déformation du maillage car la maille est liée à la matière. Or, la déformation du maillage peut réduire considérablement la précision de l'analyse car l'intégration de Gauss sur les éléments très déformés donne de mauvais résultats. Pour la formulation eulérienne, elle ne peut pas suivre les surfaces libres et les frontières en mouvement puisque le maillage de calcul et la matière sont découplés (*Armero & Love, 2003*).

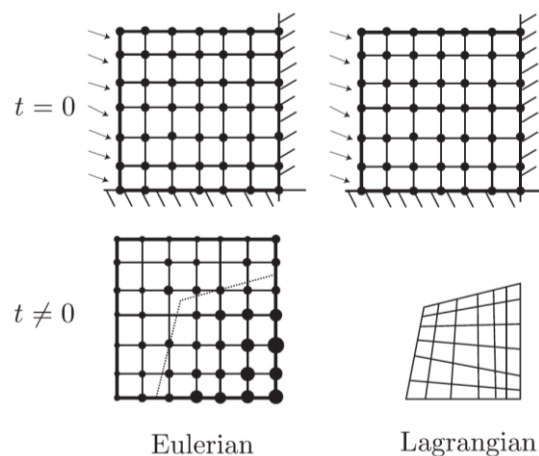


Figure 1-12. Description des méthodes Eulérienne et Lagrangienne (Nguyen, n.d.).

Afin de répondre aux deux difficultés des méthodes eulérienne et lagrangienne, la formulation **ALE** (de l'anglais Arbitrary Lagrangian Eulerian) a été proposée. En générale, dans la formulation **ALE**, on distingue trois domaines: matériel, espace, et domaine de référence. Les domaines sont liés par les règles de correspondance. L'identité entre les domaines matériel et référentiel conduirait à la formulation Lagrangienne; Et l'identité entre les domaines référentiel et spatial conduirait à la formulation Eulérienne (**Figure 1-13**). De façon générale, le domaine de référence agit en tant que modificateur ou négociateur entre le matériau et domaines spatiaux.

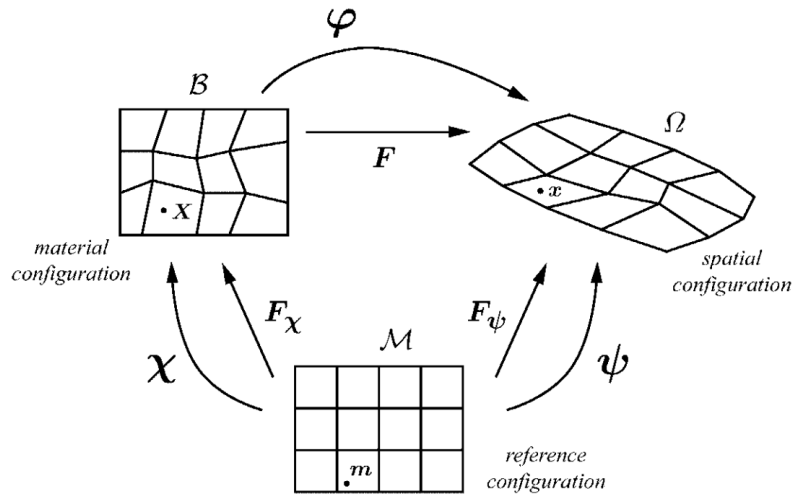


Figure 1-13. Principe de (Armero & Love 2003)

On présente ici quelques travaux du problème de pénétration statique en grande déformation réalisés par (Liyanapathirana, 2009; Lu, Randolph, Hu, & Bugarski, 2004; Susila & Hryciw, 2003; Tolooyan & Gavin, 2011) en utilisant la méthode ALE. Pour analyser l'essai de pénétration dans de l'argile, (Lu et al., 2004) ont montré que la résistance obtenue est supérieure à celle obtenue par la méthode MEF en petites déformations. Par contre, cette conclusion

est l'inverse de celle obtenue par (Liyanapathirana, 2009) pour l'argile molle. (Susila & Hryciw, 2003) ont modélisé l'essai de pénétration statique pour le sable avec un critère de Mohr-Coulomb pour l'interaction entre pénétromètre et sable et un critère de Drucker-Prager pour le sable. Leur but était d'établir une relation entre résistance de pointe et profondeur dans laquelle ils ont observé l'effet d'oscillations excessives.

Bien que leur travail permet de mieux comprendre le mécanisme de pénétration à grande déformation et de fournir des critères simples en utilisant des modèles de sol simplifiés tels que les critères de Tresca, Von Mises etc..., ils ne fournissent pas des solutions définitives du problème réel de la pénétration. Actuellement, le nombre de publications qui abordent la modélisation en grandes déformations des problèmes de pénétration de cône reste encore faible (Rodrigo Salgado, 2013).

1.3.2. Méthode des éléments discrets

En matière d'analyse en grandes déformations, parmi les méthodes numériques existantes à l'heure actuelle, la Méthode des Eléments Discrets (**MED**) peut être une approche satisfaisante, en vue de fournir une analyse des phénomènes micromécaniques se déroulant au sein du matériau granulaire et leur influence sur la résistance de pointe (*Butlanska, Arroyo, Gens, & O'Sullivan, 2013*).

Premièrement, de nombreuses simulations utilisant la MED ont été proposées (*Jiang et al. 2006; Jiang et al. 2007; Jiang et al. 2014; Breul et al. 2009; Mcdowell et al. 2012; ...*), pour chercher à éclaircir le mécanisme d'enfoncement d'une part et d'autre part pour étudier l'influence de certains paramètres du modèle sur la déformation du sol autour de la pointe. Cependant, la plupart des simulations **MED** sont bidimensionnelles afin de mieux comprendre le mécanisme de pénétration. Bien que les conditions cinématiques dans ces simulations **2D** soient complètement différentes de celles des matériaux granulaires réels (*Mcdowell et al., 2012*), l'interpolation du mécanisme de pénétration est encore l'objectif des études en **2D** en raison du coût élevé et du temps de calcul de la modélisation de **MED 3D**.

(*Calvetti & Nova, 2005*) simulent l'enfoncement du **CPT** en chambre d'étalonnage pour différentes contraintes de confinement et sur différents échantillons. Dans leur travail, la rotation des particules est inhibée, permettant de diminuer la rotation des particules circulaires. Les corrélations entre les micro-paramètres et les macro-paramètres (module sécant E_{50} , angle de frottement ϕ') du modèle ont été établies. Ainsi, les auteurs proposent de vérifier ces corrélations par les simulations de l'essai **CPT**. Notamment, les auteurs soulignent dans ces simulations que les assemblages de particules circulaires sont caractérisés par de très faibles angles de frottement (inférieurs à 30°), ce qui n'est pas le cas pour les géomatériaux comme les sables ou les graviers.

Concernant l'influence du frottement à l'interface entre le sol et le pénétromètre sur le mécanisme de l'essai de pénétration à grande profondeur, il existe des travaux de (*M. J. Jiang et al., 2007, 2006; Kinloch, 2007*). Leurs résultats basés sur l'analyse des champs de déplacement et de vitesse, des rotations des particules et des contraintes principales concluent que le frottement à l'interface sol-pénétromètre a des effets clairs sur les mécanismes de pénétration. Plus récemment, l'effet du frottement est aussi étudié sur le mécanisme d'enfoncement du **CPT** incliné dans le travail de (*M. Jiang et al., 2014*) (**Figure 1-14**). Une grande vitesse d'enfoncement (1000 mm.s^{-1}) a été utilisée pour diminuer le temps de calcul. A cette vitesse, les résultats du **CPT** n'étaient pas influencés significativement par l'augmentation de la vitesse de l'enfoncement (*Dayal & Allen, 1975*). Les résultats montrent que le sol sur le côté gauche de la pénétration inclinée subit une dilatation, tandis que sur le côté droit, il subit un compactage. Le sol subit trois mécanismes de rupture différents successivement lorsque la profondeur augmente: modes de rupture de Terzaghi pour une pénétration à faible profondeur ; modes de rupture de Biarez et Hu pour une pénétration à moyenne profondeur et modes de rupture de Berezantev et Vesic pour une pénétration à grande profondeur. La rotation des contraintes principales semble ne pas être influencée par le frottement. La résistance de pointe normalisée augmente avec le frottement et l'angle d'inclinaison.

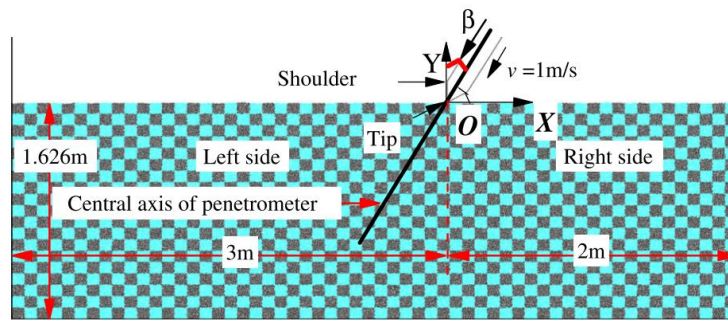


Figure 1-14. Modèle de (M. Jiang et al., 2014).

(Tordesillas, Steer, & Walker, 2014) simulent l'enfoncement par un poinçon plat rigide (Figure 1-15). Le mécanisme de pénétration est analysé à une méso-échelle en déterminant les chaînes de force et les cycles de réseau de contacts (3-cycles, 4-cycles...). Ils découvrent qu'une zone de dilatation se produit autour du poinçon plat rigide en raison de la création et de la destruction de 3-cycles de contact. Dans cette zone, de nombreuses chaînes de force composées de six particules ou plus contribuent à la résistance de pénétration.

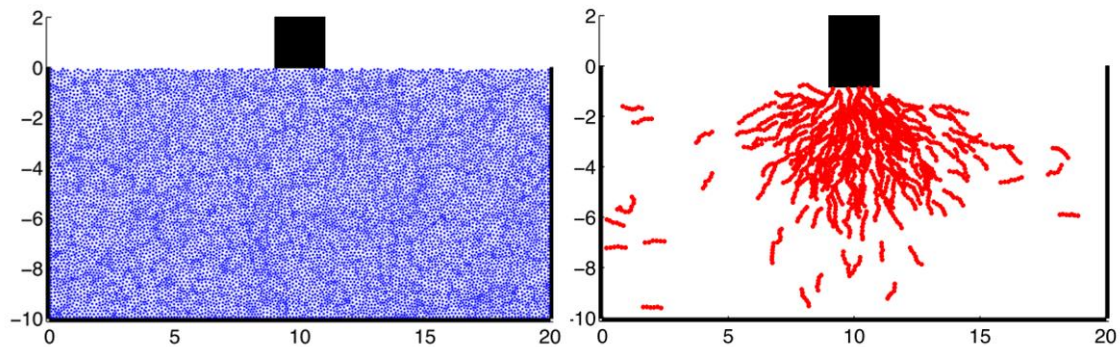


Figure 1-15. Modèle de pénétration et chaînes des forces fortes actives (Tordesillas et al., 2014)

Toutefois, les études bidimensionnelles conduisent à des contraintes liées à la modélisation du mécanisme de pénétration. Ainsi les auteurs s'accordent sur le besoin de développement d'un modèle tridimensionnel permettant de décrire le mécanisme d'enfoncement et de rupture du sol autour de la pointe de façon plus réaliste.

Concernant la simulation sur matériau fin, (Arroyo, Butlanska, Gens, Calvetti, & Jamiolkowski, 2010; Butlanska et al., 2013) ont simulé l'essai de pénétration **CPT** dans une chambre de calibration virtuelle (**VCC**) pour le sable de Ticino. La taille des particules du modèle est augmentée de 50 fois par rapport à la taille réelle. Les travaux de (Arroyo et al., 2010) ont montré que les résultats numériques sont en accord quantitatif avec les prédictions basées sur des corrélations établies antérieurement dans des chambres physiques de (Jamiolkowski, Lo Presti, & Manassero, 2003). Par la suite, les effets des conditions aux limites, des contraintes initiales (\mathbf{K}_0), de la densité moyenne initiale et de la rotation de particule ont été examinés à différentes échelles dans le travail de (Butlanska et al., 2013) en utilisant le même modèle de (Arroyo et al., 2010). Ils soulignent que l'influence des conditions aux limites peut cacher l'effet des paramètres fondamentaux tels que la densité. D'après eux, il y a une augmentation significative de la résistance de pointe, en fixant les murs latéraux et il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la forme des particules dans

les simulations. Par contre, l'augmentation la taille des particules dans les travaux de (Arroyo et al., 2010; Mcdowell et al., 2012) peut faire augmenter la fluctuation des réponses observées. Afin de diminuer la taille des particules en contact avec la pointe, une méthode de raffinement de particule a donc été développée par (Mcdowell et al., 2012) pour que la résistance de pointe soit sensiblement identique à la résistance de pointe obtenue par un assemblage ne contenant que des petites particules. Les particules proches du pénétromètre sont suffisamment petites et réalistes en taille, tandis que des plus grosses particules sont utilisées plus loin de la pointe.

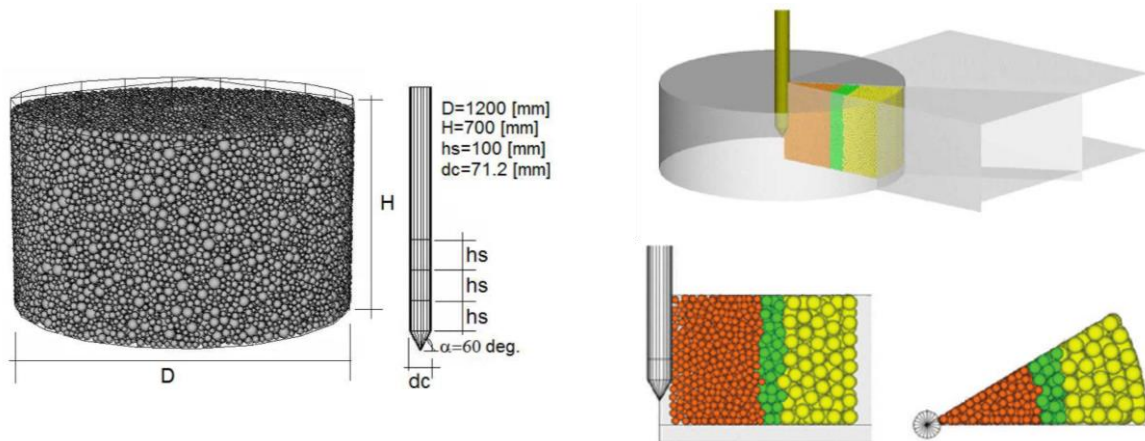


Figure 1-16. Modèles de pénétration 3D utilisé par (Arroyo et al., 2010; Butlanska et al., 2013) (à gauche) et par (Mcdowell et al., 2012) (à droite).

Pour les matériaux grossiers comme le ballast, il existe dans la littérature des travaux sur la modélisation 3D de la pénétration où la tige subit une sollicitation soit statique soit dynamique (Azéma 2007; Benz-Navarrete 2009; Escobar et al. 2013; Quezada et al. 2013; Quezada et al. 2014).

(Azéma, 2007) a simulé le vibrofonçage d'un pieu lors de ses études sur le procédé de bourrage du ballast des voies ferrées. Un pénétromètre de section rectangulaire est enfoncé dans le milieu granulaire soit par vibration horizontale soit par la vitesse de chute. D'après lui, l'enfoncement peut être décomposé en deux phases consécutives. La première phase est caractérisée par l'enfoncement du pieu soit par l'effet des vibrations soit par l'effet du choc à grande vitesse. La seconde phase est caractérisée par le mouvement diffusif du milieu. Il a montré que dans le cas où la vitesse de chute est grande, la fréquence de vibration n'a que très peu d'effet sur la dynamique du système.

Afin de caractériser les paramètres physiques des sols et des milieux granulaires, (Benz, 2009; Breul et al., 2009) ont présenté dans leur travaux un modèle avec des paramètres choisis leur permettant d'obtenir la relation trouvée dans les essais expérimentaux en utilisant le pénétromètre léger **PANDA 2** avec une pointe de 2 cm^2 de section. Cependant, l'enfoncement de la tige est simulé statique au lieu de réaliser un choc entre le marteau et la tige comme dans l'essai réel.

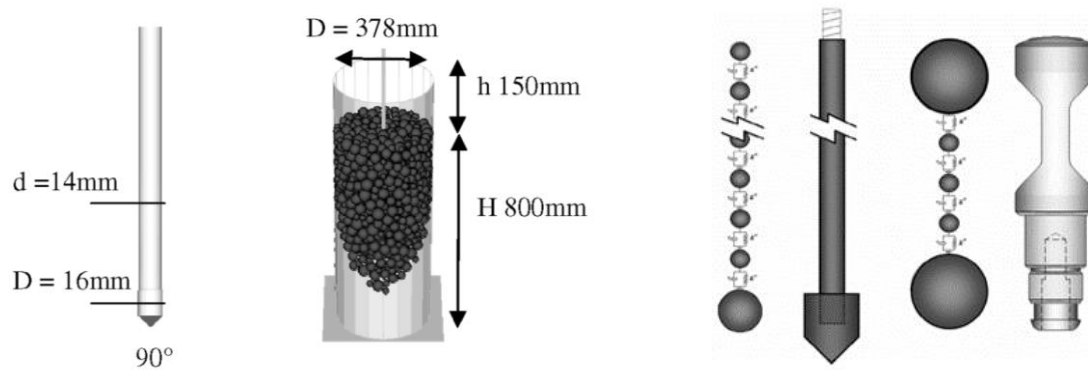


Figure 1-17. Modèle proposé par (Benz, 2009; Escobar et al., 2013) avec une pointe modélisée en détail par les particules en contact

Afin de valider l'essai de pénétration **PANDA 3**, (Escobar et al., 2013) a utilisé le même modèle que (Benz, 2009; Breul et al., 2009). Leurs résultats montrent une bonne correspondance entre les deux courbes reproduites soit par le modèle numérique soit par le **PANDA 3**. Par ailleurs, il serait intéressant d'étudier la relation entre les paramètres obtenus par l'exploitation de la courbe simulée et les paramètres micromécaniques du sol modélisé.

Plus récemment, (Quezada et al., 2014, 2013; Quezada, 2012) a continué d'étudier le mécanisme de pénétration dans les ballasts. Il s'est intéressé notamment au mode de sollicitation de la tige. La tige est enfoncée non seulement en condition statique mais aussi en condition dynamique aux différentes vitesses et aux différentes énergies fournies. Leurs résultats montrent que la résistance de pointe augmente quand la vitesse de la tige ou l'énergie injectée dans le milieu granulaire augmente. Par leur analyse locale, ils trouvent que le nombre de coordination diminue quand la vitesse de la tige ou l'énergie injectée dans le milieu granulaire augmente.

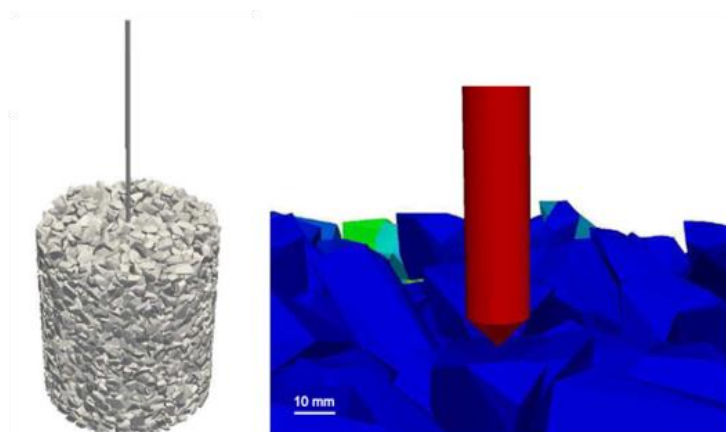


Figure 1-18. Modèle proposé par (Quezada et al., 2014).

De plus, une comparaison qualitative de la résistance de pointe entre condition statique et dynamique est proposée en supposant que l'assemblage des particules a subi une faible sollicitation en régime quasi-statique et dynamique (Quezada, 2012). Il conclut que les valeurs moyennes de q_c et q_d sont les mêmes. Cette affirmation est cohérente avec l'hypothèse d'équivalence entre q_c et q_d pour de faibles vitesses d'enfoncement et des faibles forces d'impact pour le cas dynamique.

Finalement, dans tous les travaux présentés, il est montré que la résistance de pointe peut être influencée par des paramètres tels que la vitesse de pénétration, les conditions aux limites, les caractéristiques de la particule (forme, coefficient de frottement, granulométrie)... Cependant, un point important auquel on doit tout d'abord s'intéresser est le choix de la taille du modèle : hauteur (**H**), largeur (**B**), diamètre du cône (**D_C**), diamètre médian (ou moyenne) des particules (**D₅₀**) en vue de diminuer l'effet de bords et d'obtenir des résultats raisonnables (réalistes) avec le nombre minimum de particules. Tous les paramètres géométriques utilisés dans les travaux précédents sont présentés dans le **Tableau 1-1** :

Auteurs	Paramètres du modèle				V _{Tige} [mm/s]
	H [m]	B [m]	D _C [mm]	D _{P50} [mm]	
(M. J. Jiang et al., 2006) (M. J. Jiang et al., 2007)	0.288	0.63	36	2.925	2
(Kinloch, 2007)	4.75	3.385	120	7.5	0.5
(M. Jiang et al., 2014)	1.626	5	160	7.6	1000
(Tordesillas et al., 2014)	0.254	0.508	50.8	1.69	10.2
(Arroyo et al., 2010) (Butlanska et al., 2013)	0.7	1.2	71.2	26.5	100
(Azéma, 2007)	0.7	0.8 x 0.8	40 x 40	37.5	Vibration
(Benz, 2009) (Breul et al., 2009)	0.8	0.378	16	37.5	100
(Quezada, 2012) (Quezada et al., 2013) (Quezada et al., 2014)	0.8	0.70	16	37.5	20-10 ⁴

Tableau 1-1. Paramètres du modèle

Pour le sable, (M. J. Jiang et al., 2006) a suggéré qu'il faudrait avoir au moins de **13** particules en contact avec la face de la pointe afin d'obtenir une résistance de pointe **q_c** stable. D'un autre côté, (Renzi, 1999) a suggéré qu'il n'y a aucune augmentation de la résistance de pointe **q_c** si le ratio entre largeur du moule et rayon du cône est supérieur ou égale à **40**.

Par contre, dans les simulations numériques pour les ballasts où la taille des particules devient importante par rapport à celle de cône (**D_C/D₅₀ = 0.43**), le ratio **B/D₅₀** varie de **10.08** (dans les travaux de (Benz, 2009; Breul et al., 2009) à **21.33** (dans le travail de (Azéma, 2007)).

1.3.3. Conclusion

Les modélisations numériques des essais de pénétration a fait l'objet d'un certain nombre de travaux qui ont mis en évidence que ces méthodes sont des outils intéressants pour simuler le mécanisme de pénétration par rapport aux théories analytiques de la capacité portante ou de l'expansion de cavité.

La méthode **MEF** est été appliquée afin de modéliser l'essai de pénétration en supposant le matériau comme un milieu continu et sous sollicitation statique. Ainsi, les simulations numériques utilisant la méthode **MEF** n'est appliquée que pour modéliser l'essai de pénétration statique sur le matériau fin tel que le sable et l'argile. Par ailleurs, la méthode **MEF** n'est pas efficace pour modéliser le mécanisme de pénétration à grande déformation à cause des erreurs significatives et des difficultés numériques associées au calcul de la charge de rupture. Bien que des algorithmes pour effectuer des analyses en grandes déformations par **MEF** ont été développés depuis quelques années, mais les résultats obtenus n'ont pas montré un bon consensus. D'après (*Ali, 2010*), cette méthode semble incapable pour le moment de fournir une analyse complète de la résistance de pointe.

A l'inverse, la méthode **MED** semble bien adaptée pour reproduire les essais de pénétration statique et dynamique. Par rapport à la méthode **MEF**, la méthode **MED** nous permet d'étudier non seulement le matériau fin mais encore les ballasts. Bien qu'il ne soit pas facile de modéliser un matériau réel par exemple le sable plus fin où la taille de particules est plus faible par rapport à celle de la pointe et à celle de l'échantillon. Le nombre de particule dans le calcul devient alors plus grand pour obtenir les résultats fiables. Mais la méthode **MED** est un outil efficace afin de modéliser l'essai de pénétration et d'exploiter les phénomènes en jeux lors de pénétration par les études microscopiques. Actuellement, plusieurs analyses effectuées à l'aide de la méthode **MED** donnent les résultats intéressants.

1.4. Intérêt de l'étude de l'essai de pénétration

L'essai de pénétration connaît un regain d'intérêt ces dernières années notamment du fait des améliorations et de développement qui lui ont été apportés. Concernant le pénétromètre léger **PANDA**, la mise au moins d'une nouvelle version (**PANDA 3**) permettant d'obtenir à chaque impact une courbe charge-enfoncement et un jeu de plusieurs paramètres caractéristiques du milieu sondé, ouvre de nouvelles perspectives d'exploitation de cet essai. Néanmoins, afin de contrôler la mesure, de bien exploiter ces signaux et de détecter les paramètres influençant le phénomène de pénétration, il est nécessaire d'étudier de façon plus approfondie cet essai. Or si des études expérimentales ont été menées en ce sens, celles-ci sont difficiles à conduire et à interpréter dans des milieux granulaires grossiers et une étude paramétrique reste fastidieuse. Dans ce contexte, l'utilisation de la modélisation peut s'avérer complémentaire et intéressante pour comprendre les mécanismes de pénétration au sein des milieux granulaires et permettre une meilleure exploitation.

Si des études par **MEF** ont été réalisées, les limites de cette méthode dans le domaine des grandes déformations empêchent de mener des études complètes sur le sujet. Des travaux utilisant la **MED** ont été menés et ont apporté un certain nombre de résultats intéressants notamment en ce qui concerne l'essai de pénétration statique (*Calvetti & Nova, 2005; A.-B. Huang & Ma, 1994; W. Huang, Sheng, Sloan, & Yu, 2004; M. J. Jiang et al., 2007, 2006*) en 2 dimensions, ainsi qu'en 3 dimensions (*Arroyo et al., 2010; Butlanska et al., 2013; Mcdowell et al., 2012*).

Ainsi, nous visons donc à développer dans notre travail un modèle numérique basé sur la **MED** permettant de reproduire qualitativement les signaux pénétrométriques obtenus dans un moule décrit dans la section **1.1.3**. Ensuite, une étude paramétrique sera proposée pour détecter l'influence des paramètres du modèle sur les signaux de pénétration (pénétrogramme et courbe charge-enfoncement) et sur la résistance de pointe. Ces paramètres sont la vitesse d'enfoncement, le mode d'application (statique et dynamique), le matériau (frottement, taille de particule, densité)... Une analyse macro- et micromécanique sera menée en vue de mieux comprendre le mécanisme de pénétration et de tenter d'expliquer l'influence des paramètres sur le mécanisme de pénétration. Une comparaison entre les essais de pénétration dynamiques avec ceux statiques sera analysée dans ce rapport.

Chapitre 2 : Modèle numérique de l'essai de pénétration

Les études présentées dans le chapitre précédent ont montré que le milieu situé au voisinage de la pointe et de la tige lors de l'essai de pénétration est soumis à d'importants réarrangements granulaires, qui le perturbent fortement ; les déplacements et déformations sont importants et sortent du domaine des petites déformations, on s'éloigne donc des hypothèses d'un milieu continu.

Bien qu'on puisse utiliser les méthodes des éléments finis (**MEF**) en grandes déformations et en grands déplacements (*Liyanapathirana, 2009; Lu et al., 2004*), il n'est pas facile de simuler simplement ces phénomènes. A l'inverse, la Méthode des Eléments Discrets (**MED**) permet par essence une bonne représentation du réarrangement du matériau et aussi d'avoir accès à des informations locales sur le comportement du milieu granulaire qui sont intéressantes dans le cadre de cette étude (*Jiang et al. 2006; Zhou et al. 2012; Jiang et al. 2014; Benz-Navarrete 2009; Breul et al. 2009; Benz et al. 2013,...*). Ainsi, la **MED** a été choisie pour reproduire les essais de pénétration statique et dynamique.

Dans un premier temps, on va s'attacher à présenter les principes de la **MED**. Ensuite, les paramètres physiques et mécaniques du modèle développé dans le cadre de ce travail et la mise en place de l'échantillon seront présentés dans les **sections 2.2 et 2.3**. Enfin, la procédure adoptée pour la réalisation des essais de pénétration et la synthèse des paramètres du modèle seront présentées dans les **sections 2.4 et 2.5**.

2.1. Méthode des éléments discrets

Dans les **MED**, les milieux granulaires - sable, roches, milieux fracturés - sont considérés et modélisés comme des assemblages de grains en interaction. La modélisation de ces « grains » ou « particules » suit un processus dynamique impliquant forces de volume et de surface qui agissent sur chacun d'entre eux. Un ensemble de grains est supposé équilibré quand la somme des forces sur chacun est nulle. Les principales **MED** peuvent être classées en deux grandes familles, dépendant du type d'interaction considérée entre les grains :

- la Dynamique des Contacts (**DC**) qui est basée sur l'hypothèse d'infinie rigidité des contacts (contacts indéformables ; corps rigides ou déformables) (*Jean, 1999*),
- la Dynamique Moléculaire (**DM**) : contacts déformables et particules rigides (*Cundall & Strack, 1979*).

Dans le cadre de ce travail, la Dynamique Moléculaire a été choisie. Le logiciel utilisé est Particle Flow Code in 2D (**PFC^{2D}**) développés par Itasca.

2.1.1. Principe de la dynamique moléculaire

La dynamique moléculaire repose sur une discrétisation temporelle des équations de la dynamique, appliquées à chaque particule ou grains constituant le modèle. Lors de chaque pas de temps, on détermine les points d'interaction ou contacts entre les particules constituant le système modélisé. On calcule ensuite les forces d'interaction résultantes au niveau de ces contacts par l'intermédiaire de lois d'interaction ou lois de contact. Enfin, les équations de la dynamique sont appliquées à chaque particule afin de déterminer leurs mouvements et donc de mettre à jour leurs positions (**Figure 2-1**).

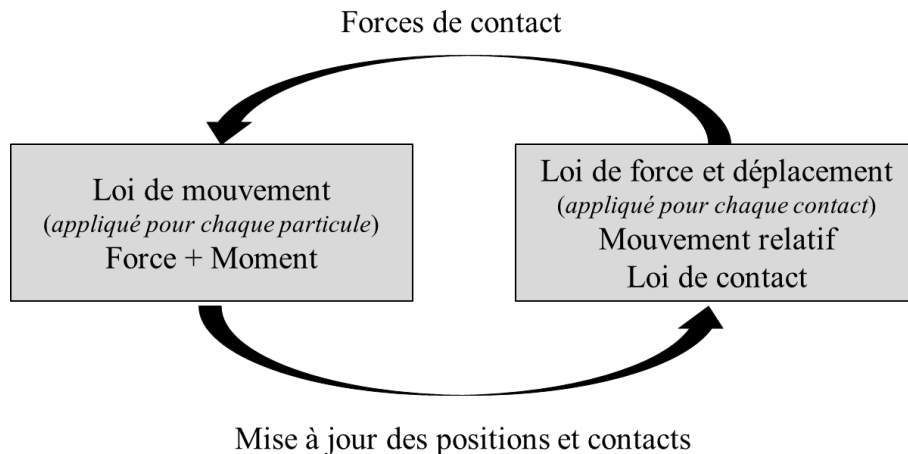


Figure 2-1. Schéma de principe de la méthode DM.

Les équations de la dynamique appliquées à chaque particule i peuvent s'écrire

$$m\vec{\ddot{x}}_i = \sum_j \vec{F}_{j \rightarrow i} + \vec{F}_{\text{vol}} = \vec{F}_{\text{tot}} \quad \text{Equation 2-1}$$

$$I\vec{\ddot{\theta}}_i = \sum_j \vec{\Gamma}_{j \rightarrow i} + \vec{m}_{\text{vol}} = \vec{m}_{\text{tot}} \quad \text{Equation 2-2}$$

où:

- m est la masse de la particule i ,
- I est la matrice de la rigidité de i ,
- $\vec{\ddot{x}}_i$ est l'accélération en translation de i ,
- $\vec{\ddot{\theta}}_i$ est l'accélération en rotation de i ,
- $\vec{F}_{j \rightarrow i}$ est la force appliquée par j sur i ,
- $\vec{\Gamma}_{j \rightarrow i}$ est le moment appliqué par j au centre de gravité de i ,
- \vec{F}_{vol} est une force extérieure appliquée sur i ,
- \vec{m}_{vol} est un moment extérieur appliqué au centre de gravité de i .

Le temps est discrétisé en une succession de pas de temps élémentaires qui sont choisis afin de décrire raisonnablement le phénomène du problème modélisé. D'après (Cundall & Strack, 1979), le pas de temps choisi doit être inférieur à un pas de temps critique donné par la formule suivante :

$$\Delta t_{\text{crit}} = 2\sqrt{\frac{m}{K^{\text{éq}}}} \quad \text{Equation 2-3}$$

avec $K^{\text{éq}}$ la rigidité équivalente du système et m la masse équivalente du système.

On peut ajouter à ces équations un terme d'amortissement dit local agissant sur chaque élément du système modélisé (particule ou mur) (Cundall & Strack, 1979). Dans l'équation du mouvement, l'amortissement local se traduit par l'ajout d'une force à la résultante s'appliquant à chaque entité. Cette force est proportionnelle à l'intensité de la résultante et dirigée dans la direction opposée à celle de la vitesse de la particule à l'instant considéré :

$$m\vec{\ddot{x}}_i = \sum_j \vec{F}_{j \rightarrow i} + \vec{F}_{\text{vol}} + \vec{\mathcal{F}}_i^d \quad \text{Equation 2-4}$$

$$\vec{\ddot{\theta}}_i = \sum_j \vec{\Gamma}_{j \rightarrow i} + \vec{m}_{\text{vol}} + \vec{M}_i^d \quad \text{Equation 2-5}$$

avec :

$$\vec{\mathcal{F}}_i^d \cdot \vec{e}_k = -\alpha \left| \left(\sum_j \vec{F}_{j \rightarrow i} + \vec{F}_{\text{vol}} \right) \cdot \vec{e}_k \right| \text{sign}(\vec{\dot{x}}_i \cdot \vec{e}_k) \quad \text{Equation 2-6}$$

$$\vec{M}_i^d \cdot \vec{e}_k = -\alpha \left| \left(\sum_j \vec{\Gamma}_{j \rightarrow i} + \vec{m}_{\text{vol}} \right) \cdot \vec{e}_k \right| \text{sign}(\vec{\dot{\theta}}_i \cdot \vec{e}_k) \quad \text{Equation 2-7}$$

avec $\vec{e}_k = \vec{e}_1, \vec{e}_2$ ou \vec{e}_3 vecteur unitaire d'une des trois directions de l'espace.

Cet amortissement local est souvent utilisé afin de créer une dissipation d'énergie fictive qui agit au niveau de chaque particule, qu'elle soit ou non en contact avec d'autres éléments. Cet amortissement n'affecte que les mouvements d'accélération.

Cet amortissement est en pratique souvent utilisé dans les modélisations de phénomènes quasi-statiques car il permet une convergence plus rapide vers un état d'équilibre, tout en

s'assurant que cet état d'équilibre est le même que celui qui serait atteint sans l'amortissement local selon la valeur de ce coefficient d'amortissement.

Dans le cas des sollicitations dynamiques cependant, pour lesquelles les mouvements d'accélération jouent un rôle important, l'amortissement local permet certes d'accélérer l'obtention d'un état d'équilibre, mais sans garantie de son unicité ni de la conservation des mécanismes permettant d'y arriver. L'amortissement local, qui représente donc une dissipation fictive de l'énergie présente dans le système, peut modifier les mécanismes observés dans le milieu sans pour autant présenter un sens physique. Il a été fait le choix ici de ne considérer aucun amortissement local.

2.1.2. Lois de contact

Le modèle d'interaction, ou loi de contact, et les paramètres associés jouent un rôle très important dans la **DM**. Ils influencent directement le comportement du milieu. Ce dernier est correctement modélisé quand le comportement obtenu par simulation est proche de celui observé dans la réalité.

En pratique, le comportement des milieux granulaires tels que les sols est très complexe. Il est difficile de bien le modéliser à cause d'un certain nombre de facteurs : forme réelle des particules, distribution des tailles de particules, complexité du comportement mécanique au contact entre particules... Afin d'approcher au mieux le comportement des matériaux réels, de nombreux modèles rhéologiques de contact ont été développés, des plus simples aux plus complexes : contact élastique linéaire, contact de Hertz, viscosité, résistance au roulement...

Cependant, le choix du modèle de contact n'a pas de réponse unique : on peut penser que la multiplication des paramètres pourrait permettre de s'approcher de manière plus fidèle du comportement réel du matériau, aux échelles macro- comme micromécanique. Mais alors, on peut imaginer la difficulté dans la détermination des valeurs de ces paramètres ainsi que de leur signification physique.

Dans le cadre de ce travail, il a été fait volontairement le choix d'un modèle de contact simple : un modèle de contact élastique linéaire. Le modèle de contact permet de déterminer les composantes de la force de contact à partir du déplacement relatif entre les deux particules (**Figure 2-2**). Les expressions des composantes normales F^n et tangentielle F^s de la force de contact sont:

$$F^n = K^n \times U^n \quad \text{Equation 2-8}$$

$$\Delta F^s = -K^s \times \Delta U^s \quad \text{Equation 2-9}$$

avec K^n la rigidité normale du contact, K^s la rigidité tangentielle du contact, U^n l'interpénétration des particules et ΔU^s l'incrément de déplacement tangentiel du point de contact.

Les rigidités normale \mathbf{K}^n et tangentielle \mathbf{K}^s de contact sont définies en fonction des deux paramètres de rigidité \mathbf{k}_n et \mathbf{k}_s de chaque entité \mathbf{i} et \mathbf{j} en contact :

$$K^n = \frac{k_n^i \times k_n^j}{k_n^i + k_n^j} \text{ et } K^s = \frac{k_s^i \times k_s^j}{k_s^i + k_s^j} \quad \text{Equation 2-10}$$

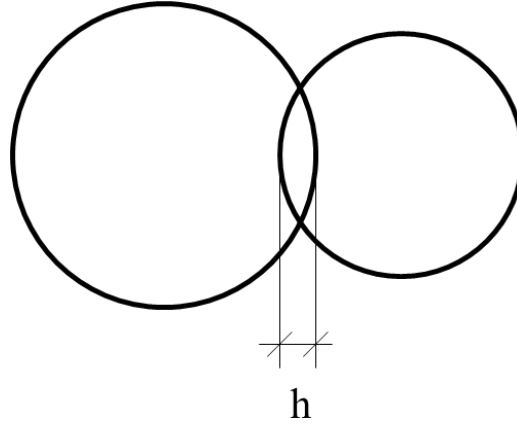


Figure 2-2. Déflexion h entre les deux particules

Un critère de frottement est appliqué au niveau du contact. Il limite la valeur de la force tangentielle de contact par rapport à la valeur de la force normale. Le glissement se produit quand la condition suivante est satisfaite :

$$|F_i^s| > F_{max}^s = \mu |F_i^n| \quad \text{Equation 2-11}$$

où μ le coefficient de frottement de contact, est égal à la valeur minimale des coefficients de frottement de chaque entité en contact.

2.1.3. Formes d'énergie

Dans un assemblage de particules soumis à une sollicitation dynamique, l'analyse de l'évolution de l'énergie présente dans le système et sa dissipation permettent de mieux comprendre la réponse mécanique observée. Dans le cadre du modèle étudié ici, on peut lister de manière exhaustive les formes sous lesquelles l'énergie peut être soit emmagasinée dans le système ou dissipée au sein de celui-ci. D'autres formes de dissipation peuvent exister, qui ne sont pas prises en compte dans notre modèle (par exemple l'énergie de rupture des particules) ; elles n'ont pas été listées ici.

2.1.3.1. Energie Cinétique

Pour une particule indiquée \mathbf{i} de volume V_i et de densité ρ_i , se déplaçant à une vitesse de translation v_i , de rotation ω_i et pour un moment d'inertie I_i , l'expression de l'énergie cinétique de cette particule est :

$$E_{c,i} = \frac{1}{2} \times V_i \times \rho_i \times v_i^2 + \frac{1}{2} \times I_i \times \omega_i^2 \quad \text{Equation 2-12}$$

2.1.3.2. Energie Potentielle Elastique

Si l'on ne considère qu'un seul contact sur une seule particule, à partir des raideurs inter-particulaires de contact, $\mathbf{k}_{n,i}$ et $\mathbf{k}_{s,i}$, et des forces de contact $\mathbf{F}_{n,i}$ et $\mathbf{F}_{s,i}$, l'énergie potentielle élastique ayant une valeur non négligeable, est alors déterminée comme suit:

$$E_{p,i} = \frac{1}{2} \times \frac{F_{n,i}^2}{k_{n,i}} + \frac{1}{2} \times \frac{F_{s,i}^2}{k_{s,i}} \quad \text{Equation 2-13}$$

Cette énergie traduit la déformation et donc le chevauchement des particules les unes par rapport aux autres. Elle représente l'énergie qui peut être restituée au niveau d'un contact lorsque la déformation du contact s'annule, c'est-à-dire lorsque le chevauchement des particules devient nul.

2.1.3.3. Energie Dissipée par Frottement

Le frottement est une source de dissipation de l'énergie : l'énergie est perdue de manière irréversible. L'incrément d'énergie dissipée par frottement ΔE_f au niveau du contact entre deux particules est exprimé comme suit:

$$\Delta E_f(t) = -F_{s,max}(t) \times \mathbf{u}_{s,p} \quad \text{Equation 2-14}$$

où $F_{s,max}$ représente l'effort maximal tangentiel de contact et $\mathbf{u}_{s,p}$ le glissement plastique d'une particule par rapport à l'autre.

2.1.3.4. Energie Potentielle de Pesanteur

Cette énergie résulte de la présence de forces de gravité. Pour une entité (particule ou mur) i doté d'une masse m_i , située à une hauteur z_i et soumise à un effort de pesanteur g , l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur est alors

$$E_{pen,i} = m_i \times g \times z_i \quad \text{Equation 2-15}$$

2.2. Paramètres du modèle

Nous présentons ici le modèle numérique établi en deux dimensions permettant de reproduire l'essai pénétrométrique en condition statique et en condition dynamique. Les essais de pénétration modélisés seront réalisés dans un échantillon délimité par des parois et constitué de particules cylindriques. On présente ici les paramètres physiques et mécaniques du modèle, les différentes procédures de la modélisation – génération de l'échantillon et la réalisation des essais de pénétration.

Le modèle rhéologique de contact retenu est présenté sur la **Figure 2-3**. En plus des paramètres physiques et géométriques, nous avons trois paramètres mécaniques de contact :

- les rigidités normale et tangentielle K^n et K^s ,
- le coefficient de frottement μ .

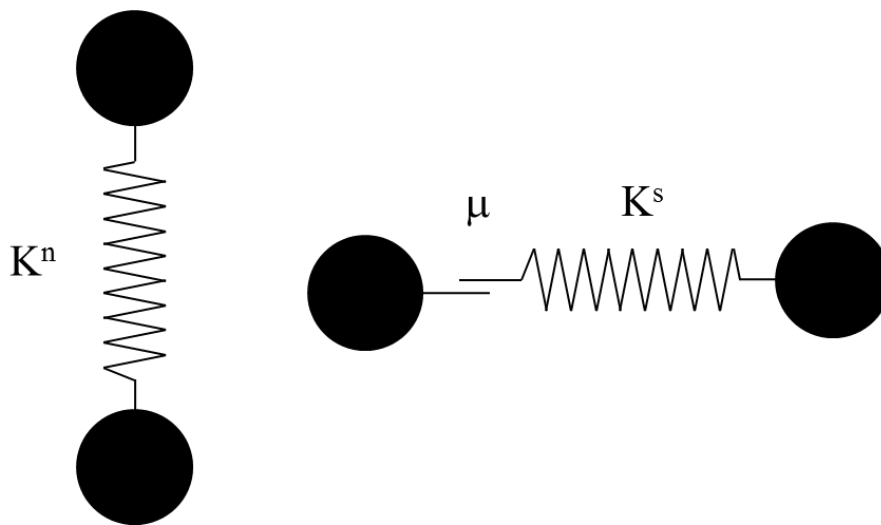


Figure 2-3. Modèle de contact linéaire

2.2.1. Paramètres physiques

Les particules constituant le matériau granulaire sont des cylindres. Les diamètres des particules sont également distribués entre les valeurs minimale D_{\min} et maximale D_{\max} , telles que $D_{\max}/D_{\min} = 2$, valeur pour laquelle le désordre est principalement d'ordre topologique (Voivret, 2008). Les valeurs effectives de tailles de particules dépendent de leur nombre rapporté à la surface de l'échantillon ; elles seront donc données au cas par cas. La densité des particules a été prise égale à $\rho = 2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2.2. Rigidité des particules

La rigidité des particules cylindres de longueur **4 mm** a d'abord été déterminée de façon à obtenir un niveau de rigidité de celles-ci de l'ordre de $\kappa \approx 10^3$ afin de garantir un ordre de grandeur proche du niveau de rigidité des géomatériaux (Combe, 2002). Le niveau de rigidité (κ) des particules est un paramètre adimensionnel qui permet de quantifier l'interpénétration moyenne h des particules par rapport au diamètre moyen de ces particules D_m (Combe, 2002):

$$\kappa = \frac{D_m}{h} \quad \text{Equation 2-16}$$

Par ce paramètre adimensionnel, il est possible de comparer le niveau de déformation des particules entre essais expérimentaux et modélisations numériques, notamment. D'après (Combe, 2002), le niveau de rigidité peut s'exprimer en fonction du niveau de pression isotrope P subi par l'échantillon, de la rigidité du contact K^n et de la longueur L des particules cylindriques :

$$\kappa = \frac{K^n}{LP} \quad \text{Equation 2-17}$$

Pour des particules cylindriques de **4 mm** de longueur ayant une rigidité normale égale à $k_n = 1 \text{ MN.m}^{-1}$, on obtient une rigidité normale de contact $K^n = 0.5 \text{ MN.m}^{-1}$ (Equation 2-17).

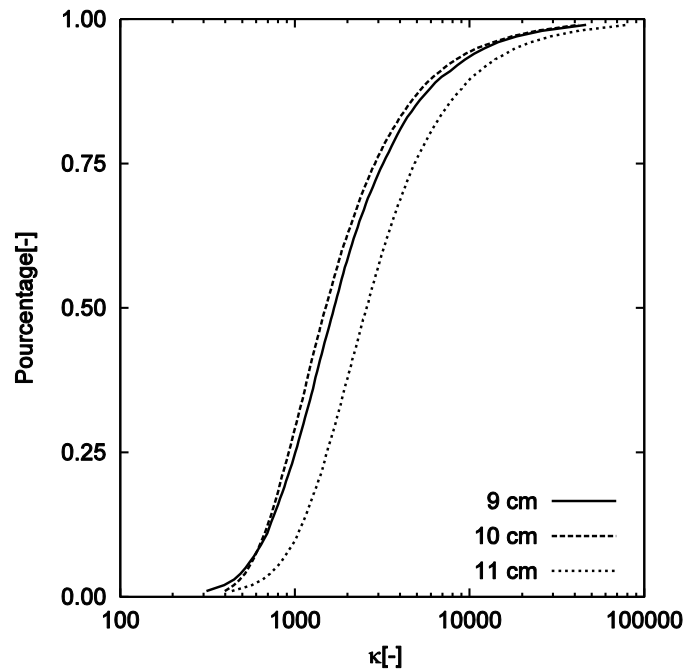


Figure 2-4. Fonction de distribution du niveau de rigidité mesuré lors d'un essai de pénétration statique avec une rigidité normale $K^n = 0.5 \text{ MN.m}^{-1}$.

Si on considère que l'on réalise un essai pénétrométrique à une profondeur de **2.00 m** dans un sol de poids volumique 20 kN.m^{-3} , on peut estimer le niveau de pression isotrope au repos inférieur à **40 kPa**, soit un niveau de rigidité des particules au repos $\kappa \approx 3\ 000$.

En ce qui concerne la rigidité tangentielle des particules k_t , (Shäfer, Dippel, & Wolf, 1996) préconise une valeur de **0.75 k_n** . De plus, (Combe, 2002) a montré que le comportement mécanique sous chargement biaxial en conditions quasi-statiques n'est pas influencé par la valeur de k_t dès lors que le rapport k_t / k_n est compris entre **0.5** et **1.0**. La valeur de $k_t = 0.75 \text{ MN.m}^{-1}$ a été choisie.

Le niveau de rigidité a été contrôlé sous sollicitation rapide, lors d'un essai de pénétration statique à vitesse **1250 mm.s⁻¹** aux différentes profondeurs. La **Figure 2-4** montre la distribution des valeurs du rapport entre interpénétration et diamètre des particules aux trois

profondeurs différentes **9, 10 et 11 cm**. La valeur médiane de ce rapport est alors de **1 000** et sa moyenne de est de **5 000**.

2.2.3. Nombre inertiel

D'après (*Roux & Chevoir, 2005*), le rapport des échelles de temps imposées par la sollicitation de vitesse $\dot{\epsilon}$ et associées à la dynamique des grains de masse m soumis à des forces d'ordre Pd définit le nombre d'inertie :

$$I = \dot{\epsilon} \sqrt{\frac{m}{PD_m}} = \frac{V}{H} \sqrt{\frac{m}{PD_m}} \quad \text{Equation 2-18}$$

Avec

- V est la vitesse de l'enfoncement
- H est la hauteur de l'échantillon
- $\dot{\epsilon}$ est la vitesse de déformation imposée aux particules
- m est la masse moyenne de particule
- D_m est le diamètre moyen de particule
- P est la pression appliquée par confinement

Pour des valeurs de I inférieures à 10^{-3} , on pourra considérer que la sollicitation est quasi-statique et donc que le matériau granulaire se comporte comme un solide élasto-plastique. Pour des valeurs de I comprises entre 10^{-3} et 10^{-1} , le matériau se comportera plutôt comme un liquide viscoplastique et au-delà ($I > 10^{-1}$) comme un gaz (régime de collision).

Dans le cas de l'essai de pénétration, il n'est pas trivial de définir une vitesse de déformation, étant donné la nature de la sollicitation. Cependant, étant donné que seul l'ordre de grandeur du nombre inertiel est intéressant, la vitesse de déformation a été prise égale au rapport entre la vitesse de la tige V durant l'essai et la hauteur H de l'échantillon. Ainsi, on a

$$I = \frac{V}{H} \sqrt{\frac{m}{PD_m}} \quad \text{Equation 2-19}$$

Pour un essai de pénétration statique à vitesse d'enfoncement de **1250 mm.s⁻¹**, on obtient une valeur de nombre d'inertie égale à $I = 4.14 \times 10^{-3}$. C'est-à-dire qu'à cette vitesse ($I > 10^{-3}$), le comportement des particules peut être considéré comme un écoulement dense. Par contre, on parlera également l'essai en condition «statique» pour les essais de pénétration où la vitesse d'enfoncement est toujours constante pendant l'essai mais beaucoup plus grande que celle préconisée dans les normes d'essais (**20 ± 5 mm.s⁻¹**) (*EN ISO 22476-1, 2007*).

Afin de décrire raisonnablement le phénomène du problème modélisé, le pas de temps choisi doit être inférieur à un pas de temps critique (*Cundall & Strack, 1979*). Le pas de temps utilisé ici est égal à **10 %** du pas de temps critique.

2.2.4. Coefficient de frottement des particules

L'essai de pénétration dynamique par battage repose sur l'injection d'une quantité d'énergie non négligeable dans le sol. Le système étudié va devoir être capable de dissiper cette énergie dans une échelle de temps compatible avec la réalisation des calculs, c'est-à-dire assez rapidement. De plus, étant donné sa nature artificielle et son influence potentielle sur le comportement, il a été fait le choix délibéré de ne considérer aucun amortissement local dans la modélisation. Enfin, le comportement de particules cylindriques a tendance à privilégier le roulement des particules les unes sur les autres sans glissement ; ceci représente un facteur supplémentaire pouvant réduire le frottement global dans l'échantillon.

Pour l'ensemble de ces raisons, le coefficient de frottement a été délibérément choisi avec une valeur élevée $\mu = 1.0$, correspondant à un angle de frottement local de **45**. L'influence de ce coefficient de frottement sur la réponse sera étudiée dans le **chapitre 6**.

2.2.5. Propriétés des parois

Les propriétés des parois, qui forment les conditions aux limites de l'échantillon, sont données par leur rigidité et leur coefficient de frottement. La rigidité des parois fait l'objet d'une étude paramétrique spécifique détaillée dans le **Chapitre 3**. Le coefficient de frottement des parois latérales et de la paroi inférieure est pour sa part pris égal à **0.0**. Cette valeur permet de s'affranchir d'éventuels effets d'arche pouvant perturber la nature du chargement.

2.3. Création de l'échantillon

La procédure de création d'un assemblage de particules a une influence importante sur son comportement mécanique. En effet, le comportement mécanique dépend de la nature de l'assemblage – densité du réseau de contact, orientation de ces contacts, imbrication des particules... – et celle-ci est fortement dépendante de la procédure adoptée pour la création de l'assemblage. (Agnolin & Roux, 2007) ont mis en évidence la complexité des relations qui existent entre procédure de mise en place d'échantillon et propriétés mécanique des assemblages.

Dans le cas présent, la création de l'échantillon se fait en 3 étapes successives (**Figure 2-5**):

- on opère un grossissement progressif des particules sans frottement et sans gravité jusqu'à atteindre la valeur minimale de la porosité,
- le diamètre des particules est ensuite très légèrement diminué pour relâcher les contraintes dans l'échantillon,
- la valeur définitive du coefficient de frottement est appliquée aux contacts ainsi que la gravité aux particules ; l'échantillon est alors stabilisé,
- une pression de confinement est appliquée sur la surface supérieure de l'échantillon par l'intermédiaire d'une paroi horizontale.

La pression de confinement appliquée en surface supérieure de l'échantillon est équivalente, en terme d'intensité, à une surépaisseur de matériau égale à **1.80 m**, soit environ **40 kPa**. Elle est mise en œuvre pour plusieurs raisons:

- pour s'affranchir des effets de surface que l'on observe traditionnellement lors des essais de pénétration (**Figure 2-5**) et qui sont associés à l'existence d'une profondeur critique,
- pour réduire le nombre de particules à modéliser.

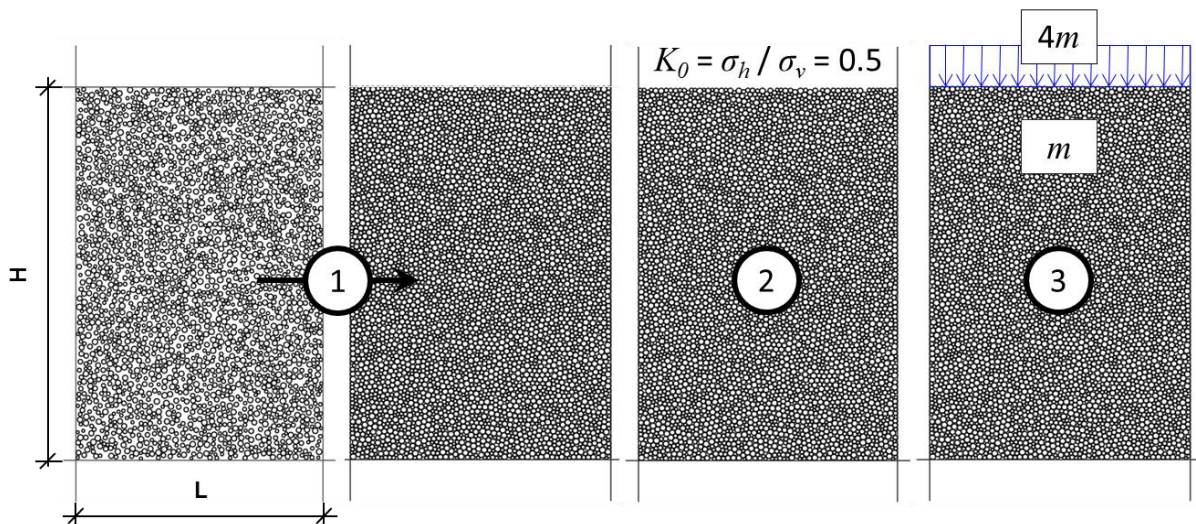


Figure 2-5. Création d'échantillon : 1 - expansion; 2 - relâchement des contraintes pour obtenir un $K_0 = 0,5$; 3 - mise en place du confinement vertical.

A l'issue de ces étapes, les échantillons générés présentent un rapport de contraintes horizontales sur verticales **$K_0 = 0.5$** .

Etant donné que l'on souhaite que la paroi supérieure modélise une couche fictive de particules qui se situerait au-dessus de l'échantillon, un coefficient de frottement μ égal à **1.0** a été attribué à la paroi afin de limiter les réarrangements des particules à son contact.

2.4. Procédure de l'essai de pénétration

Les essais de pénétration sont réalisés par enfoncement dans l'échantillon d'une tige d'un diamètre de **14 mm** munie d'une pointe « conique » de diamètre **16 mm** et d'angle d'ouverture de **90°** (Figure 2-6). La masse de l'ensemble formé par la tige et la pointe est de **0.5 kg**.

Le coefficient de frottement entre les particules et la tige est nul afin d'éliminer tout frottement latéral parasite qui peut perturber la propagation de l'onde (Escobar et al., 2013). Le coefficient de frottement entre les particules et la pointe est égal à $\mu_{\text{pointe}} = 0.3$. L'essai de pénétration est réalisé soit par enfoncement de la tige statique soit par battage (Figure 2-6).

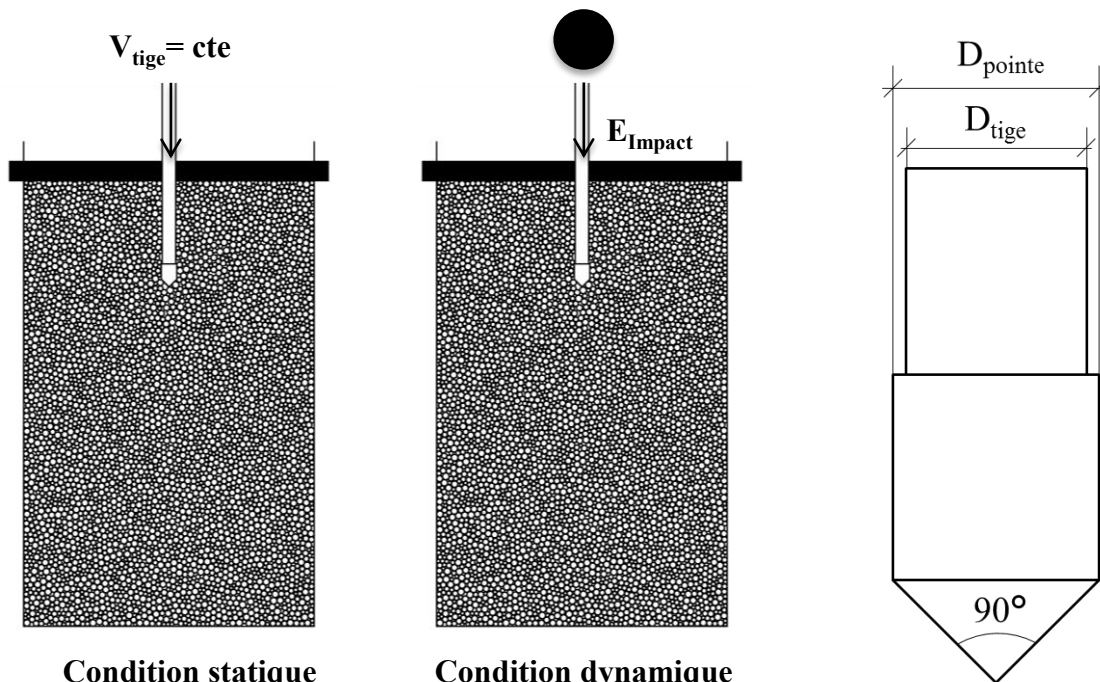


Figure 2-6. Modèles numériques de pénétration statique et dynamique et détail de la pointe.

2.4.1. Essai en condition statique

Pour les essais réalisés statique, on parlera ici d'essai en condition « statique », par analogie aux essais de pénétration statiques. La vitesse d'enfoncement est toujours constante pendant l'essai.

2.4.2. Essai en condition dynamique

Pour les essais réalisés par battage, on parlera d'essais en condition « dynamique ». Le battage est modélisé par une bille qui tombe sur la tige et transmet une énergie cinétique à celle-ci pour chaque essai de pénétration dynamique.

2.5. Synthèse des paramètres du modèle

La **Figure 2-7** représente les paramètres utilisés dans le modèle avec un échantillon de **30 cm** de largeur et de **45 cm** d'hauteur.

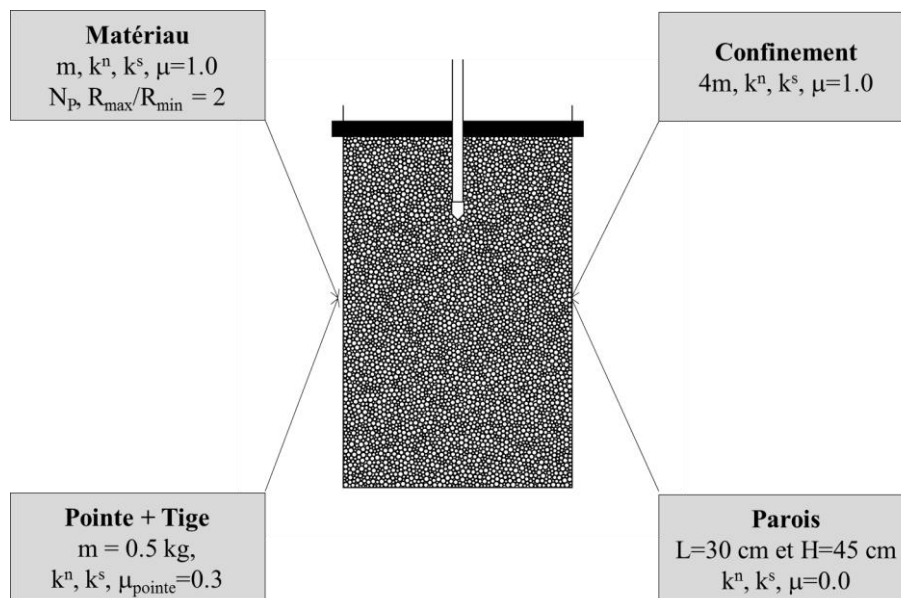


Figure 2-7. Paramètres du modèle.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle numérique en deux dimensions basé sur la dynamique moléculaire proposé par (*Cundall & Strack, 1979*) a été développé pour reproduire les essais de pénétration. La mise en place d'un assemblage des particules cylindriques de longueur **4 mm** se fait par la méthode d'expansion. Le rapport entre diamètres extrêmes des particules est de **2** avec une distribution uniforme des rayons. Le modèle de contact est un modèle linéaire de rigidités normale et tangentielle valant respectivement $\mathbf{k_n} = 10^6 \text{ N.m}^{-1}$ et $\mathbf{k_s} = 0,75.10^6 \text{ N.m}^{-1}$ (ces valeurs sont à rapporter à la longueur des cylindres). Aucun amortissement visqueux ni amortissement local n'a pas été utilisé. Une loi de frottement de type Coulomb de coefficient $\boldsymbol{\mu} = 1.00$ a été considérée. Le pas de temps utilisé est égal à **10 %** du pas de temps critique. Tous ces paramètres sont identifiés dans la section **2.2**.

Avec ce modèle, une étude de sensibilité du modèle à la vitesse de l'enfoncement constante et en fonction de la rigidité des parois sera analysée dans le **Chapitre 3** pour choisir une taille d'échantillon optimisée.

Et puis, le **Chapitre 4** sera consacré à l'étude à l'échelle macroscopique de l'influence de la vitesse d'enfoncement de la tige et du mode de sollicitation sur la force de pointe pour les essais de pénétration statique et dynamique.

Ensuite, l'essai de pénétration statique et dynamique sera analysé à l'échelle microscopique en vue de mieux comprendre le mécanisme de pénétration et de tenter d'expliquer les résultats présentés dans le **Chapitre 5**.

Enfin, l'influence des paramètres caractérisés l'assemble des particules tels que : la granulométrie, la compacité ou le coefficient de frottement entre les particules ($\boldsymbol{\mu}$),... sur l'essai de pénétration dynamique sera étudié au **Chapitre 6**.

Chapitre 3 : Essais de pénétration en conditions statique et dynamique

Ce chapitre présente tout d'abord les premiers résultats permettant de valider le modèle numérique proposé dans le chapitre précédent en termes de reproduction des essais de pénétration statique et lente 25 mm.s^{-1} (**section 3.1.1**)

Pour l'essai de pénétration statique, une étude de sensibilité du modèle à la vitesse et en fonction de la rigidité des parois sera analysée pour choisir une taille d'échantillon optimisée (**section 3.1.2**). Et puis, le confinement appliqué sur la surface libre de l'échantillon sera aussi validé (**section 3.1.3**).

Pour l'essai de pénétration dynamique, la possibilité de modélisation de l'essai de pénétration dynamique sera abordée dans la **section 3.2**.

Finalement, la fin du chapitre (**section 3.3**) sera consacrée à, une étude de la dissipation d'énergie au cours de l'essai de pénétration. Cette dissipation sera analysée sur la base de l'utilisation d'un modèle de contact linéaire sans aucun amortissement ni visqueux ni local dans lequel l'énergie injectée ne peut être dissipée ou emmagasinée que dans le système.

Conditions limites					
N°	L [cm]	H [cm]	$\frac{k_N^p}{k_N^w}$ [-]	N_p [-]	Confinement
3001	30	45	1	5 000	Avec
3002	30	45	100	5 000	Avec
6001	60	45	1	10 000	Avec
6002	60	45	100	10 000	Avec
60225	60	225	100	50 000	Sans

Tableau 3-1. Configurations testées pour différentes conditions limites

Le **Tableau 3-1** représente les **5** configurations proposées ci-dessous pour les études dans le **Chapitre 3** :

- 1^{ème} configuration, appelé « **3001** » : le ratio de rigidité entre des particules et des murs $\frac{k_N^p}{k_N^w}$ est égale à **1**,
- 2^{ème} configuration, appelé « **3002** » : diminution de la rigidité des parois, avec un rapport entre la rigidité des particules et celle des murs est égal à **100**,
- 3^{ème} configuration, « **6001** » : augmentation de la largeur du moule de **30 cm** à **60 cm** avec un ratio $\frac{k_N^p}{k_N^w} = 1$,
- 4^{ème} configuration « **6002** » : combinaison des deux solutions précédentes. On utilise une largeur de moule égale à **60 cm** avec une faible rigidité des parois $\frac{k_N^p}{k_N^w} = 100$,

- 5^{ème} configuration « **60225** » : un échantillon de **225 cm** de hauteur et de **60 cm** de largeur a été créé avec une faible rigidité des parois $\frac{k_N^p}{k_N^w} = 100$.

L'essai de pénétration statique (ou dynamique) est réalisé sur un seul assemblage à l'état plus dense pour toutes les **5** configurations ci-dessus. La porosité minimale est égale à **0.15**. Le diamètre de particule est choisi aléatoire par la distribution uniforme entre les diamètres extrémités ($D_{max}/D_{min} = 2$). Le frottement entre les particules est égale **1.0**. Par exemple, l'échantillon **3001** de largeur **0.30 m** et de hauteur **0.45 m** constitue de **5 000** particules avec un diamètre moyen de particule $D_{moy} = 5.27 \text{ mm}$.

3.1. Essai en condition statique

3.1.1. Essai à vitesse lente

L'essai en condition statique présenté ici a été réalisé sur la configuration **3001** avec **3** échantillons **S₁, S₂, S₃** possédant les mêmes caractéristiques physiques et mécaniques et avec une vitesse d'enfoncement de la tige égale à **20 mm.s⁻¹** comme le préconise les normes d'essais (*EN ISO 22476-1, 2007*).

Dans le modèle, la force de pointe est décrite par la formule suivante :

$$F_c = \sum_{i=1}^{N_c} (F_{Ni} \times \vec{n}_{Ni} + F_{Ti} \times \vec{n}_{Ti}) \times \vec{e}_y \quad \text{Equation 3-1}$$

Avec

- F_c [N] : Force de pointe,
- N_c [-] : Nombre de contact autour de la pointe,
- F_{Ni} [N] : Force normale de contact i ,
- F_{Ti} [N] : Force tangentielle de contact i ,
- $(\vec{n}_{Ni}, \vec{n}_{Ti})$: Vecteurs unitaires normal et tangentiel de contact i ,
- \vec{e}_y : Vecteur unitaire vertical.

La **Figure 3-1** (à gauche) montre l'évolution de la force de pointe F_c entre **0 cm** et **30 cm** de profondeur obtenue pour l'échantillon **S₁**. On trouve que la force de pointe F_c est stable en fonction de la profondeur et ce dès le début de la pénétration : on n'observe pas d'effet de surface lié à la profondeur critique. Cela était attendu puisque l'on a mis en place un confinement de l'échantillon pour s'affranchir de ce phénomène.

Les densités de probabilité des valeurs de F_c sont déterminées entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur pour les **3** échantillons afin de limiter les effets des conditions limites. La **Figure 3-1** (à droite) montre une bonne répétabilité de l'essai de pénétration en condition statique. Les valeurs moyennes de F_c obtenues pour les **3** échantillons sont très similaires de l'ordre de **34.5 ± 3.4 N**.

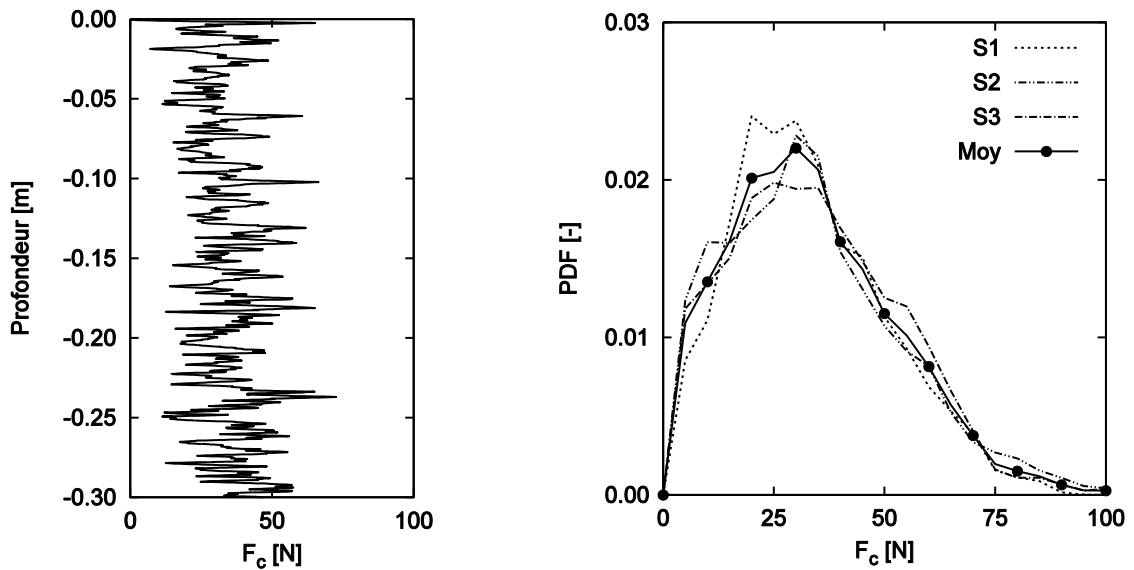


Figure 3-1. Evolution de la force de pointe F_c en fonction de la profondeur pour l'échantillon S1 (à gauche) et densité de probabilité de F_c en condition statique pour 3 échantillons (à droite) (pour une vitesse d'enfoncement de 20 mm.s^{-1}).

3.1.2. Essai à vitesse rapide

Afin de choisir une taille d'échantillon optimisée donnant des résultats stables, sous des sollicitations plus rapides notamment, des essais dans les 3 échantillons précédents ont été réalisés avec une vitesse d'enfoncement de la tige égale à 1250 mm.s^{-1} sur échantillon 3001.

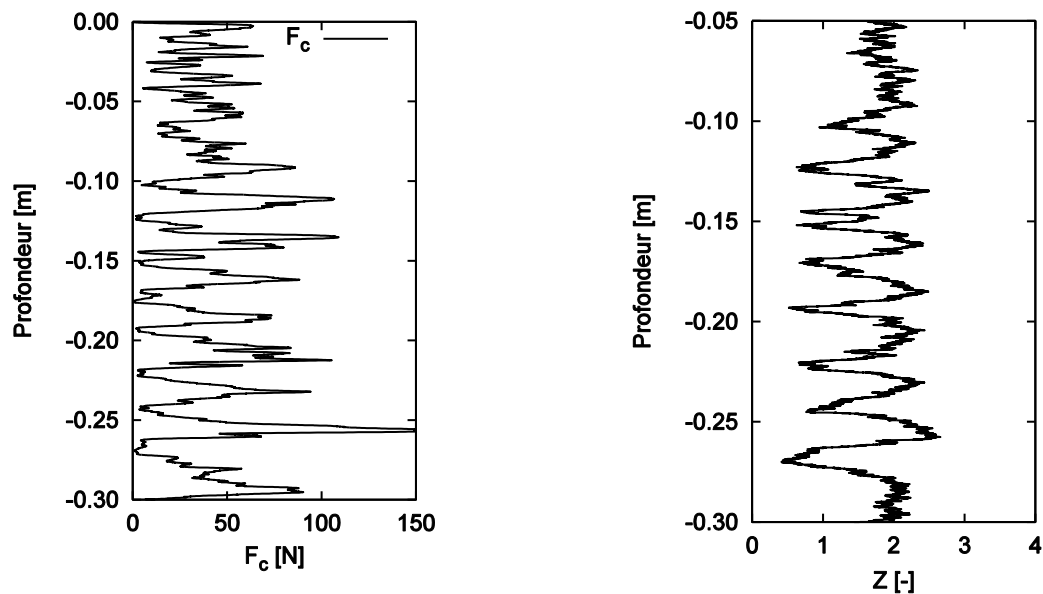


Figure 3-2. Evolution de la force de pointe F_c en fonction de la profondeur pour un essai pénétration en condition statique de 1250 mm.s^{-1} de vitesse de tige (à gauche) et évolution du nombre de coordination dans une zone rectangulaire de $5 \times 5 \text{ cm}$ autour de la pointe (à droite).

La Figure 3-2 montre la force de pointe F_c en fonction de la profondeur obtenue avec cette valeur de vitesse de 1250 mm.s^{-1} . On remarque qu'il y a un effet d'oscillation pour une profondeur supérieure à 10 cm . La Figure 3-2 montre l'évolution du nombre de coordination

dans une zone de $5 \times 5 \text{ cm}$ centrée sur la pointe en fonction de la profondeur. On constate que le nombre de coordination chute à 10 cm de profondeur puis oscille. Il existe donc un effet d'oscillation dans cet échantillon de $30 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ lorsque l'essai de pénétration est réalisé à grande vitesse par rapport à un essai où la vitesse utilisée correspond à celle préconisée dans les normes de pénétration statique. Afin de mieux comprendre ce phénomène, le champ des contraintes principales majeures des particules est représenté dans l'intervalle de profondeur 14 cm à 15 cm avec également les valeurs de force en pointe mesurées sur cet intervalle (Figure 3-3).

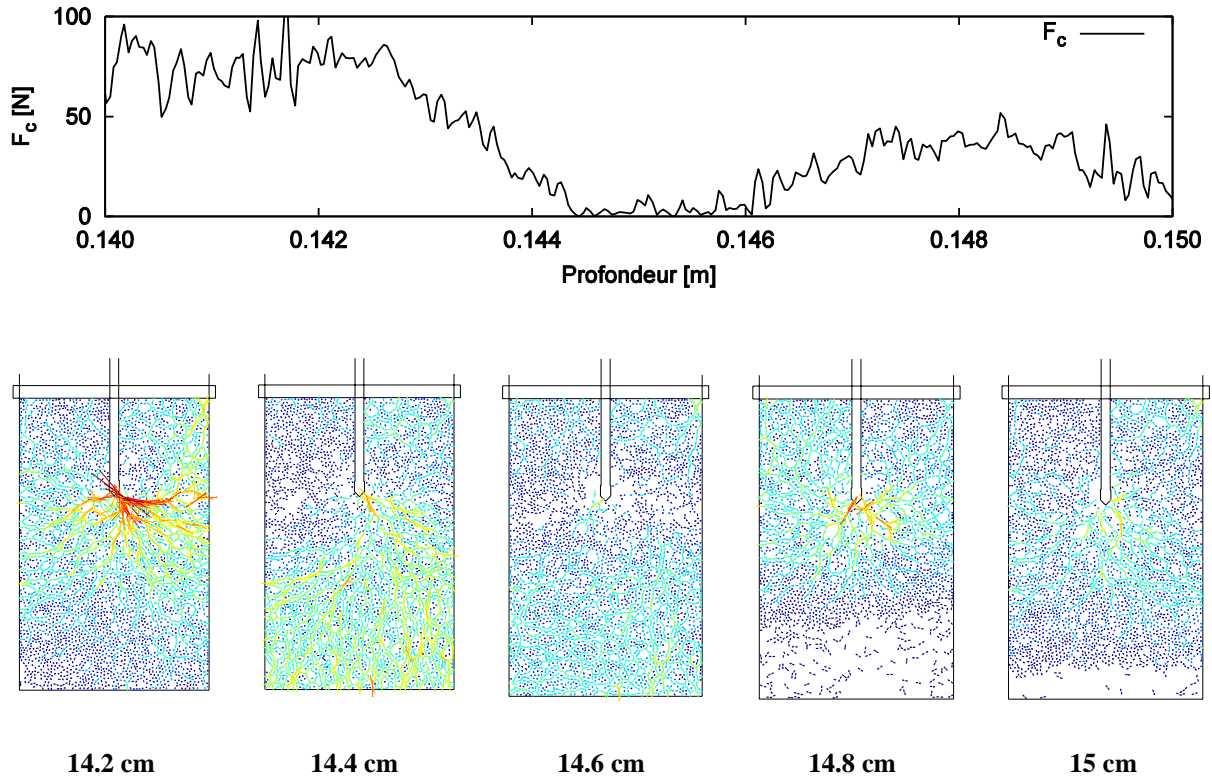


Figure 3-3. Contraintes principales majeures des particules lors d'une oscillation (entre 14 et 15 cm de profondeur).

Pour chaque particule, la contrainte principale majeure (σ_m) et sa direction principale (θ) sont données par les formules suivantes :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + (\sigma_{xy})^2} \quad \text{Equation 3-2}$$

$$\tan(2\theta) = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \quad \text{Equation 3-3}$$

Avec :

- σ_{ij} : Les composantes de la matrice de contrainte pour particule donné,

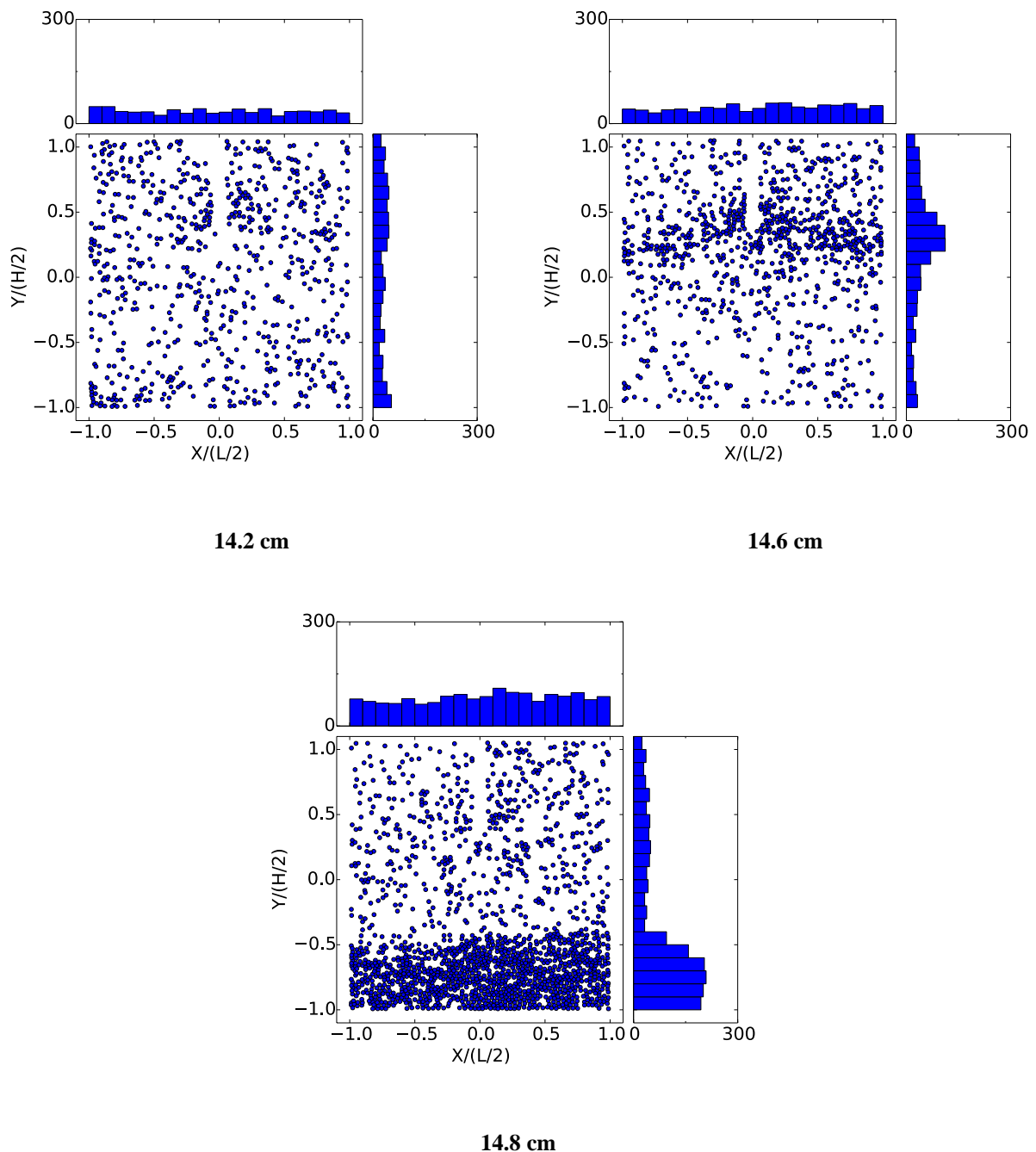


Figure 3-4. Distribution des particules sans contact de l'ensemble de l'échantillon pour les profondeurs de 14.2, 14.6 et 14.8 cm.

Pour **14.2 cm** de profondeur, de nombreuses chaînes de force relient les particules les unes aux autres autour de la pointe : la force de pointe F_c est assez élevée. Au contraire, quand les contacts autour de la pointe n'existent plus, à **14.6 cm** de profondeur par exemple, la force de pointe F_c diminue. La **Figure 3-4** présente la distribution des particules ne possédant aucun contact pour trois instants où la force de pointe F_c est élevée (**14.2 cm**), faible (**14.6 cm**) et moyenne (**14.8 cm**). On observe que la force de pointe F_c est influencée par les particules possédant aucun contact qui sont présentes dans le voisinage de la pointe. Par exemple, il y a nombreux particules sans contact se situant autour de la pointe pour la profondeur égale à

14.6 cm. En plus, on remarque que lors de l'oscillation, il y a un ensemble de particules ne possédant aucun contact qui se situe en partie basse de l'échantillon.

Du fait de la présence de cet effet d'oscillation, une étude de sensibilité du modèle est proposée en vue de s'en affranchir. Les **4** configurations proposées **3001**, **3002**, **6001** et **6002** ont été étudiées pour tenter de diminuer ou supprimer les oscillations observées dans le modèle à grande vitesse de pénétration (**Tableau 3-1**). Pour chaque configuration, un essai est effectué par échantillon pour trois échantillons **S₁**, **S₂**, **S₃** à grande vitesse d'enfoncement (**1250 mm.s⁻¹**).

Le **Tableau 3-2** montre la force de pointe moyenne obtenue entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur pour les **4** modèles testés. On note une augmentation de la force de pointe moyenne avec l'augmentation de la largeur du moule mais que le changement de la rigidité des parois influence très peu la force de pointe **F_c**. Par contre, le changement de la rigidité des parois permet de diminuer l'écart-type de la résistance lorsque le ratio $\frac{k_V^p}{k_N^w}$ diminue. Concernant l'effet de la largeur du moule, plus celle-ci augmente, plus la force de pointe et l'écart-type sont stables.

En plus, la **Figure 3-5** montre la densité de probabilité des valeurs de forces de pointe **F_c** pour les **4** modèles. On voit bien que la distribution de la force de pointe **F_c** tend à suivre une loi normale depuis le modèle **3001** jusqu'au modèle **6002**.

Ainsi, le modèle **6002** semble représenter la meilleure des **4** solutions proposées : l'essai de pénétration à grande vitesse dans ce moule présente une bonne stabilité en termes de force de pointe **F_c**.

	Vitesse (mm.s ⁻¹)	F _{cm} (N)	ΔF _{cm} (N)
3001	1250	37.60	10.80
3002	1250	38.10	7.98
6001	1250	44.30	6.88
6002	1250	45.46	4.04

Tableau 3-2. Force de pointe moyenne entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur **F_{cm}** et écart type obtenus pour les **4** configurations à une vitesse de **1250 mm.s⁻¹** pour trois échantillons.

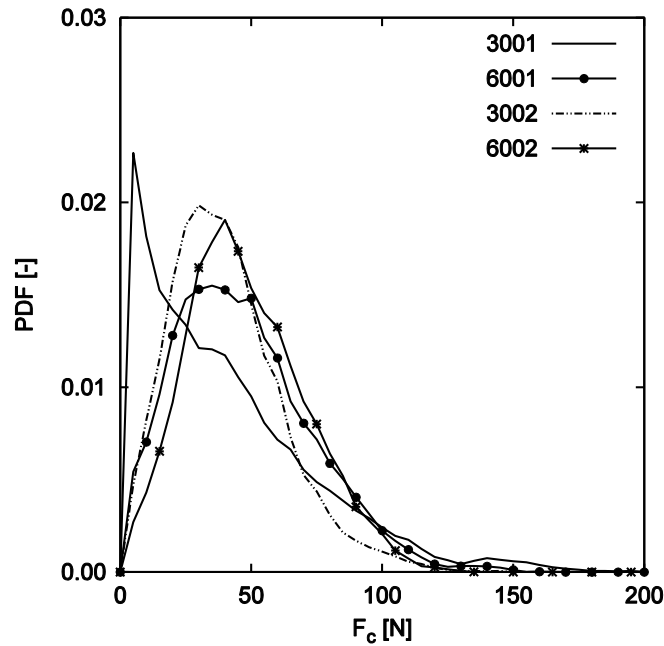


Figure 3-5. Probabilité de densité de F_c pour les 4 configurations.

Les **Figure 3-6** et **Figure 3-7** montrent les signaux pénétrométriques obtenus en fonction de la profondeur pour les 4 modèles et pour une vitesse d'enfoncement égale à 1250 mm.s^{-1} . On constate que le signal pénétrométrique se stabilise (moins d'oscillations et variations moins importantes) avec la profondeur quand la rigidité des parois est faible. Ainsi, l'effet d'oscillation diminue quand la rigidité des parois est faible et c'est la raison pour laquelle la dispersion des valeurs de forces de pointe F_c diminue quand la rigidité des parois diminue.

Concernant l'effet de la largeur du moule, les **Figure 3-8** et **Figure 3-9** montrent les pénétrographes obtenus pour les 4 modèles à vitesse d'enfoncement égale 1250 mm.s^{-1} . On remarque sur la **Figure 3-8** que les pénétrographes obtenus avec les modèles **3001** et **6001** présentent une même période d'oscillation à partir de **15 cm** de profondeur. De plus, la valeur moyenne de force de pointe F_c entre **5cm** et **30 cm** de profondeur augmente quand la largeur du moule augmente. Le pénétrogramme obtenu avec le modèle **6002** est stable lorsque la profondeur augmente. Il n'existe pas d'effet d'oscillation même si on utilise une grande vitesse d'enfoncement.

Ainsi, la configuration **6002** représente une bonne solution pour réduire la présence d'oscillations du signal de force de pointe pour les grandes vitesses d'enfoncement dues aux conditions limites de l'échantillon.

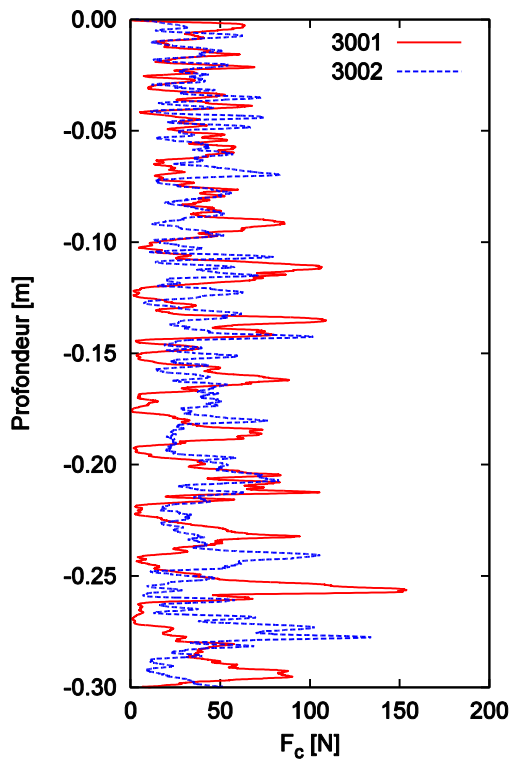


Figure 3-6. Signal pénétrométrique pour les modèles 3001 et 3002.

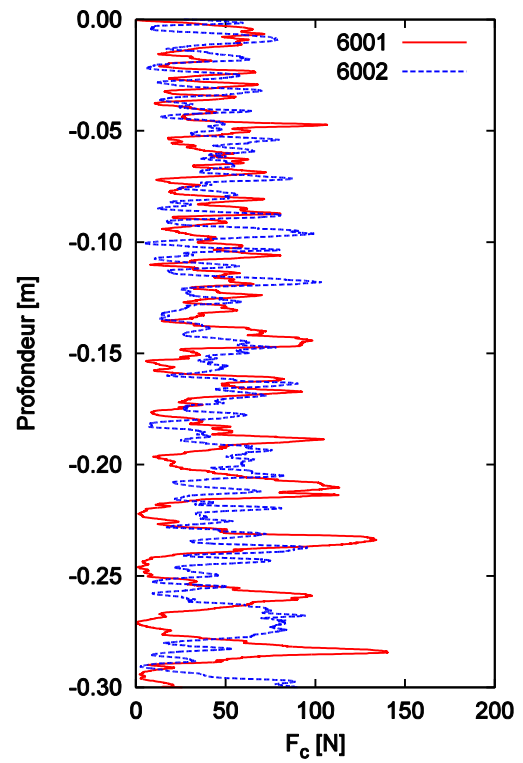


Figure 3-7. Signal pénétrométrique pour les modèles 6001 et 6002.

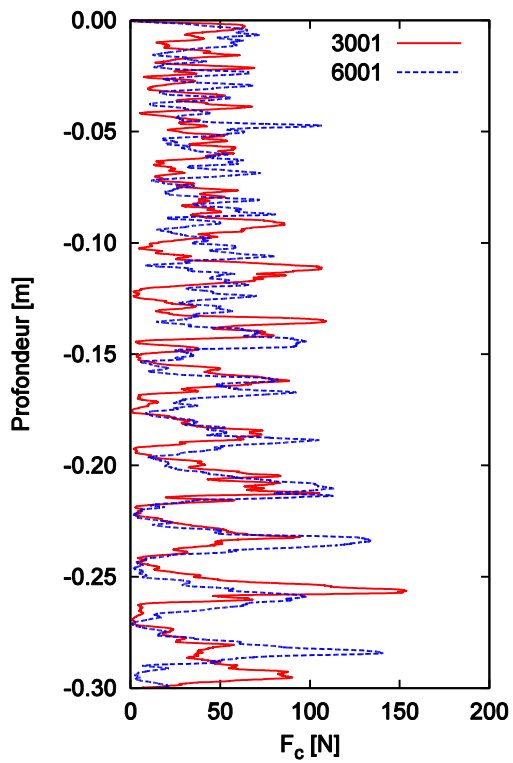


Figure 3-8. Signal pénétrométrique pour les modèles 3001 et 6001.

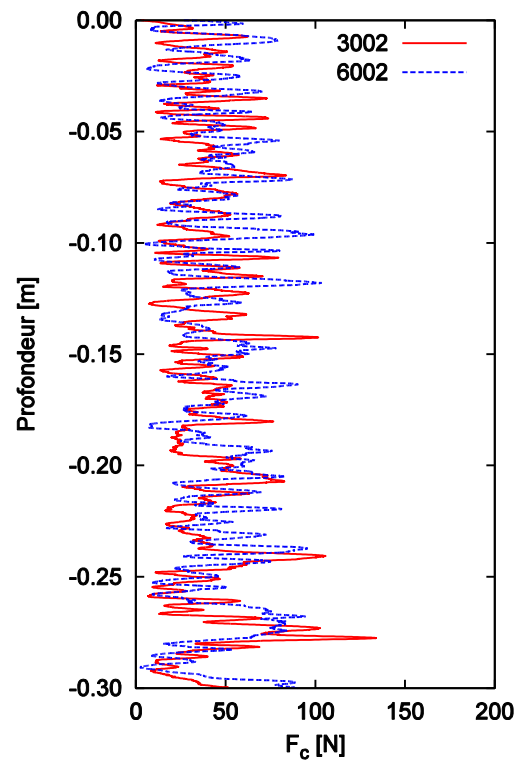


Figure 3-9. Signal pénétrométrique pour les modèles 3002 et 6002.

3.1.3. Validation du confinement

Après avoir choisi la taille de l'échantillon pour diminuer l'influence des conditions limites, on va s'attacher à valider le confinement appliqué en surface supérieure de l'échantillon. Pour ce faire, on va comparer le pénétrogramme et la probabilité de densité de la force de pointe F_c en utilisant deux configurations, d'une part avec confinement – **6002** et d'autre part sans confinement – **60225**. Les deux configurations seront utilisées pour effectuer les essais de pénétration statique à grande vitesse à 1250 m.s^{-1} pour un seul échantillon S_1 .

La **Figure 3-10** représente le pénétrogramme et la densité de probabilité pour les deux configurations à la profondeur similaire (entre **5** et **30 cm** de profondeur pour la configuration **6002** et entre **185** et **210 cm** de profondeur pour la configuration **60225**. Puisque la pression de confinement utilisée est équivalente à une surépaisseur de matériau égale à **1.80 m**. On observe que la force de pointe moyenne F_c est similaire (de l'ordre **45 N**).

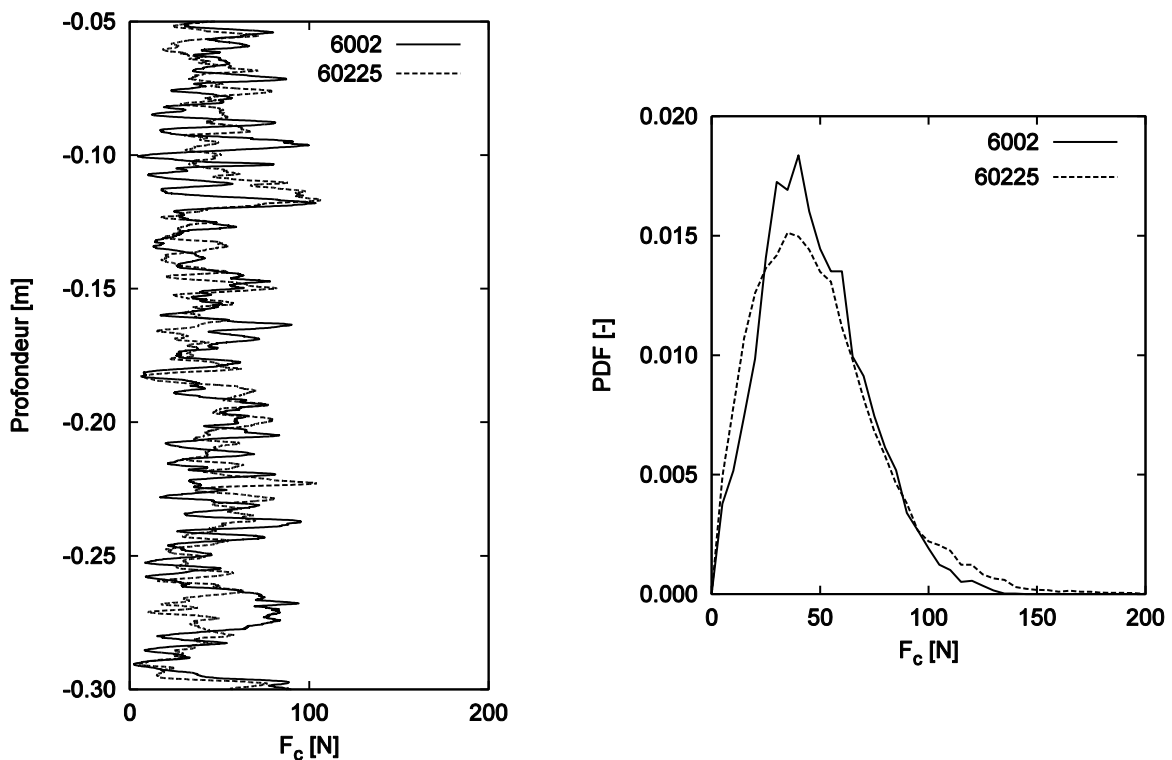


Figure 3-10. Pénétrogrammes et densité de probabilité pour les configurations 6002 et 60225.

Ainsi, la configuration **6002** nous permet de bien reproduire l'essai de pénétration statique afin d'obtenir la force de pointe stable à la profondeur lors que la tige est passée à la profondeur critique. De plus, le temps de calcul diminue grâce à la diminution du nombre de particule en utilisant la configuration **6002** par rapport à celle sans confinement **60225**.

Pour la suite de l'étude, la configuration **6002** avec la largeur du moule égale **60 cm** et une faible rigidité des murs sera utilisée.

3.2. Essai en condition dynamique

Pour la réalisation des essais de pénétration en condition dynamique, la tige est d'abord enfoncée à une vitesse constante de 1250 mm.s^{-1} jusqu'à une profondeur de **15 cm**. Après stabilisation de la tige sous son poids propre, un impact est réalisé avec une particule de masse de **0.5 kg** heurtant la tige avec une vitesse incidente de 1250 mm.s^{-1} . Sur la **Figure 3-11**, on trouve que la durée totale de l'impact entre l'impactant et la tige est de l'ordre de $t_{\text{impact}} = 2 \text{ ms}$. La vitesse de l'impactant après l'impact est nulle pour le ratio de masse entre l'impactant et la tige m_i/m_{tige} égal à **1.0** (**Figure 3-12**).

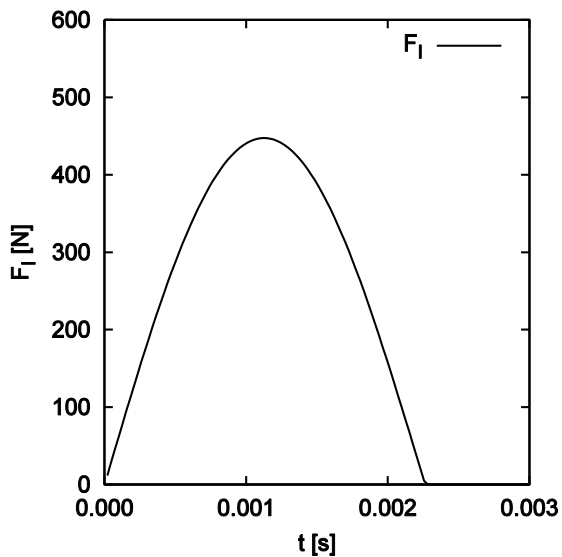


Figure 3-11. Force d'impact F_I en fonction du temps.

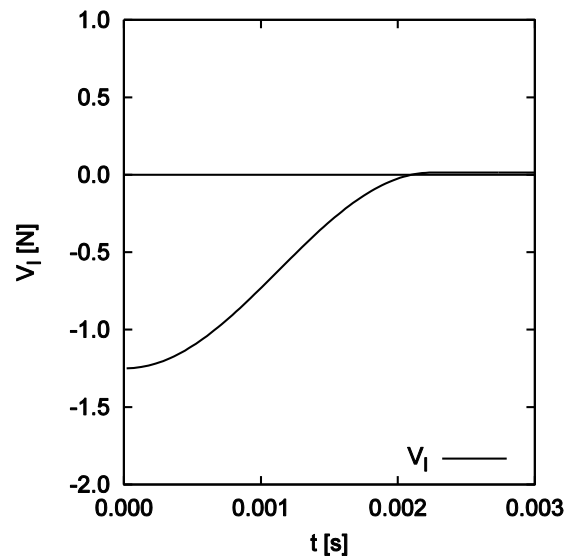


Figure 3-12. Vitesse de l'impactant V_I en fonction du temps.

La **Figure 3-13** montre l'évolution de la force verticale sur la pointe en fonction de l'enfoncement de celle-ci. Qualitativement, la forme de la réponse obtenue est conforme à ce qui peut être classiquement observé expérimentalement.

La réponse mécanique se compose d'une première phase de montée en charge rapide correspondant à l'augmentation initiale de la vitesse de la tige. Dans un second temps, l'effort sur la tige reste positif pendant l'enfoncement de la tige jusqu'à sa pénétration maximale. Enfin, on observe une phase de déchargement-rechargement correspondant à la stabilisation de la tige autour d'une position d'équilibre finale.

Parallèlement, la variation de la vitesse de la tige en fonction du déplacement est montrée **Figure 3-14**. La vitesse maximale de la tige après impact est de 1180 mm.s^{-1} . Cette valeur est inférieure à la vitesse au début de l'impact à cause de la dissipation ayant lieu entre le début de l'impact et le moment où la vitesse maximale de la tige est mesurée.

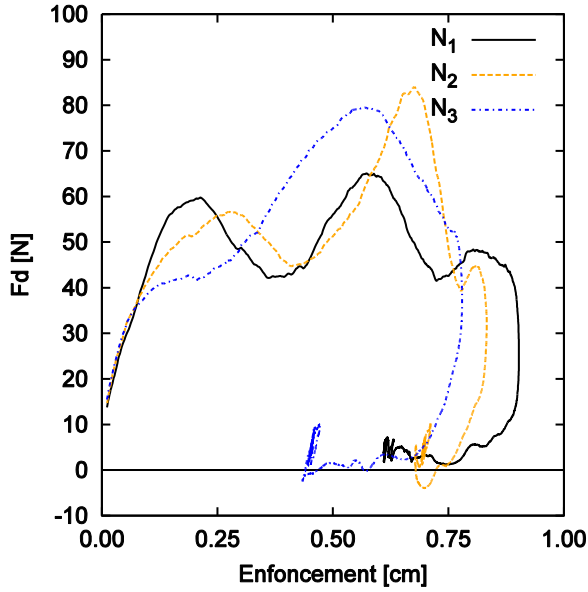


Figure 3-13. Force opposée à la pointe en fonction de l'enfoncement.

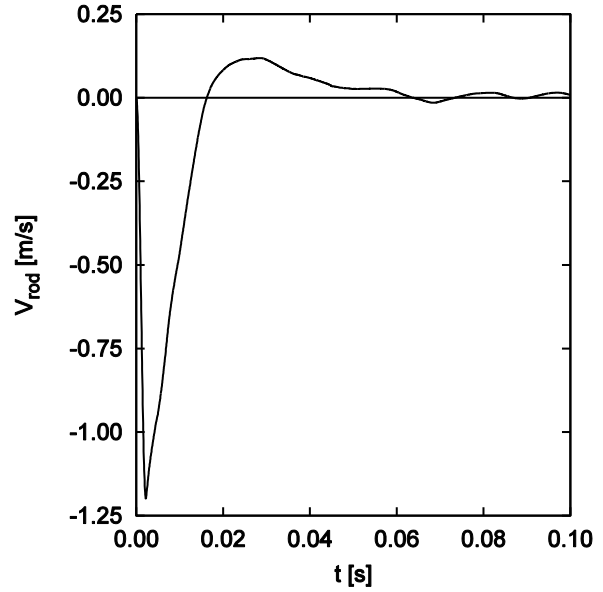


Figure 3-14. Vitesse de la tige en fonction de son enfoncement.

A partir de ces signaux, deux résistances de pointe en condition dynamique F_{dmax} et $F_{dpalier}$ ont été calculées pour chaque impact par les formules suivantes :

- La force de pointe F_{dmax} est calculée au moment où l'enfoncement de la tige atteint à la valeur maximale ϵ_{max} , donc c'est l'instant où la vitesse en pointe et la résistance dynamique sont nulles (**Equation 3-4**),
- La force de pointe $F_{dpalier}$ est la force moyenne déterminant entre le temps de l'impact t_{impact} et celui de l'enfoncement maximal t_{max} (**Equation 3-5**),

$$F_{dmax} = \frac{1}{\epsilon_{max}} \sum_{i=1}^{t_{max}} F(t_i)(\epsilon(t_i) - \epsilon(t_{i-1})) \quad \text{Equation 3-4}$$

$$F_{dpalier} = \frac{1}{\epsilon_{max} - \epsilon_{impact}} \sum_{t_{impact}}^{t_{max}} F(t_i)(\epsilon(t_i) - \epsilon(t_{i-1})) \quad \text{Equation 3-5}$$

Avec :

- $\epsilon(t_i)$ [m] : enfoncement au moment t_i ,
- ϵ_{impact} [m] : enfoncement à la fin de l'impact t_{impact} ,
- ϵ_{max} [m] : enfoncement maximal au moment t_{max} ,
- $F(t_i)$ [N] : force de pointe au moment t_i .

3.3. Bilan énergétique pour un essai dynamique

En vue d'analyser les résultats obtenus, on cherche ici à caractériser la manière dont est dissipée au sein de l'échantillon l'énergie injectée dans le système {particule, parois}. Cette énergie est due d'une part à l'énergie d'impact E_I et d'autre part à l'énergie potentielle transmise par la tige lors de son enfoncement E_{PT} .

Dans le modèle utilisé ici, cette énergie ne peut être dissipée ou emmagasinée que sous cinq formes : énergie dissipée par frottement E_F , énergie due au travail des forces de confinement appliquées sur la paroi supérieure E_C , énergie cinétique E_K , énergie de déformation E_S et énergie potentielle des particules E_{PP} . Le bilan énergétique entre les états final et initial peut donc être simplement écrit comme suit :

$$E_I + E_{PT} = E_F + E_C + E_K + E_S + E_{PP} \quad \text{Equation 3-6}$$

Dans l'équation, la composante de l'énergie fournie par l'impactant au système E_I est égale au travail de la force d'impact pendant toute la durée de l'impact. Elle est calculée de la manière suivante :

$$E_I = \int_{t=0}^{t_I} F_I(t) V_I(t) dt \quad \text{Equation 3-7}$$

Avec :

- $F_I(t)$ [N] : force de contact normale entre l'impactant et la tige,
- $V_I(t)$ [m.s⁻¹] : vitesse de l'impactant,
- t_I [s] : temps total de l'impact.

Il faut noter que la vitesse de l'impactant est égale zéro après l'impact dans le cas où le ratio de masses entre l'impact et la tige m_I/m_{tige} est égale 1. De plus, l'impactant est supprimé juste après l'impact.

La composante correspondant à l'énergie dissipée par frottement E_F est égale au travail des forces tangentielles glissantes, c'est-à-dire ayant atteint le critère de frottement de Coulomb. Cette énergie est à considérer dans l'ensemble des contacts existants ou ayant existés entre les états initial et final considérés. L'incrément d'énergie dissipée par frottement pour tous les contacts est donné par la formule suivante, à chaque pas de temps Δt :

$$\Delta E_F = \sum_1^{N_C} F_{Si}(t) \times \Delta U_i(t) \quad \text{Equation 3-8}$$

Avec :

- N_C [-] : nombre de contacts dans le système,
- F_{Si} [N] : force tangentielle de contact,
- $\Delta U_i(t)$ [m] : déplacement tangentiel.

L'énergie dissipée totale par frottement E_F entre l'état final et l'état initial, est l'intégration des incréments d'énergie ΔE_F sur l'ensemble des pas de temps entre l'état initial et final

$$E_F = \int_{t=0}^{t \rightarrow +\infty} \Delta E_F = \int_{t=0}^{t \rightarrow +\infty} \left[\sum_1^{N_c} F_{Si}(t) \times \Delta U_i(t) \right] \quad \text{Equation 3-9}$$

L'énergie E_C correspondant au travail des efforts de confinement est calculée au niveau de la paroi supérieure. Cette paroi n'a pas de masse mais est déplacée verticalement de manière à appliquer un effort de confinement constant. L'énergie E_C est donc égale au travail des forces entre ce mur et les particules entre l'état initial et final.

$$E_C = \int_{t=0}^{t \rightarrow +\infty} F_C(t) V_C(t) dt = F_C \Delta h_C \quad \text{Equation 3-10}$$

Avec :

- F_C [N] : Efforts de confinement,
- $V_C(t)$ [m.s⁻¹] : Vitesse de la paroi de confinement,
- Δh_C [m] : Variation de position verticale du confinement.

La conservation d'énergie a été vérifiée sur l'échantillon S_1 , sur lequel un impact a été réalisé avec une masse de **0.5 kg** heurtant la tige avec une vitesse incidente de **1250 mm.s⁻¹**. Le bilan d'énergie de l'essai est donné dans le **Tableau 3-3**,

V_I [mm.s ⁻¹]	Energie	Injection			Dissipation ou Transmission			
		E_I [%]	E_{PT} [%]	E_F [%]	E_C [%]	E_K [%]	E_S [%]	E_{PP} [%]
1250	[J]	0.398	0.023	0.403	0.017	0.000	0.001	0.002
	[%]	94.55	5.45	95.34	3.96	0.00	0.16	0.54

Tableau 3-3. Bilan énergétique pour l'échantillon S_1 à vitesse d'impactant de 1250 mm.s⁻¹.

La différence observée entre l'énergie provenant des sources et la dissipation ou accumulation dans l'échantillon est inférieure à **0.8 %**, ce qui représente une erreur raisonnable pouvant être due à la différence d'état d'équilibre entre l'état final et l'état initial. D'autre part, on note que l'essentiel de l'énergie est dissipé par frottement, le reste de l'énergie est seulement emmagasiné et peut donc être restitué.

Afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu lors de l'essai de pénétration, et notamment concernant la dissipation de l'énergie, l'étude des distributions d'énergie est proposée pour l'essai dynamique présenté.

L'énergie dissipée par frottement a été répartie à parts égales entre les deux entités impliquées dans chaque contact. La contribution de chaque particule dans la dissipation d'énergie par frottement E_F a pu être calculée.

Pour déterminer les zones de l'échantillon les plus sollicitées dans le processus de dissipation d'énergie, les distributions spatiales d'énergie dissipée par frottement et par particule ont été tracées avec une échelle logarithmique. Sur la **Figure 3-15**, on remarque logiquement que la zone où l'énergie est la plus dissipée par frottement est très concentrée

autour de la pointe et diminue très rapidement lorsque l'on s'en éloigne. Les conditions aux limites choisies n'ont donc que très peu d'influence sur les phénomènes observés.

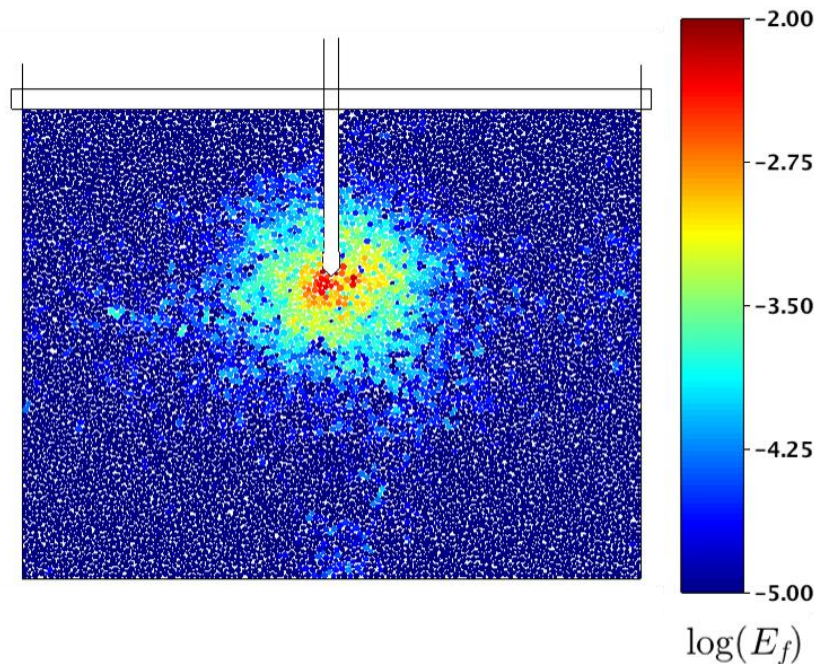


Figure 3-15. Zone d'énergie dissipée par frottement pendant l'essai dynamique à vitesse 1250 mm.s^{-1} pour S_1 .

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les premiers résultats obtenus afin de modéliser l'essai de pénétration statique et dynamique en utilisant le modèle numérique présenté dans le **Chapitre 3**.

Pour l'essai de pénétration statique, une étude de sensibilité du modèle à vitesse rapide est analysée vis-à-vis des conditions aux limites. Un fort effet d'agitation oscillatoire vertical des particules est observé quand la largeur du moule est faible; cet effet d'oscillation perturbe fortement le comportement du matériau que l'on cherche à quantifier. Pour diminuer l'influence des conditions aux limites, la largeur de l'échantillon a été augmentée à **60 cm** et la rigidité des parois a été diminuée.

Concernant l'essai de pénétration dynamique, le modèle permet de reproduire ce type d'essai. L'allure de la courbe charge – enfoncement obtenue est conforme à ce qui peut être classiquement observé expérimentalement.

On a aussi introduit une analyse basée sur l'étude de la dissipation d'énergie qui sera utilisée dans la suite de ce travail. On a naturellement trouvé qu'il y a une conservation d'énergie entre l'état final et l'état initial, pour un essai de pénétration dynamique. Le calcul des composantes énergétiques a montré que l'énergie de l'impact est transmise totalement au système, puis dissipée en grande partie, par frottement. Le reste de l'énergie est absorbé par le confinement. De plus, la zone où l'énergie est la plus dissipée par frottement se situe autour de la pointe. La dissipation par frottement se produit au voisinage de la pointe pénétrométrique et diminue très rapidement lorsque l'on s'en éloigne.

Chapitre 4 : Influence du mode de pénétration

Ce chapitre est consacré à l'étude à l'échelle macroscopique de l'influence de la vitesse d'enfoncement de la tige et du mode de sollicitation sur la force de pointe pour les essais de pénétration statique et dynamique. On mettra dans un premier temps en évidence une augmentation de plus en plus importante de la force de pointe F_c quand la vitesse de l'enfoncement statique devient plus grande (**section 4.1**). Concernant l'essai de pénétration dynamique, l'influence de l'énergie injectée sur la force de pointe F_a sera étudiée (**section 4.2**). Enfin, on s'attachera à comparer la force de pointe des essais de pénétration statique et dynamique avec une vitesse de sollicitation comparable (**section 4.3**).

4.1. Effet de la vitesse d'enfoncement en condition statique

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'influence de la vitesse d'enfoncement sur la force de pointe F_c d'un essai en condition statique. Une gamme de vitesse de pénétration de 25 mm.s^{-1} à 5000 mm.s^{-1} est étudiée. La **Figure 4-1** présente les pénétrogrammes obtenus entre **5 cm** et **15 cm** de profondeur (afin de limiter l'influence des conditions limites du modèle) pour les trois vitesses d'enfoncement différentes de 25 mm.s^{-1} , 1250 mm.s^{-1} et 5000 mm.s^{-1} pour l'échantillon S_1 . On observe que le signal à faible vitesse (25 mm.s^{-1}) est plus stable que pour les deux autres cas étudiés.

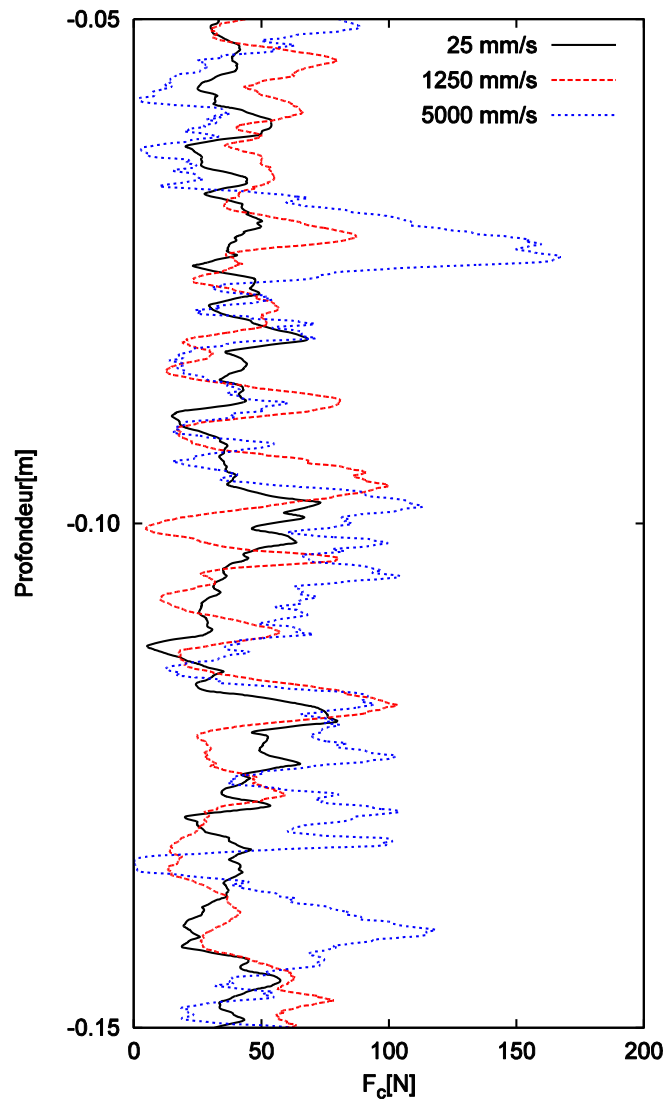


Figure 4-1. Signaux de pénétration statique en fonction de la vitesse d'enfoncement entre 5 et 15 cm de profondeur pour l'échantillon S_1 .

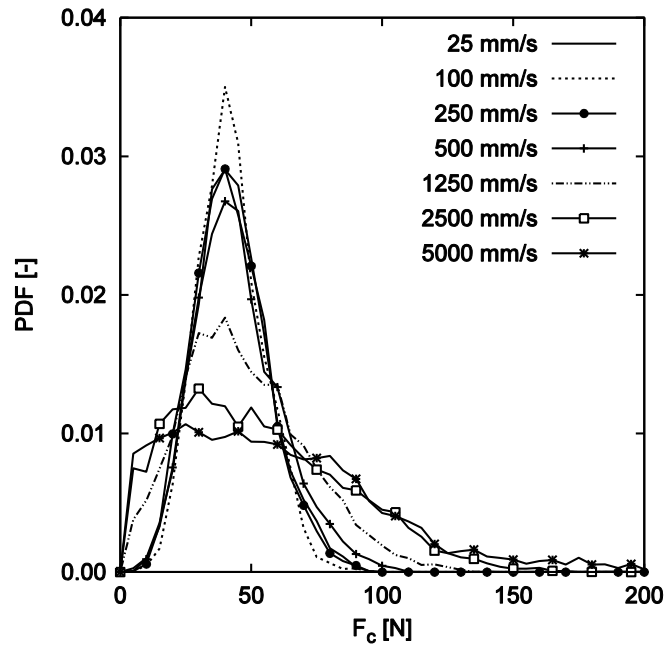


Figure 4-2. Probabilité de densité des forces de pointe F_c en fonction de la vitesse d'enfoncement entre 5 et 15 cm de profondeur pour les trois échantillons S_1 , S_2 , S_3 .

La Figure 4-2 présente la probabilité de densité de force F_c déterminée entre 5 cm et 15 cm de profondeur pour les trois échantillons S_1 , S_2 , S_3 aux différentes vitesses. On trouve que la distribution de densité reste stable lorsque la vitesse d'enfoncement reste faible. Mais, la dispersion devient importante quand la vitesse de l'enfoncement commence à être supérieure à 1250 mm.s^{-1} .

Pour chaque vitesse de l'enfoncement, toutes les valeurs de la force de pointe F_c dans chaque intervalle de 1 cm de profondeur sont déterminées. On obtient la valeur moyenne de la force de pointe F_{cm} pour chaque intervalle. Et, la Figure 4-3 représente la force de pointe moyenne (F_{cm}) déterminée entre 5 cm et 15 cm de profondeur aux différentes vitesses de l'enfoncement. On observe que plus la vitesse de l'enfoncement augmente, plus la force de pointe (F_{cm}) augmente. De plus, la dispersion augmente en fonction de la vitesse de l'enfoncement.

$V_{Tige} [\text{mm.s}^{-1}]$	$I [-]$
25	8.28E-05
1250	4.14E-03
2500	8.28E-03
5000	1.66E-02

Tableau 4-1. Nombre inertiel en fonction de la vitesse d'enfoncement pour l'essai de pénétration statique en utilisant l'Equation 2-19.

Ces résultats sont en accord avec les observations de (Roux & Chevoir, 2005) qui expliquent que quand la vitesse d'enfoncement augmente en passant d'une faible vitesse 25 mm.s^{-1} (qu'on trouve souvent dans les normes) à une grande vitesse (5000 m.s^{-1}), le comportement des particules passe de l'état quasi – statique ($I = 8.28 \times 10^{-5}$ à vitesse 25 mm.s^{-1}) à l'état d'écoulement dense ($I = 1.66 \times 10^{-2}$ à vitesse 5000 m.s^{-1}) (Tableau 4-1). L'agitation des particules devient alors plus importante. Ainsi, plus la vitesse d'enfoncement augmente, plus la force de pointe moyenne F_c augmente et l'écart-type des valeurs de F_{cm} augmente également.

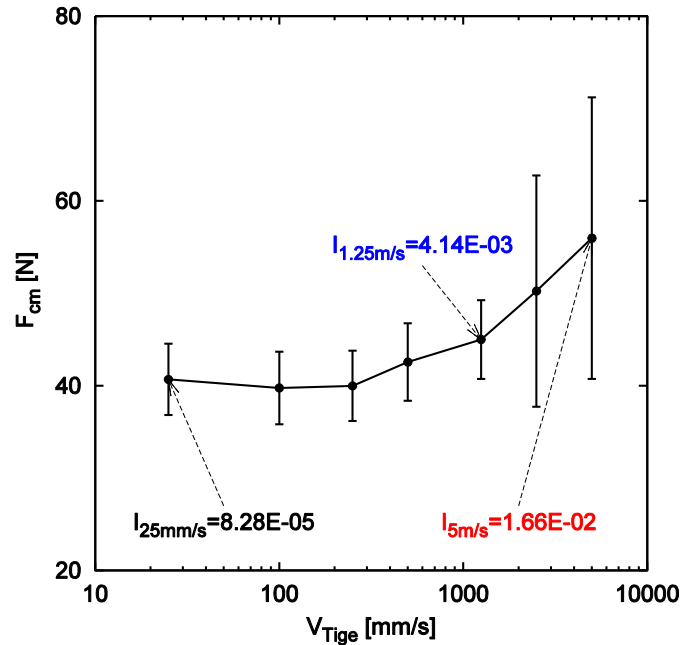


Figure 4-3. Force de pointe moyenne F_{cm} entre 5 et 15 cm de profondeur en fonction de la vitesse d'enfoncement pour les trois échantillons S_1, S_2, S_3 .

4.2. Influence du mode de sollicitation en condition dynamique

Dans ce paragraphe, on va étudier tout d'abord l'influence du mode d'injection de l'énergie sur la force de pointe F_d en injectant une même énergie dans le système (section 4.2.1). Ensuite, l'étude de l'influence de la vitesse de l'impactant sur la force de pointe dynamique F_d sera présentée à la section 4.2.2.

4.2.1. Influence du mode d'injection de l'énergie

Dans cette section, afin d'étudier l'influence du mode d'injection de l'énergie, on a changé à la fois la vitesse de l'impactant (**Figure 4-4**) et le ratio de masse entre l'impactant et la tige ($m_I/m_{\text{tige}} = 0.5, 1.0$ et 2.0) afin de obtenir une énergie injectée identique dans le système (**Figure 4-6**).

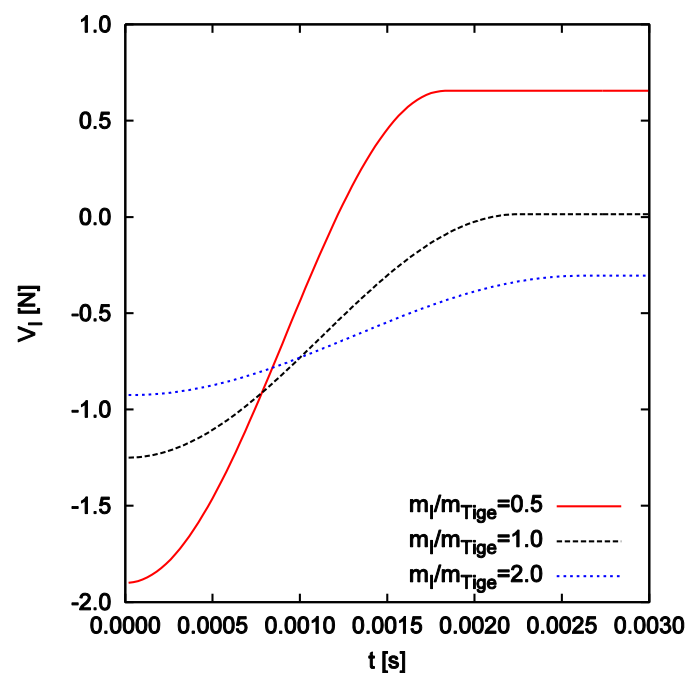


Figure 4-4. Vitesse de l'impactant pendant l'impact pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.

En termes d'impact, quand le ratio m_I/m_{tige} est diminué, le temps de l'impact devient plus petit (**Figure 4-5**). Pour les trois cas étudiés, il n'y a que l'essai où le ratio de $m_I/m_{\text{tige}} = 1.0$ pour lequel l'énergie de l'impactant est transmise totalement dans le système (la vitesse de l'impactant à la fin de l'impact est égale à 0). Pour les autres cas, soit l'impactant rebondit, soit il continue à descendre (mais sans contact entre l'impactant et la tige). L'impactant est supprimé juste après l'impact.

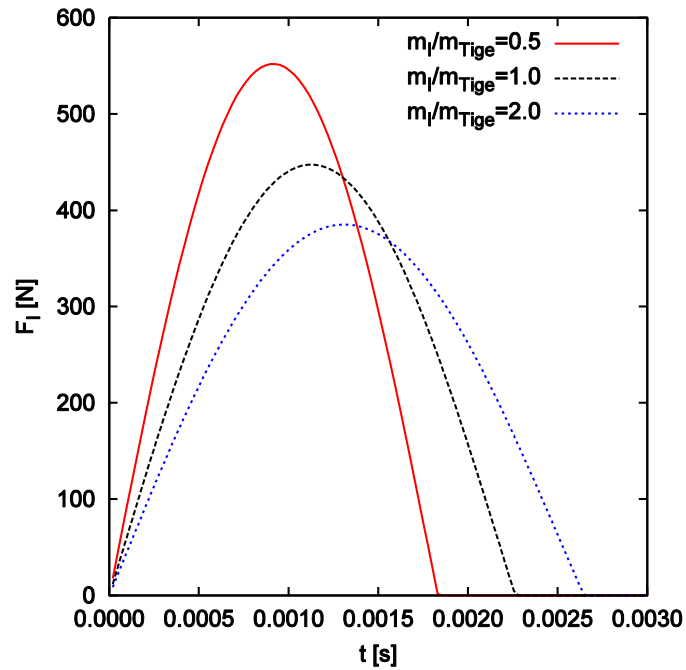


Figure 4-5. Force d'impact pendant l'impact pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige

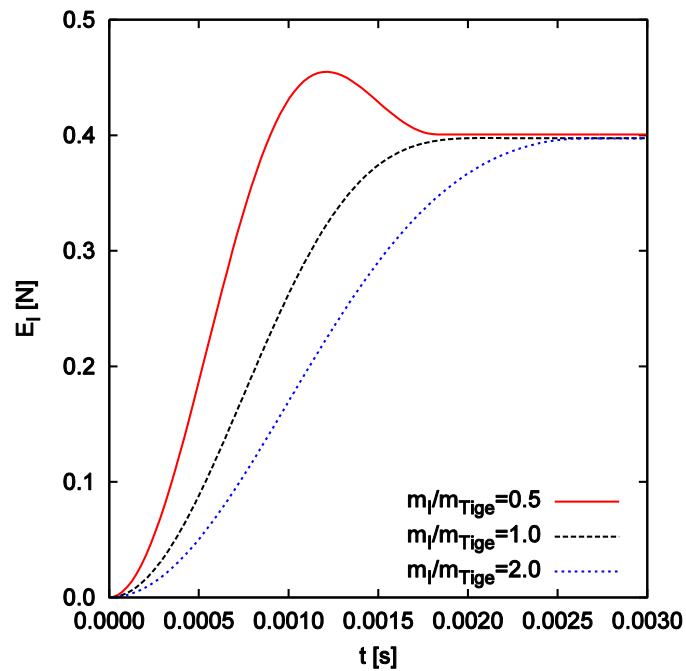


Figure 4-6. Energie injectée dans le système pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.

Pour chaque cas, on a effectué cinq essais dynamiques successifs. La **Figure 4-7** présente les courbes charge-enfoncement correspondant au premier coup dynamique de chaque cas. On constate qu'elles sont presque similaires sauf durant la dernière phase de l'essai qui correspond à la stabilisation de la tige autour de sa position d'équilibre.

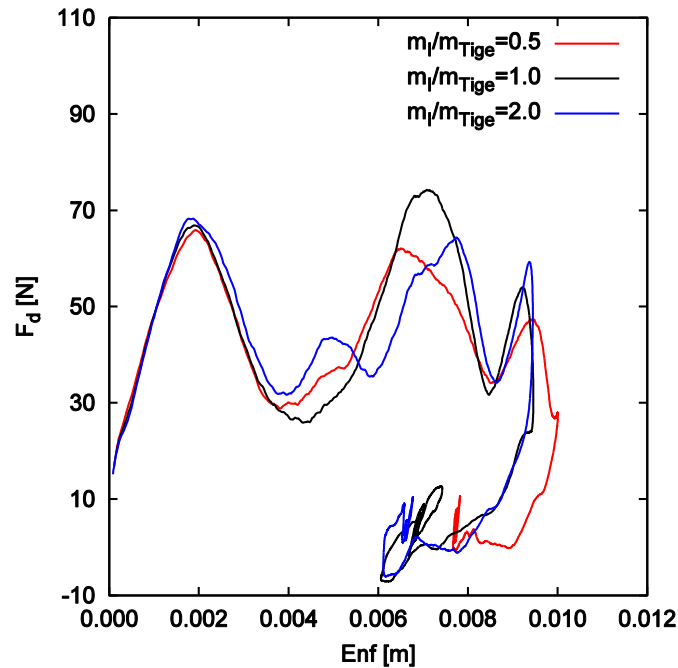


Figure 4-7. Courbe charge - enfoncement pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.

Sur la **Figure 4-8**, on observe que la force de pointe F_a moyenne de 15 essais calculées par les formules données par les équations 3-4 et 3-5 pour les différents ratios de m_I/m_{tige} est stable.

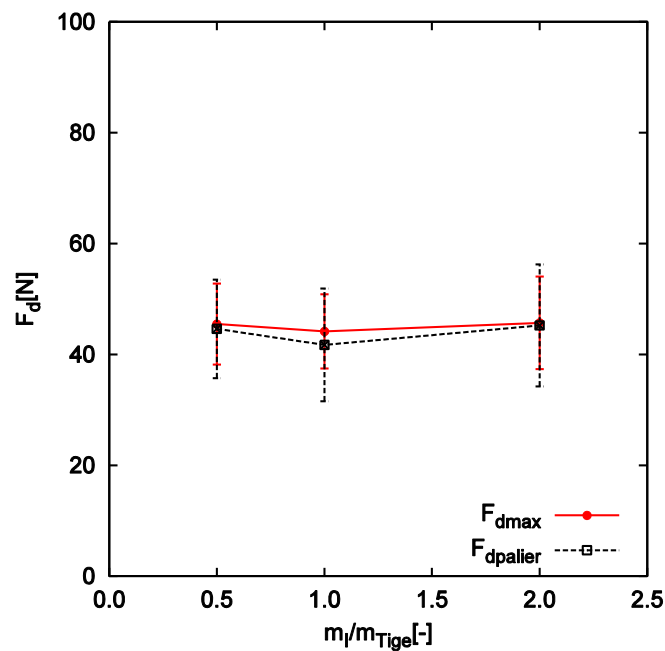


Figure 4-8. Force de pointe F_a pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige

En termes d'énergie, le **Tableau 4-2** et la **Figure 4-9** montrent une bonne répétabilité des différentes composantes du bilan énergétique pour 5 essais dynamiques correspondant au trois cas où $m_I/m_{tige} = 0.5, 1.0$ et 2.0 . On remarque que la zone la plus sollicitée par frottement au sein de l'échantillon n'est globalement pas modifiée dans les trois cas.

m_i/m_{Tige}	Injection [%]			Dissipation ou Transmission [%]			
	E_I	E_{Pr}	E_F	E_C	E_K	E_S	E_{PP}
0.5	91.89	8.11	94.82	5.10	0.01	-0.55	0.62
1.0	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
2.0	92.75	7.25	95.64	3.92	0.01	-0.06	0.49

Tableau 4-2. Bilan d'énergie moyen pour 5 essais dynamiques successifs pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige

En conclusion, la force de pointe F_a est similaire quand on fait varier à la fois la vitesse de l'impactant et le ratio de masse entre l'impactant et la tige ($m_i/m_{t\grave{e}ge} = 0.5, 1.0$ et 2.0) mais que l'énergie injectée dans le système est identique. Au sein de l'échantillon, la taille de la zone où la majorité de l'énergie est dissipée par frottement, reste la même pour les trois cas étudiés. Il y a plus de **90%** d'énergie dissipée par frottement dans la zone où la valeur absolue de position horizontale de particule – $abs(X_P)$ est inférieure à **15 cm**.

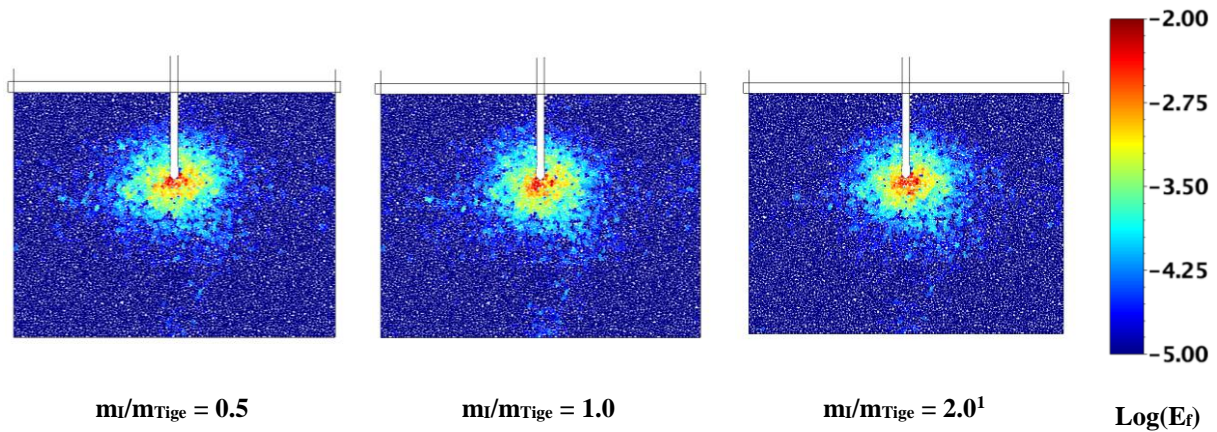


Figure 4-9. Zone de distribution d'énergie dissipée pour différents ratios de masse entre l'impactant et la tige.

4.2.2. Essais de pénétration avec différentes vitesses d'impactant

Dans cette section, on s'intéresse à l'influence de la vitesse de l'impactant sur l'essai de pénétration dynamique. La **Figure 4-10** présente la vitesse maximale de la tige juste après l'impact en fonction de la vitesse de l'impactant – vitesse maximale de l'impactant juste avant le choc, qui varie de **100 mm.s⁻¹** à **5000 mm.s⁻¹**. La vitesse de la tige maximale semble augmenter linéairement avec l'augmentation de la vitesse de l'impactant.

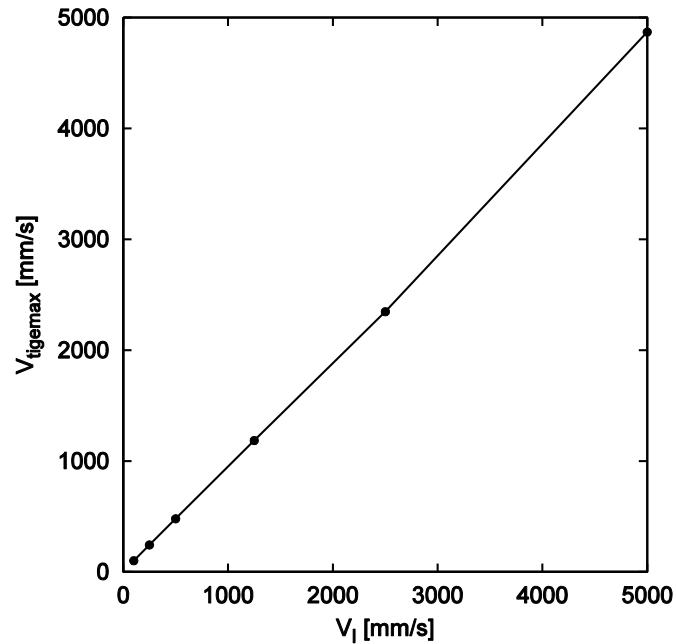


Figure 4-10. Vitesse maximale de la tige en fonction de la vitesse d'impactant.

Pour chaque vitesse de l'impactant, on a effectué **15** essais à partir de **15 cm** de profondeur pour trois échantillons **S₁, S₂ et S₃**. Les courbes charge – enfoncement de chaque vitesse sont présentées dans la **Figure 4-11**. On observe que plus la vitesse de l'impactant augmente, plus la grandeur du palier de la force de pointe **F_a** augmente. Quand la vitesse de l'impactant reste petite (**V_I ≤ 250 mm.s⁻¹** et **V_{Tigemax} ≤ 242.8 mm.s⁻¹**), on constate un refus de la tige.

Quand la vitesse de l'impactant est plus importante (**V_I = 2500 mm.s⁻¹**), on observe que la force de pointe **F_a** au début du palier est plus grande que celle à la fin de l'essai. Cet effet peut s'expliquer par la diminution de la vitesse de la tige après de l'impact. Puisque la vitesse de la tige dans l'essai de pénétration dynamique augmente jusqu'à la vitesse maximale (**V_{Tigemax}**) dans quelques millisecondes de l'impact (**≈ 2ms**) et puis elle est diminuée à cause de la réaction des particules se situant au-dessous de la tige (**Figure 3-14**). De plus, plus la vitesse de la tige augmente, plus le nombre inertiel (**I**) est plus grand. Ainsi, si on considère que le comportement est dans l'état critique entre l'état quasi – statique et l'écoulement dense avec la vitesse de l'impactant égale à **1250 mm.s⁻¹**, le comportement des particules passe donc de l'état d'écoulement dense pendant un seul coup dynamique où la vitesse de l'impactant est plus grande (**V_I = 2500 mm.s⁻¹**) (au début de l'essai où **V_{Tige} ≥ 1250 mm.s⁻¹**) à l'état quasi – statique (à la fin de l'essai où **V_{Tige} ≤ 1250 mm.s⁻¹**).

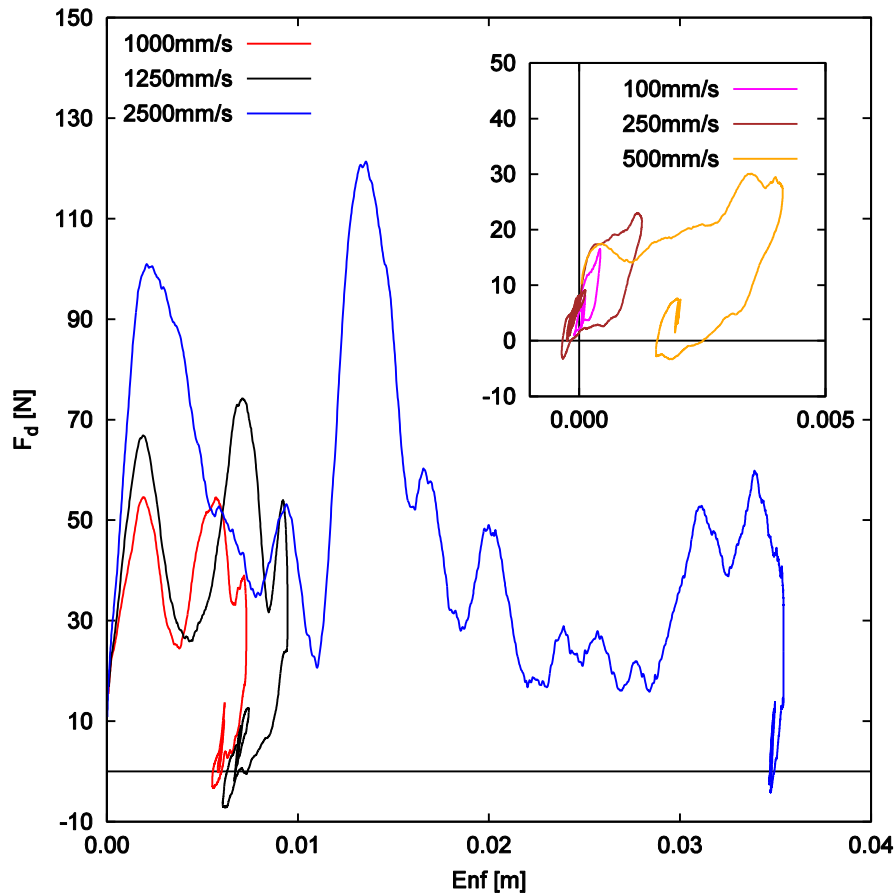


Figure 4-11. Courbe charge - enfoncement pour différentes vitesses d'impactant.

Pour chaque vitesse d'impact qui varie de 100 mm.s^{-1} à 2500 mm.s^{-1} , les forces de pointe F_a de 15 essais effectués sur trois échantillon S_1 , S_2 et S_3 sont calculées par les équations 3-4 et 3-5. Pour le cas où vitesse de l'impactant égale à 5000 mm.s^{-1} , car l'enfoncement final d'un unique essai dynamique est l'ordre de 15 cm, un seul coup dynamique est donc réalisé par échantillons pour trois échantillons S_1 , S_2 et S_3 afin d'assurer que la profondeur de la tige est dans la plage de profondeur entre 15 cm et 30 cm.

La Figure 4-12 représente la force de pointe moyenne en fonction de la vitesse de la tige maximale. On trouve que la force de pointe F_a augmente généralement quand la vitesse de l'impactant augmente. L'augmentation de la force de pointe F_a est moins importante lorsque la vitesse de l'impactant est supérieure à 1250 mm.s^{-1} .

Une comparaison de l'effet de vitesse sur les essais de pénétration statique et dynamique sera présentée dans la section 4.3 afin de comparer la force de pointe F_c et F_a pour des vitesses de tige comparables aux différents régimes de l'écoulement des particules (quasi – statique ou écoulement dense).

En termes d'énergie, on a calculé toutes les moyennes des composantes du bilan énergétique de 5 essais dynamiques successifs pour chaque vitesse de 100 mm.s^{-1} à 2500 mm.s^{-1} pour échantillon S_1 (Tableau 4-3). On note que, dans le cas où la vitesse de l'impactant égale à 5000 mm.s^{-1} , le bilan d'énergie d'un seul coup dynamique est réalisé sur échantillon S_1 .

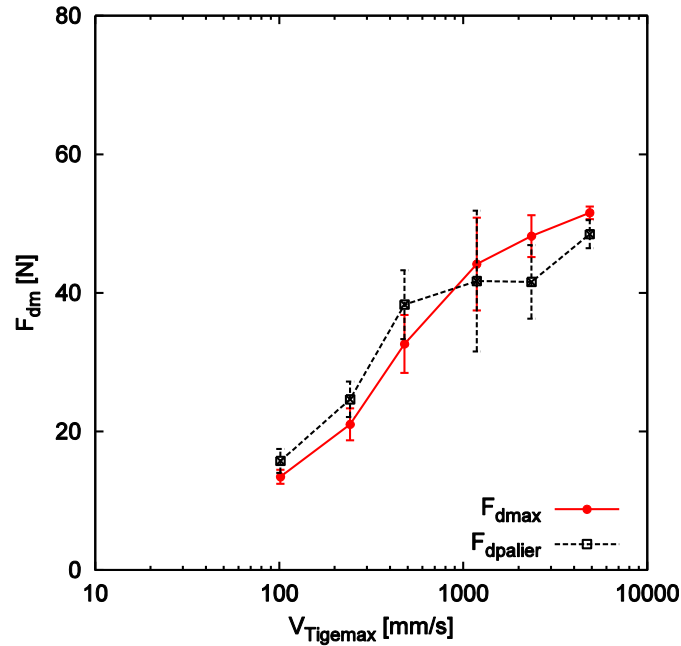


Figure 4-12. F_d en fonction de la vitesse maximale de la tige.

Sur le **Tableau 4-3** on observe que l'énergie potentielle de la tige est négative. C'est à dire qu'il y a un refus de la tige quand la vitesse de l'impactant est égale à **100 mm.s⁻¹**. Dans ce cas, les termes d'énergie de confinement et de déformation jouent un rôle non trivial par rapport au terme d'énergie dissipée par frottement (**190 %**). Quand la vitesse de l'impactant est supérieure à **1250 mm.s⁻¹**, il n'y a que deux composantes de l'énergie qui sont significativement représentées : celle dissipée par frottement et celle absorbée par confinement.

V _I [mm/s]	Injection [%]		Dissipation ou Transmission [%]				
	E _I [%]	E _{PT} [%]	E _F [%]	E _C [%]	E _K [%]	E _S [%]	E _{PP} [%]
100	104.53	-4.53	190.89	-62.81	0.02	-22.26	-5.84
1250	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
2500	90.26	9.74	92.88	6.03	0.00	0.13	0.96
5000	90.74	9.26	93.25	5.80	0.00	0.10	0.85

Tableau 4-3. Bilan d'énergie moyen pour 5 essais dynamiques successifs en fonction de la vitesse d'impact

On calcule maintenant d'ici la proportion d'énergie dissipée par frottement (**%E_{Frott}**) par la formule suivante :

$$\%E_{Frott} = \frac{\sum_{P_i \in (M)} E_{Frott}^{Pi}}{\sum_{Total} E_{Frott}^{Pi}} \quad \text{Equation 4-1}$$

Où

- $\sum_{P_i \in (M)} E_{Frott}^{Pi}$: Energie dissipée par frottement pour les particules dans la zone de mesurée (**M**) où la position absolue horizontale de particule est inférieur à **15 cm**,
- $\sum_{Total} E_{Frott}^{Pi}$: Energie dissipée par frottement pour toutes les particules dans l'échantillon.

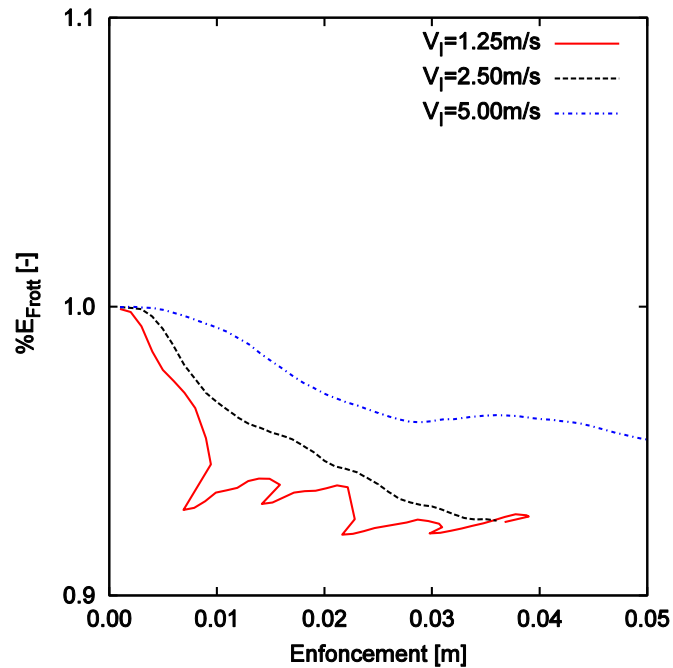


Figure 4-13. Pourcentage de l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour trois vitesses de l'impactant 1250, 2500 et 5000 mm.s^{-1} pour l'échantillon S₁.

La **Figure 4-13** représente la proportion de l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement aux trois vitesses de l'impactant **1250, 2500 et 5000 mm.s^{-1}** pour l'échantillon S₁. On observe qu'il y a plus de **90%** de l'énergie dissipée par frottement dans la zone mesurée. De plus lorsque la vitesse de l'impactant augmente, la dissipation d'énergie par frottement devient plus efficace par les particules se situant autour de la pointe.

La zone de dissipation par frottement de l'énergie à **9 mm** de l'enfoncement pour différentes vitesses d'impactant est présentée dans la **Figure 4-14**. On constate que la taille de la zone de dissipation d'énergie par frottement diminue quand la vitesse de la tige est plus importante. Ainsi, plus la vitesse de la tige augmente, plus la zone de dissipation d'énergie par frottement localise autour de la pointe.

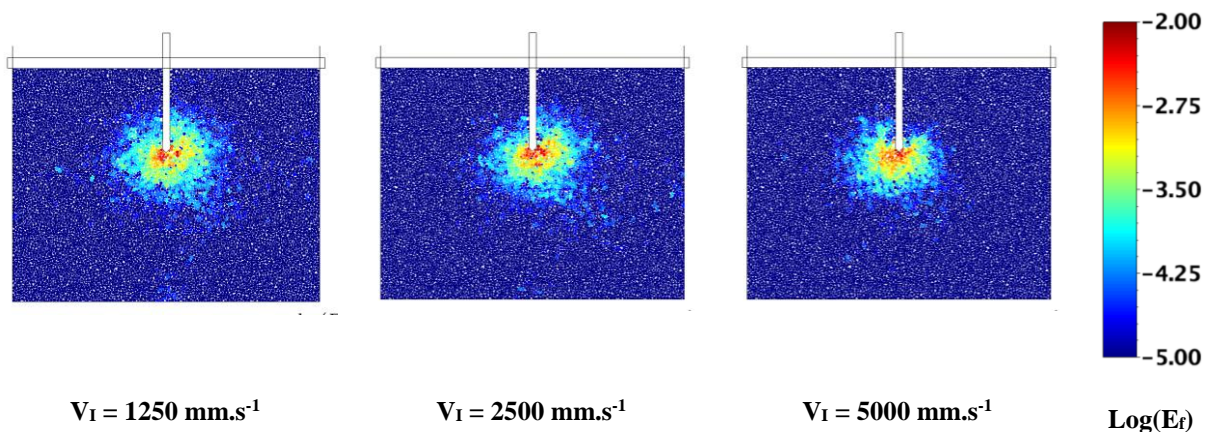


Figure 4-14. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un essai dynamique pour différentes vitesses à 9 mm d'enfoncement.

En conclusion, plus la vitesse d'impactant est importante, plus la force de pointe F_a augmente. Cependant, lorsque la vitesse de l'impactant est supérieure à 1250 mm.s^{-1} , le comportement des particules passe de l'état d'écoulement dense à l'état plus stable à cause de la diminution de la vitesse de la tige après de l'impact. C'est la raison pour laquelle force de pointe F_a au début du palier est plus grande que celle à la fin de l'essai. Ainsi bien que la force de pointe F_a moyenne de **15** essais dynamiques augmente. Mais l'augmentation de la force de pointe F_a est moins importante lorsque la vitesse de l'impactant est supérieure à 1250 mm.s^{-1} .

En termes d'énergie dissipée par frottement, il y a plus de **90%** d'énergie dissipée par frottement dans la zone mesurée. Et l'énergie dissipée par frottement devient plus localisée autour de la pointe lorsque la vitesse de l'impactant augmente.

4.3. Comparaison de l'effet de la vitesse en conditions statique et dynamique

Dans les paragraphes précédents, on a montré l'influence de la vitesse de l'impactant sur les essais de pénétration statique et dynamique. Dans cette section, on s'attache à comparer les forces de pointe F_c et F_d pour des vitesses de tige comparables.

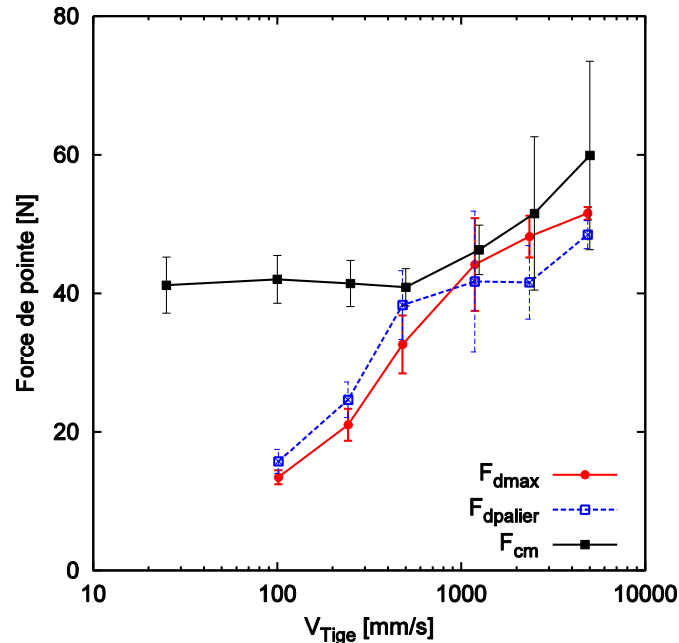


Figure 4-15. Comparaison entre F_c et F_d à vitesse de sollicitation comparable.

La **Figure 4-15** représente les forces de pointe F_c et F_d . Puisque l'essai de pénétration dynamique est réalisé à **15 cm** de profondeur. La force de pointe moyenne F_{cm} pour chaque vitesse de l'enfoncement est la valeur moyenne des **15** valeurs des forces de pointe calculées pour chaque centimètre entre **15** et **30 cm** de profondeur pour les trois échantillons S_1 , S_2 et S_3 . Tandis que la force de pointe moyenne F_{dm} est calculée par la valeur moyenne de **15** essais dynamiques réalisés sur **3** échantillons S_1 , S_2 , S_3 aux différentes vitesses de l'impactant. On note qu'il y a un seul coup dynamique est effectué sur chaque échantillon S_1 , S_2 , S_3 à **5000 mm.s⁻¹** de vitesse de l'impactant pour assurer que la tige est enfoncée dans la zone de **15** à **30 cm** de profondeur. Ainsi, la dispersion qui est beaucoup plus forte à grande vitesse ($V_{Tige} \geq 2500 \text{ mm.s}^{-1}$) pour l'essai statique que pour l'essai dynamique.

Quand la vitesse de l'impactant est inférieure à **1250 mm.s⁻¹**, le nombre inertiel est faible ($I < 4.14E-03$), le comportement des particules reste dans l'état quasi – statique pour l'essai de pénétration dynamique. Cependant on observe que la force de pointe en condition dynamique F_d est plus petite que celle en condition statique F_c même si le comportement des particules est toujours dans l'état quasi – statique pour l'essai de pénétration soit statique soit dynamique (**Figure 4-15**). Lorsque la vitesse de l'impactant est plus faible ($V_I < 1250 \text{ mm.s}^{-1}$), le ratio entre l'enfoncement maximale moyenne pour un coup dynamique et le diamètre moyen des particules Enf_{max}/D_m reste faible. La tige n'est pas enfoncée dans l'assemblage des particules. La force de pointe dynamique F_{dmax} est plus petite par rapport à celle statique F_c

(Figure 4-16). Par contre, lorsque la vitesse de l'impactant devient plus grandes ($V_I \geq 500 \text{ mm.s}^{-1}$), la tige est donc enfoncée dans le sol à l'ordre de diamètre moyenne des particules. Le ratio F_{dmax}/F_c est supérieur à **0.75**.

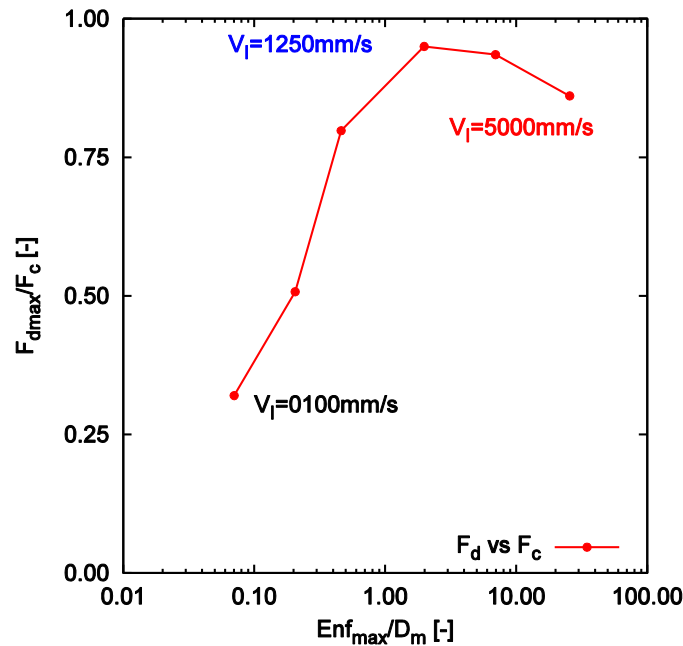


Figure 4-16. Ratio F_{dmax}/F_c en fonction du ratio Enf_{max}/D_m

Pour une vitesse de l'impactant de 1250 mm.s^{-1} , la force de pointe F_a semble similaire à celle F_c . Ce résultat sont en accord avec les observations de (Quezada, 2012) qui a comparé qualitativement la force de pointe entre condition statique ($V_{Tige} = 20 \text{ mm.s}^{-1}$) et dynamique ($F_{Pic} = 30\text{kN}$) en supposant que l'assemblage des particules a subi une faible sollicitation en régime quasi – statique et dynamique. Et il conclut que les valeurs moyennes de q_c et q_d sont les mêmes.

Lorsque la vitesse de l'impactant devient beaucoup plus importante ($V_I > 1250 \text{ mm.s}^{-1}$), le comportement des particules passe de l'état de l'écoulement à l'état quasi – statique à cause de la diminution de la vitesse de la tige pendant un coup dynamique. Tandis que les particules est toujours dans l'état de l'écoulement dense pour l'essai de pénétration statique quand la vitesse de la tige est supérieure à 1250 mm.s^{-1} . Ainsi, on trouve que la force de pointe en condition dynamique F_a est plus petite que celle en condition statique F_c lorsque la vitesse de la tige est supérieure à 1250 mm.s^{-1} (Figure 4-15).

On introduit donc d'ici une formule pour calculer la force de pointe dynamique F_{d1250} où le comportement des particules est seulement dans l'état de l'écoulement dense (Vitesse de la tige doit être supérieure à 1250 mm.s^{-1}). La formule est décrite par l'équation suivante :

$$F_{d1250} = \frac{1}{\varepsilon_{1250}} \sum_{t_i=0}^{t_{1250}} F(t_i) \times (\varepsilon(t_i) - \varepsilon(t_{i-1})) \quad \text{Equation 4-2}$$

Avec :

- $\varepsilon(t_i)$ [m] : enfoncement au moment t_i ,
- t_{1250} [s] : temps maximale où $V_{Tige} > 1250 \text{ mm.s}^{-1}$,
- ε_{1250} [m] : enfoncement correspondant au temps t_{1250} ,
- $F(t_i)$ [N] : force de pointe au moment t_i .

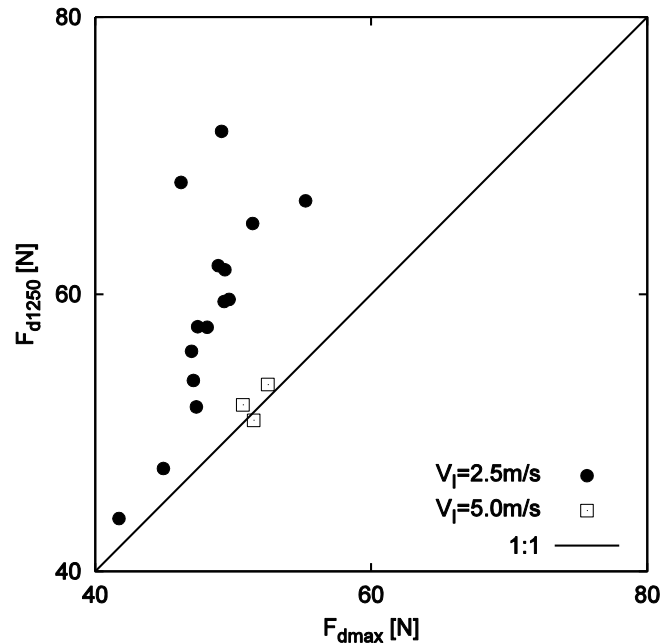


Figure 4-17. Comparaison entre la force de pointe F_{d1250} et F_{dmax} pour les essais de pénétration dynamiques avec la vitesse d'impactant $V_I > 1250 \text{ mm.s}^{-1}$.

La **Figure 4-17** représente la force de pointe F_{d1250} en fonction de celle maximale F_{dmax} pour **15** essais dynamiques à vitesse de l'impactant égale à **2500 mm.s^{-1}** et **3** essais dynamiques à vitesse de l'impactant égale à **5000 mm.s^{-1}** effectués sur les trois échantillons **S₁, S₂ et S₃**. On observe que la force de pointe F_{d1250} est supérieure à celle maximale F_{dmax} pour tous les essais dynamiques à n'importe quelle vitesse de l'impactant. C'est – à dire que la force de pointe dans l'état de l'écoulement dense est supérieure à celle dans l'état quasi – statique lors de la diminution de la vitesse de la tige pendant un coup dynamique où la vitesse de l'impactant est supérieure à **1250 mm.s^{-1}** .

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié l'influence du mode d'application de la sollicitation sur les essais de pénétration statique et dynamique. En général, la force de pointe augmente quand la vitesse de la tige augmente.

Pour l'essai de pénétration statique, on remarque que l'augmentation de la force de pointe F_c devient plus importante quand la vitesse de la tige est supérieure à 1250 mm.s^{-1} .

Pour l'essai de pénétration dynamique, on a montré dans un premier temps que la force de pointe F_a n'est pas influencée pour une énergie injectée constante, par le mode d'injection de l'énergie (modification de la masse ou de la vitesse de l'impactant). Ensuite, l'influence de la vitesse de l'impactant sur la force de pointe F_a a été analysée. Quand la vitesse de l'impactant est inférieure à 1250 mm.s^{-1} la force de pointe F_a augmente en fonction de la vitesse de l'impactant. Par contre à partir de 1250 mm.s^{-1} de vitesse de l'impactant, la force de pointe F_a augmente mais moins importante.

Finalement, une comparaison de la force de pointe statique et dynamique est présentée en fonction de l'énergie injectée. Quand la vitesse de la tige reste faible ($V_{\text{Tige}} < 1250 \text{ mm.s}^{-1}$), l'assemblage des particules est dans l'état quasi – statique pour l'essai de pénétration soit à constante soit dynamique. Cependant, l'énergie de l'impact n'est pas suffisante pour avoir un enfoncement maximal Enf_{max} de la tige comparable au diamètre moyen des particules D_m . Ainsi, la force de pointe F_a reste faible par rapport à celle statique.

Lorsque la vitesse de la tige est supérieure à 1250 mm.s^{-1} , le comportement des particules passe de l'état de l'écoulement à l'état quasi – statique à cause de la diminution de la vitesse de la tige pendant un coup dynamique. Tandis que les particules est toujours dans l'état de l'écoulement dense pour l'essai de pénétration statique. La force de pointe F_a est donc inférieure à celle statique F_c . Et la différence entre les deux forces de pointe F_a et F_c devient plus grande quand la vitesse de la tige est plus grande.

Afin de mieux comprendre le mécanisme de pénétration et de tenter d'expliquer les résultats trouvés dans cette partie, une étude de l'essai de pénétration statique et dynamique à l'échelle microscopie doit être menée.

Chapitre 5 : Etude du mécanisme de pénétration

Dans ce chapitre, l'essai de pénétration statique et l'essai dynamique seront analysés à l'échelle microscopique en vue de mieux comprendre le mécanisme de pénétration et de tenter d'expliquer les résultats présentés dans le **Chapitre 4**. On commence tout d'abord par présenter les paramètres de mesure qui permettront d'estimer qualitativement la réponse mécanique des particules et ce pour un essai de pénétration en condition statique à **25 mm.s⁻¹** de vitesse d'enfoncement (**section 5.1**) : agitation du milieu granulaire, transmission des efforts...

Ensuite, l'influence de la vitesse de pénétration sera quantifiée en comparant quantitativement et qualitativement des paramètres de mesure tels que la température granulaire, la distribution topologique du réseau de contacts et des chaînes de force (**section 5.2**).

Enfin, une comparaison qualitative entre essais de pénétration statique et dynamique est présentée dans la **section 5.3**. Les essais utilisés pour cette comparaison sont réalisés dans les mêmes conditions mécaniques et physiques avec une même énergie de pénétration et une vitesse de pénétration comparable.

5.1. Mécanismes associés à la pénétration en condition statique lente

On s'intéresse dans cette section aux mécanismes de pénétration dans le cas d'un essai statique lente à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement. Pour cela, on présente les paramètres d'analyse permettant d'estimer quantitativement et qualitativement les caractéristiques du milieu granulaire en termes d'agitation du milieu granulaire et du réseau de contacts (température granulaire, distribution angulaire du nombre de contacts et de l'intensité des forces de contact normal ou topologie des contacts et des chaînes de force ...).

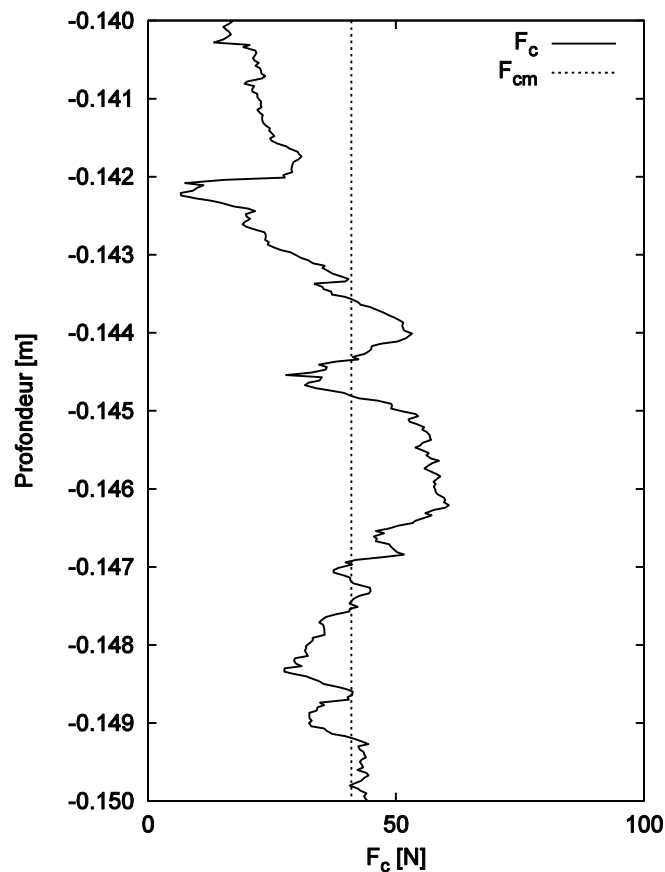


Figure 5-1. Pénétrogramme pour l'essai pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

Les paramètres utilisés sont présentés dans les paragraphes suivants. Les données d'analyse sont obtenues à partir de l'essai de pénétration statique réalisé à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement et sur 1 cm de profondeur de pénétration, pris entre 14 cm et 15 cm depuis la surface de l'échantillon. La Figure 5-1 montre l'évolution de la force de pointe F_c sur cet intervalle pour un échantillon.

5.1.1. Agitation du milieu granulaire

On s'intéresse ici à la notion de température granulaire proposée initialement par (Ogawa, 1978) et qui est définie comme la moyenne du carré des fluctuations de vitesses du milieu granulaire. A un instant donné, on peut décomposer la vitesse d'une particule en une vitesse moyenne (\overline{V}_m) associée à une partie fluctuante ($\overline{\delta V}_i$) : $\overline{V}_i = \overline{V}_m + \overline{\delta V}_i$

La température granulaire, notée T , d'un milieu granulaire contenant N_p particules est déterminée comme la valeur moyenne du carré des parties fluctuantes $\overline{\delta V}_i$:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \overline{\delta V}_i^2}{N_p} \quad \text{Equation 5-1}$$

Pour l'essai de pénétration statique à faible vitesse 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement, pour lequel les particules sont soumises à un régime quasi-statique, on constate que les composantes fluctuantes $\overline{\delta V}_i$ du milieu granulaire se situent autour de la position moyenne $(0.0, 0.0)$ (Figure 5-2). L'agitation du milieu granulaire est logiquement faible sous cette sollicitation quasi-statique.

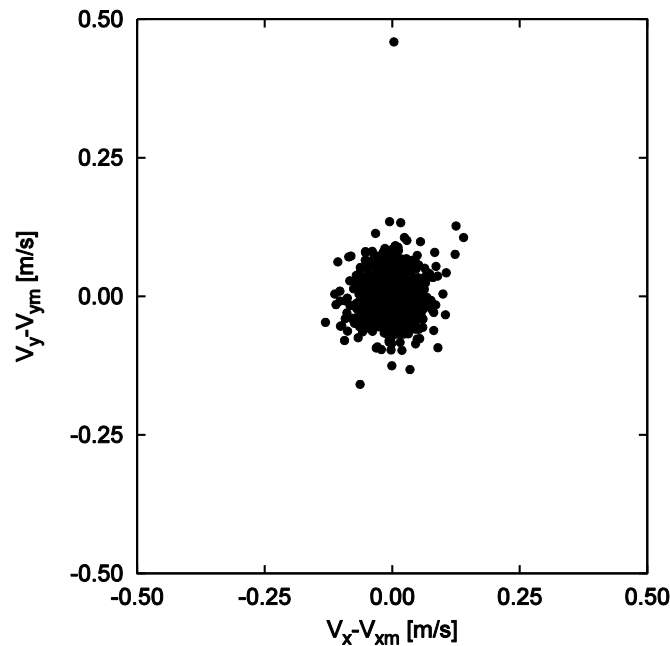


Figure 5-2. Distribution de la vitesse fluctuantes $\overline{\delta V}_i$ des particules aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

La Figure 5-3 présente la densité de probabilité de la température granulaire en fonction de la vitesse fluctuantes des particules $\overline{\delta V}_i$ et la température granulaire entre 14 cm à 15 cm profondeur. On trouve bien que la courbe de la densité de probabilité est quasi-stable en fonction de la profondeur et que la température granulaire maximale entre 14 cm à 15 cm de profondeur est l'ordre de $0.001 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ (Figure 5-3). Par ailleurs, une augmentation de la température granulaire entre 14.5 et 14.7 cm de profondeur peut être reliée à une augmentation de force de pointe F_c (Figure 5-1).

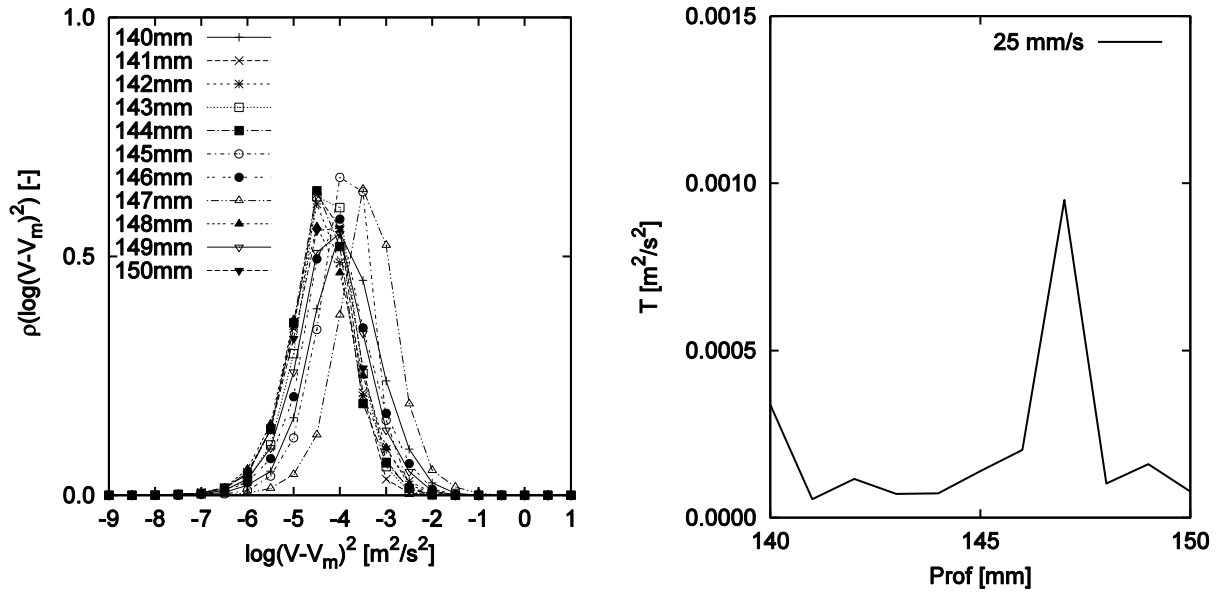


Figure 5-3. Densité de probabilité de la vitesse de fluctuation $\overline{\delta V_i}$ (à gauche) et température granulaire (à droite) aux différentes profondeurs.

La température granulaire est un paramètre intéressant à observer lorsque le milieu granulaire est soumis à une sollicitation plus importante soit en condition statique soit en condition dynamique. On discutera les variations de la température granulaire en fonction de la vitesse de tige pour l'essai de pénétration statique (**section 5.2**) et également lorsque les conditions d'essais (statique ou dynamique) varient (**section 5.3**).

5.1.2. Evolution du nombre de coordination

La **Figure 5-4** représente le nombre de coordination déterminé entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour la vitesse d'enfoncement égale à **25 mm.s⁻¹**. On trouve que le nombre de coordination est stable (de l'ordre de **3**).

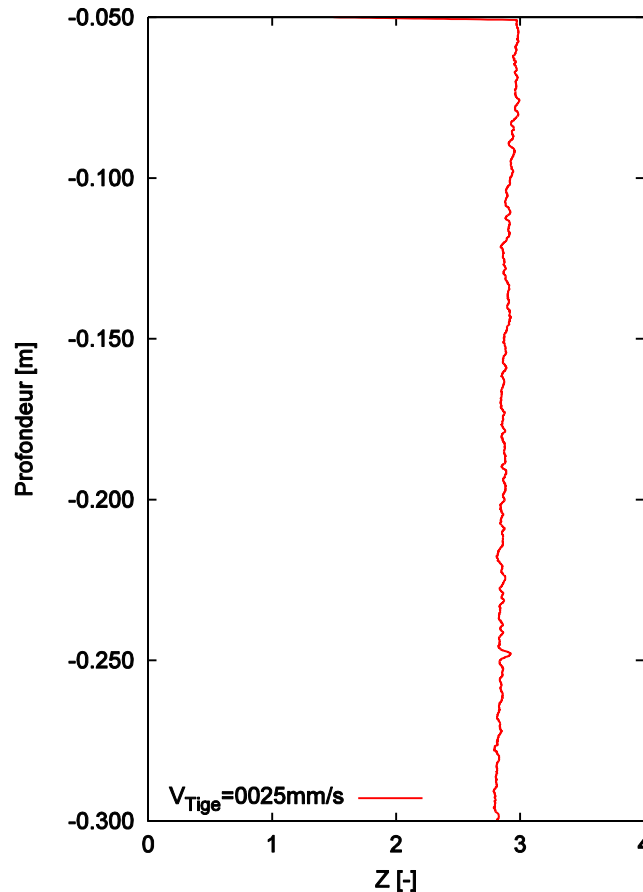


Figure 5-4. Nombre de coordination mesuré dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration en condition statique avec vitesse d'enfoncement égale à 25 mm.s⁻¹.

5.1.3. Chaines de forces

Afin de mieux comprendre l'influence de l'arrangement et du réarrangement des particules sur la capacité portante de l'assemblage des particules lors de l'essai de pénétration, on étudie ici la topologie des contacts.

La **Figure 5-5** représente le réseau de contacts pour les profondeurs **14 cm**, **14.6 cm** et **15 cm** correspondant à trois instants où la force de pointe **F_c** est respectivement inférieure, supérieure et égale à la force moyenne **F_{cm}** (**Figure 5-1**). On note qu'il n'y a que les contacts où **F_N/⟨F_N⟩ > 1** qui sont présentés.

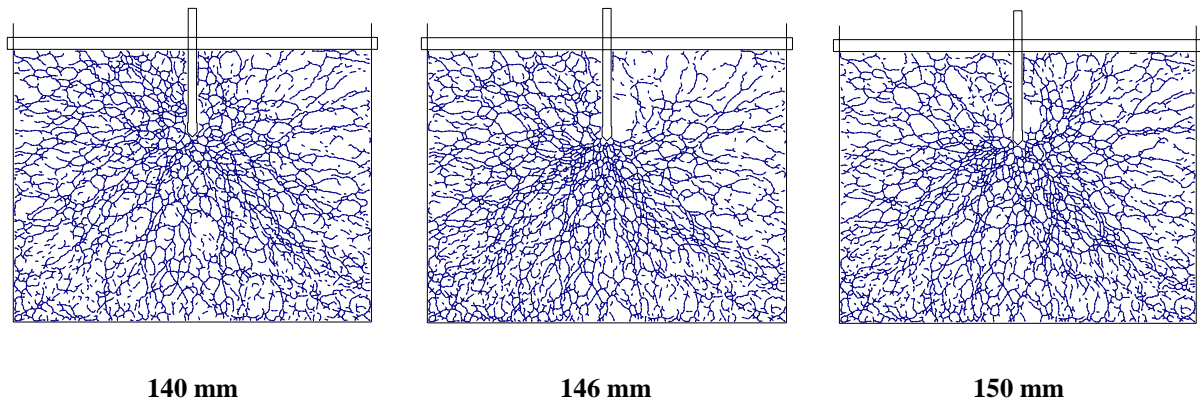


Figure 5-5. Réseaux de contact normal aux différentes profondeurs (14 cm, 14.6 cm et 15 cm) pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

On constate que les contacts forts, c'est-à-dire pour lesquels $F_N / \langle F_N \rangle > 1$, situés au-dessous de la pointe semblent plus concentrés dans les cas où $F_c \geq F_{cm}$ (**14.6 cm** et **15 cm**) par rapport au cas où $F_c < F_{cm}$ (**14 cm**). Par contre, il est difficile de mettre en évidence des différences entre ces réseaux de force. C'est la raison pour laquelle on s'intéresse à la quantification des chaînes de force qui permet d'analyser plus en détail la capacité portante liée à un réseau de forces donné. En effet, d'après (*Peters, Muthuswamy, Wibowo, & Tordesillas, 2005*), la force de pointe F_c est essentiellement portée par les particules dans les chaînes de force forte.

Un algorithme a été développé par (*Peters et al., 2005*) pour déterminer les chaînes de forces à définir à un instant donné à partir de la contrainte principale maximale et de sa direction sur chaque particules. D'après leur algorithme, une chaîne de force doit satisfaire les trois conditions suivantes: (i) le nombre minimal de particules doit être égal à 3, (ii) les contraintes principales maximales des particules doivent être supérieures ou égales à la moyenne des valeurs de contrainte principale maximale et (iii) pour un contact entre les deux particules A et B où $\vec{\sigma}_A$ et $\vec{\sigma}_B$ sont les vecteurs des contraintes principales maximales des particules, et \vec{n}_{AB} et \vec{n}_{BA} les vecteurs branches entre les particules A et B, les angles $\alpha(\vec{\sigma}_A, \vec{n}_{AB})$ et $\alpha(\vec{\sigma}_B, \vec{n}_{BA})$ doivent être inférieurs à 45° .

L'algorithme de détermination des chaînes de force est présenté plus en détail dans le travail de (*Peters et al., 2005*).

La **Figure 5-6** représente les chaînes de force à différents instants pris entre **14** et **15 cm** de profondeur pour l'essai de pénétration statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement. La couleur de chaque particule est liée à sa contrainte principale maximale en échelle logarithmique.

Il est clair que les particules portant des chaînes de force se répartissent partout dans l'échantillon pour le cas où la force de pointe est inférieure à la force de pointe moyenne (à **14.1 cm** de profondeur). A l'inverse, pour les cas où la force de pointe est supérieure ou égale à la force de pointe moyenne (à **14.6 cm** et **15 cm** de profondeur), les chaînes de force se concentrent au-dessous de la pointe. De plus, les particules portant des forces très fortes se situent également au-dessous de la pointe.

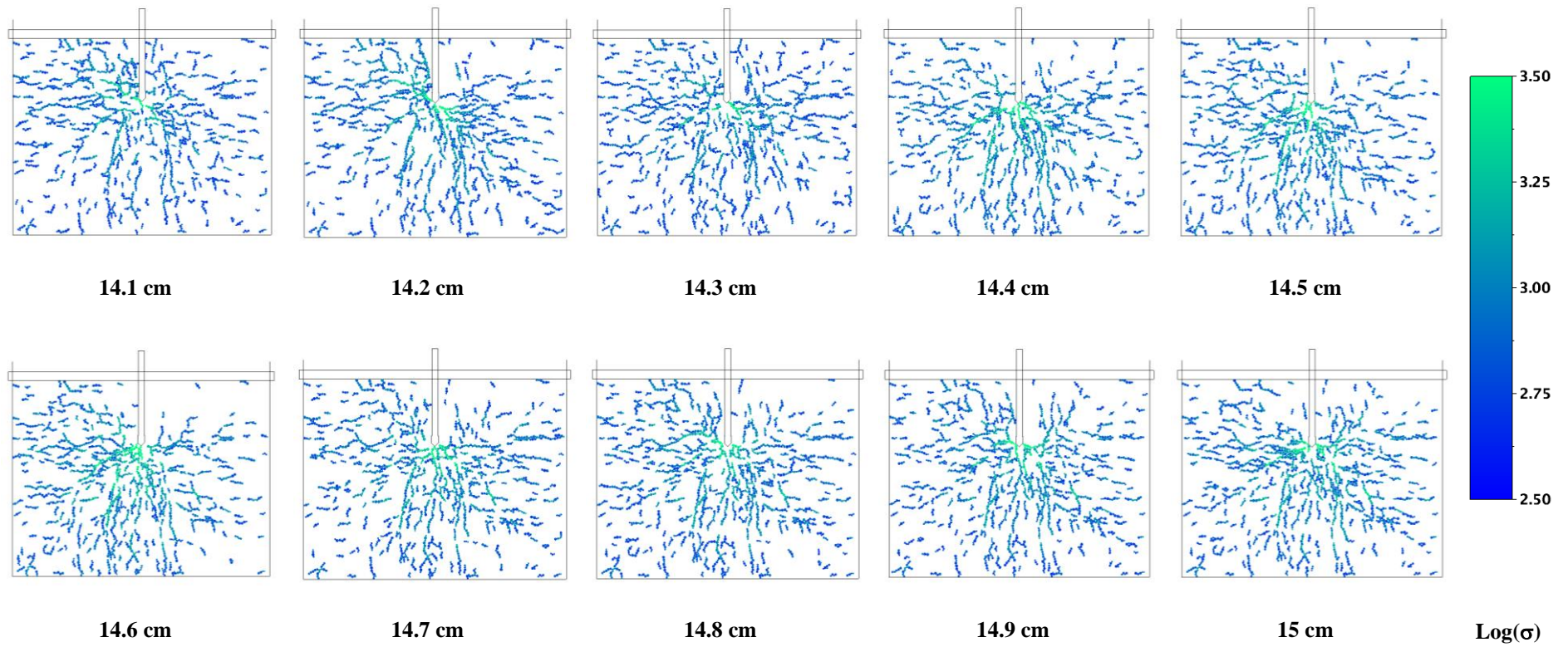


Figure 5-6. Evolution des chaînes de force entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

5.1.4. Réseau de contacts et texture

Les réseaux de chaînes de force sont des ensembles très complexes, plus ou moins discontinus, hétérogènes spatialement et très fluctuants temporellement. On s'attache ici à les décrire quantitativement, d'abord en termes de forces, puis d'orientation de contact et enfin de topologie de contact.

5.1.4.1. Bilan des contacts créés, détruits et persistants

On présente ici les nombres de contact créés, détruits et persistants pour chaque millimètre d'enfoncement entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur (**Figure 5-7**). Ces valeurs sont stables. Le nombre de contacts créés semble être égal au nombre de contacts détruits. Par contre, le nombre de contacts persistants est beaucoup plus grand par rapport aux contacts créés et détruits. Il est l'ordre de **15 000** contacts sur la plage considérée (et l'ordre de **95%** de tous les contacts).

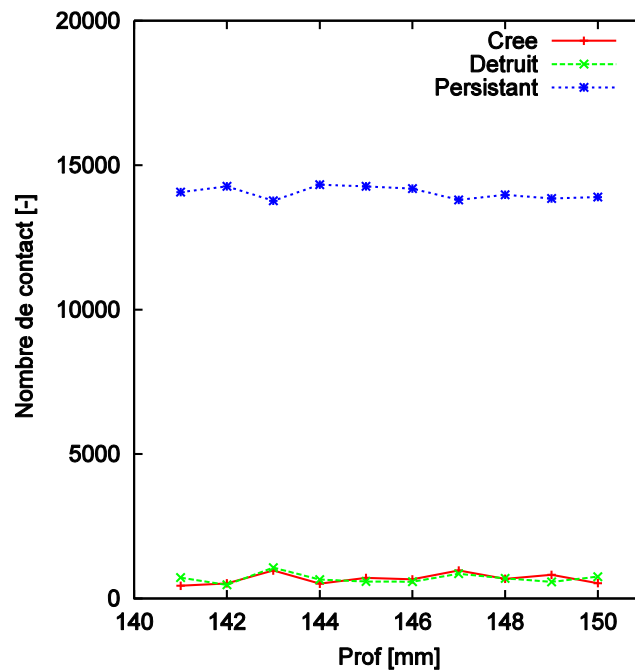


Figure 5-7. Nombres de contacts créés, détruits et persistants pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

5.1.4.2. Orientation des contacts

Un contact est caractérisé par un angle d'orientation ϕ associé à une base (\mathbf{n}, \mathbf{t}) et par la magnitude F de la force qu'il porte. La force de contact se décompose en deux parties, normale et tangentielle (**Equation 5-2**). Un contact est glissant pour $F_T = \pm \mu F_N$.

$$\vec{F} = F_N \vec{n} + F_T \vec{t} \quad \text{Equation 5-2}$$

La **Figure 5-8** présente le schéma retenu pour déterminer l'orientation de contact α et les deux termes de la force de contact F_N et F_T . Une symétrie existant par rapport à l'axe de la tige, on comptera comme égales les orientations opposées de contacts situés de part et d'autre de cet axe.

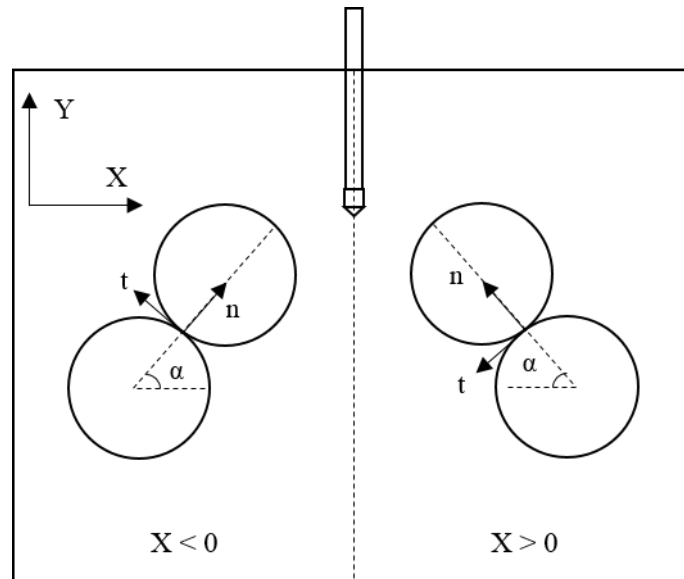


Figure 5-8. Schéma de détermination de la force de contact (F_N et F_T) et de l'orientation de contact (α)

On commence tout d'abord par l'étude de l'anisotropie des orientations de contact dont la distribution $\rho(\alpha)$, de période π est symétrique: un contact compté dans la direction ϕ doit l'être aussi dans la direction $(\alpha + \pi)$, avec la même valeur.

La **Figure 5-9** présente le nombre de contacts entre les particules en fonction de l'orientation du contact pour les profondeurs **14 cm**, **14.6 cm** et **15 cm** où la force de pointe F_c est respectivement inférieure, supérieure et presque égale à celle moyenne $F_{cm} (\cong 41 \text{ N})$ (**Figure 5-1**) pour l'essai de pénétration statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement. On constate que l'orientation de contact semble isotrope pour l'essai de pénétration au régime quasi – statique.

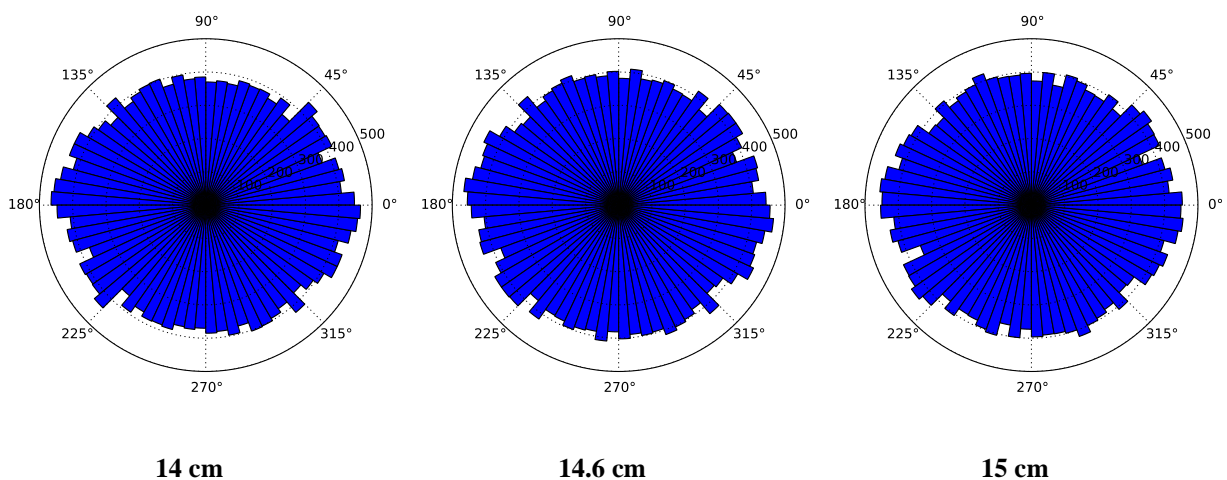


Figure 5-9. Nombre de contacts en fonction de l'angle d'orientation pour différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement effectué sur l'échantillon S_1 .

5.1.4.3. Forces de contact

La distribution des valeurs de forces de contact normales en fonction de l'intensité normale F_N normalisée par la force moyenne $\langle F_N \rangle$ est présentée sur la **Figure 5-10** pour différentes profondeurs. On trouve bien que les forces de contact faibles pour lesquelles $F_N < \langle F_N \rangle$ sont dominantes (de l'ordre de **60 %** des contacts totaux) et ce pour toutes les valeurs de profondeur représentées.

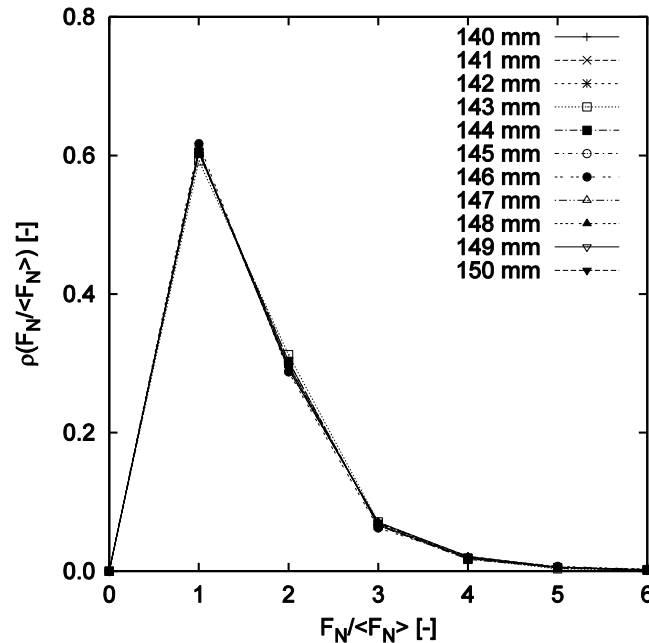


Figure 5-10. Densité de probabilité des forces de contact normales pour l'essai pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

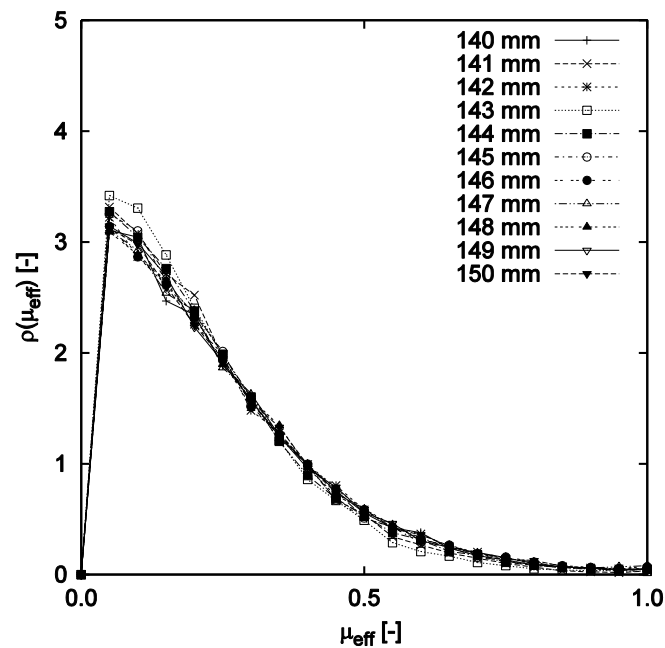


Figure 5-11. Distribution de la mobilisation du frottement lors de l'essai de pénétration en condition statique entre 14 cm à 15 cm de profondeur à 25 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

Nous étudions ensuite statistiquement comment le frottement est mobilisé. On considère le frottement effectif $\mu_{\text{eff}} = F_T/F_N$, compris entre **0.0** et $\mu = 1.0$. Le contact est glissant pour $\mu_{\text{eff}} = \pm 1.0$, roulant sinon.

La **Figure 5-11** montre la distribution de la mobilisation du frottement lors de l'essai de pénétration statique à **25 mm.s⁻¹** de vitesse d'enfoncement. Le pourcentage des contacts glissants est assez faible.

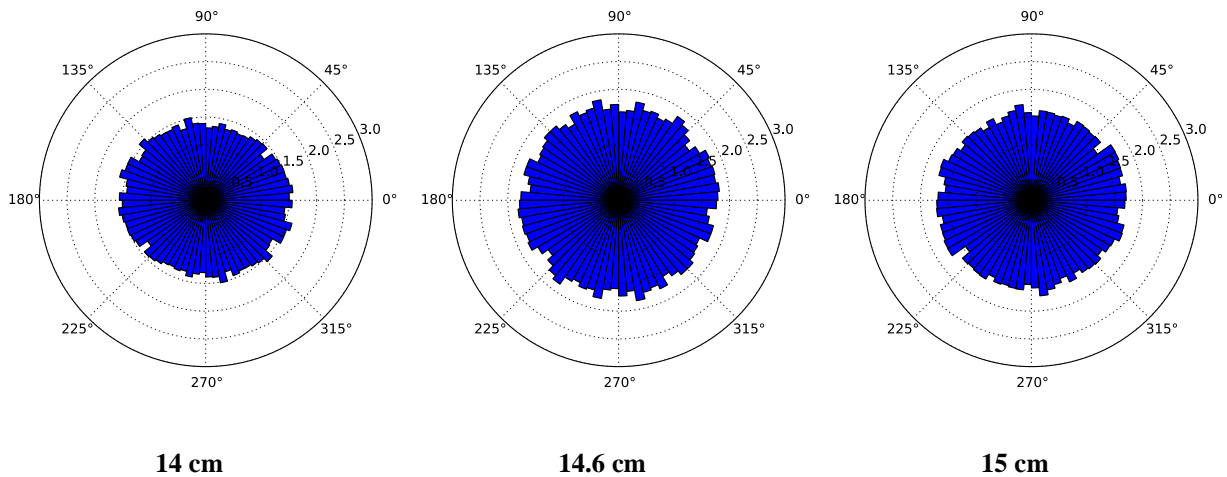


Figure 5-12. Intensité de la force normale de contact en fonction de l'angle de contact aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s⁻¹ de vitesse d'enfoncement.

On s'intéresse maintenant à l'anisotrope de la force normale et de la mobilisation du frottement. La **Figure 5-12** représente la distribution angulaire de la force normale F_N en fonction de l'orientation du contact φ . On constate que l'intensité de la force de contact normale semble isotrope. De plus, plus l'intensité de la force normale est grande, plus la force de pointe F_c augmente (**Figure 5-1**). Concernant la distribution angulaire du frottement effective μ_{eff} , la **Figure 5-13** montre que le frottement effectif moyen est de l'ordre de **20 %** pour l'essai de pénétration statique égale à **25 mm.s⁻¹** et relativement isotrope.

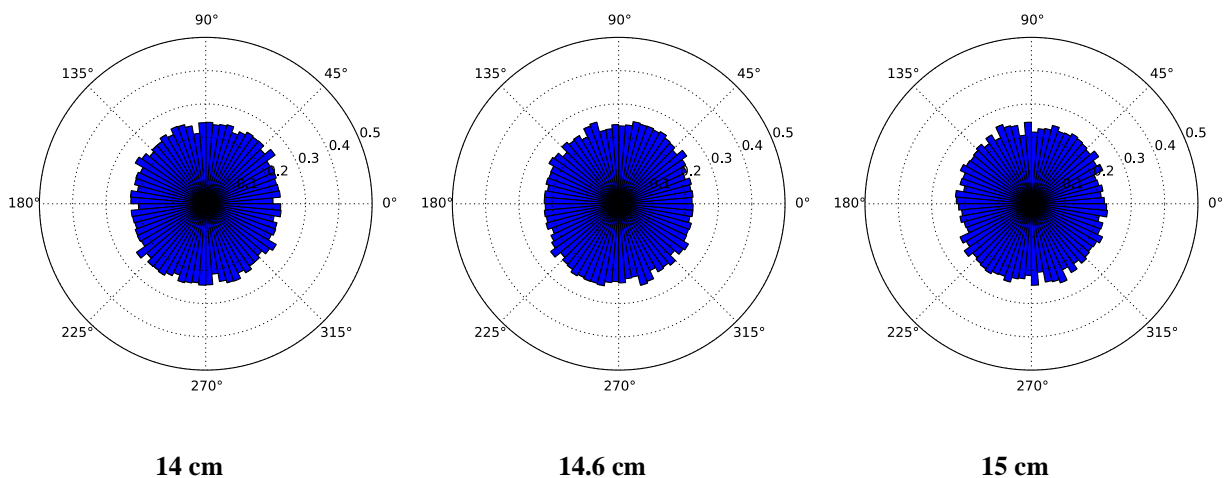


Figure 5-13. Intensité du frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes profondeurs 14 cm, 14.6 cm et 15 cm pour l'essai de pénétration en condition statique à 25 mm.s⁻¹ de vitesse d'enfoncement.

5.1.5. Conclusion

Dans cette section, nous avons analysé l'essai de pénétration statique à **25 mm.s⁻¹** de vitesse d'enfoncement à l'échelle microscopique en termes d'agitation et de réseau de force en étudiant notamment l'orientation des contacts, la distribution angulaire des forces normales et de la mobilisation du frottement.

La température granulaire pour l'essai de pénétration en régime quasi-statique est de l'ordre de **0.001 m².s⁻²**. Les paramètres d'analyse calculés sont stables en fonction de la profondeur. L'augmentation de la température granulaire peut être corrélée avec une augmentation de la résistance de pointe.

L'étude du réseau de force a montré que les contacts faibles sont dominants (environ **60 %** de l'ensemble des contacts). L'étude de la distribution de la mobilisation du frottement met en évidence que le nombre de contacts glissants est relativement faible. De plus, le nombre de contacts persistants représente en moyenne environ **95%** des contacts.

L'analyse de l'anisotrope de la force normale et de la mobilisation du frottement montre que les intensités de la force normale et du frottement effectif sont isotropes. Le frottement effectif mobilise de l'ordre de **20 %** du frottement des particules en moyenne.

La capacité portante des réseaux de forces à un instant donné a été corrélée avec la topologie du contact et notamment les chaînes de forces fortes. Les chaînes de force fortes se concentrent sous la pointe lorsque la force de pointe **F_c** est forte.

5.2. Influence de la vitesse en condition statique

Lorsque la vitesse d'enfoncement augmente d'une faible vitesse de 25 mm.s^{-1} à une vitesse importante de 5000 mm.s^{-1} , le comportement des particules passe de l'état quasi-statique à un régime d'écoulement dense quantifiable par l'augmentation du nombre d'inertie I (Roux & Chevoir, 2005). Ainsi, l'objectif de cette section est d'évaluer l'évolution du mécanisme de pénétration statique pour différents régimes de sollicitation, à partir des paramètres présentés dans la **section 5.1**. Les valeurs de vitesse étudiées correspondent à 0.025 , 1.25 et 5.0 m.s^{-1} .

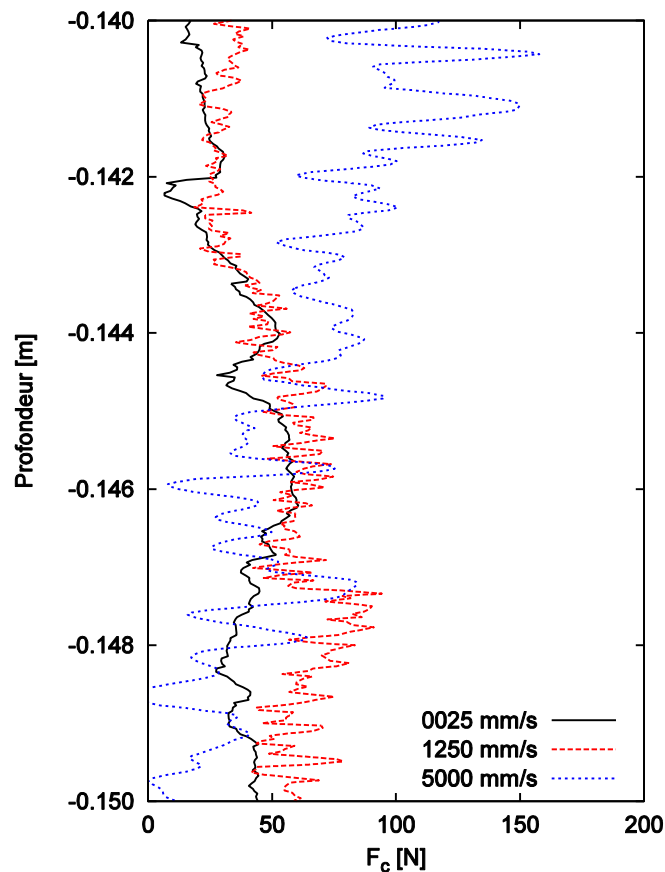


Figure 5-14. Pénétragramme statique obtenu entre 14cm et 15 cm de profondeur pour les vitesses 25, 1250 et 5000 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

5.2.1. Agitation du milieu granulaire

La **Figure 5-15** représente la densité de probabilité de la vitesse de fluctuation $\overline{\delta V}_t$ pour l'essai de pénétration statique 1250 mm.s^{-1} et 5000 mm.s^{-1} de 14 cm à 15 cm de profondeur.

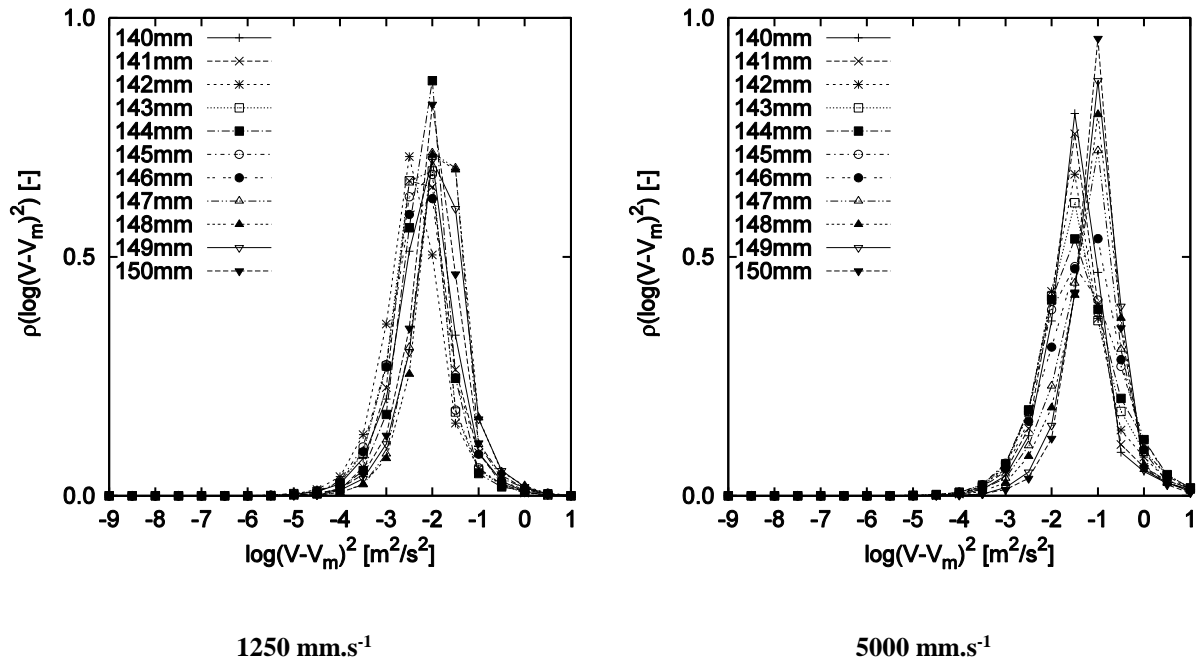


Figure 5-15. Densité de probabilité de la vitesse fluctuation $\overline{\delta V}_t$ pour l'essai de pénétration statique 1250 et 5000 mm.s^{-1} .

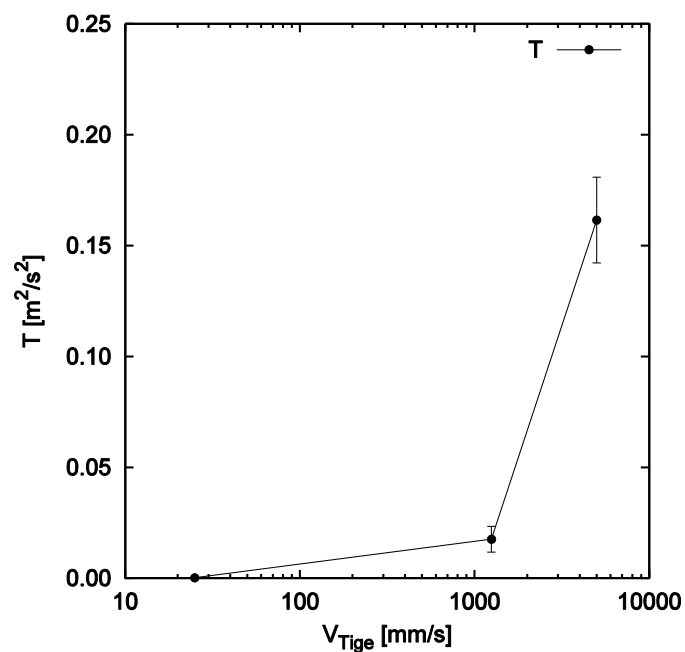


Figure 5-16. Température granulaire moyenne entre 14 cm et 15 cm aux différentes vitesse d'enfoncement.

En comparant la **Figure 5-3** avec la **Figure 5-15** on trouve que l'agitation granulaire reste faible lorsque la vitesse d'enfoncement augmente jusqu'à 1250 mm.s^{-1} . Cette stabilité peut

être mise en relation avec la stabilité de la force de pointe moyenne pour des vitesses de pénétration inférieures à 1250 mm.s^{-1} (Figure 5-14). Cette conclusion est en accord avec l'observation de (M. Jiang et al., 2014) qui ont souligné que l'on pourrait obtenir la même résistance de pointe q_c si on utilise une vitesse d'enfoncement beaucoup plus grande (1000 mm.s^{-1}) que celle préconisée dans les normes ($20 \pm 5 \text{ mm.s}^{-1}$).

La température granulaire moyenne déterminée entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur pour l'essai de pénétration aux différentes vitesses est présentée dans la Figure 5-16. La fluctuation n'augmente significativement que lorsque la vitesse de la tige est égale à **5000 mm.s⁻¹**. Ainsi, la force de pointe F_c obtenue à cette vitesse est plus grande que celle obtenue à faible vitesse (Figure 5-3).

5.2.2. Evolution du nombre de coordination

La Figure 5-17 représente l'évolution du nombre de coordination dans la zone située entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur aux différentes vitesses de l'enfoncement. On trouve que le nombre de coordination diminue et devient moins stable quand la vitesse de l'enfoncement augmente.

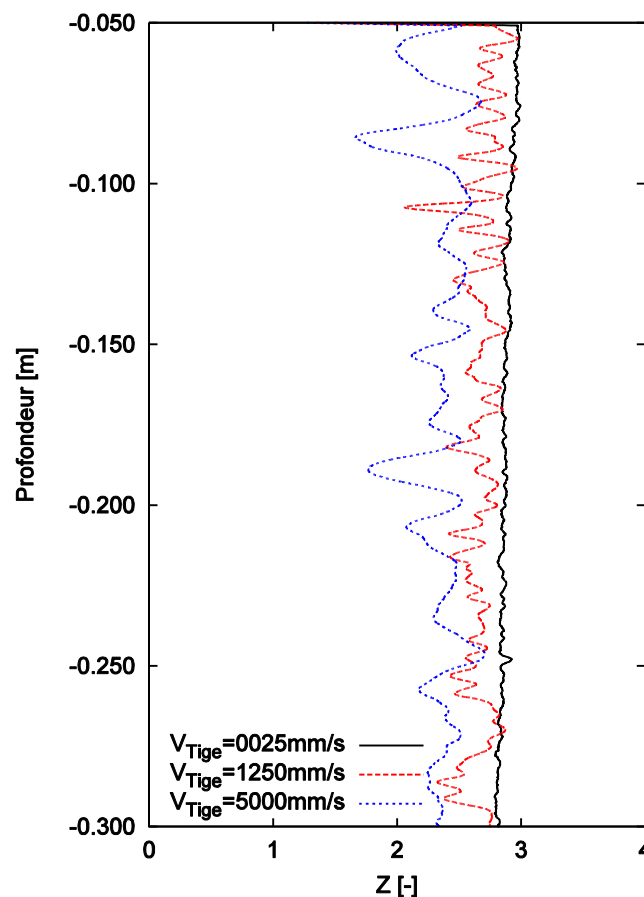


Figure 5-17. Evolution du nombre de coordination dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration statique aux trois vitesses de l'enfoncement 25, 1250 et 5000 mm.s^{-1} .

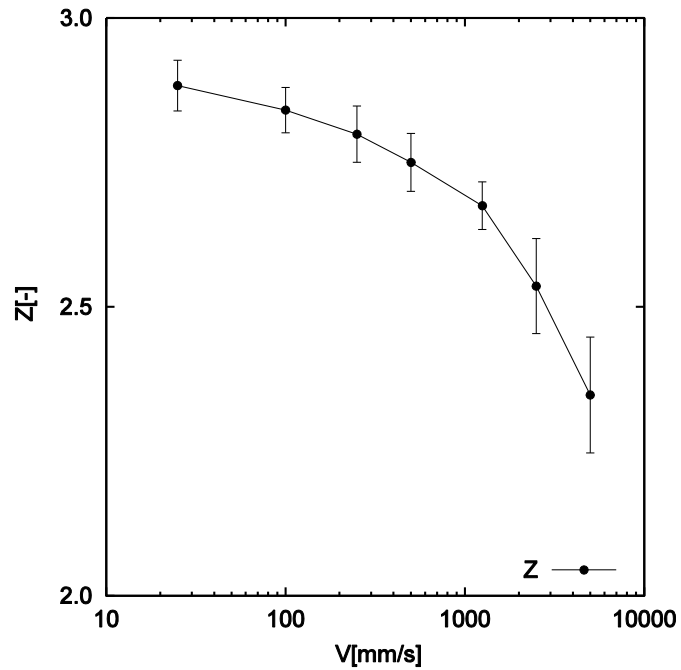


Figure 5-18. Nombre de coordination moyen entre 5 et 30 cm de profondeur dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'essai de pénétration statique aux différentes vitesses de l'enfoncement.

Le nombre de coordination moyen déterminé dans la zone de mesure entre **5 cm** et **30 cm** de profondeur aux différentes vitesses d'enfoncement est présenté dans la **Figure 5-18**. On voit bien que le nombre de coordination diminue et l'écart-type devient de plus en plus important lorsque la vitesse de l'enfoncement augmente.

5.2.3. Chaines de forces

Le réseau de force a été analysé en termes de chaines de forces fortes entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur pour les deux vitesses d'enfoncement **1250 mm.s⁻¹** et **5000 mm.s⁻¹**. Ils sont représentés sur les figures **5-19** et **5-20**.

On trouve que l'évolution des chaines de forces fortes entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur semblent stable quand la vitesse d'enfoncement reste inférieure à **1250 mm.s⁻¹** et que les chaines de forces fortes se répartissent en général dans l'ensemble de l'échantillon.

Quand la vitesse d'enfoncement est plus grande (**5000 mm.s⁻¹**), l'évolution des chaines de forces fortes entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur devient moins stable. La répartition des chaines de forces fortes est plus aléatoire dans l'échantillon et les chaines de forces fortes raccourcissent. Par ailleurs, on constate qu'il n'y a pas de contacts dans la région se situant le long de la tige à proximité de la pointe. Ainsi, la force de pointe **F_c** devient moins stable lorsque la vitesse de la tige augmente.

Les figures **5-6** et **5-19** montrent que les chaines de forces fortes semblent comparables pour les deux essais réalisés à **25 mm.s⁻¹** et **1250 mm.s⁻¹** de vitesse d'enfoncement à **14.1 cm** de profondeur. Ces essais présentent une force de pointe **F_c** similaire (**Figure 5-14**). Pour une vitesse de **5000 mm.s⁻¹**, les chaines de forces fortes diffèrent. Les contraintes maximales des particules se situant au-dessous de la pointe sont plus importantes. Ainsi, la force de pointe **F_c** est plus forte à **14.1 cm** de profondeur pour la vitesse de la tige égale à **5000 mm.s⁻¹** que les vitesses égales à **25 mm.s⁻¹** et **1250 mm.s⁻¹**. Par contre, pour **14.5 cm** de profondeur (valeurs de force de pointe comparables), on observe que les contraintes maximales des particules se situant au-dessous de la pointe sont similaires.

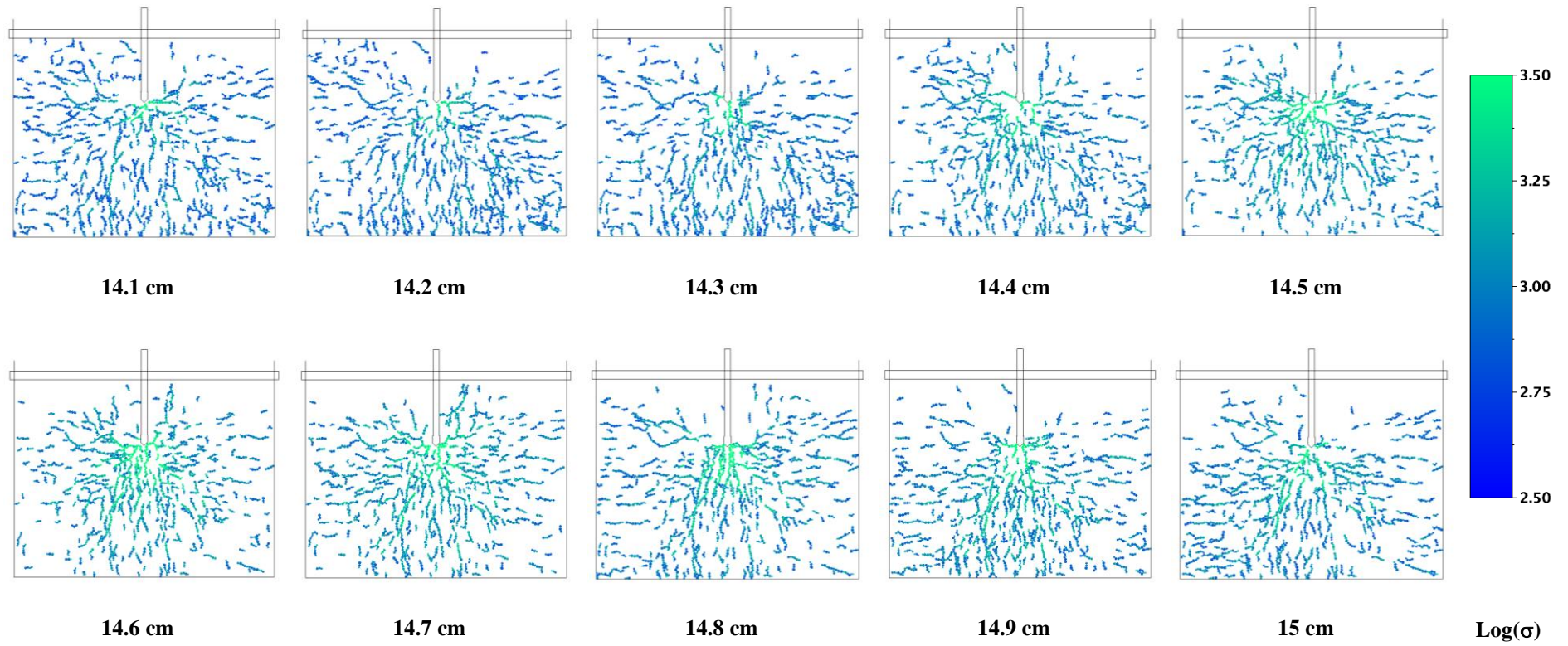


Figure 5-19. Evolution des chaines de forces entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

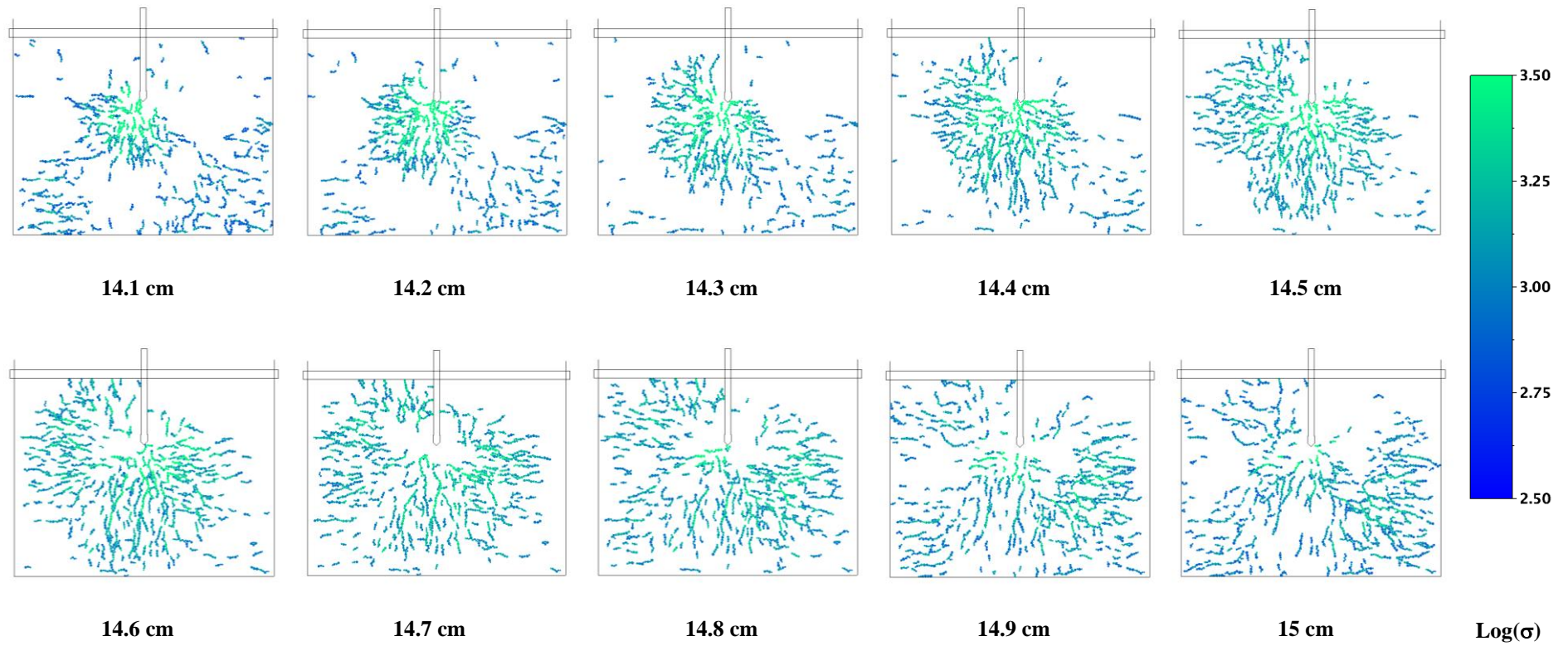


Figure 5-20. Evolution des chaines de forces entre 14 cm et 15 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique à 5000 mm.s^{-1} de vitesse d'enfoncement.

5.2.4. Réseau de contacts et texture

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'influence de la vitesse sur l'essai de pénétration en termes de réseau de contacts.

5.2.4.1. Bilans des contacts créés, détruits et persistants

La **Figure 5-21** représente le pourcentage moyen de contacts persistants déterminé entre **14 cm** et **15 cm** de profondeur en fonction de la vitesse de l'enfoncement pour l'essai de pénétration statique. On trouve que le pourcentage de contacts persistants diminue de **95 %** à **88 %** des contacts lorsque la vitesse augmente.

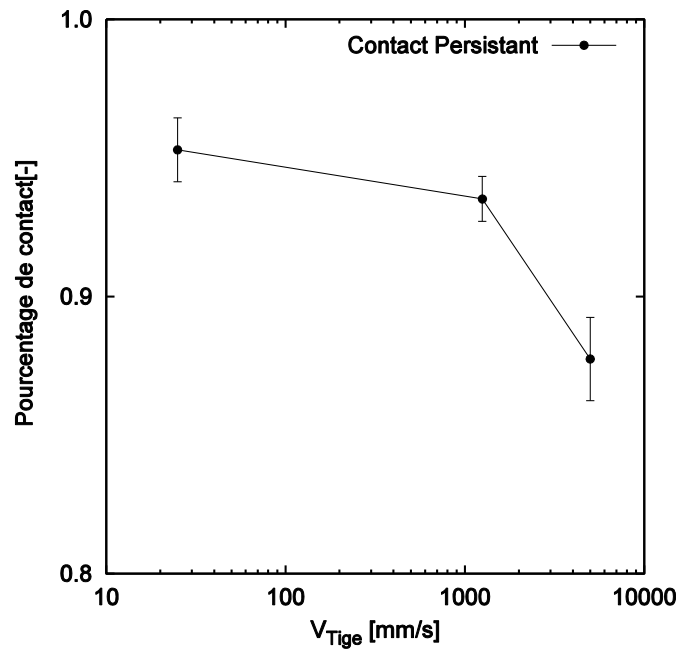


Figure 5-21. Pourcentage moyen de contacts persistants entre 14 cm et 15 cm aux différentes vitesses d'enfoncement.

5.2.4.2. Orientation des contacts

On étudie la distribution angulaire de nombre de contacts pour les essais de pénétration statique (25, 1250 et 5000 mm.s⁻¹) pour deux profondeurs où la force de pointe est soit différente pour les 3 vitesses (à 14 cm) (Figure 5-22), soit similaire (à 14.5 cm) (Figure 5-23). On trouve que le nombre de contacts diminue quand la vitesse d'enfoncement augmente et préférentiellement dans les directions non horizontales.

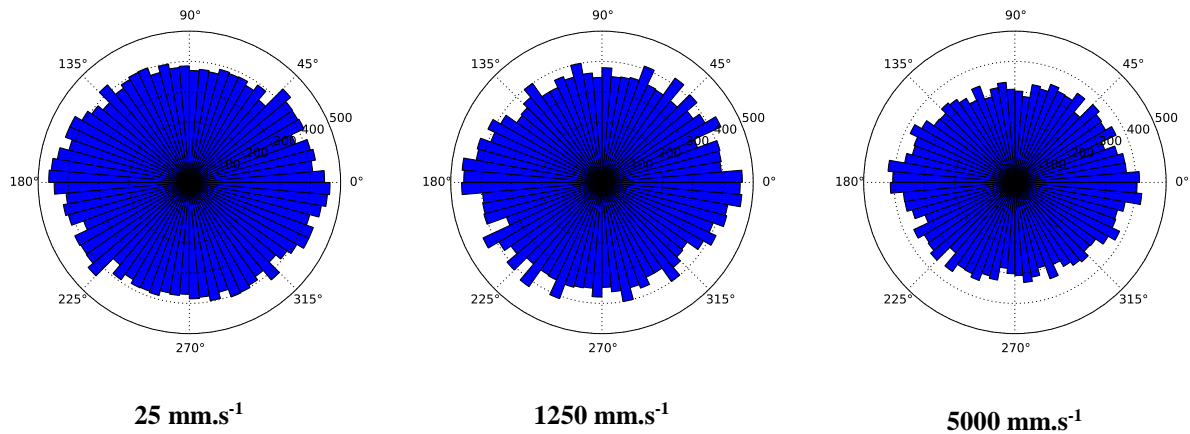


Figure 5-22. Nombre de contacts en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

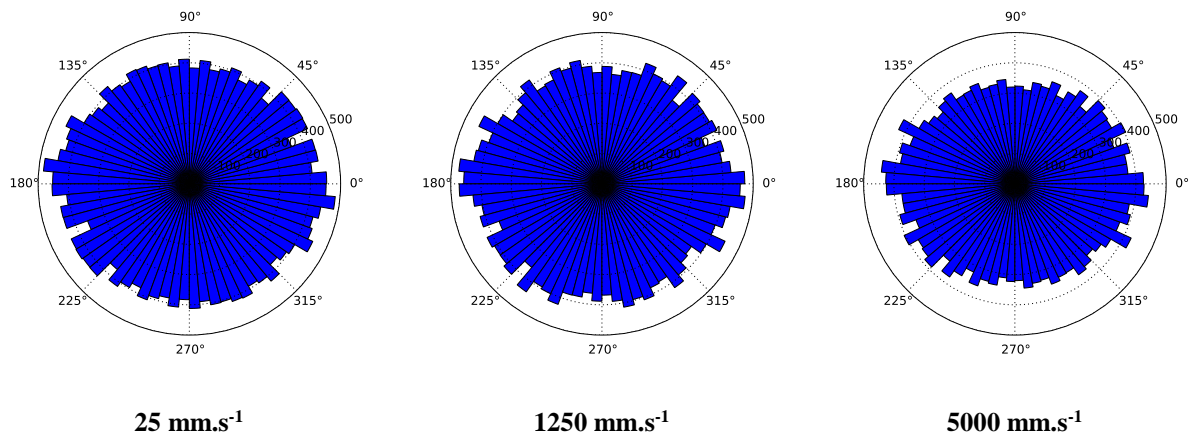


Figure 5-23. Nombre de contacts en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

5.2.4.3. Forces de contact

La **Figure 5-24** représente la probabilité de densité de la force normale aux contacts aux différentes vitesses 1250 mm.s^{-1} et 5000 mm.s^{-1} . Ces courbes varient peu avec la profondeur. Les contacts portant des faibles valeurs de forces restent dominants et le pourcentage de contacts faibles par rapport à l'ensemble des contacts passe de **60%** à **65%** quand la vitesse de l'enfoncement augmente de 1250 mm.s^{-1} à 5000 mm.s^{-1} .

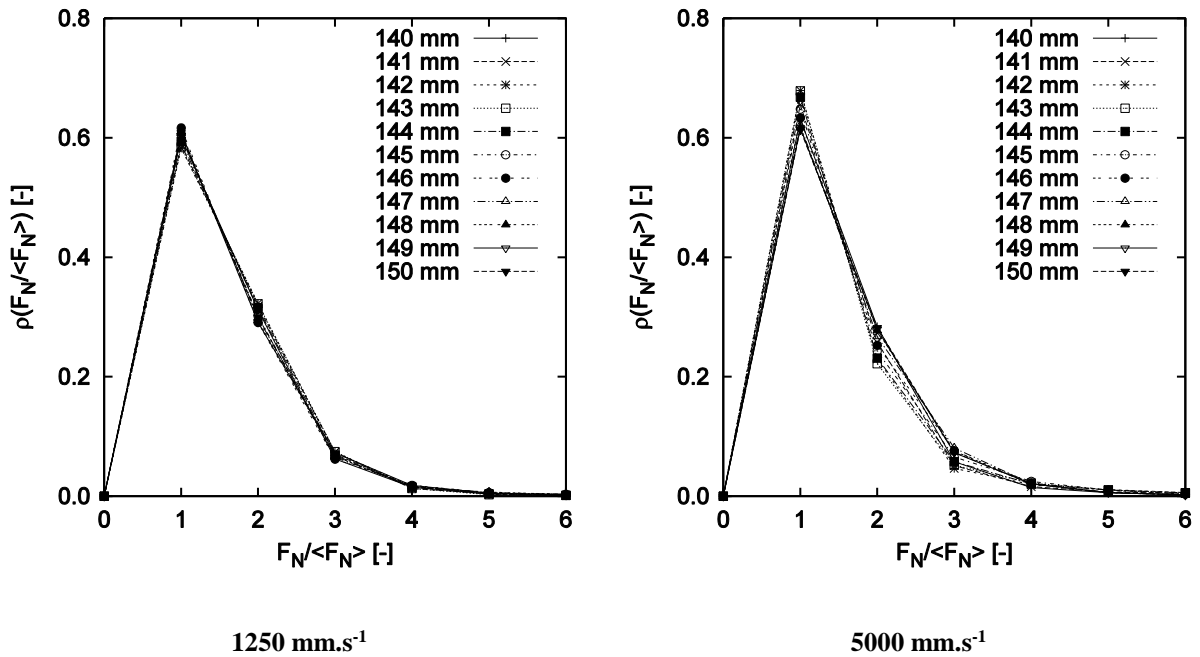


Figure 5-24. Densité de probabilité de la force de contact normale pour l'essai de pénétration statique.

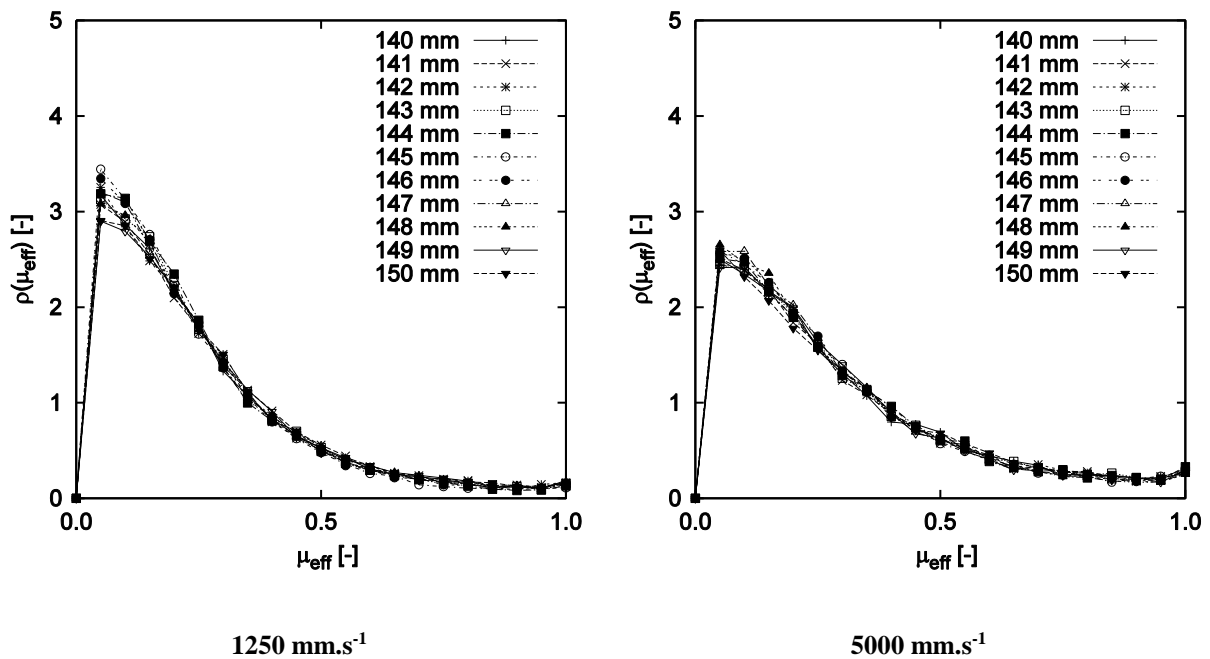


Figure 5-25. Densité de probabilité du frottement effectif lors de l'essai de pénétration statique.

La **Figure 5-25** montre la densité de probabilité du frottement effectif en fonction de la vitesse de l'enfoncement. On constate que le nombre de contacts où $0.9 < |\mu_{eff}| \leq 1$ augmente quand la vitesse d'enfoncement augmente. Ainsi, le nombre de contacts glissants augmente lorsque la vitesse d'enfoncement augmente.

On étudie ensuite l'intensité de la force normale et du frottement effectif en fonction de l'angle de contact pour mettre en évidence la différence de l'anisotropie de force de contact normale et du frottement effectif lorsque la vitesse de la tige augmente.

Les figures **5-26** et **5-27** montrent la distribution angulaire de la force normale aux différentes profondeurs lorsque la vitesse de la tige augmente de 25 mm.s^{-1} à 5000 mm.s^{-1} . On observe que l'intensité de la force normale devient plus grande quand la vitesse augmente. Cela paraît logique parce que la sollicitation augmente tandis que le nombre de contacts diminue lorsque la vitesse de l'enfoncement augmente. Aucune direction de pression dominante n'est observée puisque l'intensité de la force normale semble indépendante de la direction du contact.

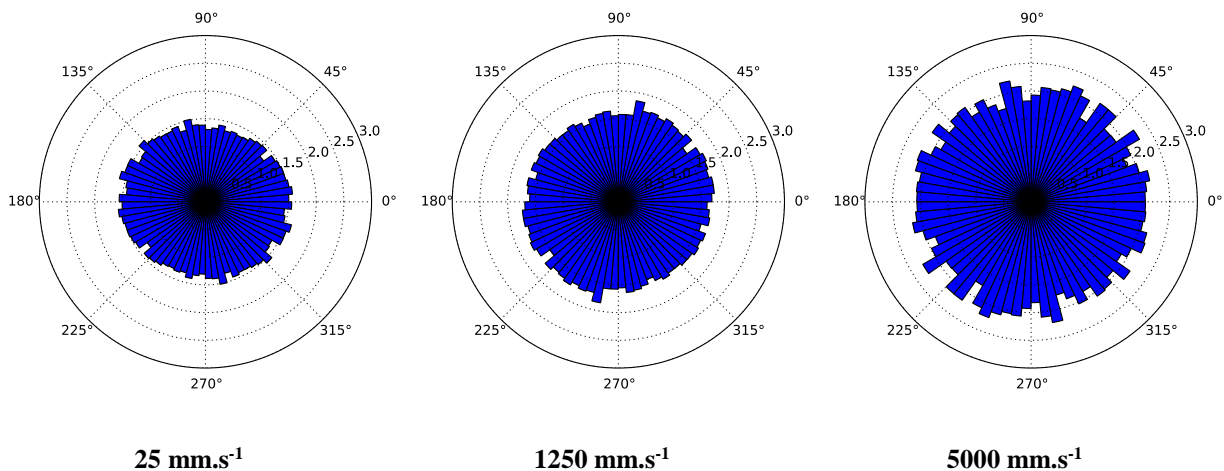


Figure 5-26. Intensité de la force de contact normale en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

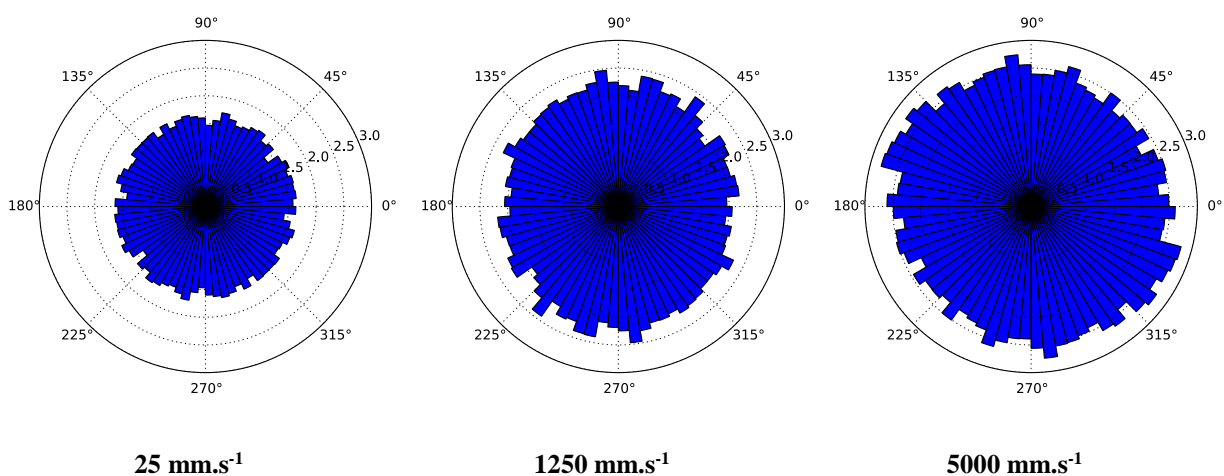


Figure 5-27. Intensité de la force de contact normale en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

Les figures 5-28 et 5-29 montrent la distribution angulaire du frottement effectif aux différentes profondeurs lorsque la vitesse de la tige augmente de 25 mm.s^{-1} à 5000 mm.s^{-1} . Le frottement effectif ne dépend pas l'angle de contact et augmente avec la vitesse de la tige. Cette conclusion est en accord avec la conclusion de (Da Cruz, 2004) qui a montré que le frottement effectif augmente rapidement quand le comportement des particules passe d'un régime critique à un régime d'écoulement dense.

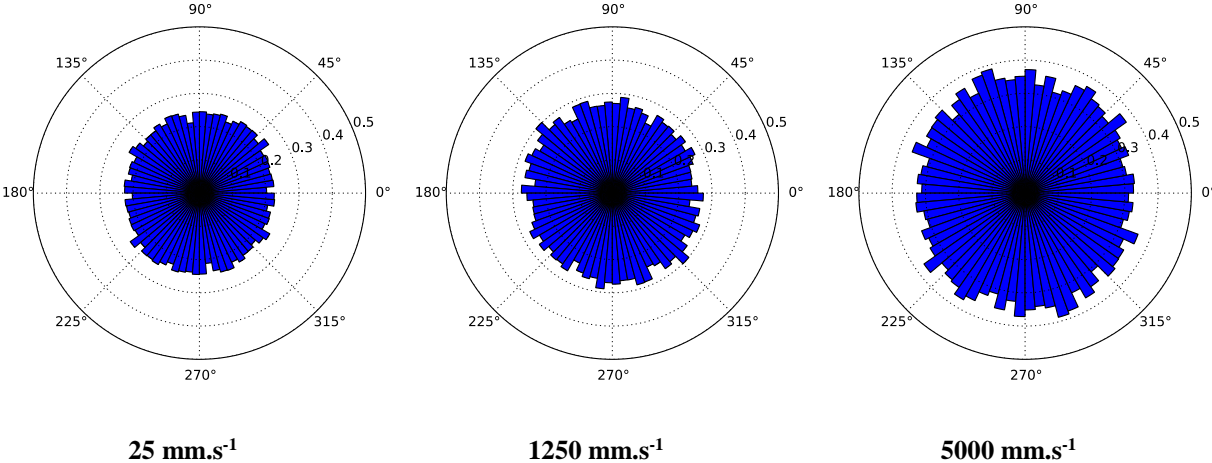


Figure 5-28. Intensité de frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

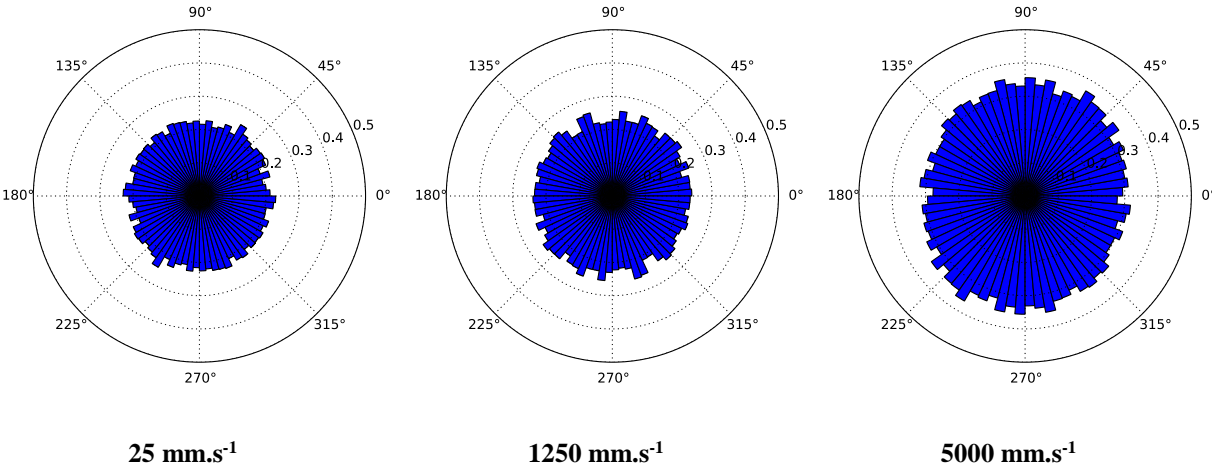


Figure 5-29. Intensité de frottement effectif en fonction de l'angle de contact aux différentes vitesses à 14.5 cm de profondeur pour l'essai de pénétration statique.

5.2.5. Conclusion

Dans cette section l'influence de la vitesse sur le mécanisme d'enfoncement statique a été analysée. Lorsque la vitesse de la tige augmente de **25 mm.s⁻¹** à **5000 mm.s⁻¹**, l'assemblage des particules passe d'un régime quasi-statique à un régime d'écoulement dense. L'agitation des particules augmente, le nombre de contact diminue donc. Cependant, aucune direction de contact dominante n'est observée. L'intensité de la force normale ainsi que celle de frottement effectif augmente. Elle semble indépendante de la direction du contact.

L'évolution des chaînes de forces fortes en fonction de la profondeur devient instable lorsque la vitesse de la tige augmente. Cependant, les chaînes de forces fortes restent stables en fonction de la profondeur lorsque la vitesse de la tige est inférieure à **1250 mm.s⁻¹**. De plus, bien que les chaînes de forces fortes raccourcissent pour des vitesses plus importantes, l'intensité de contrainte maximale des particules est plus importante pour la vitesse de la tige égale à **5000 mm.s⁻¹** que pour les vitesses de la tige moins importantes (inférieures à **1250 mm.s⁻¹**).

Ces observations à l'échelle microscopique peuvent être reliées à l'augmentation de la force de pointe ainsi que de l'écart-type avec la vitesse d'enfoncement.

5.3. Influence du mode d'application: conditions statique ou dynamique

L'objectif de cette section est de tenter d'expliquer à l'échelle microscopique les différences de force de pointe obtenues entre l'essai de pénétration statique et l'essai de pénétration dynamique aux trois régimes correspondant aux trois gammes de vitesse de la tige (100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹).

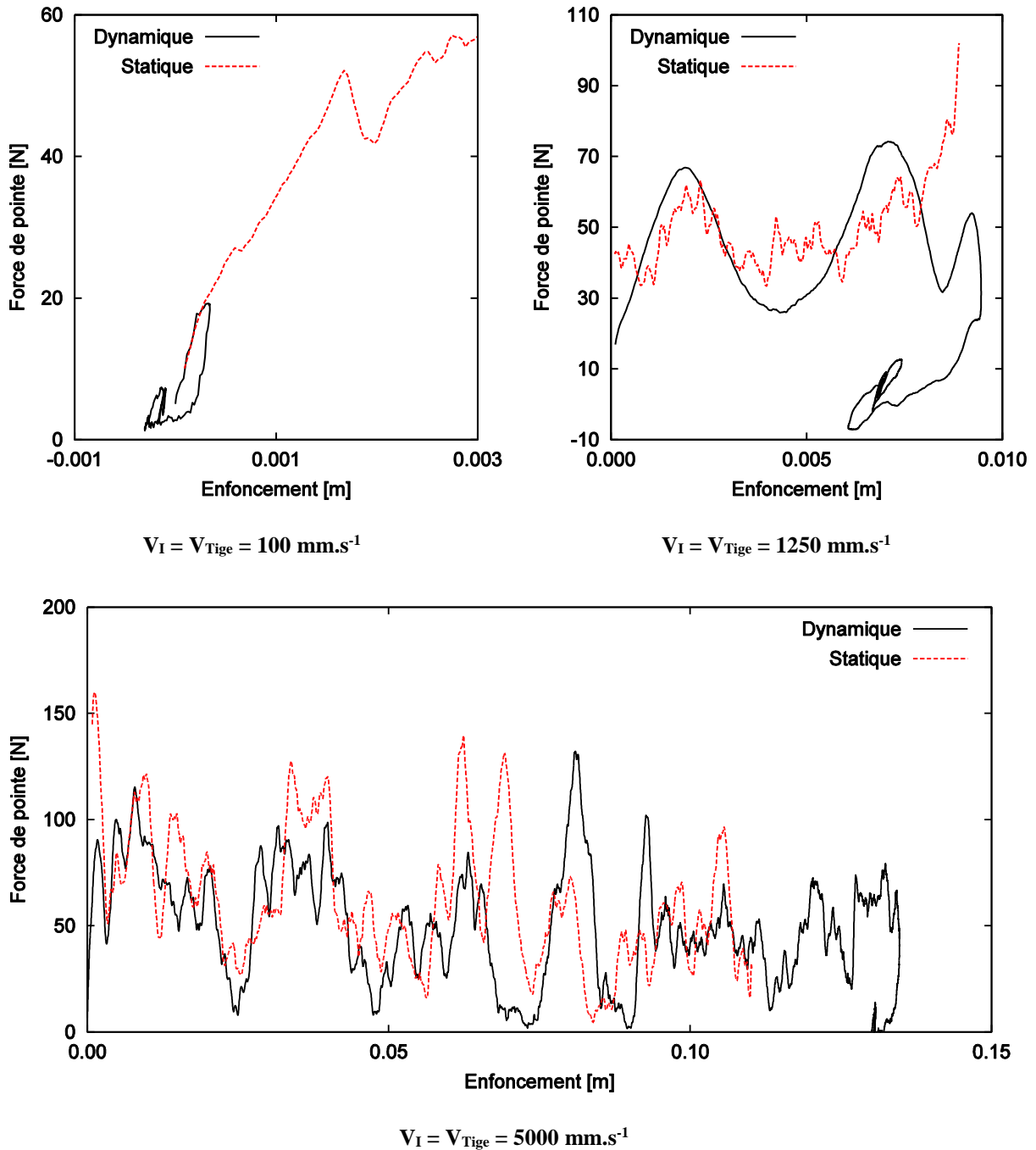


Figure 5-30. Pénétrogramme pour les essais de pénétration aux trois régimes de vitesse de la tige 100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹.

Tous les essais de pénétration statique et dynamique sont réalisés pour le même état initial. Quand la vitesse de la tige est supérieure à 1250 mm.s^{-1} , l'énergie injectée dans le milieu est la même entre le début et la fin de l'essai: l'essai statique a donc été arrêté lorsque l'énergie injectée correspondait à l'énergie injectée de l'essai dynamique.

Pour le cas où la vitesse de l'impactant est égale à 100 mm.s^{-1} , l'énergie d'impact dans le milieu est faible ($E_I = 0.0025 \text{ J}$). L'enfoncement de cet essai est donc faible (**Figure 5-30**). Ainsi, les analyses à cette vitesse au - dessous seront présentées en fonction du temps au lieu de l'enfoncement.

La **Figure 5-30** montre les courbes charge-enfoncement obtenues aux différents régimes correspondant aux trois vitesses de la tige 100 , 1250 et 5000 mm.s^{-1} .

Lorsque la gamme de vitesse de l'impactant est égale ou inférieure à 100 mm.s^{-1} , on trouve que l'énergie injectée n'est pas suffisante pour que la tige enfonce dans le milieu granulaire pour l'essai de pénétration dynamique. La force de pointe obtenue en condition dynamique F_a est donc faible par rapport à celle en condition statique.

Au deuxième régime où la vitesse de la tige est égale à 1250 mm.s^{-1} , l'enfoncement semble similaire pour les essais de pénétration statique et dynamique. Ainsi, la force de pointe dynamique F_a semble similaire à celle statique F_c .

Par contre, lorsque de vitesse de l'impactant est égale à 5000 mm.s^{-1} , la force de pointe F_a augmente. L'enfoncement final est moins important pour l'essai de pénétration statique que pour l'essai de pénétration dynamique. Ainsi, la force de pointe dynamique F_a est inférieure à F_c obtenue par l'essai de pénétration statique où la valeur de la vitesse de la tige est égale à celle de l'impactant.

Afin de tenter de comprendre ces différences, on va s'attacher à étudier l'agitation granulaire des particules dans les deux conditions : statique et pour l'essai dynamique.

5.3.1. Agitation du milieu granulaire

La **Figure 5-31** représente la température granulaire pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse (**100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹**).

On note que la température granulaire (**T**) pour le régime de vitesse de la tige égale à **100 mm.s⁻¹** est présentée en fonction du temps.

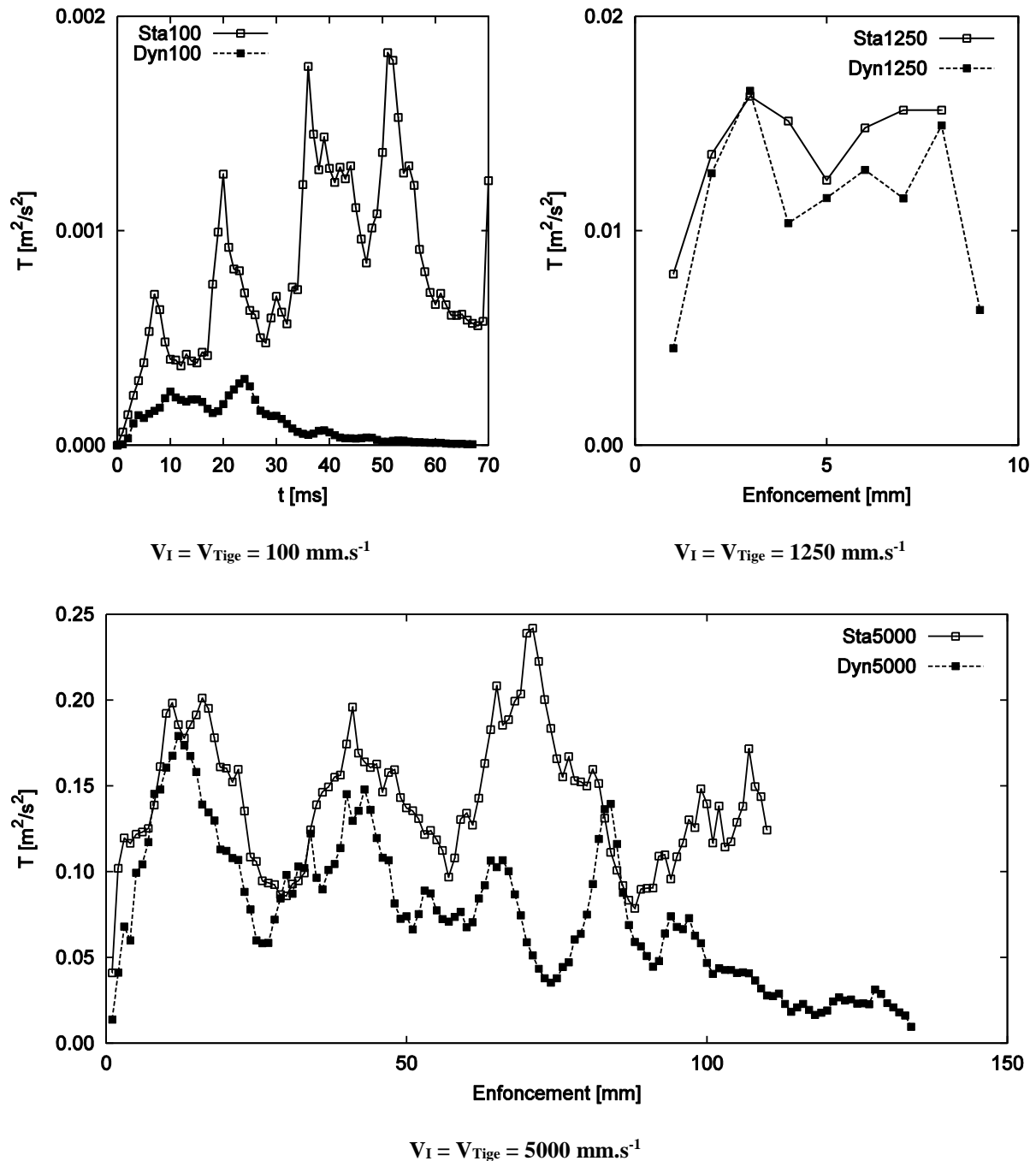


Figure 5-31. Température granulaire en fonction de l'enfoncement pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse 100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹.

On observe que la température granulaire pour le régime de vitesse **100 mm.s⁻¹** est globalement faible (de l'ordre de **0.002 m².s⁻²**). Par contre, on retrouve que la température granulaire est beaucoup plus faible pour l'essai de pénétration dynamique que pour l'essai de pénétration statique.

Quand la vitesse de la tige est égale à **1250 mm.s⁻¹**, les températures granulaires sont proches (de l'ordre de **0.02 m².s⁻²**) pour les essais de pénétration statique et dynamique.

Lorsque la vitesse d'impact est égale **5000 mm.s⁻¹** en dynamique, la sollicitation change de nature et le comportement granulaire pendant l'essai dynamique passe d'un régime d'écoulement dense en début d'essai à un régime quasi-statique en fin d'essai. A partir de la **Figure 5-31**, on constate que la température granulaire est presque similaire entre l'essai statique et l'essai dynamique au début de la pénétration, c'est-à-dire lorsque les vitesses sont du même ordre. Cependant, en fin d'essai dynamique, la vitesse de la tige diminue significativement et on observe que la température granulaire diminue. La température granulaire semble stable en moyenne pour l'essai réalisé statique.

5.3.2. Evolution du nombre de coordination

La **Figure 5-32** représente le nombre de coordination déterminé dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse **100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹**.

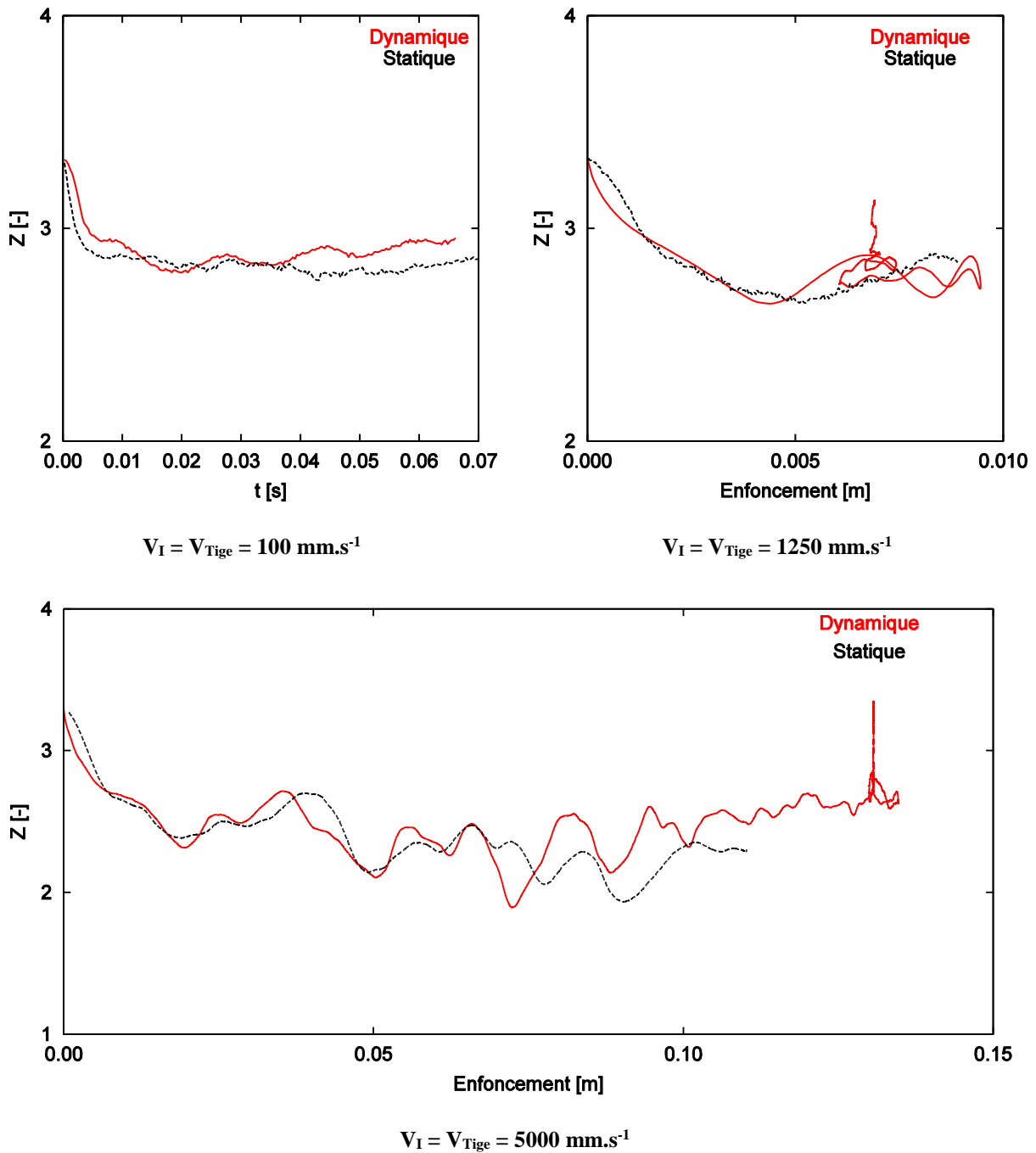


Figure 5-32. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse 100, 1250 et 5000 mm.s⁻¹

On observe que l'évolution du nombre de coordination pendant les essais de pénétration statique et dynamique semble similaire. On note que le nombre de coordination à la fin de l'essai de pénétration dynamique tend à augmenter à cause de la diminution de la vitesse de la tige.

5.3.3. Chaines de forces

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'évolution des chaines de force forte pendant les essais de pénétration statique et dynamique aux trois régimes de vitesse de la tige **100**, **1250** et **5000 mm.s⁻¹**.

Quand la vitesse de la tige reste faible (**100 mm.s⁻¹**), on observe que la forme des chaines de forces fortes semble ne pas changer en fonction du temps pour l'essai de pénétration dynamique. De plus les contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe restent faibles (**Figure 5-33**) puisque l'énergie injectée dans le milieu n'est pas suffisante à enfoncer la tige. Par contre, pour l'essai de pénétration statique, la tige est toujours enfoncée dans le milieu à vitesse égale à **100 mm.s⁻¹**, on trouve que bien que les chaines de forces fortes restent stables, les contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe deviennent plus grandes que dans l'essai de pénétration dynamique (**Figure 5-33**).

La **Figure 5-34** représente l'évolution des chaines de force forte pour les essais de pénétration statique au régime de vitesse de la tige égale à **1250 mm.s⁻¹**. La forme des chaines de force forte pour les essais de pénétration statique et dynamique reste similaire et est un peu changé par l'enfoncement de la tige. En plus, l'intensité des contraintes principales maximales des particules au – dessous de la pointe est comparable pour les deux modes d'application de la sollicitation.

Les figures **5-35** et **5-36** représentent les chaines de forces fortes pour les essais de pénétration dynamique et statique au régime de vitesse le plus rapide (**5000 mm.s⁻¹**) en fonction de l'enfoncement de la tige.

Au début de l'essai de pénétration dynamique, la vitesse de la tige est comparable à celle de l'essai de pénétration statique et égale à **5000 mm.s⁻¹**. Ainsi, les chaines de forces fortes sont similaires pour les deux modes d'application de la sollicitation (**Figure 5-35**). Cependant, lors de la diminution de la vitesse de la tige à la fin de l'essai de pénétration dynamique, l'évolution des chaines de forces fortes devient plus stable pour l'essai de pénétration dynamique que pour l'essai de pénétration statique (**Figure 5-36**).

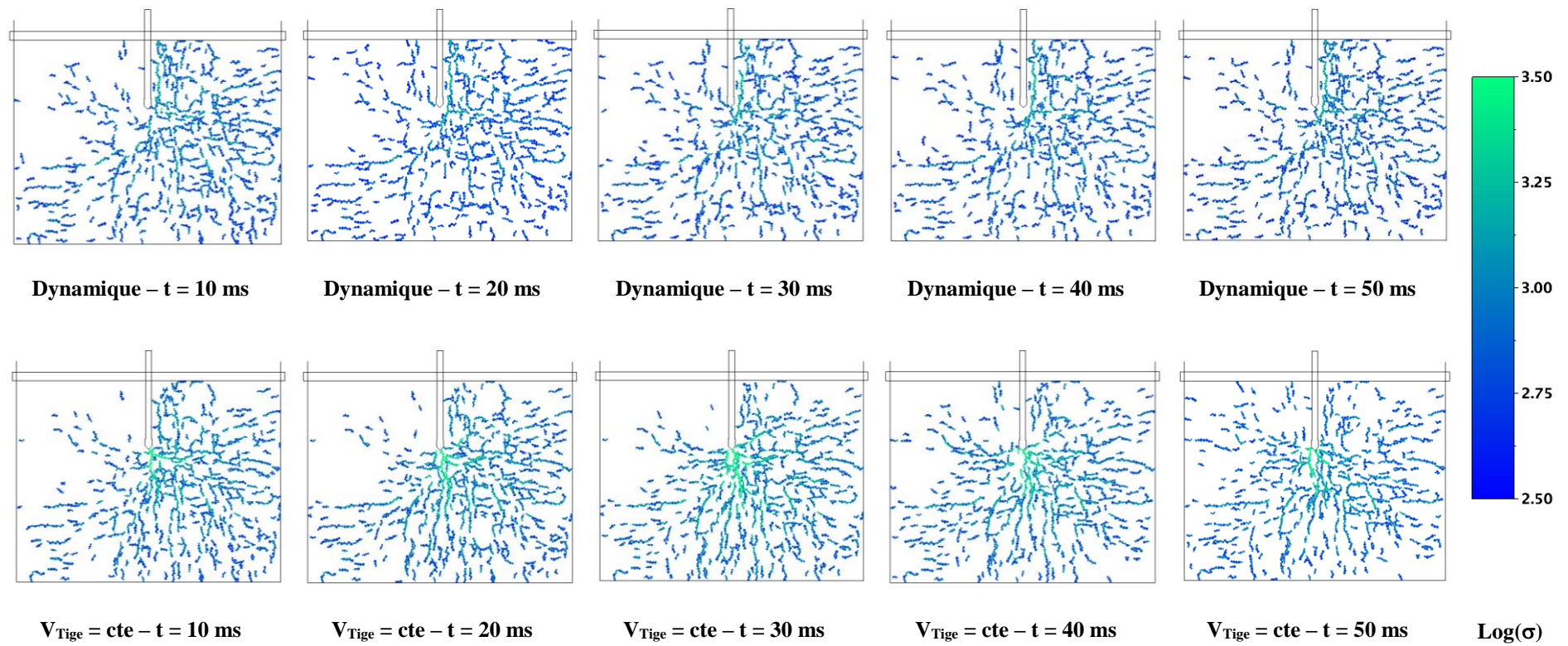


Figure 5-33. Evolution des chaînes de forces fortes pour les essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 100 mm.s^{-1} .

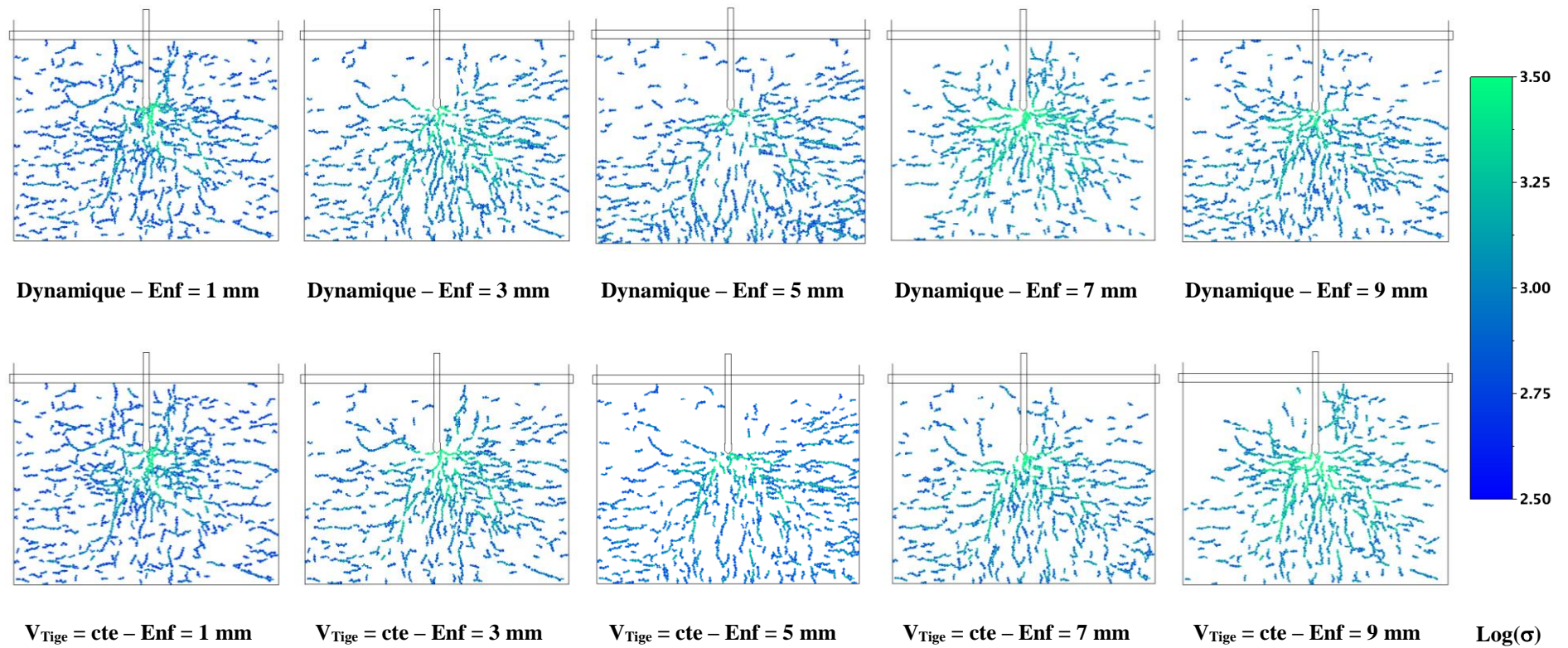


Figure 5-34. Evolution des chaînes de forces fortes pour les essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 1250 mm.s^{-1} .

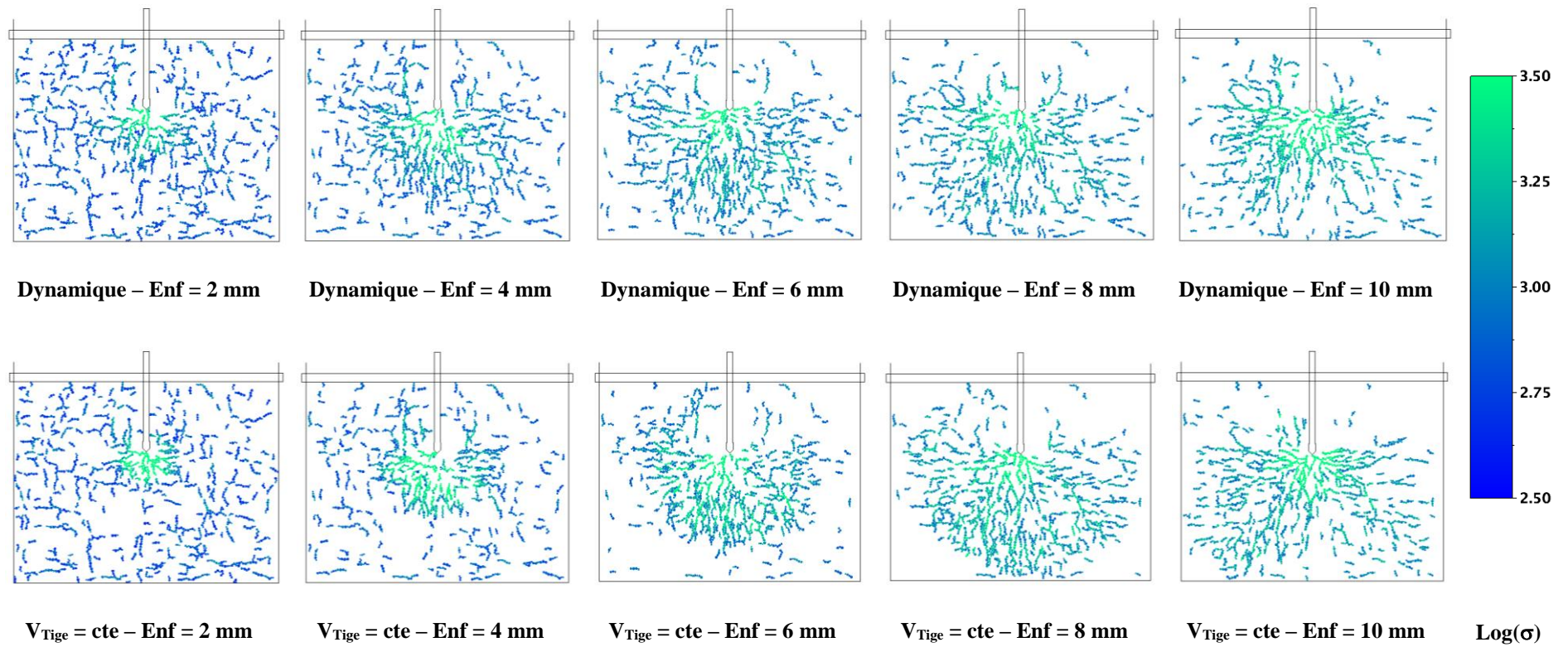


Figure 5-35. Evolution des chaines de forces fortes au début des essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 5000 mm.s^{-1} .

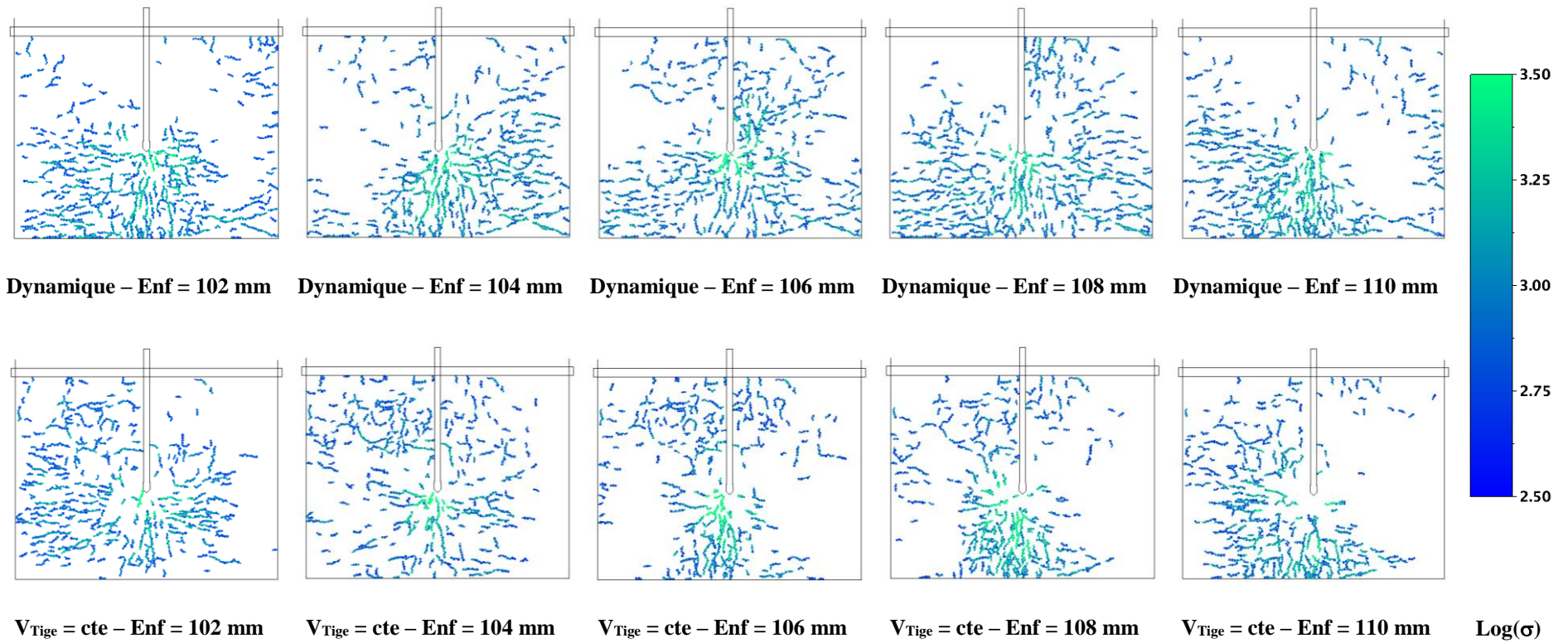


Figure 5-36. Evolution des chaines de forces fortes à la fin des essais de pénétration dynamique et statique pour une vitesse de la tige égale à 5000 mm.s^{-1} .

5.3.4. Conclusion

Une comparaison au niveau microscopique des essais de pénétration réalisés avec 2 modes d'application de la sollicitation (statique et dynamique) a été présentée pour trois régimes différents de vitesse de la tige.

On a trouvé que le comportement du milieu granulaire est essentiellement piloté par l'ordre de grandeur de la vitesse de la tige. Lorsque la vitesse de la tige est faible ($V_I = V_{\text{Tige}} = 100 \text{ mm.s}^{-1}$), l'agitation des particules pour les essais de pénétration statique et dynamique est faible de l'ordre de $0.002 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. Cependant, puisque l'énergie injectée dans le milieu reste petite, la tige ne peut pas être enfoncée dans le milieu et les particules ne sont pas déplacées sous la sollicitation. On observe que l'intensité des contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe est moins importante pour l'essai de pénétration dynamique que pour l'essai de pénétration statique. Ainsi, la force de pointe dynamique F_d est faible par rapport à celle obtenue par l'essai de pénétration statique F_c .

Pour une vitesse de la tige égale à 1250 mm.s^{-1} , les évolutions de l'agitation et des chaînes de forces fortes du milieu granulaire restent similaires et stables pour les deux modes d'application de la sollicitation de l'essai pénétration. La force de pointe dynamique F_d est similaire à celle obtenue par l'essai de pénétration statique F_c .

Lorsque la gamme de vitesse de la tige devient plus importante (égale à 5000 mm.s^{-1}), le comportement du milieu granulaire semble similaire pour les deux modes d'application de la sollicitation quand la vitesse de la tige est comparable (au début de l'essai de pénétration dynamique). Par contre, quand la vitesse de la tige n'est pas comparable à cause de la diminution de la vitesse à la fin de l'essai de pénétration dynamique. L'agitation du milieu granulaire devient faible pour l'essai de pénétration. L'évolution des chaînes de forces fortes devient plus stable pour l'essai de pénétration dynamique que pour l'essai de pénétration statique. Ainsi, la force de pointe statique F_c est supérieure à celle dynamique F_d à la gamme de vitesse de la tige plus importante.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le mécanisme de pénétration a été analysé à l'échelle microscopique en termes d'influence de la vitesse d'enfoncement et du mode d'application de la sollicitation.

Pour l'essai de pénétration statique, le comportement du milieu granulaire passe par trois régimes (quasi-statique, moyen et écoulement dense) lorsque la vitesse de la tige augmente d'une faible vitesse 25 mm.s^{-1} à une vitesse importante de 5000 mm.s^{-1} . L'agitation granulaire est petite et la sollicitation correspond à un régime quasi-statique pour une vitesse de la tige inférieure ou égale à 1250 mm.s^{-1} . L'agitation des particules croît avec la vitesse de la tige et passe alors d'un régime quasi-statique à un régime d'écoulement dense (5000 mm.s^{-1}).

Au niveau des contacts, l'orientation des contacts semble isotrope lors de l'enfoncement. Bien que les chaînes de forces fortes raccourcissent lors que la vitesse de la tige augmente, mais l'intensité de contrainte maximale des particules est plus importante pour la vitesse de la tige égale à 5000 mm.s^{-1} que pour la vitesse de la tige moins importante (inférieure à 1250 mm.s^{-1}).

Ces observations peuvent être reliées à l'augmentation de la force de pointe ainsi que de l'écart-type avec la vitesse d'enfoncement pour l'essai de pénétration statique.

Une comparaison au niveau microscopique des essais de pénétration statique et dynamique a été analysée. Lorsque la vitesse de l'impactant est faible ($V_I = 100 \text{ mm.s}^{-1}$), les chaînes de forces fortes restent stables, les particules ne sont pas déplacées sous cette faible sollicitation. L'intensité des contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe est plus faible pour l'essai de pénétration dynamique que pour celui statique. Ainsi, la force de pointe dynamique F_a est plus faible que celle obtenue par l'essai de pénétration statique F_c .

Lorsque l'assemblage des particules subit une sollicitation à la gamme de vitesse la vitesse de la tige égale à 1250 mm.s^{-1} pour les essais de pénétration statique et dynamique, les évolutions de l'agitation et des chaînes de forces fortes du milieu granulaire restent similaires et stables pour les deux modes d'application de la sollicitation des essais de pénétration. La force de pointe dynamique F_a est similaire à celle obtenue par l'essai de pénétration statique F_c .

Cependant, le comportement du granulaire ne semble que similaire pour les deux modes d'application de la sollicitation quand la vitesse de la tige est comparable (au début de l'essai de pénétration dynamique) pour la sollicitation plus importante (où $V_I = V_{\text{Tige}} = 5000 \text{ mm.s}^{-1}$). L'évolution des chaînes de force forte devient plus stable pour l'essai de pénétration dynamique que pour l'essai de pénétration statique à la fin des essais. Ces observations peuvent être liées à la dominance de la force de pointe F_c par rapport à celle obtenue par l'essai de pénétration dynamique F_a .

Chapitre 6 : Influence des caractéristiques du matériau sur l'essai de pénétration dynamique

On étudiera dans ce chapitre, l'influence des caractéristiques du matériau, uniquement sur l'essai de pénétration dynamique et vis à vis de l'allure de la courbe charge-enfoncement, de la force de pointe F_d , de l'évolution du nombre de coordination Z et du bilan énergétique. Les caractéristiques étudiées seront le coefficient de frottement entre les particules μ , la compacité de l'assemblage ϕ et la granulométrie.

Avant de présenter l'influence de ces différentes caractéristiques sur l'essai de pénétration, l'étude sur l'influence du critère de stabilisation utilisé à la fin d'un essai dynamique sera présentée en vue de choisir un critère optimisé et adapté pour les calculs avec un nombre de particules et donc des temps de calcul plus importants.

Tous les essais de pénétration dynamique sont effectués avec une masse d'impactant égale à **0.5 kg** et une vitesse d'impact égale à **1250 mm.s⁻¹**.

6.1. Influence du critère d'arrêt de calcul

A la fin de chaque essai dynamique, la tige se stabilise autour d'une position dite finale. On considère que la tige est stabilisée quand on vérifie un critère d'arrêt déterminé à l'avance. Le critère d'arrêt est vérifié lorsque l'une des deux équations suivantes est satisfaite:

$$v = \frac{\sum_{i=0}^{N_P} |\overrightarrow{F}_{tot}^i|}{N_P} \times \left(\frac{\sum_{i=0}^{N_C} |\overrightarrow{F}_N^i|}{N_C} \right)^{-1} \quad \text{Equation 6-1}$$

$$v = \frac{\max(|\overrightarrow{F}_{tot}^i|)}{\max(|\overrightarrow{F}_N^i|)} \quad \text{Equation 6-2}$$

Avec :

- $v [-]$: valeur critique choisie (v) (par exemple: 10^{-2} par défaut dans PFC^{2D}),
- $N_P [-]$: nombre de particules,
- $N_C [-]$: nombre de contacts non-nuls,
- $\overrightarrow{F}_{tot}^i [N]$: force totale appliquée sur la particule i ,
- $\overrightarrow{F}_N^i [-]$: force de contact normale non-nulle,

Par ailleurs, le temps de calcul pour un essai dynamique est multiplié par 3 quand on change la valeur du critère de stabilisation à 10^{-3} au lieu de 10^{-2} .

Afin de choisir une valeur de critère de stabilisation optimisée, on a réalisé une série de 5 essais dynamiques consécutifs dans les trois échantillons S_1 , S_2 , S_3 en utilisant deux valeurs de critère de stabilisation 10^{-2} et 10^{-3} .

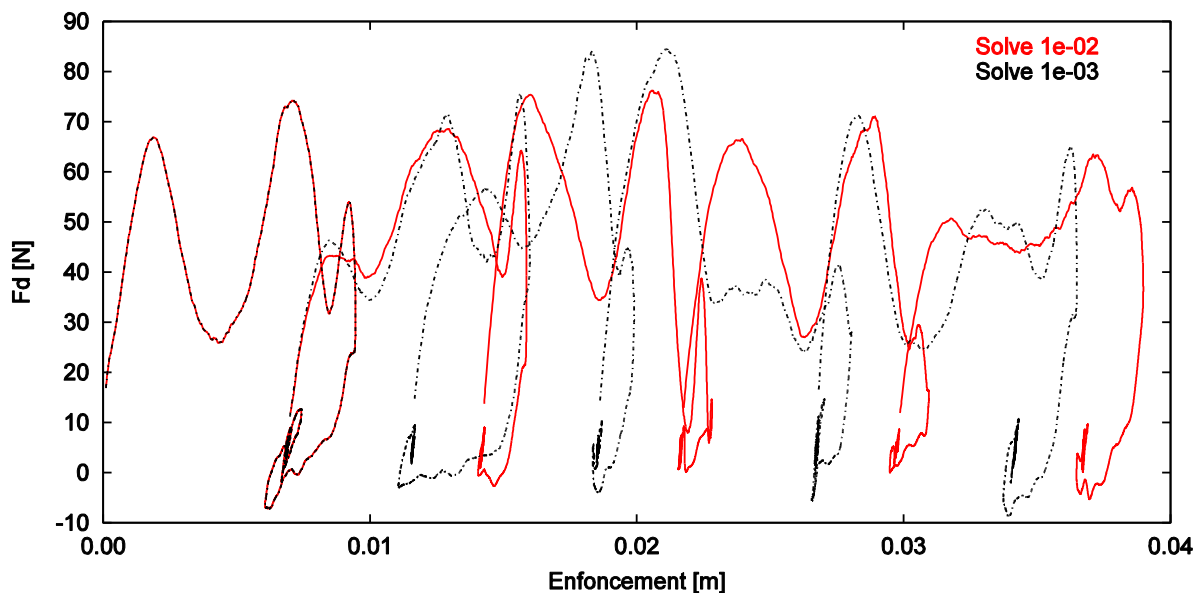


Figure 6-1. Comparaison des signaux pénétrométriques de 5 essais dynamiques consécutifs au sein de l'échantillon S_1 pour deux valeurs du critère de stabilisation différentes (10^{-2} et 10^{-3}).

La Figure 6-1 représente le pénétrogramme des 5 essais dynamiques successifs pour l'échantillon S_1 avec les deux critères de stabilisation. On observe que le signal pénétrométrique est similaire avec les deux valeurs de critère de stabilisation uniquement pour le premier coup. Pour les coups suivants, on observe une divergence suivant la valeur choisie

pour le critère d'arrêt. On constate que l'état de stabilisation est moins rapide quand on utilise la valeur du critère de stabilisation de 10^{-3} . Cependant, la valeur de la force de pointe dynamique est comparable pour les deux signaux pour les 2 critères utilisés.

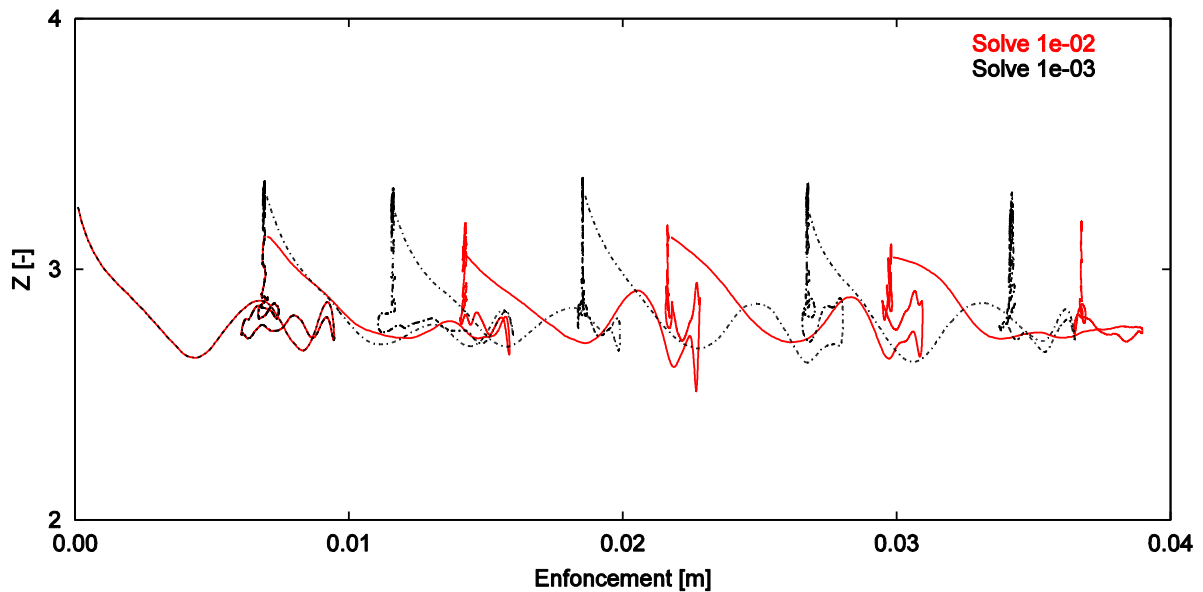


Figure 6-2. Evolution du nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les 5 essais dynamiques consécutifs avec l'échantillon S₁ et pour deux valeurs du critère de stabilisation différentes (10^{-2} et 10^{-3}).

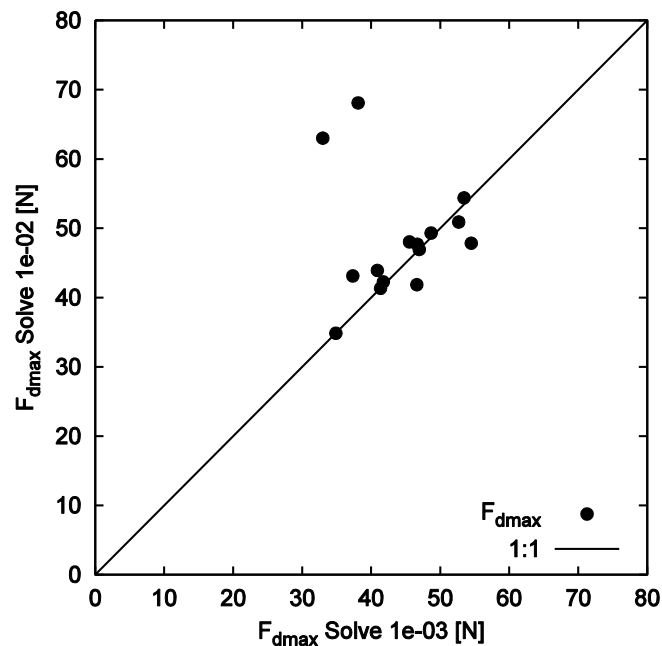


Figure 6-3. Force de pointe dynamique avec les différents critères de stabilisation.

La Figure 6-2 montre le nombre de coordination Z déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre en fonction de l'enfoncement pour les 5 essais dynamiques consécutifs avec l'échantillon S₁ avec les deux valeurs du critère de stabilisation différentes 10^{-2} et 10^{-3} . L'évolution du nombre de coordination semble similaire sauf que les valeurs de nombre de coordination obtenues à la fin de chaque essai sont plus petites quand le critère d'arrêt est égal à 10^{-2} par rapport à 10^{-3} . Pour un critère d'arrêt égal à

10^{-3} , on retrouve en fin de chaque essai dynamique, la valeur du nombre de coordination que le système présentait avant les essais dynamiques. Le système est donc insuffisamment stabilisé avec le critère d'arrêt égal à 10^{-2} . Cela permet d'expliquer pourquoi les signaux pénétrométriques sont différents à partir du deuxième coup dynamique.

Une comparaison en termes de force de pointe dynamique F_{dmax} est effectuée en utilisant les deux valeurs du critère de stabilisation (**Figure 6-3**). On trouve que même si l'état de stabilisation de l'échantillon est moins bon avec une valeur du critère de stabilisation plus grande, les valeurs de résistances de pointe dynamiques obtenues sont similaires.

Ainsi, à la vue des résultats en termes de force de pointe, les essais de pénétration dynamiques pour les prochaines études seront stabilisés avec une valeur du critère de stabilisation égale à 10^{-2} .

Pour la suite, on s'intéresse à l'influence des caractéristiques du matériau sur l'essai de pénétration dynamique à la fois sur l'allure du signal de la courbe charge-enfoncement et sur la force de pointe dynamique.

6.2. Influence du coefficient de frottement entre particules

Afin d'étudier l'influence du coefficient de frottement μ entre les particules, on a effectué des essais de pénétration dynamiques avec différentes valeurs de μ comprises entre **0.05** et **1.00**. Pour chaque valeur de frottement, **15** essais de pénétration dynamique ont été effectués pour les trois échantillons **S₁**, **S₂**, **S₃** possédant les mêmes caractéristiques mécaniques et physiques.

6.2.1. Réponse mécanique macroscopique

La **Figure 6-4** représente un exemple des courbes charge-enfoncement d'un essai dynamique pour les différentes valeurs du frottement $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et **1.00**.

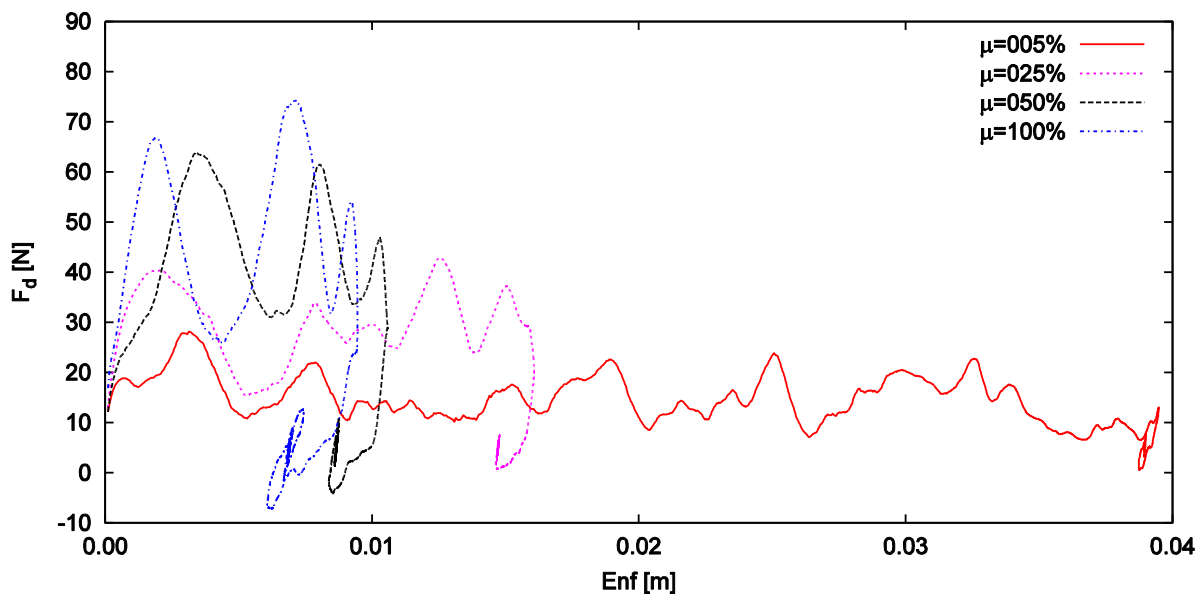


Figure 6-4. Courbes charge-enfoncement pour un essai dynamique et pour différents coefficients de frottement des particules $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et **1.00**.

On s'intéresse maintenant à la Transformée de Fourier (**F_f**) de la courbe charge-enfoncement afin d'estimer la variation des oscillations et la fréquence d'oscillation correspondant à la distance entre deux pics les plus proches (λ_{pic}).

On note que la fréquence principale où l'amplitude du spectre est la plus grande peut ne pas correspondre à la distance λ_{pic} pour un signal complexe où les amplitudes des signaux décomposés sont comparables. A titre d'exemple, les signaux donnés par l'**Equation 6-3** sont composés des trois fréquences principales **f = 1, 2** et **5 Hz**. Dans la première fonction (f_1), l'amplitude du signal associé à la fréquence **f = 1 Hz** est beaucoup plus importante, on trouve donc que l'écart entre 2 pics successifs λ_{pic} est égal à **1**, ce qui correspond à l'inverse de la fréquence dominante **f = 1 Hz**. Par contre, lorsque les amplitudes des signaux décomposés sont comparables (fonction f_2), on trouve un écart entre pics successifs $\lambda_{pic} = 1/f = 0.2$ qui correspond à la fréquence dont l'amplitude est maximale **f = 5 Hz** (**Figure 6-5**).

$$\begin{aligned} f_1(x) &= 20\sin(2\pi x) + \sin(4\pi x) + \cos(10\pi x) \\ f_2(x) &= 5\sin(2\pi x) + 10\sin(4\pi x) + 15\cos(10\pi x) \end{aligned} \quad \text{Equation 6-3}$$

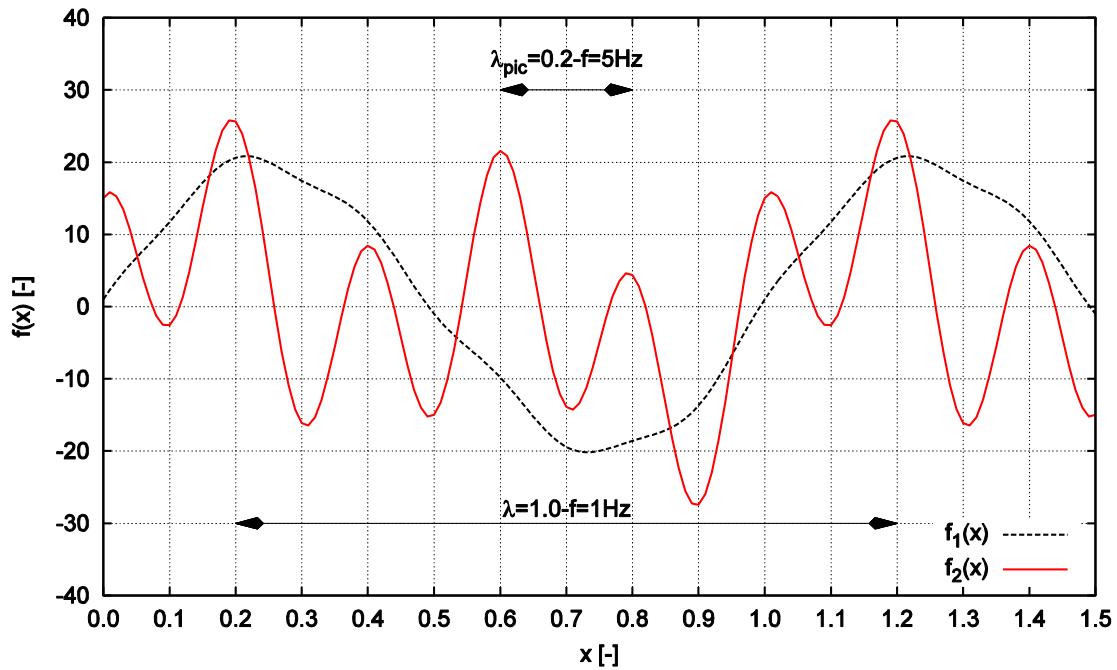


Figure 6-5. Exemple de signaux composant les trois fréquences dominantes $f = 1, 2$ et 5 Hz.

La **Figure 6-6** présente la transformée de Fourier discrète obtenue à partir de l'analyse des paliers des courbes charge-enfoncement des essais dynamiques pour différents coefficients de frottement entre particules. Un ensemble de **20** spectres est représenté à raison d'un spectre par coefficient de frottement (4 valeurs) et par essai dynamique (5 essais dynamiques consécutifs). On observe tout d'abord, que l'amplitude du spectre devient plus importante lorsque μ augmente. Ainsi, la variation de la force en pointe F_a sur le palier de la courbe charge-enfoncement est plus importante quand μ augmente.

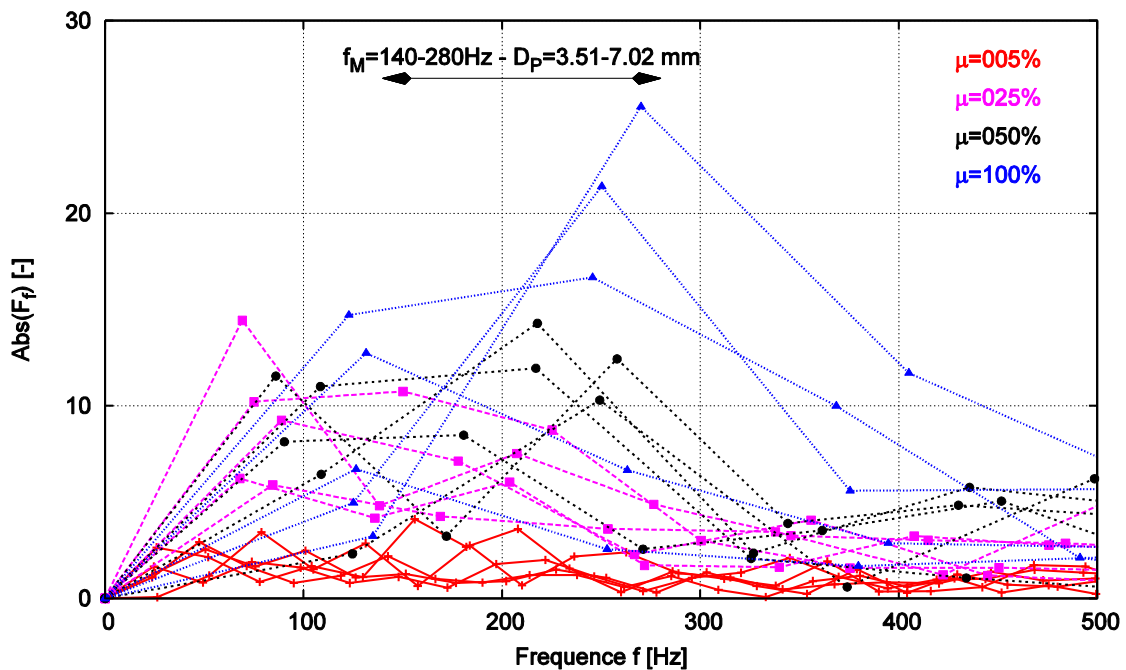


Figure 6-6. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques consécutifs réalisés dans l'échantillon S_1 pour différents coefficients de frottements des particules $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00 .

En termes de fréquence d'oscillation de la courbe charge-enfoncement, on introduit d'ici la gamme de fréquences correspondant à la distance entre les diamètres extrêmes du matériau sollicité (f_M) par la formule suivante :

$$f_M = \left[\frac{1}{D_{max}}; \frac{1}{D_{min}} \right] \quad \text{Equation 6-4}$$

Où : D_{max} et D_{min} sont les diamètres extrêmes des particules.

Pour $D_{max}/D_{min} = 2$ et $D_{max} = 7.02 \text{ mm}$, on obtient $f_M \cong [140 \text{ Hz} ; 280 \text{ Hz}]$

On trouve que la fréquence de ces oscillations de grande amplitude semble dans la gamme de fréquences du matériau $f_M \cong [140 \text{ Hz} ; 280 \text{ Hz}]$ pour les cas où $\mu = 0.50$ et 1.00 . Tandis que la fréquence de ces oscillations de grande amplitude reste faible par rapport à la gamme de fréquences du matériau f_M pour les cas où $\mu = 0.05$ et 0.25 . En effet, puisque plus μ est faible, plus l'enfoncement d'un coup dynamique augmente. Ces fréquences pourraient donc être reliées aux distances entre les deux pics non-adjacents du signal pénétrométrique (**Figure 6-5**). Ainsi, la fréquence de l'oscillation pourrait être liée à la taille des particules. Ces oscillations dans la courbe charge-enfoncement pourraient également être reliées aux tailles des particules déplacées durant l'enfoncement. Cette piste pourrait faire l'objet d'études ultérieures qui n'ont pas pu être menées dans le cadre de ce travail de thèse.

En termes de force de pointe, la **Figure 6-7** représente la valeur de force de pointe F_a obtenue pour 15 essais dynamiques pour les différentes valeurs du frottement. Cette figure montre que la force de pointe F_a et l'écart-type de celle-ci deviennent plus importants quand le frottement augmente de 0.05 à 0.50 . Quand le frottement est supérieur ou égale à 0.50 , la force de pointe F_a semble peu influencée par la valeur du coefficient de frottement.

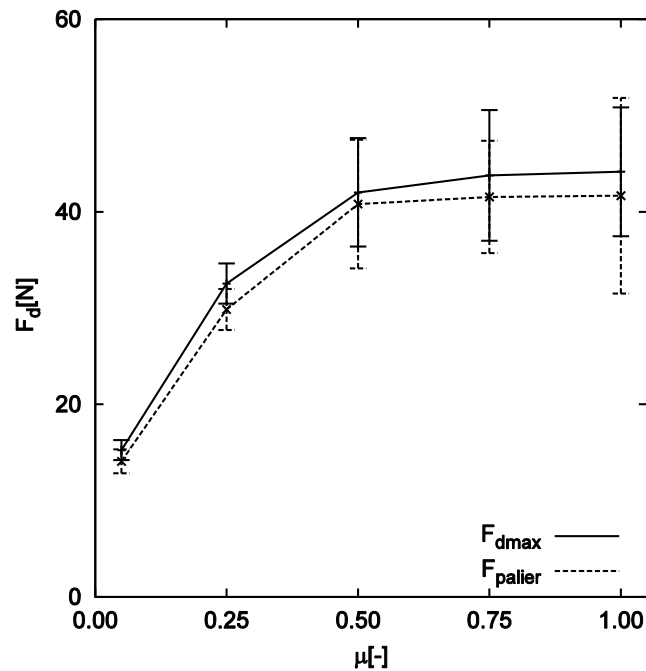


Figure 6-7. Force de pointe F_a en fonction du frottement.

6.2.2. Evolution du nombre de coordination

On introduit d'ici la fonction de connectivité P_k définie par la proportion de particules ayant exactement k contacts (Voivret, 2008):

$$\sum_k P_k = 1 \text{ et } \sum_k k \cdot P_k = Z \quad \text{Equation 6-5}$$

La **Figure 6-8** représente la fonction de connectivité P_k des états initiaux déterminée dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre avec les différentes valeurs frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et **1.00**. On trouve que quand le frottement est faible ($\mu = 0.05$), la proportion des particules ayant **4, 5** ou **6** contacts ($P_{3 < k < 7}$) est plus forte et la fraction $P_{k < 3}$ est faible. Au contraire, la fraction $P_{3 < k < 7}$ diminue tandis que la fraction $P_{k < 3}$ devient de plus en plus importante quand le frottement augmente. Ainsi, le nombre de coordination initial Z_0 devient faible lorsque le frottement des particules augmente.

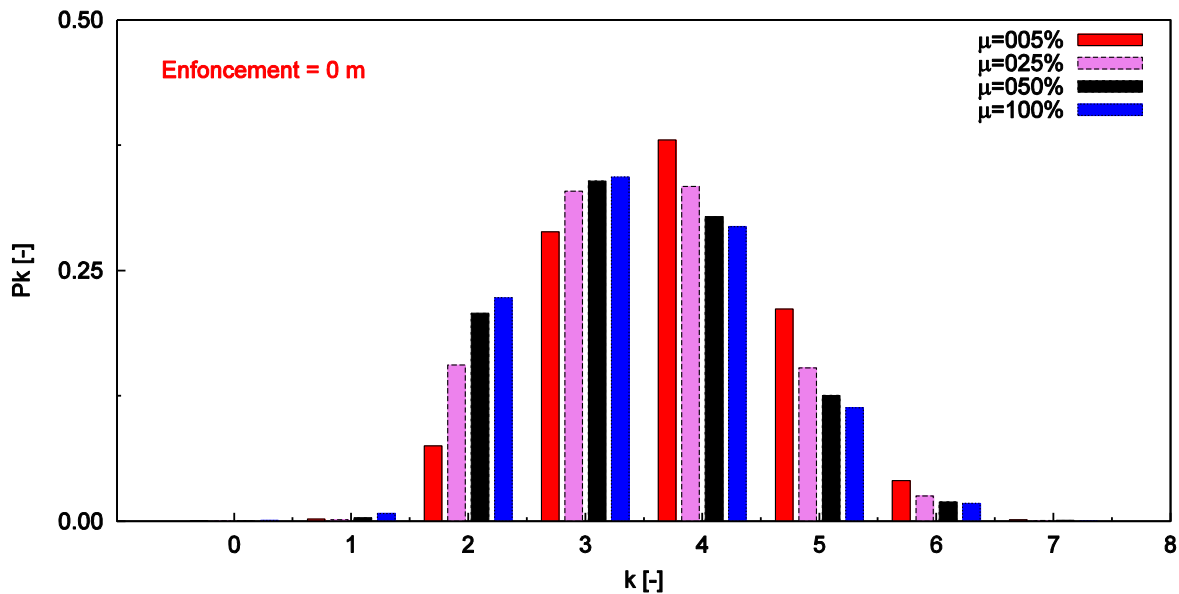


Figure 6-8. Fonction de connectivité P_k déterminée dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre à l'état initial pour les différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et **1.00**.

La **Figure 6-9** montre l'évolution du rapport (Z/Z_0) – ratio entre le nombre de coordination à un instant t et le nombre de coordination initial – déterminé dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour les **5** essais dynamiques successifs avec l'échantillon S_1 avec les différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et **1.00** (**Figure 6-9**). On trouve que Z diminue rapidement lors de l'impact. Plus μ augmente, plus la diminution du nombre de coordination est importante. Puis, après l'impact et durant l'essai, Z évolue beaucoup moins autour d'une valeur moyenne pour un faible frottement que pour des frottements plus importants. A la fin de l'essai, lorsque l'énergie injectée dans le milieu est complètement dissipée, Z remonte. On constate également qu'à la fin de l'essai, Z semble plus grand pour un frottement important que pour un faible frottement.

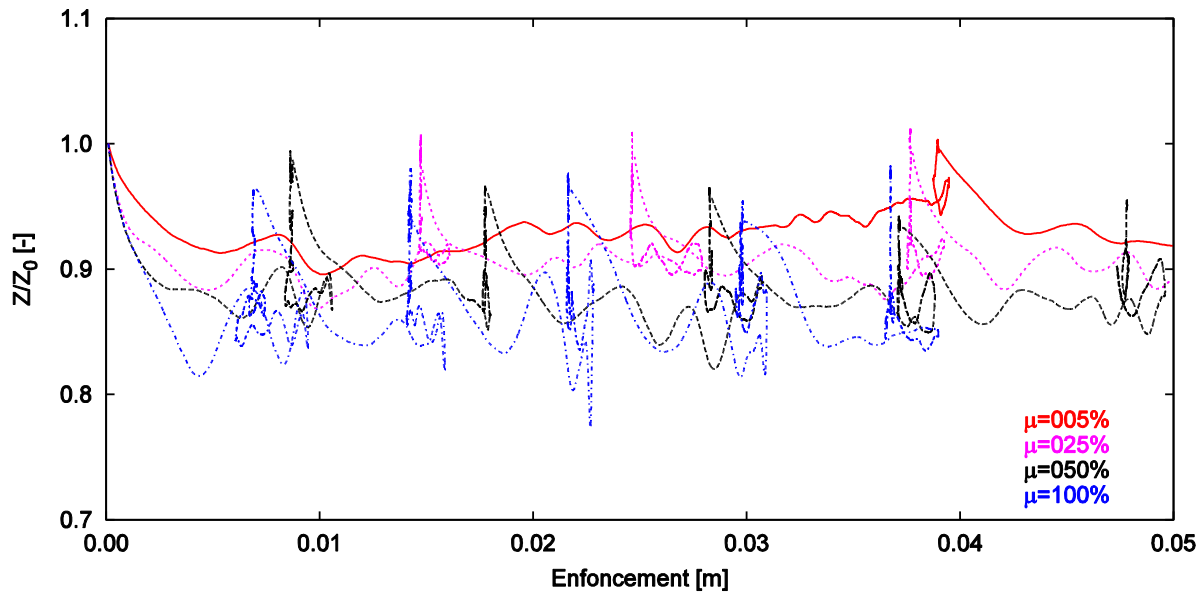


Figure 6-9. Ratio de Z/Z_0 déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs avec l'échantillon S_1 pour les différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00 .

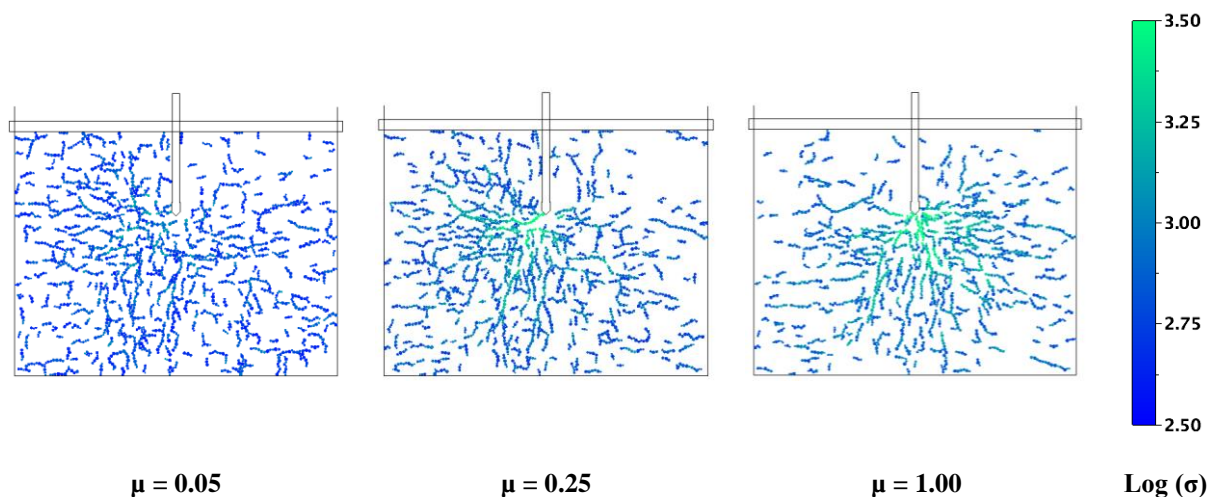


Figure 6-10. Chaines de forces fortes juste après le choc pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant et pour différentes valeurs de frottement $\mu = 0.05, 0.25$ et 1.00 .

La **Figure 6-10** représente les chaines de forces fortes quelques millisecondes après l'impact pour un coup dynamique et pour différentes valeurs de frottements $\mu = 0.05, 0.25$ et 1.00 . On observe que l'intensité de la contrainte principale maximale des particules au-dessous de la pointe devient de plus en plus importante quand μ augmente. En effet, lorsque μ augmente, les particules en contact ont plus de difficulté à glisser entre elles. Lors d'un impact dynamique, les particules situées juste au-dessous de la pointe subissent une sollicitation plus importante lorsque le frottement inter-particulaire est important que lorsqu'il est faible. En effet, pour un frottement faible, lors de l'enfoncement de la pointe, les particules sont plus faciles à arranger, il y a moins de blocages au sein du milieu granulaire, pour obtenir un nouvel état d'équilibre. C'est pourquoi, le nombre de coordination diminue rapidement au début de l'essai pour un frottement plus important.

6.2.3. Analyse énergétique

Le **Tableau 6-1** représente les termes d'énergie du bilan énergétique déterminés pendant un coup dynamique pour un même enfoncement (**9 mm**) et pour différentes valeurs de frottement entre particules.

μ [-]	Injection		Dissipation ou Transmission				
	E_I [%]	E_{PT} [%]	E_F [%]	E_C [%]	E_K [%]	E_S [%]	E_{PP} [%]
0.05	90.03	9.97	23.16	4.18	67.62	4.87	0.16
0.25	90.01	9.99	41.33	3.03	49.52	5.91	0.20
0.50	90.01	9.99	57.64	4.38	27.40	10.33	0.25
0.75	90.02	9.98	71.85	6.52	15.85	4.98	0.80
1.00	90.01	9.99	73.91	4.34	8.58	13.07	0.10

Tableau 6-1. Bilan énergétique en terme de frottement à 9 mm d'enfoncement pour l'essai dynamique à 1250 mm.s⁻¹.

On trouve que plus le frottement entre particules augmente, plus l'énergie dissipée par frottement à même l'enfoncement **9 mm** est dissipée rapidement (**Tableau 6-1**). Il devient plus difficile d'enfoncer la tige dans le milieu granulaire. L'enfoncement d'un coup dynamique est faible et la force de pointe **F_a** devient plus grande.

La zone la plus sollicitée par frottement se situe autour de la pointe et sa taille augmente quand le frottement des particules augmente (**Figure 6-11**) à même enfoncement.

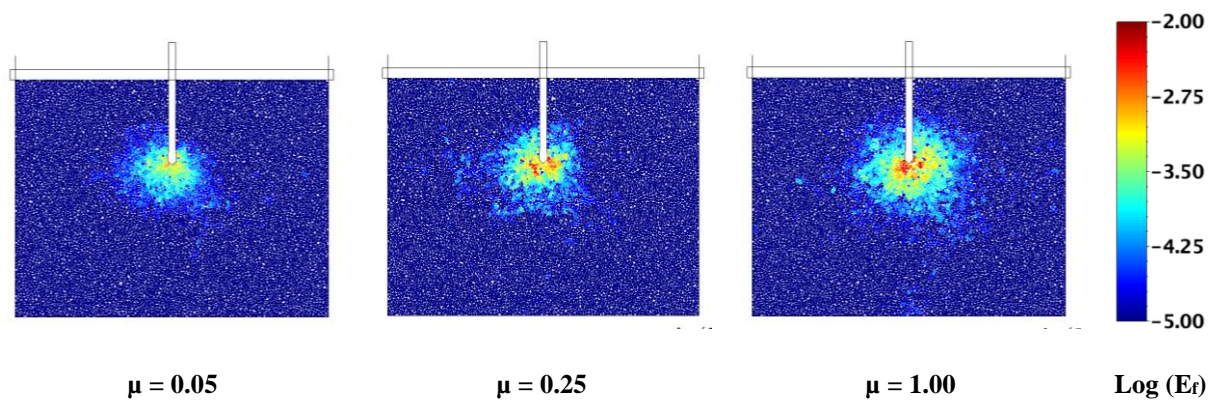


Figure 6-11. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour les différents frottements $\mu = 0.05, 0.25$ et 1.00 à 9 mm d'enfoncement pour l'essai dynamique à 1250 mm.s⁻¹ de vitesse d'impactant.

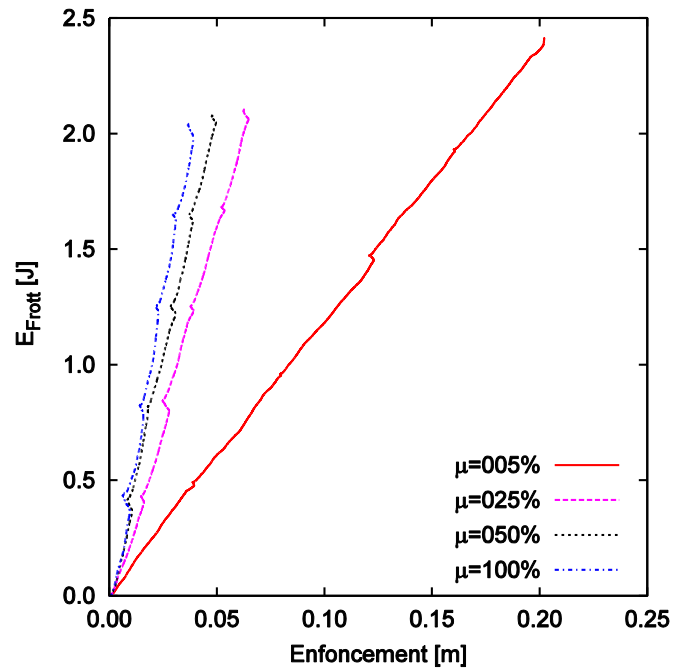


Figure 6-12. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminée dans l'échantillon pour différents frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00 .

La Figure 6-12 représente l'énergie dissipée par frottement dans l'échantillon en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminé dans l'échantillon pour différents frottements $\mu = 0.05, 0.25, 0.50$ et 1.00 . On retrouve que l'énergie dissipée par frottement à la même profondeur est de plus en plus importante lorsque μ augmente. Il faut noter que plus μ est faible, plus l'enfoncement final des 5 essais dynamiques successifs est important. L'énergie potentielle de la tige E_{PT} augmente donc lorsque μ diminue. L'énergie injectée dans le milieu (égale à la somme de l'énergie de l'impact E_I et celle potentielle de la tige E_{PT}) n'est pas donc la même pour différents frottements. Ainsi, on trouve que l'énergie dissipée par frottement est plus grande pour $\mu = 0.05$.

Pour conclure, lorsqu'on fait varier le frottement des particules μ , les variations de la courbe charge-enfoncement sur le palier de la courbe sont plus importantes quand μ augmente. Concernant la fréquence des oscillations du signal, on a mis en évidence que la fréquence de l'oscillation semble être liée à la taille de la granulométrie du milieu. Ainsi, la fréquence où son amplitude est comparable à l'amplitude maximale du spectre de Fourier est située dans la gamme de fréquences $f_M = [140 \text{ Hz} ; 280 \text{ Hz}]$ qui est liée à l'écart entre D_{min} et D_{max} du matériau sollicité.

Au niveau des contacts, on constate une forte baisse du nombre de coordination en début d'essai juste après l'impact dans les milieux où le frottement est important. Par la suite, le nombre de coordination (Z) semble stable autour de la valeur moyenne durant l'essai pour différents frottements inter-particules avant d'augmenter à nouveau en fin d'essai.

En termes d'énergie, plus le frottement entre particules augmente, plus l'énergie dissipée par frottement est dissipée rapidement, la zone la plus sollicitée par frottement augmente en taille à même l'enfoncement. Dans un milieu très frottant, il devient plus difficile d'enfoncer

la tige dans le milieu granulaire, l'enfoncement d'un coup dynamique est faible et la force de pointe F_a devient plus grande.

6.3. Influence de la compacité

Afin d'étudier l'influence de la compacité sur l'essai de pénétration dynamique, on a fait varier la compacité ϕ entre **0.817** et **0.844** en faisant varier le frottement entre particules lors de la procédure de grossissement des particules. La densité du milieu granulaire varie légèrement donc entre **22.06** et **22.79 KN.m⁻³**.

Pour chaque valeur de frottement entre particules utilisée lors du grossissement, on a créé trois échantillons possédant les mêmes caractéristiques physiques et mécaniques. Le **Tableau 6-2** représente la compacité de l'assemblage des particules en faisant varier le frottement des particules lors de la procédure de génération de l'échantillon. Pour chaque échantillon, on effectue **5** essais dynamiques consécutifs avec une masse d'impactant de **0.5 kg** et une vitesse d'impact de **1250 mm.s⁻¹**.

μ [-]	Compacité ϕ [-]			Compacité ϕ_m [-]
	S ₁	S ₂	S ₃	
0	0.845	0.844	0.844	0.844 (dense)
5	0.841	0.842	0.842	0.842
15	0.839	0.839	0.838	0.839
25	0.822	0.824	0.823	0.823 (moyenne)
50	0.817	0.817	0.816	0.817 (lâche)

Tableau 6-2. Compacités de l'assemblage en fonction du frottement.

6.3.1. Réponse mécanique macroscopique

La **Figure 6-13** montre le signal pénétrométrique créé par **5** essais dynamiques successifs correspondant aux trois états de compacité (lâche, moyen et dense). On constate que l'augmentation de la compacité entraîne un enfoncement final plus faible. Ainsi, la force de pointe F_a augmente quand la compacité de l'assemblage des particules augmente. Cela est conforme aux résultats obtenus dans les travaux de (*Benz et al., 2013; Breul et al., 2009; Chaigneau et al., 2000*).

La transformée de Fourier des **5** essais dynamiques successifs pour chaque compacité (dense, moyen et lâche) est présentée dans la **Figure 6-14**. On observe que l'amplitude des fréquences du spectre devient plus grande quand la compacité augmente. Ainsi, la hauteur du palier des courbes charge-enfoncement augmente de plus en plus lorsque la compacité devient plus importante.

Concernant la fréquence des oscillations du signal, on trouve que les fréquences du spectre de Fourier possédant l'amplitude la plus importante restent encore dans la gamme de fréquences du matériau sollicité $f_M = [140 \text{ Hz} ; 280 \text{ Hz}]$. Ainsi, la fréquence de ces oscillations de grande amplitude augmente également avec la compacité. (**Figure 6-13**).

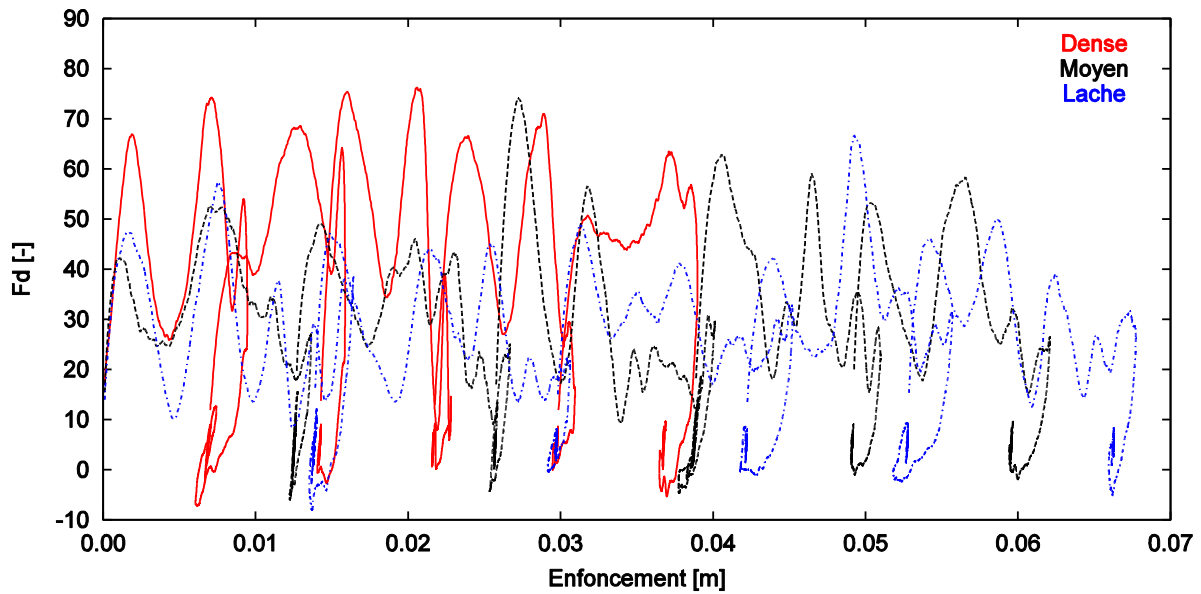


Figure 6-13. Courbes charge-enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs dans un échantillon avec trois états de compacité différents : lâche, moyen et dense.

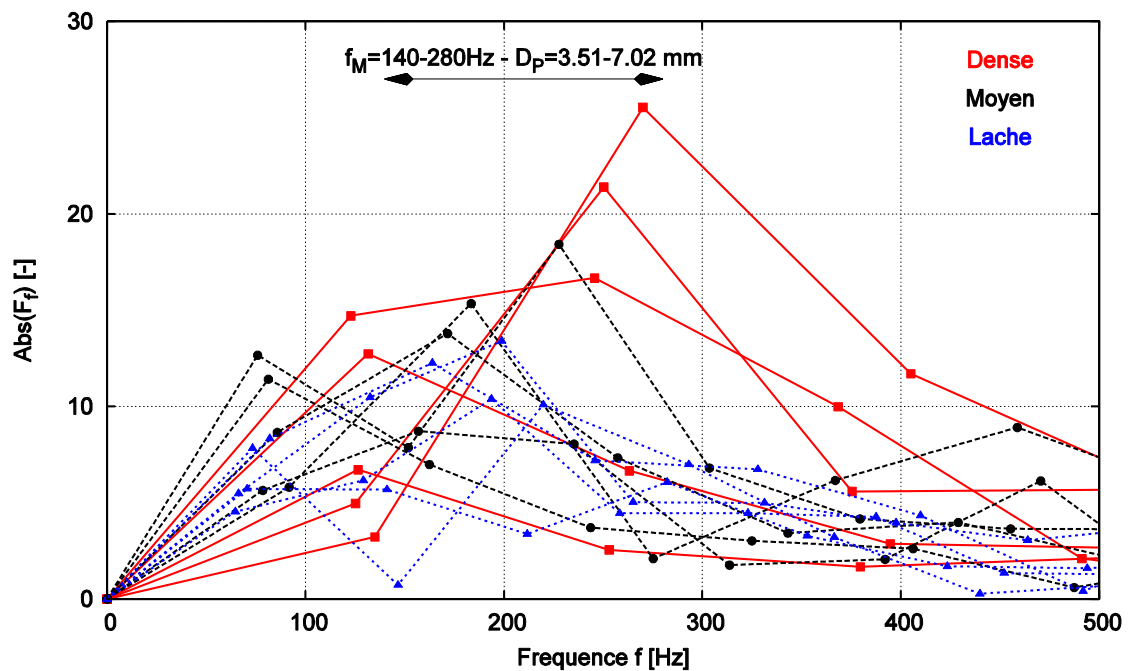


Figure 6-14. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour chaque état de compacité dense, moyen et lâche

La Figure 6-15 représente la force de pointe F_a moyenne des 15 essais dynamiques obtenus pour chaque état de compacité. On trouve que bien que la gamme de compacité varie très légèrement (de 0.817 à 0.844), la force de pointe F_a augmente quand la compacité devient plus dense.

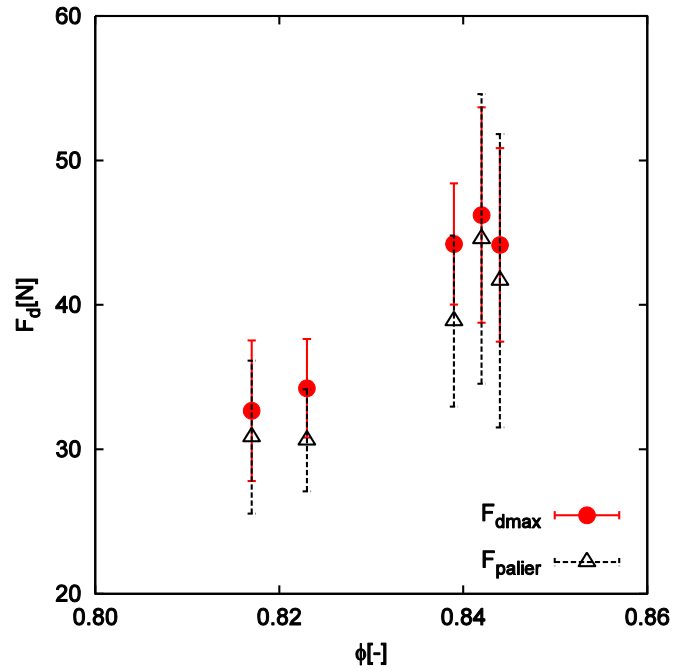


Figure 6-15. Force de pointe F_a moyenne de 15 essais dynamiques pour chaque l'état de compacité.

La **Figure 6-16** représente le champ de déplacement (U) des particules aux différentes compacités (lâche, moyen et dense) pour un coup dynamique. On observe que les particules autour de la pointe se déplacent plus facilement pour une faible compacité, il y a une réorganisation plus importante du milieu. La tige a donc plus de facilité à s'enfoncer dans le milieu granulaire et donc la force de pointe F_a est plus faible (**Figure 6-15**).

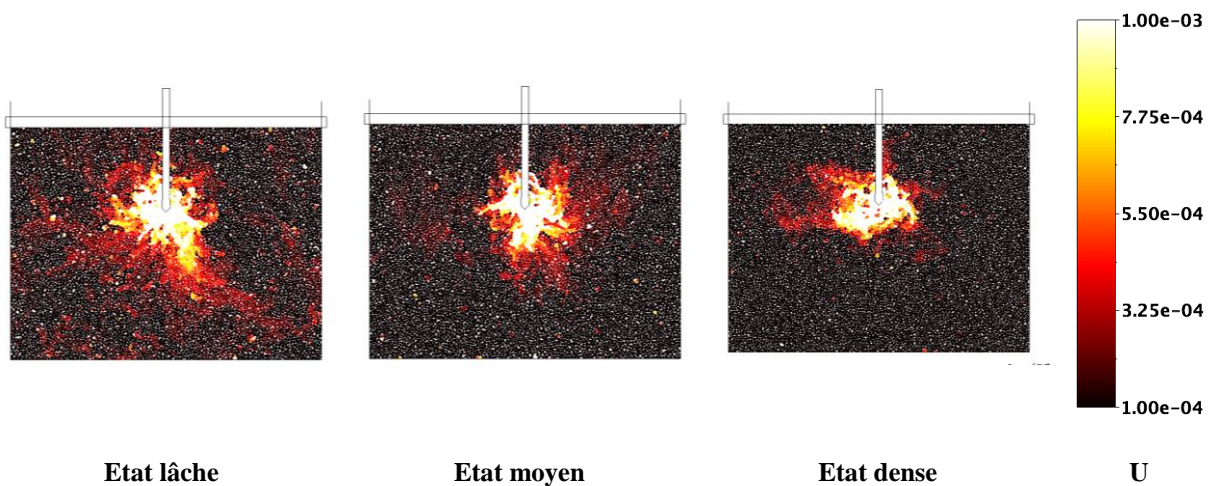


Figure 6-16. Champs de déplacement des particules pour différentes compacités pour un coup dynamique à 1250 mm.s^{-1} .

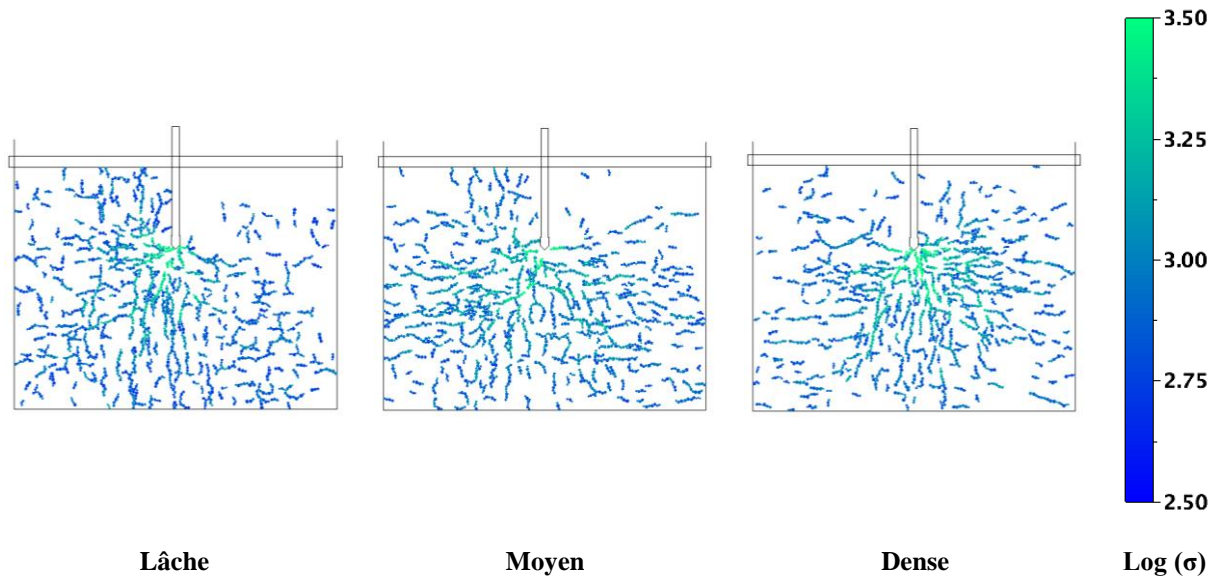


Figure 6-17. Chaines de forces fortes juste après l'impact (enfoncement = 2 mm) pour l'essai dynamique à 1250 mm.s^{-1} de vitesse d'impactant et pour différents états de compacité: dense, moyen et lâche.

La **Figure 6-17** montre les chaines de forces fortes, juste après l'impact pour différentes compacités. Lorsque le milieu est dans l'état le plus lâche, les chaines de forces fortes se situent partout dans l'échantillon. Il n'y a aucune orientation dominante observée. A l'inverse, les chaines de forces pour l'état le plus dense semblent s'orienter vers la pointe lors de l'enfoncement. Par ailleurs, l'intensité des contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe est plus importante quand la compacité est plus grande.

6.3.2. Evolution du nombre de coordination

Concernant le nombre de coordination, la **Figure 6-18** représente l'évolution du nombre de coordination en fonction de l'enfoncement des 5 essais dynamiques successifs pour différentes compacités (dense, moyenne et lâche). Bien que la compacité initiale soit un peu différente, le nombre de coordination initial semble similaire. Au début d'un coup, on observe tout d'abord, une forte baisse du nombre de coordination pour n'importe quel état de compacité initiale. En effet, les particules au-dessous de la pointe peuvent être faciles à déplacer lors de l'impact puisque l'intensité des contraintes principales maximales des particules au-dessous de la pointe est plus faible pour la densité est plus faible (**Figure 6-17**). La diminution du nombre de coordination est donc importante pour une compacité plus faible. Puis, le nombre de coordination augmente et oscille autour d'une valeur moyenne avant de se stabiliser autour de cette valeur puis d'augmenter à nouveau à la fin de l'enfoncement lorsque toute l'énergie est dissipée. Plus le milieu est lâche et plus le temps de stabilisation est long et plus la réduction de Z lors de la première phase de l'enfoncement est importante. Le premier coup dynamique entraîne une baisse de Z puis lors des autres essais, Z oscille selon la description faite au premier point mais reste globalement constant.

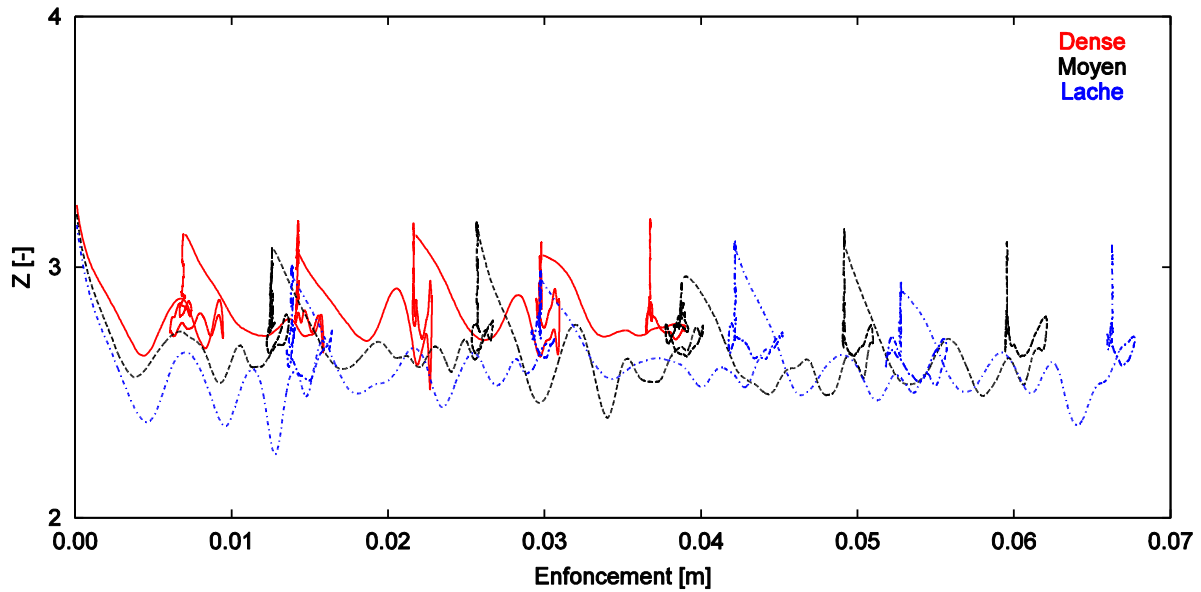


Figure 6-18. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre en fonction de la compacité.

6.3.3. Analyse énergétique

Le **Tableau 6-3** représente le bilan énergétique aux différentes valeurs de compacité pour 5 essais dynamiques effectués sur l'échantillon **S₁**. On voit que l'énergie injectée dans le système est majoritairement dissipée par frottement (> **90%**). Il n'y aucune tendance claire observée en terme d'énergie dissipée par frottement (**E_F**) lors du changement de la compacité de l'assemblage des particules.

Compacité [-]	Injection			Dissipation ou Transmission			
	E_I	E_{PT}	E_F	E_C	E_K	E_S	E_{PP}
0.844	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
0.842	92.25	7.75	97.45	2.50	0.00	-0.29	0.34
0.839	90.10	9.90	92.99	6.66	0.00	-0.43	0.78
0.823	87.21	12.79	97.43	2.84	0.01	-0.53	0.25
0.817	85.97	14.03	97.70	2.20	0.01	-0.04	0.13

Tableau 6-3. Bilans énergétiques pour différentes valeurs de compacité pour 5 essais dynamiques successifs à 1250 mm.s⁻¹ de vitesse d'impactant effectués sur l'échantillons **S₁**.

La **Figure 6-19** représente la distribution de la dissipation d'énergie par frottement pour les différents états de compacité pour un essai dynamique. La taille des zones mobilisées dans la dissipation semble peu changer.

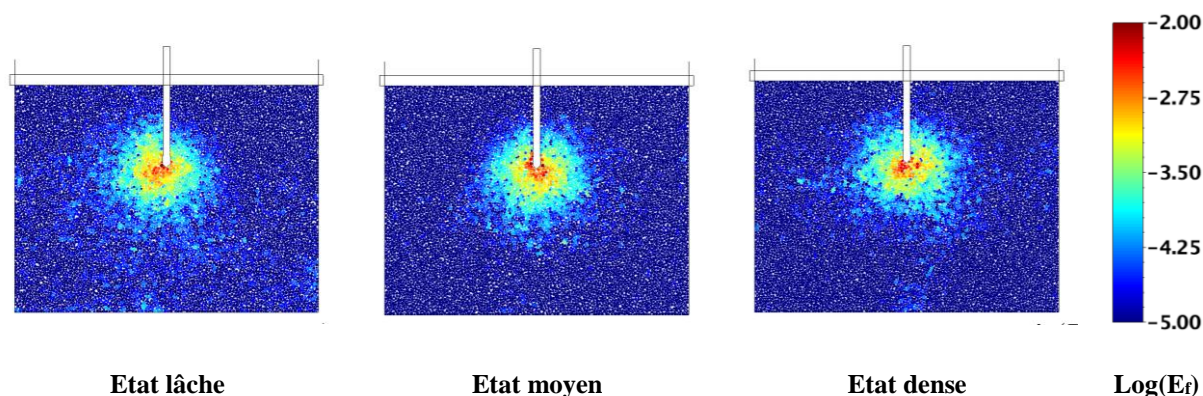


Figure 6-19. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour différents états de compacité pour un coup dynamique à 1250 mm.s^{-1} .

La Figure 6-20 représente l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminé dans l'échantillon pour chaque compacité (lâche, moyen et dense). On constate que plus la compacité est importante, plus l'énergie est dissipée rapidement par frottement.

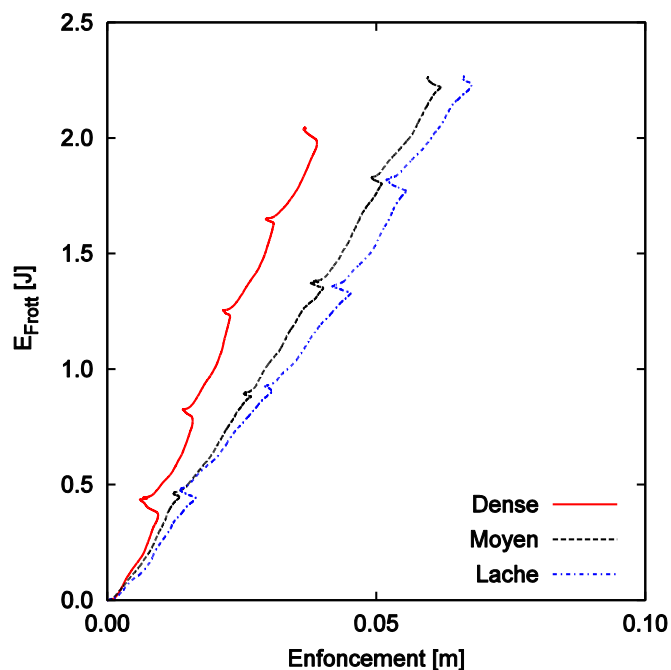


Figure 6-20. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminée dans l'échantillon pour chaque état de compacité: lâche, moyen et dense.

Dans ce paragraphe, l'étude de l'influence de la compacité sur l'essai de pénétration dynamique a été analysée. En termes de signal, on trouve que la variation du signal est plus importante lorsque la compacité augmente. Cependant, la fréquence des oscillations correspondant aux variations plus importante semble similaire pour les matériaux possédant différentes compacités mais sa granulométrie reste la même.

Le nombre de coordination évolue de façon importante quand la compacité reste faible. Il y a une réorganisation du milieu plus importante observée. Plus la compacité est faible, plus la tige s'enfonce facilement et plus la force de pointe F_a est faible. En termes d'énergie, l'énergie est dissipée plus rapidement lorsque la compacité augmente.

6.4. Influence de la granulométrie

Nous nous intéressons ici à l'influence de la forme de la distribution granulométrique sur l'essai de pénétration dynamique. On va d'abord présenter la méthodologie de génération de l'assemblage des particules pour différents types de granulométries. Pour notre méthodologie de création d'un échantillon, la granulométrie d'un assemblage granulaire est déterminée par les 4 facteurs suivants :

- Porosité (n),
- Diamètre maximal de la particule (D_{max}),
- Ratio entre diamètre maximal et diamètre minimal (D_{max}/D_{min}),
- Façon de déterminer le diamètre d'une particule, décrit par les équations suivantes :

$$\text{Ordre1} : D_i = D_{min} + \text{Rand}(0, 1) \times (D_{max} - D_{min}) \quad \text{Equation 6-6}$$

$$\text{Ordre2} : D_i = D_{min} + \text{Rand}(0, 1)^2 \times (D_{max} - D_{min}) \quad \text{Equation 6-7}$$

$$\text{Ordre3} : D_i = D_{min} + \text{Rand}(0, 1)^3 \times (D_{max} - D_{min}) \quad \text{Equation 6-8}$$

Où : **Rand(0,1)** – Valeur aléatoire déterminée par loi de distribution uniforme entre 0 et 1.

Etant donné qu'on ne s'intéresse qu'aux granulométries où les compacités sont dans un état dense, 7 courbes granulométriques différentes seront utilisées dans les études suivantes (**Tableau 6-4**):

Simulation	Génération			Méthode de génération de la particule	Compacité ϕ [-]
	D_{max}/D_{min} [-]	D_{max} [mm]	N_P [-]		
<i>Granulo1</i>	2	14.04	2 500	Ordre1	0.843
<i>Granulo2</i>	2	7.02	10 000	Ordre1	0.844
<i>Granulo3</i>	2	3.51	40 000	Ordre1	0.843
<i>Granulo4</i>	2	7.02	14 700	Ordre2	0.843
<i>Granulo5</i>	2	7.02	18 252	Ordre3	0.842
<i>Granulo6</i>	5	7.02	30 000	Ordre2	0.856
<i>Granulo7</i>	10	7.02	97 831	Ordre3	0.869

Tableau 6-4. Courbes granulométriques étudiées.

Pour chaque forme de la courbe granulométrique, on a créé trois échantillons possédant les mêmes caractéristiques mécaniques et physiques. On note que le frottement $\mu = 0$ est utilisé dans tous les cas lors de la génération de l'échantillon. Pour chaque échantillon, on a effectué 5 essais dynamiques successifs à partir de 15 cm de profondeur avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹.

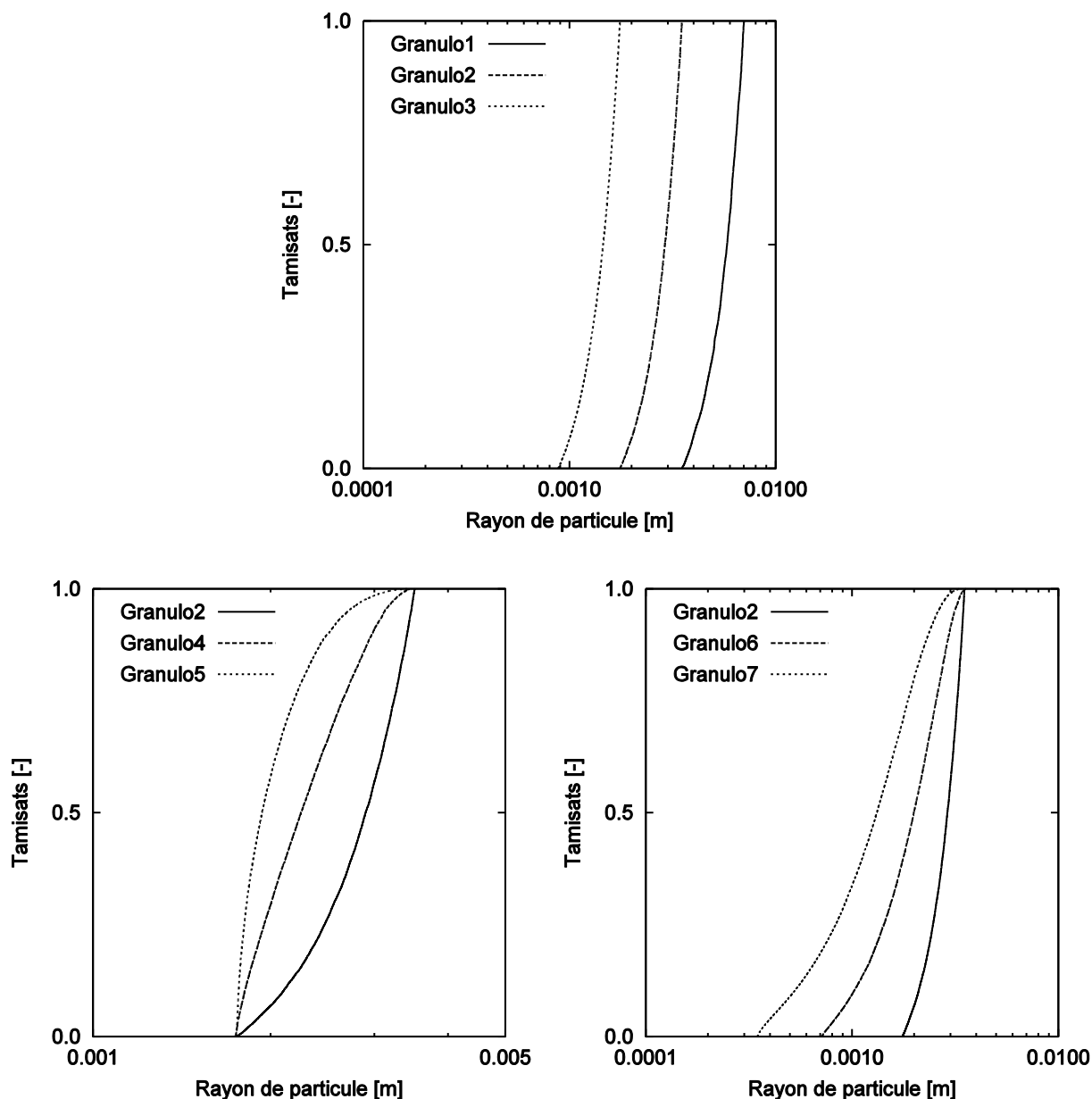


Figure 6-21. Courbes granulométriques étudiées.

L'influence de la forme de la courbe granulométrique sur l'essai de pénétration dynamique sera analysée avec les 3 types de granulométries suivants (**Figure 6-21**):

- **Type 1:** En conservant le ratio D_{\max}/D_{\min} et la valeur du diamètre maximum mais changeant le nombre de particule N_P , on obtient trois courbes granulométriques **Granulo1**, **Granulo2** et **Granulo3** possédant le même étalement mais des diamètres minimum et maximum différents,
- **Type 2:** En changeant seulement la méthode de génération des particules, on obtient trois granulométries **Granulo2**, **Granulo4** et **Granulo5** avec les mêmes diamètres extrêmes mais des distributions différentes,
- **Type 3:** En changeant en même temps le ratio D_{\max}/D_{\min} et la méthode de génération des particules. Ainsi, on obtient trois courbes granulométriques différentes **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7** avec un diamètre maximal constant $D_{\max} = 7.02 \text{ mm}$.

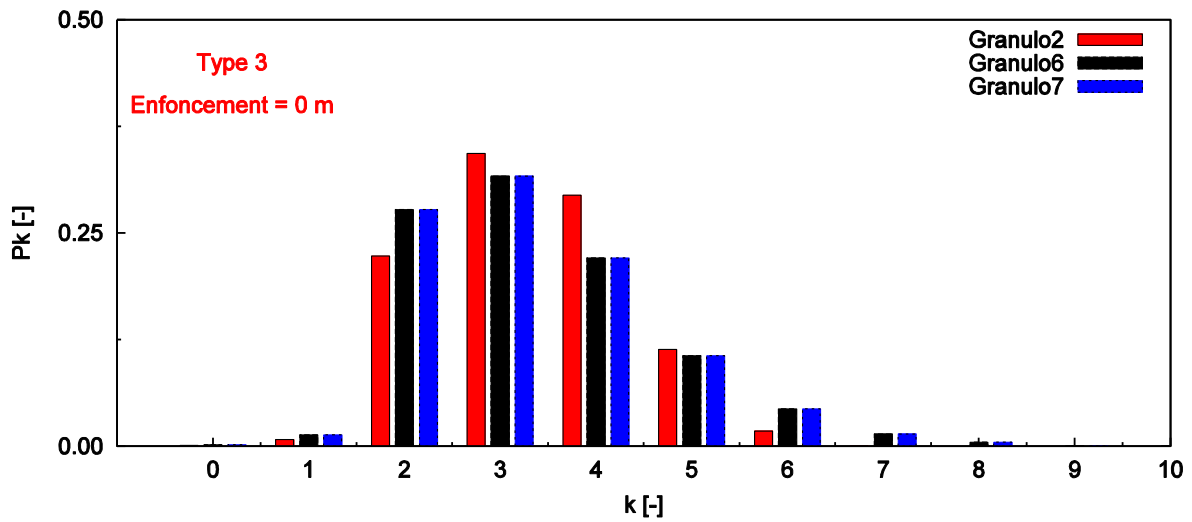
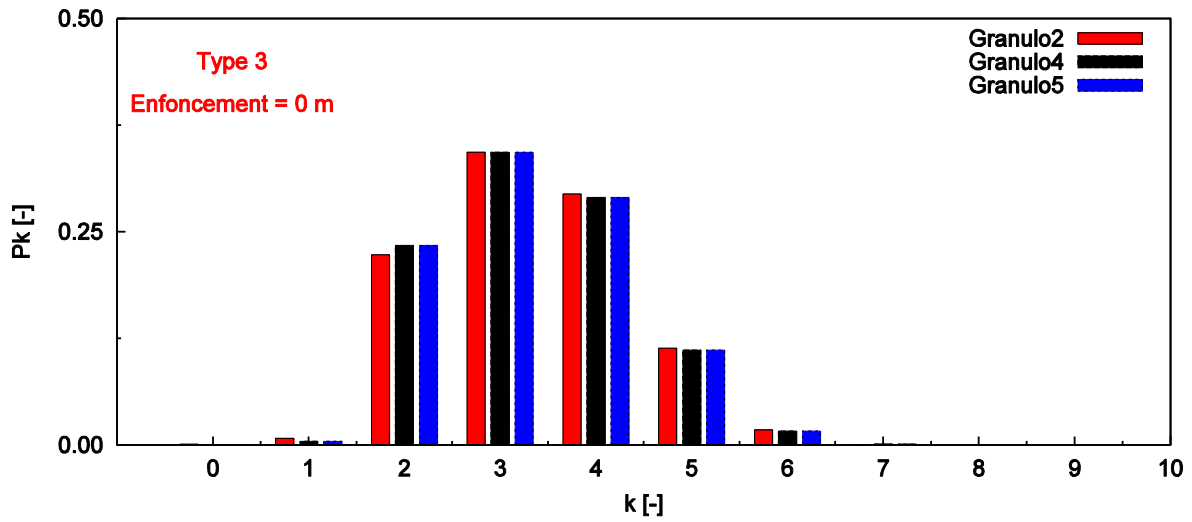
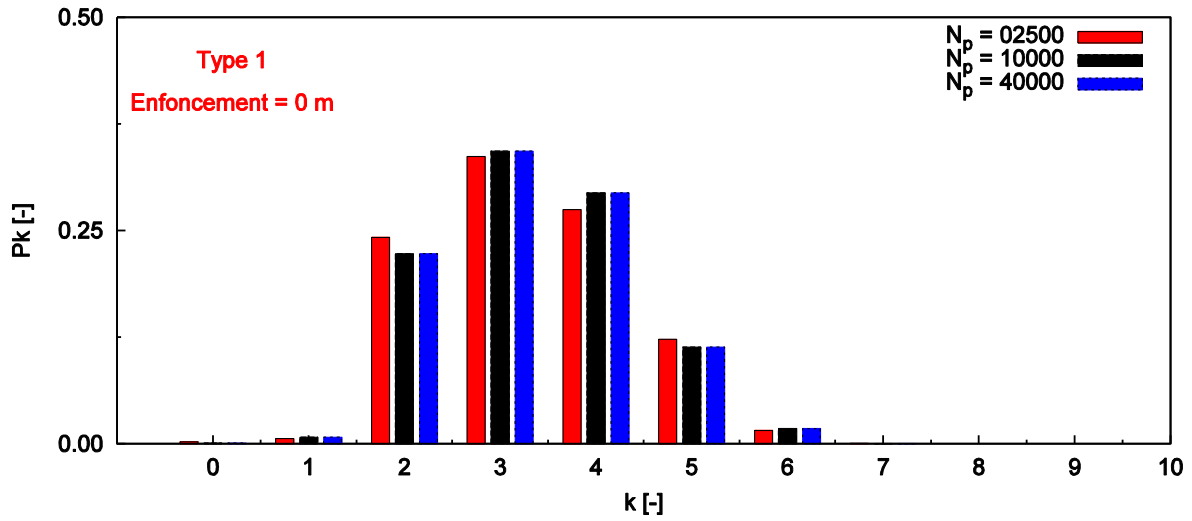


Figure 6-22. Fonction de connectivité P_k déterminée dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre à l'état initial pour les différentes granulométries

La **Figure 6-22** représente P_k déterminée par l'**Equation 6-5** dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre à l'état initial pour différentes granulométries. Pour la granulométrie à fort étalement, on trouve une connectivité plus grande parce que les grosses particules peuvent être en contact avec beaucoup de petites (*Voivret, 2008*).

6.4.1. Effet de la taille des particules

On étudie ici l'influence de la taille des particules à partir de **3** distributions granulométriques (**Granulo1, 2 et 3**) possédant le même ratio $D_{max}/D_{min} = 2$ mais un nombre de particules évoluant entre de **2 500** et **40 000**. Le diamètre d'une particule est choisi à partir d'une loi de distribution uniforme entre D_{min} et D_{max} (**Figure 6-23**). Le diamètre maximal des particules devient donc **2** fois plus petit lorsque N_P est multiplié par **4**. On observe que la compacité des 3 granulométries ne change pas et est égale à $\phi \cong 0.844$ (**Tableau 6-4**).

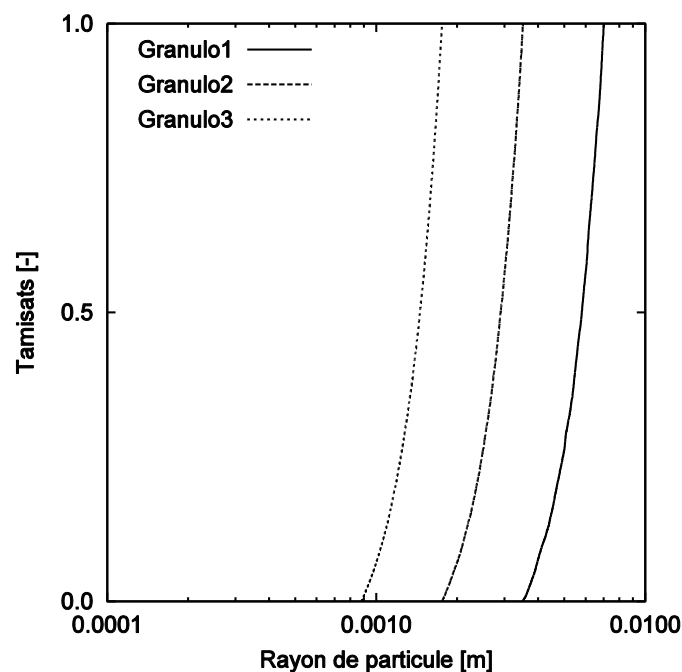


Figure 6-23. Courbes granulométriques Granulo1, 2 et 3

6.4.1.1. Réponse mécanique macroscopique

Pour chaque courbe granulométrique, on effectue 5 essais dynamiques dans 3 échantillons S_1 , S_2 et S_3 avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹.

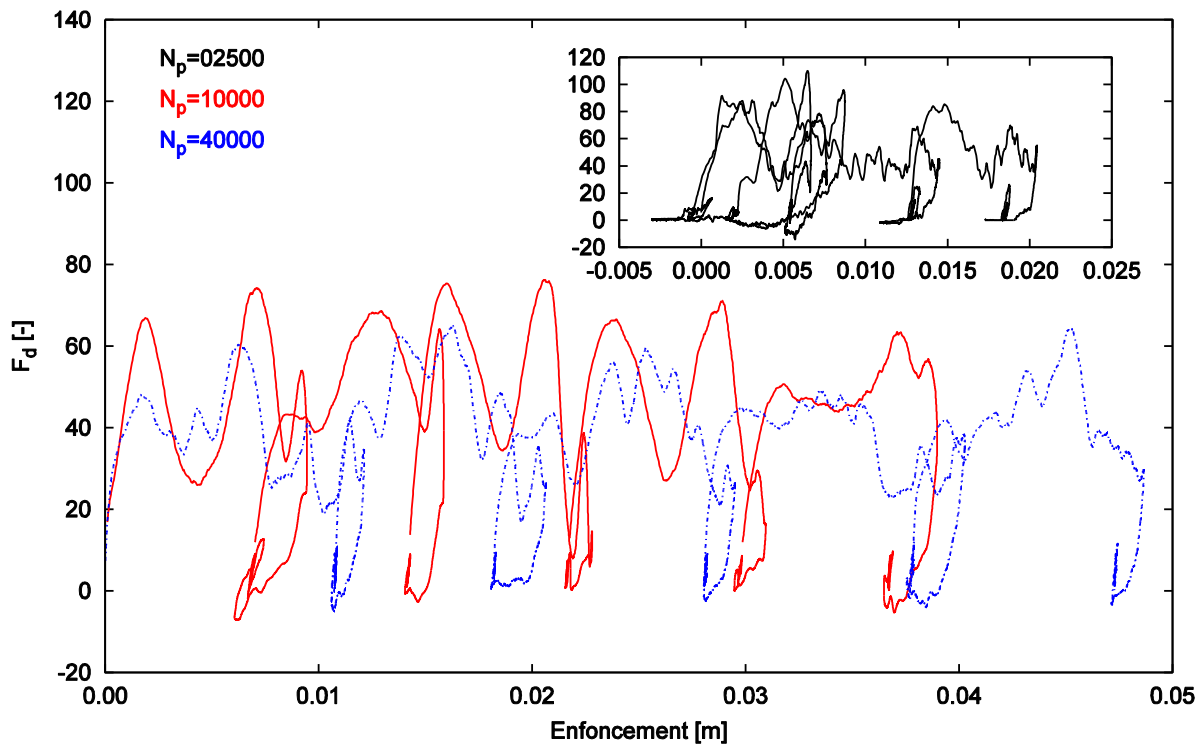


Figure 6-24. Pénétragrammes de 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour l'échantillon S_1 et pour 3 granulométries avec différents nombres de particules: $N_P = 2\ 500$, 10 000 et 40 000.

La Figure 6-24 représente les pénétrogrammes de 5 essais dynamiques successifs pour l'échantillon S_1 pour 3 granulométries différentes correspondant à $N_P = 2\ 500$, 10 000 et 40 000. On observe que l'enfoncement après 5 essais dynamiques est plus important lorsque le nombre de particules augmente. Pour l'essai dans le matériau comportant le moins de particules (milieu grossier - $N_P = 2\ 500$), on a obtenu un refus.

La Figure 6-25 représente la transformée de Fourier du palier des courbes charge-enfoncement ainsi que les gammes de fréquences du matériau sollicité déterminé par l'Equation 6-4 correspondant aux différentes tailles de particules $N_P = 2\ 500$, 10 000 et 40 000. On observe que l'amplitude des fréquences du spectre est plus importante pour la distribution granulométrique où la taille des particules est plus grande.

En terme de fréquence des oscillations, on trouve que la gamme de fréquence du spectre du matériau sollicité augmente lorsque le nombre de particule augmente. La fréquence correspondant à l'amplitude maximale reste faible pour le cas où $N_P = 40\ 000$. Ces fréquences peuvent être reliées aux distances entre les deux pics non-adjacents du signal pénétrométrique (Figure 6-5). Les autres fréquences où les amplitudes sont non négligeables par rapport à l'amplitude maximale du spectre restent dans la gamme de fréquences correspondant à la gamme de la taille de particules de l'échantillon comportant $N_P = 40\ 000$ particules.

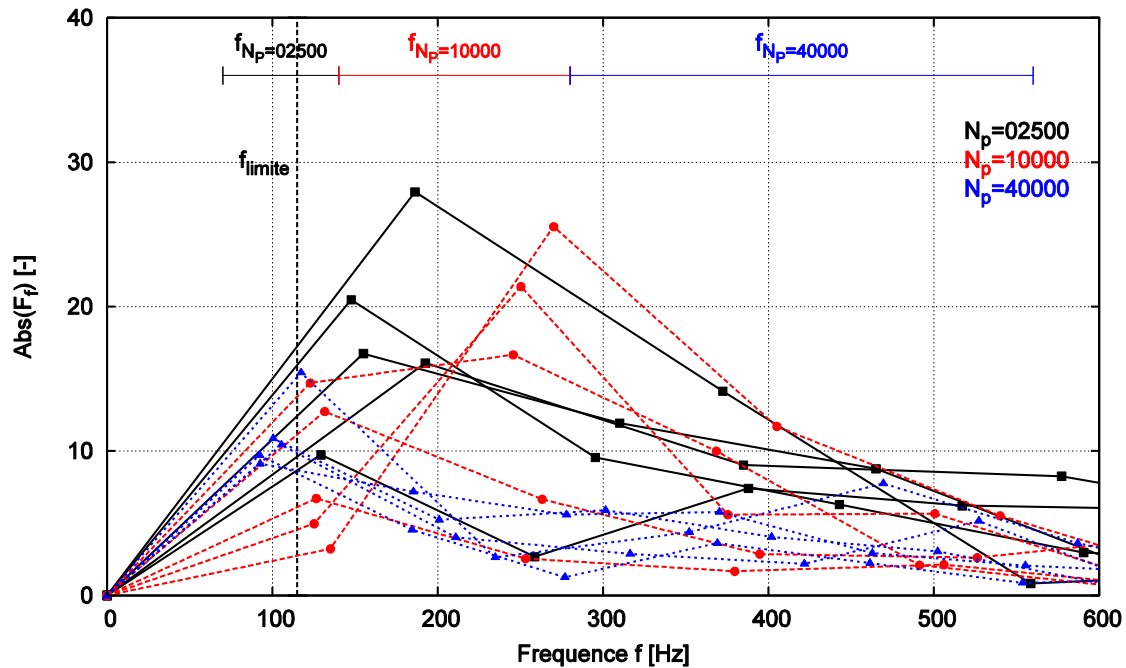


Figure 6-25. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour l'échantillon S1 et pour chaque granulométrie correspondant aux différents nombres de particule $N_P = 2\,500$, $10\,000$ et $40\,000$.

Pour le cas où $N_P = 2\,500$, l'enfoncement maximal moyen des 15 essais dynamiques est égale $\text{Enf}_{\max} = 8.8 \text{ mm}$ (de l'ordre du diamètre minimal du milieu $D_{\min} = 7.02 \text{ mm}$). Sur la Figure 6-25, on trouve que toutes les fréquences du spectre dans le cas $N_P = 2\,500$ sont supérieures à $f_{\text{limite}} = 1/\text{Enf}_{\max} \cong 115 \text{ Hz}$. On constate également que les fréquences ayant les amplitudes importantes dépassent la gamme de fréquence correspondant à la taille de la granulométrie $f_{N_P=2500}$. En plus, il semble que les fréquences où ses amplitudes sont non négligeables par rapport à l'amplitude maximale du spectre est plus faible pour la taille de particule est plus grandes (Figure 6-25). Ainsi, on trouve que la fréquence des oscillations entre deux pics proches est plus faible plus le matériau est fin.

Les annexes Annexe 29, Annexe 30 et Annexe 31 montrent la force de pointe F_a calculées pour 15 essais dynamiques pour les différentes granulométries. On trouve que l'enfoncement résiduel pour un coup dynamique reste faible lorsque le nombre de particules $N_P = 2\,500$. Il y a quelques essais pour lesquels l'enfoncement résiduel est négatif (Annexe 29). C'est à dire que la position finale de la tige est inférieure à la position initiale. La tige a donc eu un refus. Lorsque le nombre de particules augmente, pour une même énergie, la tige s'enfonce plus dans le milieu granulaire. Plus la taille des particules augmente, plus les blocages se développent. Ainsi, pour une même énergie injectée, la force de pointe F_a devrait être plus grande quand le nombre de particules diminue.

La Figure 6-26 représente la force de pointe F_a moyenne calculée pour 15 essais dynamiques pour chaque granulométrie. On retrouve que plus la taille des particules augmente, plus la force de pointe F_a est grande. De plus, on constate une diminution de l'écart-type pour des tailles de particules plus faible. La mesure de force de pointe F_a est moins reproductible ou moins stable lorsque la taille des particules augmente.

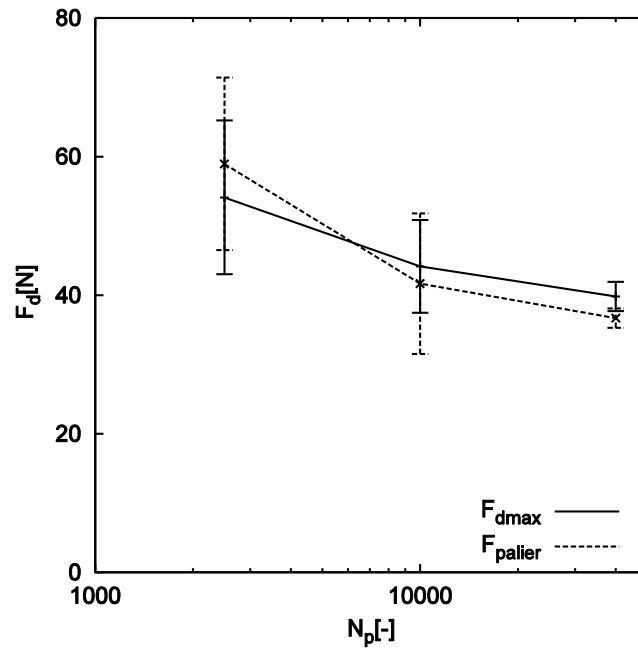


Figure 6-26. Résistance de pointe F_d moyenne pour 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de $1250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour 3 échantillons différents S_1 , S_2 et S_3 de mêmes caractéristiques en fonction du nombre de particules $N_p = 2500$, 10000 et 40000 .

6.4.1.2. Evolution du nombre de coordination

La Figure 6-27 représente le nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs effectués dans l'échantillon S_1 et pour différents nombres de particules ($N_p = 2500$, 10000 et 40000).

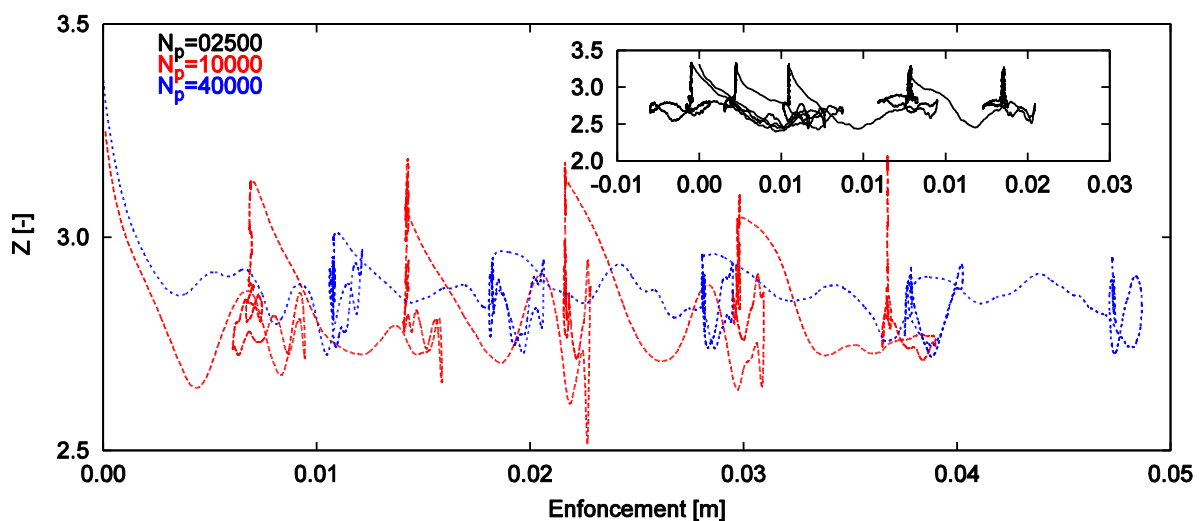


Figure 6-27. Nombre de coordination pour 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de $1250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour l'échantillon S_1 pour différents nombres de particules $N_p = 2500$, 10000 et 40000 .

On constate que le nombre de coordination moyen reste stable durant l'essai (après l'impact) et diminue lorsque le nombre de particules augmente. On trouve également que sur l'ensemble d'un coup, plus le matériau est grossier et plus la variation du nombre de coordination est importante.

6.4.1.3. Analyse énergétique

En terme d'énergie, l'effet de la taille des particules sur le bilan énergétique et la distribution de la dissipation a été étudié (**Tableau 6-5**). On constate que la part d'énergie dissipée par frottement diminue avec l'augmentation du nombre de particules au détriment de l'énergie correspondant au travail du confinement (E_C). Par ailleurs, on note que les énergies potentielle E_{PP} et de déformation E_S des grains sont peu affectées par l'augmentation du nombre de particules.

N_p [-]	Injection		Dissipation ou Transmission				
	E_I [%]	E_{PT} [%]	E_F [%]	E_C [%]	E_K [%]	E_S [%]	E_{PP} [%]
2 500	95.83	4.17	99.80	0.59	0.01	-0.57	0.16
10 000	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
40 000	89.56	10.44	92.56	6.78	0.01	-0.12	0.77

Tableau 6-5. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon S₁ pour différents nombres de particules: $N_P = 2500, 10\ 000$ et $40\ 000$.

La diminution de la dissipation de l'énergie par frottement lorsque le nombre de particules augmente est illustrée par la **Figure 6-28**. On trouve que la zone la plus sollicitée par frottement se situe autour de la pointe et que sa taille augmente lorsque la taille des particules augmente.

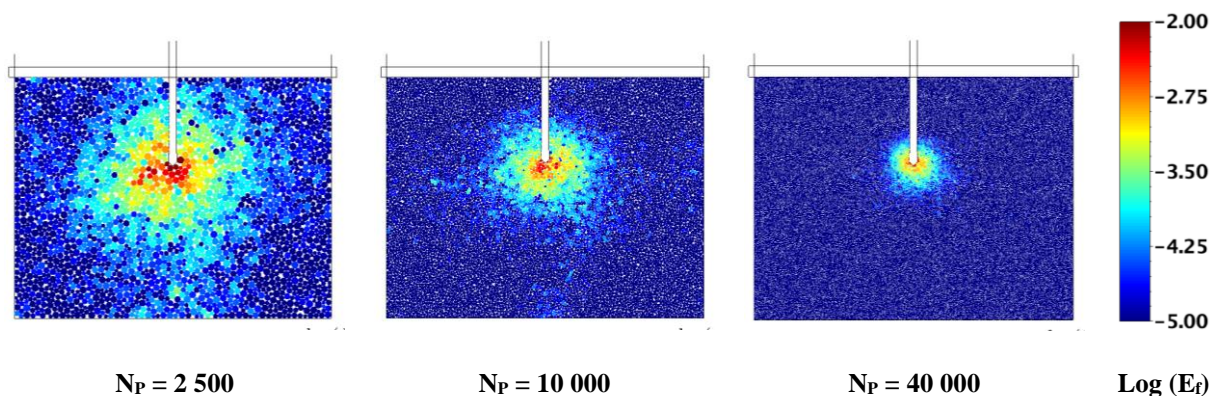


Figure 6-28. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour différents nombres de particules $N_P = 2500, 10000$ et 40000 pour un coup dynamique à 1250 mm.s⁻¹ de vitesse d'impactant.

La **Figure 6-29** représente l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs déterminée dans l'échantillon pour différents nombres de particules $N_P = 2\ 500, 10\ 000$ et $40\ 000$. On trouve que l'énergie dissipée par frottement se dissipe plus rapidement pour la granulométrie la plus grossière.

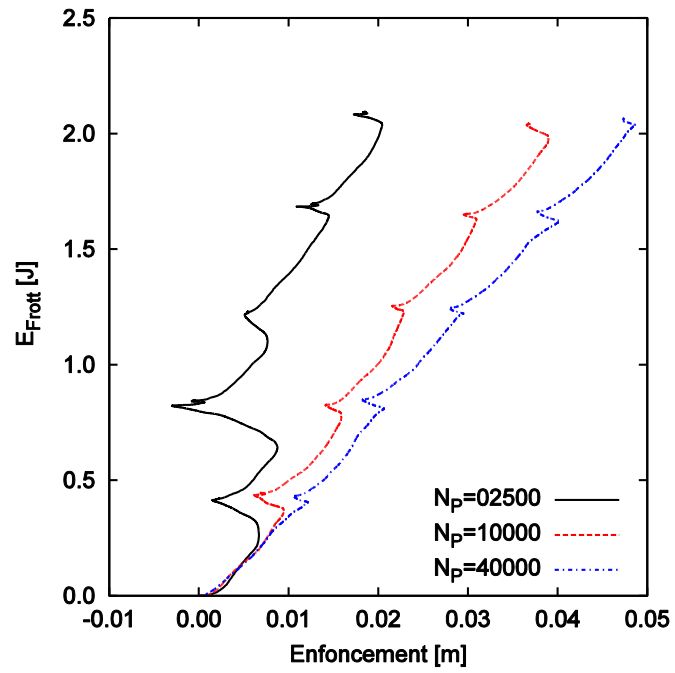


Figure 6-29. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs pour différents nombres de particules: $N_p = 2\ 500$, $10\ 000$ et $40\ 000$.

6.4.2. Influence de la forme de la courbe granulométrique

Dans cette section, trois granulométries différentes sont créées. Les diamètres extrêmes sont fixés ($D_{\max}/D_{\min} = 2$ et $D_{\max} = 7.02 \text{ mm}$). La proportion de petites particules change en fonction de la méthode de génération (**Figure 6-30**). Cependant, les compacités d'échantillons sont similaires (**Tableau 6-4**).

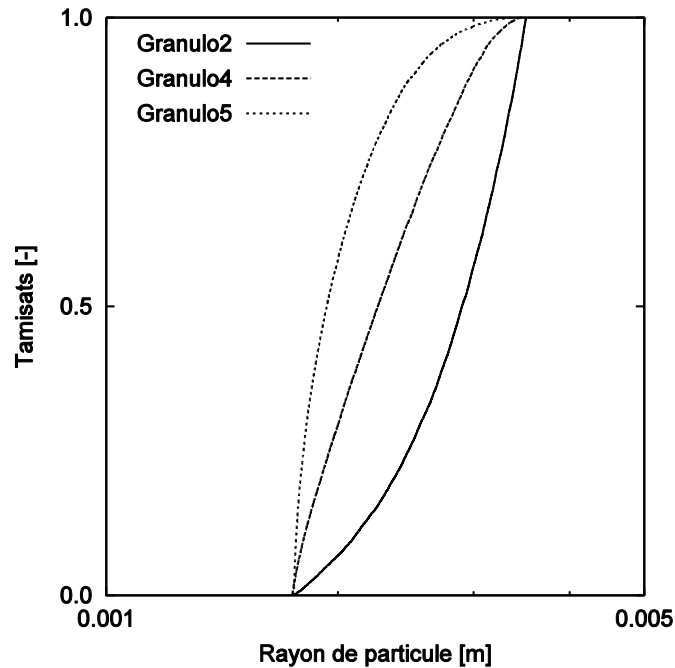


Figure 6-30. Courbes granulométriques Granulo2, 4 et 5

6.4.2.1. Réponse mécanique macroscopique

Pour chaque courbe granulométrique, on effectue **5** essais dynamiques avec une masse d'impactant égale à **0.5 kg** et une vitesse d'impact égale à **1250 mm.s⁻¹** dans trois échantillons **S₁**, **S₂** et **S₃**.

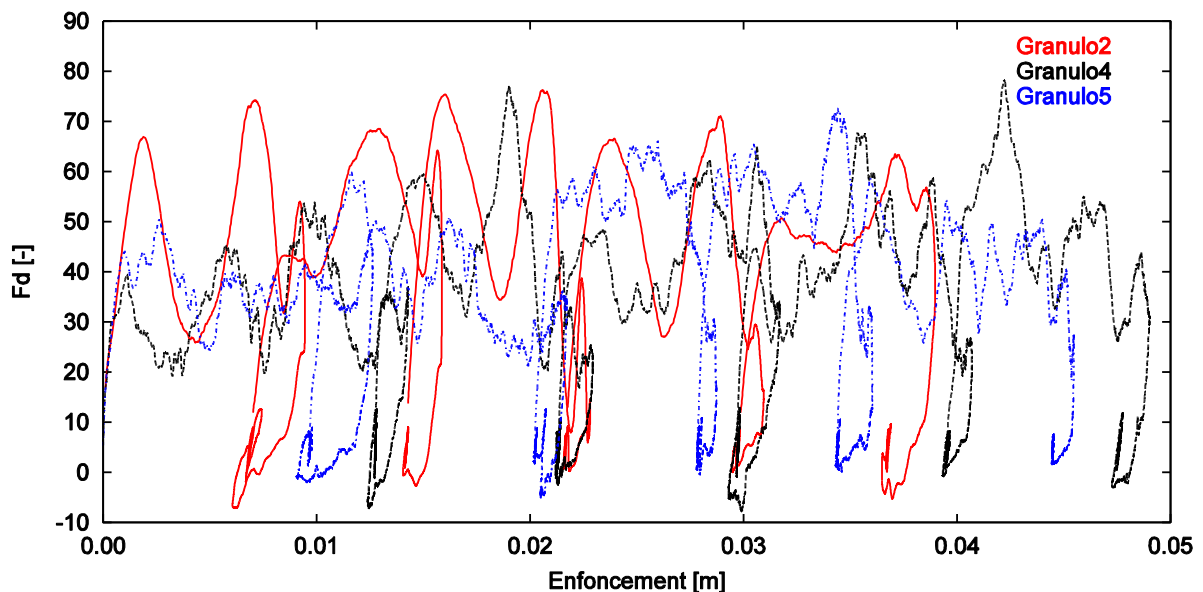


Figure 6-31. Pénétrogrammes de 5 essais dynamiqués successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour l'échantillon S₁ et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

La Figure 6-31 donne les pénétrogrammes des 5 essais dynamiqués successifs effectués sur échantillon S₁ pour chaque granulométrie Granulo2, Granulo4 et Granulo5. On trouve que plus il y a de particules fines, plus les enfoncements sont importants, plus les oscillations du signal sont faibles en amplitude et importantes en fréquence. Les mêmes phénomènes ont été observés sur les autres échantillons testés (S₂ et S₃).

Ces observations sont corroborées par l'analyse de la Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiqués successifs réalisés dans l'échantillon S₁ pour chaque granulométrie Granulo2, Granulo4 et Granulo5 (Figure 6-32). On trouve en effet, que l'amplitude des fréquences du spectre diminue pour le matériau le plus fin. Plus le matériau est fin, plus les fréquences où ses amplitudes sont non négligeables par rapport à l'amplitude maximale du spectre est supérieure à la gamme de fréquence du matériau sollicité f_M .

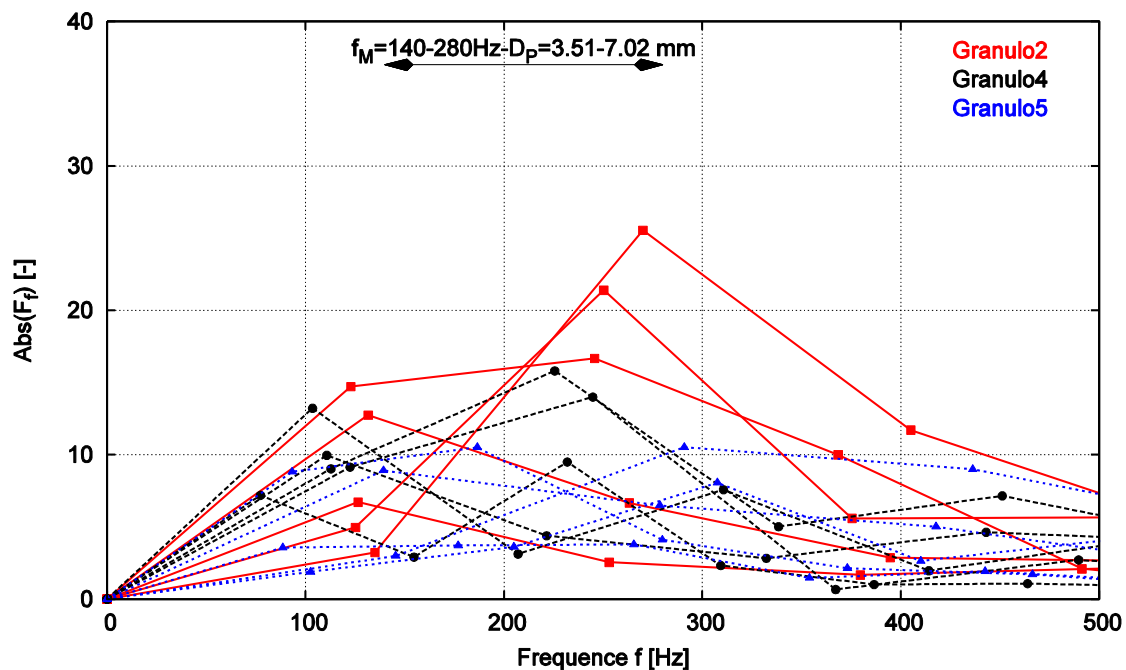


Figure 6-32. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiqués successifs réalisés dans l'échantillon S₁ pour les granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

Les calculs de la force de pointe F_a et de l'enfoncement pour 15 essais dynamiqués avec les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5 sont présentés en détail dans les annexes Annexe 30, Annexe 32 et Annexe 33.

On constate que la force de pointe moyenne évolue peu pour les 3 types de granulométries testées, mais que l'augmentation du nombre de fines particules au sein d'un matériau (Granulo5), réduit la variabilité de la force de pointe dynamique (Figure 6-33).

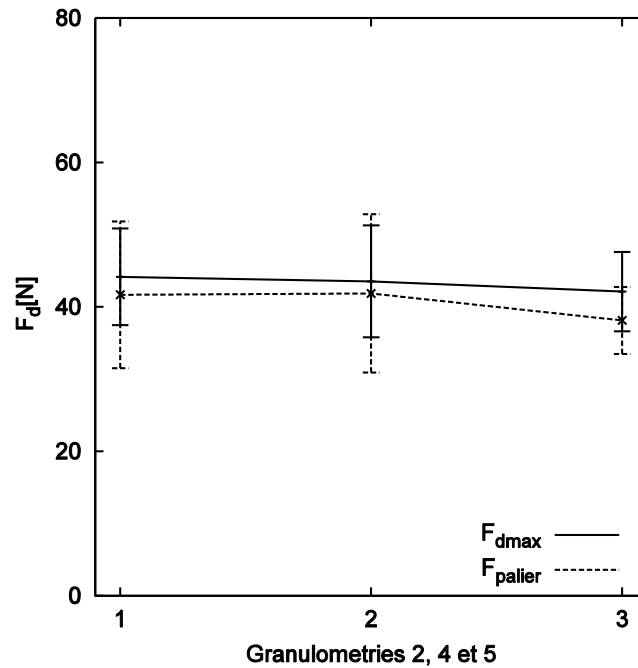


Figure 6-33. Force de pointe moyenne de 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons différents S₁, S₂ et S₃ et pour les granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

Lorsque la proportion de particules fines diminue, on trouve que l'enfoncement moyen d'un essai dynamique diminue. Cette observation est conforme à celle observée sur les courbes charge-enfoncement pour les granulométries **Granulo1, 2 et 3** (section 6.4.1). Ainsi, la force de pointe **F_a** moyenne pour les 15 essais dynamiques augmente pour un matériau plus grossier. Par contre, l'écart type est plus important parce que les valeurs de force de pointe **F_a** mesurées sont plus variables pour la granulométrie possédant un **D₅₀** plus grand.

La **Figure 6-33** représentant la force de pointe moyenne de 15 essais dynamiques pour les différentes granulométries **Granulo2, Granulo4 et Granulo5** confirme les conclusions exposées ci-dessus. On trouve que pour une distribution granulométrique similaire, la force de pointe augmente légèrement lorsque la taille des particules augmente.

6.4.2.2. *Evolution du nombre de coordination*

La **Figure 6-34** représente l'évolution du nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs effectués sur l'échantillon S₁ et pour les différentes méthodes de génération des particules **Granulo2, Granulo4 et Granulo5**. On observe que le nombre de coordination et son évolution semblent similaires pour les trois granulométries données.

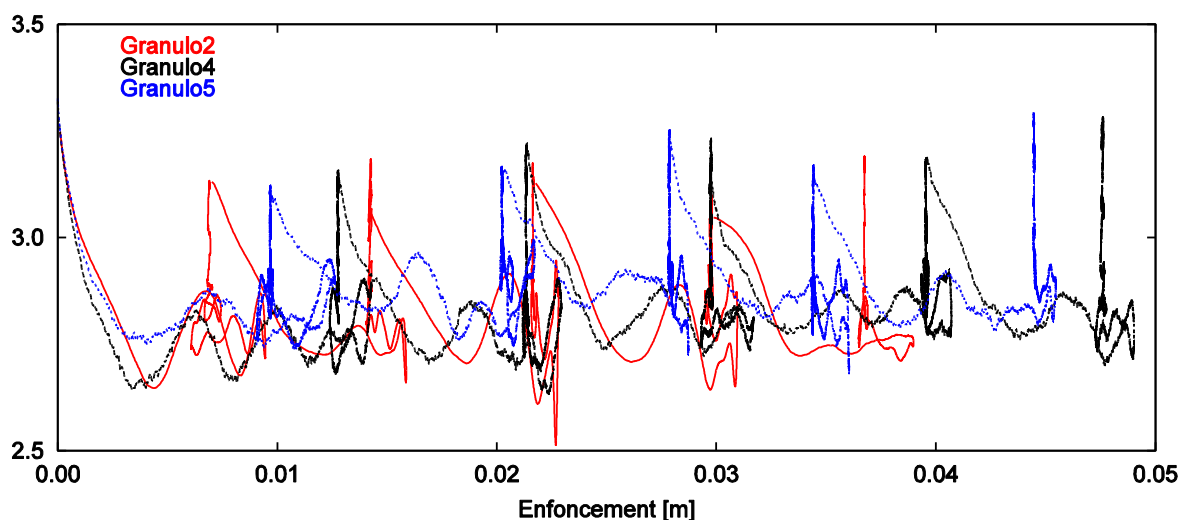


Figure 6-34. Nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs effectués pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

6.4.2.3. Analyse énergétique

En termes d'énergie, le **Tableau 6-6** montre le bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques effectués dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo4** et **Granulo5**. La **Figure 6-35** représente l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs calculés dans l'échantillon **S₁** pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo4** et **Granulo5**. On trouve que l'énergie dissipée par frottement diminue légèrement lorsque la proportion des particules fines est plus importante pour des matériaux de granulométries similaires. L'énergie injectée dans le système est d'autant plus dissipée par frottement que le matériau contient des particules grossières. Cette conclusion est en accord avec la conclusion obtenue dans la section **6.4.1.3**.

Type2 [-]	Injection		Dissipation ou Transmission				
	E _I [%]	E _{PT} [%]	E _F [%]	E _C [%]	E _K [%]	E _S [%]	E _{PP} [%]
Granulo2	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
Granulo4	89.52	10.48	92.92	5.85	0.00	0.54	0.68
Granulo5	90.14	9.86	92.57	6.20	0.00	0.50	0.73

Tableau 6-6. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

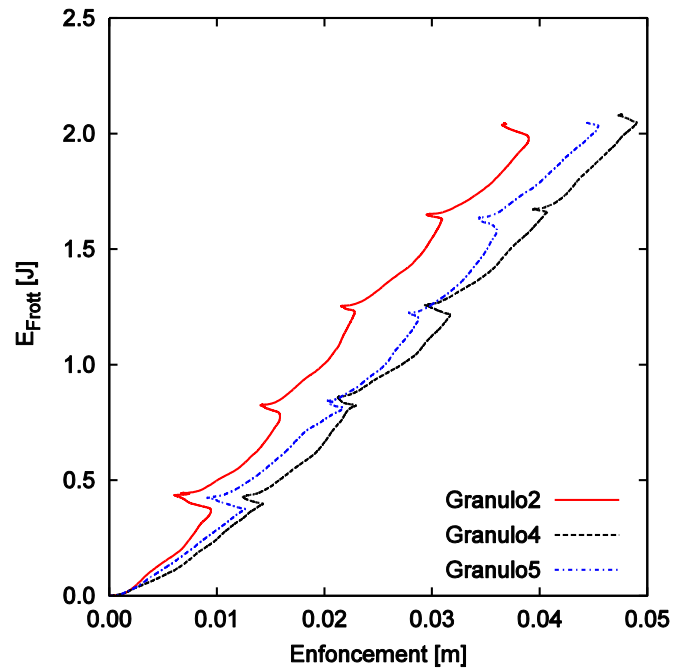


Figure 6-35. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5 et pour l'échantillon S₁.

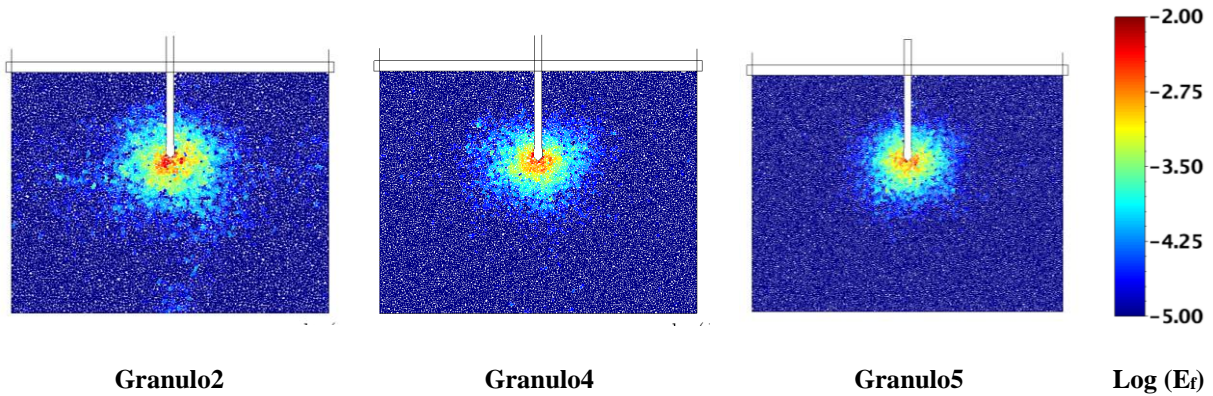


Figure 6-36. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un coup dynamique avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon S₁ et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo4 et Granulo5.

La **Figure 6-36** montre la distribution d'énergie dissipée par frottement pour un coup dynamique effectué dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo4** et **Granulo5**. On observe que la taille de la zone d'influence en termes de dissipation par frottement diminue un peu lorsque la taille des particules moyennes diminue.

6.4.3. Influence de l'étalement granulométrique

Dans cette section, on aborde l'influence de l'étalement granulométrique sur l'essai de pénétration dynamique sur la réponse mécanique macroscopique, le réseau de contacts et sur la dissipation d'énergie. Les trois courbes granulométriques **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7** ont été obtenues en changeant l'étalement granulométrique. Le diamètre maximal des trois granulométries est constant ($D_{\max} = 7.02 \text{ mm}$) (**Figure 6-37**). Le **Tableau 6-4**, fournit la compacité maximale obtenue pour chaque granulométrie, qui augmente lorsque le ratio D_{\max}/D_{\min} augmente. Ceci s'explique par le fait que les vides entre les particules plus grandes sont remplacés par des particules plus petites.

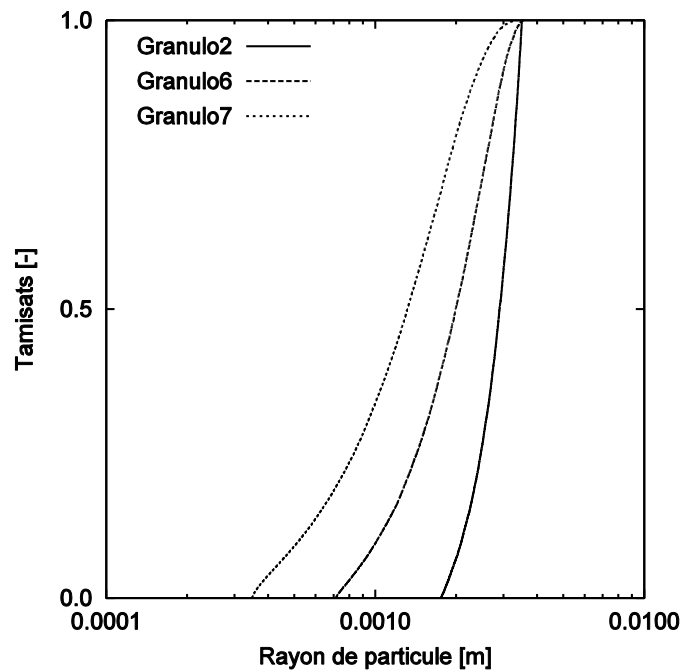


Figure 6-37. Courbes granulométriques Granulo2, 6 et 7

Pour chaque granulométrie, on effectue **15** essais dynamiques avec une masse d'impactant de **0.5 kg** et une vitesse d'impact de **1250 mm.s⁻¹** dans trois échantillons **S₁**, **S₂** et **S₃**.

6.4.3.1. Réponse mécanique macroscopique

La **Figure 6-38** donne les pénétrogrammes pour **5** essais dynamiques successifs effectués pour l'échantillon **S₁** et pour les différentes granulométries **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7** où le ratio entre les diamètres extrêmes correspond à **2**, **5** et **10**.

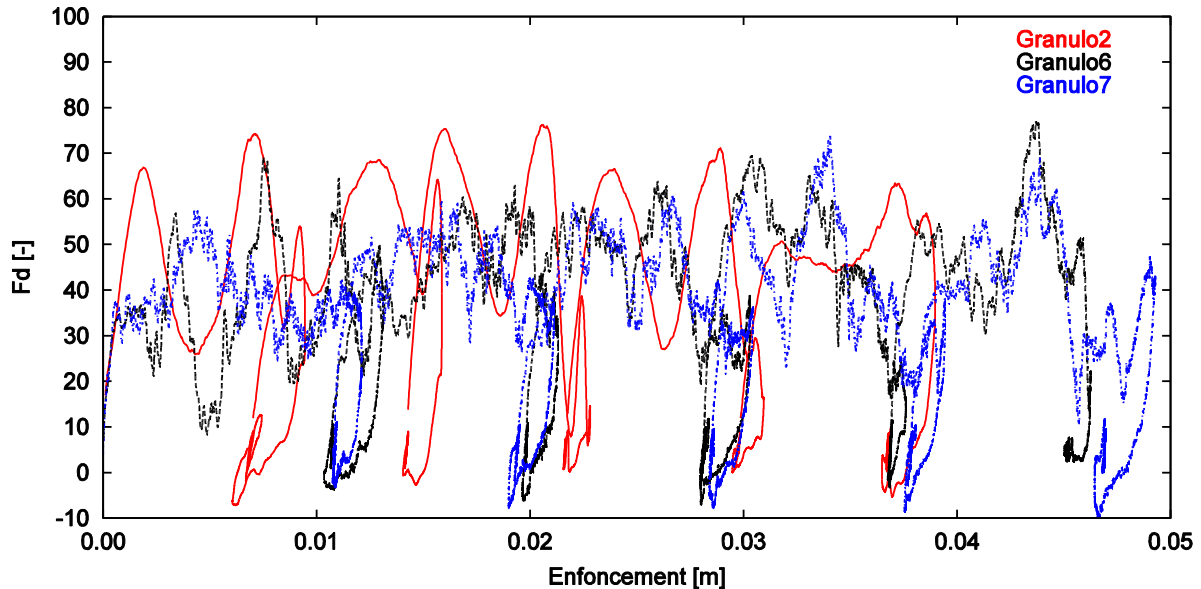


Figure 6-38. Pénétrogrammes de 5 essais dynamiques successifs effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7**.

On observe que les signaux des **4** premiers essais avec les deux granulométries **Granulo6** et **Granulo7** sont presque similaires. Le pénétrogramme de la granulométrie **Granulo2** (étalement granulométrique le plus faible) est quant à lui totalement différent de celui des deux autres granulométries. En outre, l'enfoncement final des **5** essais dynamiques successifs est plus faible pour la granulométrie **Granulo2**. L'analyse de la transformée de Fourier montre que la gamme de fréquences correspondant aux diamètres extrêmes de la granulométrie augmente lorsque D_{\max}/D_{\min} augmente. De plus, l'amplitude des fréquences du spectre de Fourier devient faible pour l'étalement granulométrique le plus important. Ainsi, on observe que les oscillations du palier des courbes charge-enfoncement sont plus faibles en amplitude mais plus importantes en fréquence lorsque l'étalement granulométrique augmente (**Figure 6-39**).

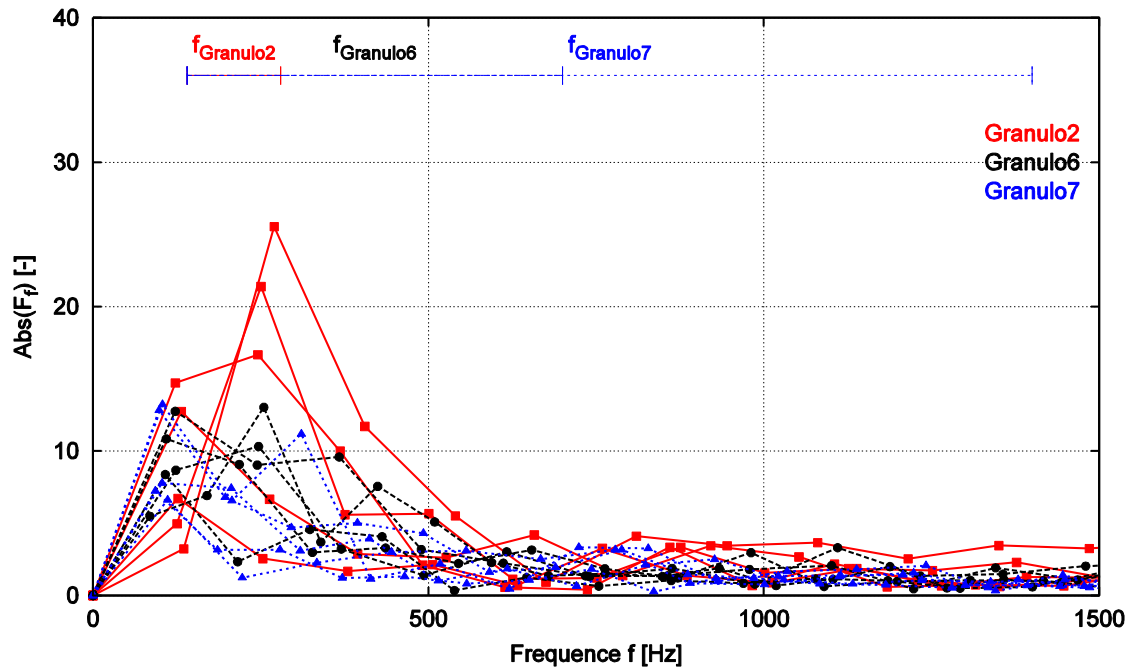


Figure 6-39. Transformée de Fourier discrète de 5 essais dynamiques successifs pour un échantillon et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.

La Figure 6-40 montre que la force de pointe moyenne F_a est encore une fois plus faible pour le matériau plus fin et d'étalement plus important (Granulo7), et que la variabilité de la résistance diminue plus la granulométrie est étalée (Granulo2).

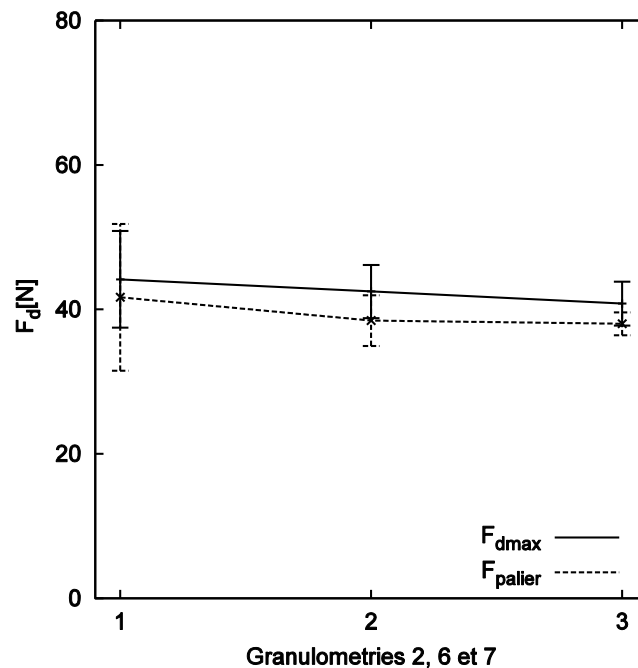


Figure 6-40. Force de pointe moyenne des 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon S1 et pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.

6.4.3.2. Evolution du nombre de coordination

La **Figure 6-41** représente le nombre de coordination et son évolution au cours de l'enfoncement déterminés dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour **5** essais successifs effectués dans l'échantillon **S₁** pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7**. On observe clairement que le nombre de coordination est plus faible pour le milieu granulaire plus étalé (**Granulo7**). On observe également que plus l'étalement est faible et plus la variation au cours de l'essai est importante.

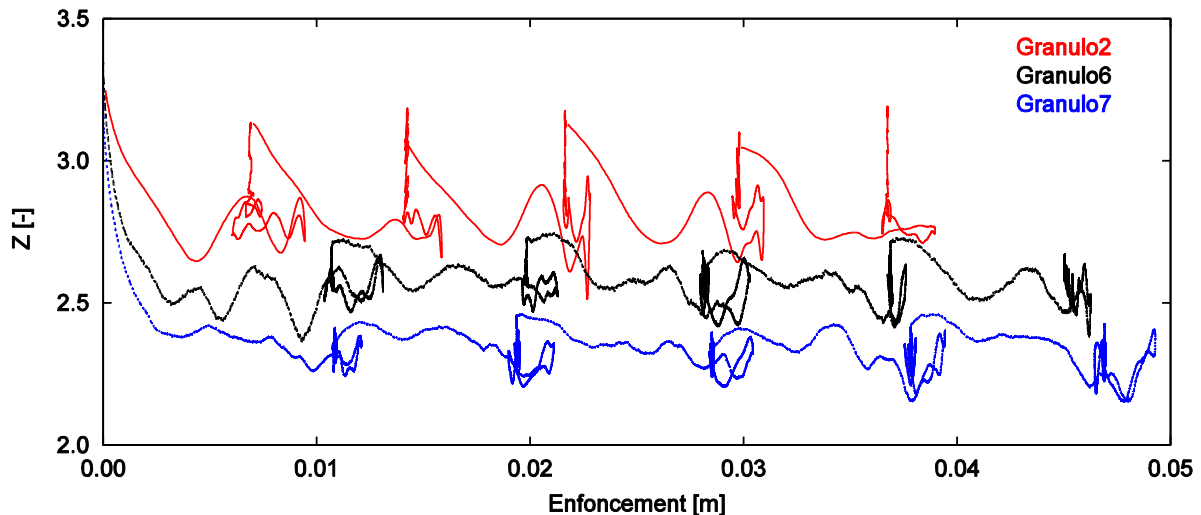


Figure 6-41. Evolution du nombre de coordination déterminé dans une bande de 15 cm de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre pour 5 essais dynamiques successifs dans un échantillon et pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.

6.4.3.3. Analyse énergétique

Le **Tableau 6-7** montre le bilan énergétique moyen pour **5** essais dynamiques successifs effectués dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7**. On observe que l'énergie dissipée par frottement est plus importante pour la granulométrie **Granulo2** (étalement plus faible), tandis qu'elles sont presque similaires pour les deux granulométries **Granulo6** et **Granulo7** (**92.66%** contre **92.97%**).

Type3 [-]	Injection			Dissipation ou Transmission			
	E _I [%]	E _{PT} [%]	E _F [%]	E _C [%]	E _K [%]	E _S [%]	E _{PP} [%]
Granulo2	92.23	7.77	94.80	4.58	0.00	0.05	0.56
Granulo6	90.00	10.00	92.66	6.12	0.01	0.49	0.73
Granulo7	89.63	10.37	92.97	6.05	0.02	0.24	0.71

Tableau 6-7. Bilan énergétique moyen pour 5 essais dynamiques avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ effectués dans l'échantillon **S₁** et pour les trois granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.

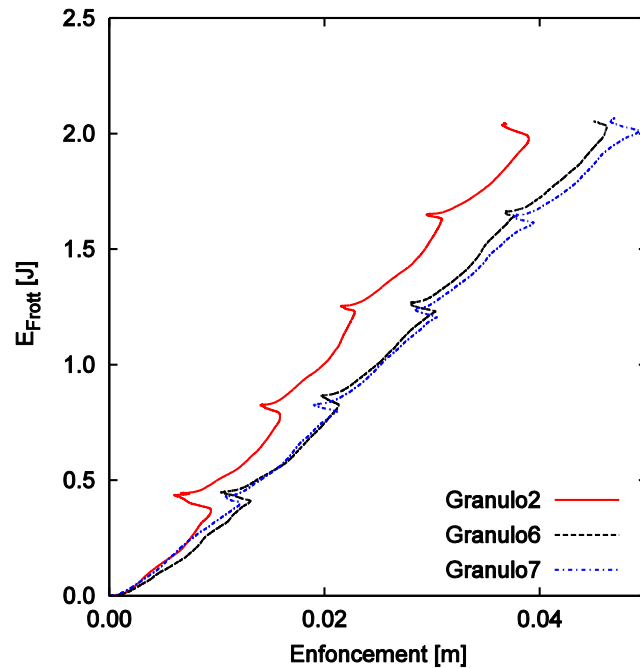


Figure 6-42. Energie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs réalisés dans un échantillon pour les granulométries Granulo2, Granulo6 et Granulo7.

La **Figure 6-42** représente l'énergie dissipée par frottement en fonction de l'enfoncement pour 5 essais dynamiques successifs réalisés dans un échantillon pour les granulométries **Granulo2**, **Granulo6** et **Granulo7**. On trouve que la dissipation d'énergie par frottement est plus efficace pour la granulométrie ayant le ratio de D_{\max}/D_{\min} le plus petit (**Granulo2**). En outre, on observe que la taille de la zone la plus sollicitée par frottement diminue lorsque le ratio de D_{\max}/D_{\min} augmente (**Figure 6-43**).

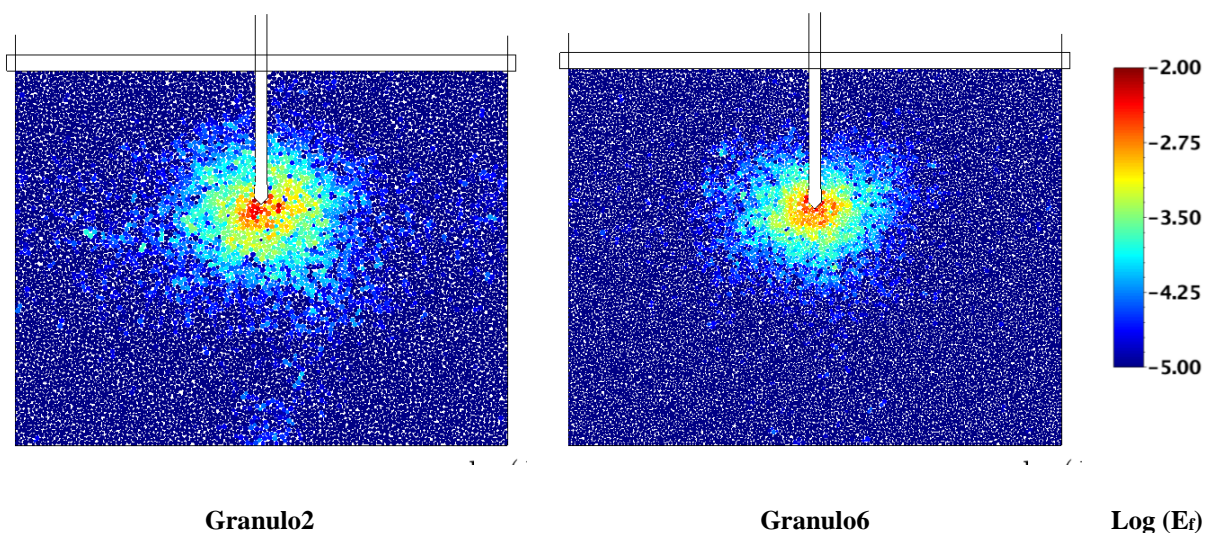


Figure 6-43. Distribution d'énergie dissipée par frottement pour un coup dynamique avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s^{-1} effectués dans l'échantillon S_1 et pour les trois granulométries Granulo2 et Granulo6.

6.4.4. Conclusion

Dans cette section, l'influence de **3** types de granulométrie (variation de l'étalement, variation du D_{max} et variation de la distribution pour un même étalement et un même D_{max}) sur l'essai de pénétration dynamique a été analysée. Pour la réponse mécanique macroscopique, plus le diamètre moyen D_{50} augmente que ce soit en changeant le nombre de particules N_p dans l'échantillon, la répartition des particules fines ou l'étalement granulométrique du matériau, plus la force de pointe moyenne augmente et plus la variabilité est importante pour une même énergie d'impact.

Les oscillations du palier des courbes charge-enfoncement sont plus importantes en amplitude lorsque D_{50} augmente. L'analyse de Fourier des signaux a permis de mettre en évidence que le signal pénétrométrique est beaucoup plus bruité (fréquence d'oscillation plus importante et variable) lorsque l'étalement et la répartition des particules fines augmentent.

Au niveau de l'analyse des contacts, on constate que le nombre de coordination déterminé dans une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre est stable et varie peu quand la taille des particules diminue pour les granulométries **Granulo1, 2** et **3**. Tandis que le nombre de coordination diminue et évolue fortement au voisinage de la pointe du pénétromètre pour des matériaux plus grossiers. Ces observations peuvent être reliées à l'augmentation du nombre de petites particules sans contact pendant l'essai lorsque l'étalement granulométrique augmente. En outre, le nombre de coordination semble peu influencé par le type de distribution lorsque l'étalement granulométrique est identique.

Concernant l'analyse énergétique, on a trouvé que si l'énergie dissipée par frottement reste le mode prédominant de dissipation de l'énergie au sein du matériau durant l'essai (de l'ordre de **90%** de l'énergie injectée), il y a une légère diminution de l'énergie dissipée par frottement lorsque la taille de particule moyenne D_{50} diminue. En effet, les efforts aux contacts deviennent plus importants, lorsque les particules grossissent. Si les efforts de contacts sont donc plus importants, la dissipation sera plus grande car on mobilisera moins de contacts pour dissiper la même énergie.

6.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence des caractéristiques du milieu granulaire sur l'essai de pénétration dynamique aux échelles macro et microscopiques. On s'intéresse tout d'abord à la variabilité du signal pénétrométrique, puis à l'évolution du nombre de coordination et enfin à l'analyse énergétique pendant l'essai de pénétration dynamique.

L'étude des gammes de fréquences du spectre de Fourier des signaux pénétrométriques montre une supposition entre la gamme des fréquences présentant les amplitudes les plus fortes et la gamme de fréquences liée à l'étalement granulométrique du matériau. Les oscillations de la courbe charge-enfoncement pourraient être reliées aux tailles des particules qui ont été déplacées durant l'enfoncement. Cette piste pourrait faire l'objet d'études ultérieures qui n'ont pas pu être menées dans le cadre de ce travail de thèse.

Pour le coefficient de frottement des particules μ (paragraphe 6.2), on a montré que plus le frottement des particules augmente, plus la force de pointe F_a augmente et qu'il est donc plus difficile d'enfoncer la tige dans le milieu granulaire. Cependant, la force de pointe semble similaire lorsque le coefficient de frottement de l'assemblage des particules est supérieur à **0.5**. De plus, la variation des oscillations du signal est de plus en plus importante en amplitude lorsque μ augmente. Au niveau des contacts, on a trouvé que le nombre de coordination reste plus grand (supérieur à **3.5**) quand le frottement des particules est faible. Concernant la dissipation d'énergie par frottement, celle-ci est moins efficace avec un faible frottement entre particules.

Concernant la compacité de l'assemblage des particules (paragraphe 6.3), on trouve que les contacts entre les particules dans l'échantillon sont plus nombreux, lorsque la compacité est plus grande. La tige est donc plus difficile à enfoncer dans le milieu bien que la variation de densité explorée est très faible (entre **22.06** et **22.79 KN.m⁻³**). Ainsi, plus la compacité ϕ est grande, plus la force de pointe F_a est grande. Les oscillations de la courbe charge-enfoncement sont plus grandes en amplitude lorsque la compacité initiale est plus importante. De plus, la fréquence de ces oscillations de grande amplitude augmente également avec la compacité. Cependant, on n'a trouvé aucune influence claire de la compacité sur le bilan énergétique. Il y a plus de **90%** d'énergie dissipée par frottement.

Enfin, l'influence de la granulométrie a été présentée dans le paragraphe 6.4. En ce qui concerne la réponse mécanique macroscopique, on a trouvé que la force de pointe devient plus petite pour les granulométries possédant plus de particules fines et la variabilité de la réponse devient plus faible. Plus le diamètre moyen des particules augmente, plus les oscillations du signal sont importantes en amplitude. De plus, le palier de la courbe charge-enfoncement possède plus des fréquences d'oscillations où ses amplitudes sont non négligeables par rapport à l'amplitude maximale du spectre sont plus importantes pour des matériaux dont la granulométrie comporte plus de particules fines. Au niveau des contacts, on a montré que le nombre de contacts sur une bande de **15 cm** de large de part et d'autre de la pointe du pénétromètre semble similaire lorsque le ratio entre les diamètres extrêmes reste constant. Lorsque le ratio D_{max}/D_{min} augmente, la proportion de petites particules augmente et lors de l'enfoncement, il y aura de nombreuses particules ayant **0** contact à cause de la proportion de petites particules. C'est la raison pour laquelle, le nombre de coordination

devient plus faible et que la capacité de dissipation d'énergie par frottement diminue. Enfin, la taille de la zone la plus sollicitée par frottement diminue lorsque le ratio D_{\max}/D_{\min} augmente.

Conclusion

Face aux récents développements des essais de pénétration et au besoin de compréhension des mécanismes se déroulant lors de l'essai, l'objectif principal de ce travail était de mettre en évidence et d'étudier les paramètres influant sur les signaux pénétrométriques et la résistance de pointe – par exemple, le mode d'application de la sollicitation, la densité, la granularité du matériau – et de mieux comprendre le comportement du milieu granulaire soumis à un essai de pénétration statique ou dynamique afin de pouvoir mieux exploiter et interpréter la réponse macroscopique de l'essai. Pour cela, nous avons proposé un modèle numérique basé sur la Méthode des Eléments Discrets.

Dans un premier temps, une étude bibliographique sur l'essai de pénétration et plus particulièrement sur les essais CPT et Panda a permis de mettre en évidence les paramètres influençant la mesure. Les différentes approches analytiques et numériques utilisées dans la littérature pour modéliser l'essai de pénétration ont également été présentées avec pour objectif de définir l'approche la mieux adaptée pour modéliser les essais de pénétration statique et dynamique. Sur la base de ce travail, la Méthode des Eléments Discrets a été choisie pour mener les études présentées dans cette thèse.

Les principes généraux de la Méthode des Eléments Discrets ont été présentés dans le deuxième chapitre. Par la suite, un modèle numérique n'intégrant aucun amortissement ni visqueux ni local et permettant de reproduire l'essai de pénétration statique et dynamique a été proposé. La justification du choix des paramètres physiques et mécaniques du modèle a été présentée en détail dans ce chapitre.

Le troisième chapitre a permis de tester la validité du modèle à partir de simulations réalisées avec une faible vitesse d'enfoncement égale à **25 mm.s⁻¹**, équivalente à celle utilisée dans les normes de l'essai de pénétration statique. Les pénétrogrammes obtenus dans plusieurs échantillons homogènes présentent une valeur de force en pointe qui est stable en fonction de la profondeur et montrent une bonne répétabilité. Par contre, une étude de sensibilité du modèle à vitesse plus rapide a révélé un fort effet d'agitation oscillatoire vertical des particules, lié à la faible largeur de l'échantillon ; cet effet d'oscillation perturbe fortement le comportement du matériau. Par la suite, afin de diminuer l'influence des conditions aux limites, un échantillon plus large (**60 cm**), de même hauteur (**45 cm**) et présentant une rigidité des parois diminuée a été choisi. Le modèle ainsi affiné permet une bonne reproduction de l'essai de pénétration dynamique et l'obtention d'une courbe charge-enfoncement conforme à ce qui peut être classiquement observé expérimentalement.

Dans le quatrième chapitre, une analyse comparée de l'essai de pénétration pour différents modes d'application de la sollicitation a été réalisée : statique ou en condition statique et en condition dynamique. Les résultats obtenus ont été exploités et analysés en termes de réponse macroscopique ainsi qu'au niveau microscopique.

Concernant l'essai de pénétration statique, l'étude a mis en évidence que le comportement du milieu granulaire présente trois régimes différents lorsque la vitesse de pénétration varie entre une vitesse faible (**25 mm.s⁻¹**) et une vitesse importante (**5000 mm.s⁻¹**) : régime quasi-statique, régime intermédiaire et enfin un régime de type écoulement dense. Par ailleurs, il apparaît que la force de pointe augmente fortement lorsque la vitesse d'enfoncement devient supérieure à **1250 mm.s⁻¹**.

Au niveau des contacts, l'orientation des contacts semble demeurer isotrope durant l'enfoncement. Les chaînes de forces dites fortes se raccourcissent lorsque la vitesse de la tige augmente, en contrepartie le niveau de chargement des particules est plus important lorsque la vitesse de la tige est importante. Ces observations peuvent être reliées à l'augmentation avec la vitesse d'enfoncement, de la force de pointe et de son écart-type.

Pour l'essai de pénétration dynamique, la force de pointe **F_a** n'est pas influencée par le mode d'injection de l'énergie – variation du couple masse impactante / vitesse d'impact – tant que l'énergie globale injectée reste constante. Pour des vitesses d'impact inférieures à **1250 mm.s⁻¹**, la force de pointe **F_a** augmente avec la vitesse d'impact. Par contre, pour des vitesses d'impact au-delà de **1250 mm.s⁻¹**, la force de pointe **F_a** augmente mais de manière moins importante.

Une comparaison des essais de pénétration statique et dynamique a été réalisée. Lorsque la vitesse de la tige reste inférieure à **1250 mm.s⁻¹**, l'assemblage des particules est dans un état quasi-statique pour les 2 types d'essais de pénétration. Le niveau de chargement des particules au-dessous de la pointe est plus faible pour l'essai de pénétration dynamique que pour celui statique. Ainsi, la force de pointe obtenue en condition dynamique reste plus faible que celle obtenue statique.

Lorsque l'assemblage subit une sollicitation égale à **1250 mm.s⁻¹**, les évolutions de l'agitation granulaire et des chaînes de forces fortes restent similaires et stables en fonction de la profondeur pour les 2 modes d'essais de pénétration. Ainsi, la force de pointe dynamique est similaire à celle obtenues par l'essai de pénétration statique.

Lorsque la sollicitation est plus importante (**5000 mm.s⁻¹**), l'étude à l'échelle microscopique a montré que le comportement du milieu granulaire n'est que similaire dans les deux types de l'essai quand la vitesse de tige est comparable. En effet, dans l'essai dynamique, la vitesse de la tige n'est réellement égale à **5000 mm.s⁻¹** qu'en début d'essai, au fur et à mesure que la tige pénètre le milieu granulaire, celle-ci est amortie progressivement et sa vitesse diminue, le régime auquel est soumis le milieu granulaire change donc lui aussi en cours d'essai. Au contraire, pour l'essai de pénétration dit statique, la vitesse de la tige reste constante. Ainsi, on observe que la force de pointe statique **F_c** est globalement supérieure à celle obtenue par l'essai de pénétration dynamique **F_a**.

Finalement, dans le dernier chapitre, l'influence des caractéristiques du matériau sur la réponse de l'essai de pénétration dynamique a été effectuée à partir de l'analyse des modifications du signal pénétrométrique, de l'évolution du nombre de coordination et enfin du bilan énergétique.

Concernant l'influence des caractéristiques des matériaux sur la réponse mécanique macroscopique, nous avons mis en évidence à partir de l'étude des fréquences du spectre de Fourier du signal, que les oscillations de la courbe charge–enfoncement pourraient être reliées à la taille des particules qui ont été déplacées durant l'enfoncement.

Concernant l'influence du coefficient de frottement des particules, nous avons mis en évidence que plus le frottement des particules augmente, plus la dissipation d'énergie par frottement est efficace et plus la force de pointe F_d augmente. Par contre, la force de pointe atteint une valeur palier pour des valeurs de coefficients de frottement μ supérieurs à **0.5**. Les oscillations du signal sont également de plus en plus importantes lorsque μ augmente.

Concernant l'influence de la compacité de l'assemblage des particules, bien que la gamme considérée de densité du milieu granulaire varie que très légèrement (entre **22.06** et **22.79 kN.m⁻³**), on note une augmentation de la force de pointe F_d avec la compacité, mais aussi de l'amplitude des oscillations de la courbe charge–enfoncement. De plus, la fréquence des oscillations augmente également avec la compacité. Il n'y a aucune tendance claire observée en termes de dissipation de l'énergie.

L'influence de la granulométrie sur l'essai de pénétration dynamique a été étudiée. On constate que la variabilité de la réponse de l'essai diminue pour les granulométries possédant plus de fines particules. Plus la taille moyenne des particules augmente, plus la force de pointe augmente. De plus, l'analyse de Fourier des signaux a permis de mettre en évidence que le signal pénétrométrique est beaucoup plus bruité (fréquence d'oscillation plus importante et variable) lorsque l'étalement et la répartition des particules fines augmentent. Au niveau des contacts, plus le ratio D_{max}/D_{min} augmente, plus la proportion de particules ayant **0** contact augmente. Ainsi, le nombre de coordination devient plus faible, la capacité de dissipation d'énergie par frottement diminue et, la taille de la zone la plus sollicitée par frottement diminue lorsque le ratio D_{max}/D_{min} augmente.

Perspectives

En perspective de ce travail, il serait nécessaire d'étendre le modèle numérique en trois dimensions pour pouvoir modéliser de façon plus réaliste l'essai de pénétration. En ce sens, un modèle numérique plus complexe permettant de bien modéliser la transmission des forces entre l'impactant et la tige, la propagation des ondes dans la tige et dans le milieu granulaire sera un des objectifs dans l'avenir afin de valider le modèle avec les essais expérimentaux.

Une amélioration du modèle numérique pourrait également être apportée en envisageant d'autres modèles de contact entre particules. De la même façon, des formes de particules plus complexes et donc plus réalistes permettraient de reproduire le comportement d'assemblage de particules possédant les caractéristiques physiques et mécaniques plus proches de la réalité (par exemple en termes de gamme de densité, d'angle de frottement...).

Afin d'améliorer l'interprétation et l'exploitation de la courbe charge-enfoncement, l'analyse du signal dans le domaine fréquentiel permettrait d'associer la variation du signal obtenue au paramètres du matériau testé notamment sur les aspects liés à la granulométrie du milieu. L'étude des arrangements et réorganisation des particules au niveau local autour de la pointe pourra être une piste intéressante à explorer afin d'expliquer la variation de la force de pointe.

Par ailleurs, la réponse mécanique macroscopique pendant l'essai de pénétration dynamique se déroule en générale trois phases. Lors des premières millisecondes suivant l'impact, il y a une augmentation en charge rapide correspondant à l'augmentation initiale de la vitesse de la tige. Puis, l'effort sur la tige reste positif pendant l'enfoncement de la tige jusqu'à sa pénétration maximale. Enfin, dans une troisième phase, la tige se stabilise autour d'une position finale d'équilibre. L'étude du comportement du milieu granulaire pendant l'essai n'a été analysée que pour chaque millimètre ou chaque milliseconde dans notre travail. Ainsi, la variation du comportement du milieu granulaire lors des trois phases évoquées ci-dessus devrait être analysée dans pas de temps plus petits.

Afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu lors de l'essai ainsi que de détecter les paramètres dominants influençant la réponse mécanique macroscopique, les outils d'analyse devrait encore être développés aux différentes échelles. Une étude de l'évolution du réseau de contact complexe non orienté, non pondérée (ou pondérée) et des particules au niveau mésoscopique permettrait d'expliquer la variation de la capacité portante de l'assemblage granulaire lors de l'essai.

Annexe

Annexe 1. Simulations réalisées pour différentes conditions limites	167
Annexe 2. Force de pointe statique moyenne déterminée entre 5 et 30 cm de profondeur pour différentes conditions aux limites et pour différentes vitesses d'enfoncement.	168
Annexe 3. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.25 kg et une vitesse d'impact de 1900 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	169
Annexe 4. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.50 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	169
Annexe 5. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 1.00 kg et une vitesse d'impact de 925 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	170
Annexe 6. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiques effectués pour 3 échantillons et pour différents modes d'injection de l'énergie.....	170
Annexe 7. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 100 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	171
Annexe 8. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	171
Annexe 9. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 500 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	172
Annexe 10. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	172
Annexe 11. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 2500 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	173
Annexe 12. Forces de pointe obtenues sur 3 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 5000 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002	173
Annexe 13. Force de pointe dynamique moyenne en fonction de la vitesse d'impact pour 3 échantillons et pour le modèle 6002.....	174
Annexe 14. Simulations réalisées pour différents coefficients de frottement.....	175
Annexe 15. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 5\%$	176
Annexe 16. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 25\%$	176
Annexe 17. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 50\%$	177
Annexe 18. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 75\%$	177
Annexe 19. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 100\%$	178
Annexe 20. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour différents coefficients de frottement.....	178
Annexe 21. Simulations réalisées pour différents états de compacité	179

Annexe 22. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.844$	180
Annexe 23. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.842$	180
Annexe 24. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.838$	181
Annexe 25. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.823$	181
Annexe 26. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.816$	182
Annexe 27. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse de l’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour différents états de compacité	182
Annexe 28. Liste des simulations réalisées pour l’étude de l’effet de la granulométrie.....	183
Annexe 29. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo1 – N _p =2 500	184
Annexe 30. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo2 – N _p =10 000	184
Annexe 31. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo3 – N _p =40 000	185
Annexe 32. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo4.....	185
Annexe 33. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo5.....	186
Annexe 34. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo6.....	186
Annexe 35. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo7.....	187
Annexe 36. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d’impactant de 0.5 kg et une vitesse d’impact de 1250 mm.s ⁻¹ pour 3 échantillons et pour les différentes granulométries.....	188

Annexe 1. Essai de pénétration en condition statique: influence de la vitesse

Simulation ^o	Condition limites				Caractéristique du matériau					
	L [cm]	H [cm]	$\frac{k_N^p}{k_N^w}$ [-]	Confinement	D_{max} [mm]	$\frac{D_{max}}{D_{min}}$ [-]	Méthode de génération de la particule	Compacité ϕ [-]	N_P [-]	μ [-]
3001	30	45	1	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	5 000	1.00
3002	30	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	5 000	1.00
6001	60	45	1	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	1.00
6002	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	1.00
60225	60	225	100	Sans	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	50 000	1.00

Annexe 1. Simulations réalisées pour différentes conditions limites

Simulation	V_{Tige} [mm.s ⁻¹]	F_{cm} [N]	ΔF_{cm} [-]	Simulation	V_{Tige} [mm.s ⁻¹]	F_{cm} [N]	ΔF_{cm} [-]
3001	20	31.55	2.99	3002	20	33.67	3.23
	50	33.10	3.07		50	33.08	3.29
	250	32.48	2.76		250	34.24	3.85
	500	34.02	4.54		500	35.67	3.75
	1250	37.69	11.01		1250	38.10	7.98
	2500	43.18	10.32		2500	44.83	8.75
	5000	53.93	13.16		5000	53.34	14.60
6001	20	42.70	2.51	6002	25	42.07	3.08
	50	41.46	3.99		100	41.11	3.74
	250	39.17	2.84		250	40.85	3.52
	500	40.15	5.14		500	41.55	3.39
	1250	44.52	6.93		1250	45.76	3.82
	2500	49.93	11.10		2500	51.02	11.43
	5000	56.05	19.43		5000	58.33	14.09

Annexe 2. Force de pointe statique moyenne déterminée entre 5 et 30 cm de profondeur pour différentes conditions aux limites et pour différentes vitesses d'enfoncement.

Annexe 2. Essai de pénétration dynamique : influence du mode d'injection de l'énergie

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.439	0.008	56.654	0.450	0.010	44.934	42.323
	0.437	0.008	56.791	0.449	0.010	43.887	40.964
	0.453	0.010	46.075	0.460	0.011	41.154	39.349
	0.416	0.003	152.644	0.438	0.007	61.023	61.490
	0.440	0.008	52.305	0.451	0.011	42.442	34.531
S ₂	0.452	0.010	43.486	0.465	0.013	35.492	34.426
	0.450	0.009	47.790	0.455	0.010	43.385	39.701
	0.443	0.009	51.388	0.457	0.012	39.595	36.649
	0.442	0.008	56.330	0.452	0.010	46.480	49.021
	0.433	0.006	71.219	0.444	0.008	52.616	52.465
S ₃	0.455	0.011	41.134	0.464	0.013	36.252	36.361
	0.436	0.008	57.984	0.445	0.009	47.788	44.706
	0.439	0.008	56.363	0.452	0.010	43.137	44.750
	0.424	0.004	95.664	0.439	0.007	59.096	61.744
	0.435	0.007	62.824	0.450	0.010	44.891	50.596

Annexe 3. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.25 kg et une vitesse d'impact de 1900 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.432	0.007	62.581	0.444	0.009	46.941	48.001
	0.421	0.005	90.224	0.443	0.009	48.678	54.149
	0.432	0.007	62.148	0.439	0.008	52.673	52.740
	0.438	0.008	53.437	0.444	0.010	46.682	39.930
	0.434	0.007	58.011	0.446	0.010	45.540	47.360
S ₂	0.450	0.011	42.074	0.463	0.013	34.865	33.144
	0.443	0.009	48.225	0.452	0.011	40.881	39.303
	0.417	0.004	104.785	0.437	0.008	54.491	51.051
	0.456	0.012	38.253	0.467	0.014	32.970	30.572
	0.444	0.009	47.111	0.445	0.010	46.597	16.772
S ₃	0.439	0.008	52.115	0.451	0.011	41.339	41.393
	0.431	0.007	64.244	0.451	0.011	41.741	44.529
	0.410	0.003	161.994	0.438	0.008	53.452	53.042
	0.443	0.009	47.811	0.458	0.012	37.320	37.340
	0.441	0.009	50.121	0.457	0.012	38.089	36.434

Annexe 4. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.50 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E _{res} [J]	En _{fres} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	En _{fmax} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.430	0.007	65.118	0.444	0.009	46.955	48.990
	0.430	0.007	61.690	0.442	0.009	47.358	43.131
	0.449	0.010	44.925	0.458	0.012	38.660	36.018
	0.396	0.000	-104894.371	0.434	0.008	55.113	66.470
	0.438	0.009	49.778	0.445	0.010	43.436	45.318
S ₂	0.447	0.010	45.010	0.459	0.012	37.057	33.097
	0.440	0.009	49.462	0.450	0.011	40.679	33.343
	0.440	0.009	49.703	0.443	0.009	47.322	37.654
	0.433	0.008	55.927	0.452	0.012	38.917	41.548
	0.415	0.003	128.774	0.438	0.008	55.242	60.224
S ₃	0.452	0.011	40.501	0.458	0.013	36.543	36.180
	0.419	0.004	100.343	0.441	0.009	51.748	55.214
	0.451	0.011	41.708	0.462	0.013	35.154	33.053
	0.436	0.007	61.879	0.449	0.010	46.656	48.159
	0.419	0.004	94.633	0.430	0.007	64.559	60.112

Annexe 5. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 1.00 kg et une vitesse d'impact de 925 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Simulation	Echantillon	F _{dres} [N]	ΔF _{dres} [N]	F _{dmax} [N]	ΔF _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]	ΔF _{dpalier} [N]
m _I /m _{Tige} = 0.5	S ₁	72.894	44.795	46.688	8.140	43.731	10.355
	S ₂	54.043	10.698	43.514	6.545	42.452	7.891
	S ₃	62.794	20.088	46.233	8.350	47.631	9.379
	3S	63.243	28.015	45.478	7.294	44.605	8.874
m _I /m _{Tige} = 1.0	S ₁	65.280	14.426	48.103	2.791	48.436	5.587
	S ₂	56.089	27.515	41.961	8.816	34.168	12.530
	S ₃	75.257	48.901	42.388	6.483	42.547	6.706
	3S	65.542	32.010	44.151	6.696	41.717	10.166
m _I /m _{Tige} = 2.0	S ₁	-20934.572	46934.955	46.304	6.037	47.985	11.364
	S ₂	65.775	35.431	43.843	7.456	41.173	11.203
	S ₃	67.813	28.461	46.932	12.048	46.544	11.740
	3S	-6933.661	27100.026	45.693	8.347	45.234	11.015

Annexe 6. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiques effectués pour 3 échantillons et pour différents modes d'injection de l'énergie.

Annexe 3. Essai de pénétration dynamique : influence de la vitesse d'impactant

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.0025	-0.0001	-18.5471	0.0048	0.0003	14.0388	17.7412
	0.0035	0.0001	51.2147	0.0052	0.0004	12.1223	14.2780
	0.0031	0.0000	-293.6902	0.0049	0.0004	13.7304	16.5472
	0.0032	0.0000	315.7987	0.0049	0.0004	13.5326	16.2998
	0.0030	0.0000	-91.2009	0.0049	0.0004	13.3066	15.9055
S ₂	0.0017	-0.0003	-5.8723	0.0055	0.0005	11.4215	11.6951
	0.0037	0.0001	31.7767	0.0051	0.0004	12.5971	13.8521
	0.0028	-0.0001	-37.2809	0.0052	0.0004	12.4088	13.9115
	0.0033	0.0000	143.1837	0.0050	0.0004	13.0841	15.3121
	0.0034	0.0001	59.4362	0.0049	0.0004	13.7341	16.1877
S ₃	0.0033	0.0000	116.8618	0.0049	0.0004	13.5639	15.7417
	0.0030	0.0000	-83.4749	0.0048	0.0003	14.1255	16.1248
	0.0025	-0.0001	-18.6253	0.0046	0.0003	15.0935	18.0409
	0.0031	0.0000	-2451.0374	0.0047	0.0003	14.3115	16.4128
	0.0030	0.0000	-69.3902	0.0047	0.0003	14.7683	18.0455

Annexe 7. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 100 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.0167	-0.0001	-180.6948	0.0234	0.0013	18.2753	20.4806
	0.0164	-0.0002	-99.0951	0.0234	0.0013	18.3042	23.1334
	0.0161	-0.0002	-74.4794	0.0240	0.0014	17.0934	21.5488
	0.0169	0.0000	-371.5408	0.0226	0.0011	20.2168	23.7406
	0.0153	-0.0004	-38.6081	0.0221	0.0010	21.9265	25.2507
S ₂	0.0155	-0.0003	-47.7163	0.0228	0.0012	19.5791	22.4895
	0.0184	0.0003	68.5456	0.0227	0.0012	19.7083	21.6459
	0.0189	0.0003	54.1522	0.0227	0.0011	19.9038	24.0082
	0.0176	0.0001	193.3719	0.0219	0.0010	22.4445	25.6283
	0.0174	0.0000	369.6093	0.0219	0.0010	22.2706	25.4800
S ₃	0.0167	-0.0001	-154.6462	0.0226	0.0011	20.2503	24.5506
	0.0165	-0.0001	-121.4345	0.0213	0.0009	24.8033	28.0042
	0.0157	-0.0003	-52.3482	0.0214	0.0009	24.2210	28.9366
	0.0168	-0.0001	-196.8645	0.0217	0.0009	23.3811	27.7094
	0.0173	0.0000	647.1618	0.0218	0.0009	22.9774	27.0787

Annexe 8. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.0754	0.0020	37.2831	0.0857	0.0041	20.7126	23.7870
	0.0685	0.0006	114.0642	0.0789	0.0027	28.8193	34.7203
	0.0678	0.0005	149.3342	0.0763	0.0022	34.3916	39.4182
	0.0646	-0.0002	-307.2845	0.0761	0.0022	35.1023	42.3599
	0.0679	0.0005	147.5898	0.0772	0.0024	32.4193	40.5466
S ₂	0.0633	-0.0005	-128.8791	0.0769	0.0023	32.9995	41.6038
	0.0726	0.0014	51.2638	0.0779	0.0025	30.7580	37.5582
	0.0717	0.0013	57.2115	0.0779	0.0025	30.7884	36.7796
	0.0632	-0.0005	-125.4348	0.0759	0.0021	35.6203	42.3099
	0.0691	0.0007	96.7301	0.0782	0.0026	30.0900	36.8319
S ₃	0.0631	-0.0005	-135.8423	0.0754	0.0020	36.7814	37.0428
	0.0679	0.0005	135.3562	0.0770	0.0024	32.3402	35.2625
	0.0661	0.0001	552.0251	0.0759	0.0021	35.3965	39.6546
	0.0654	-0.0001	-1134.9277	0.0757	0.0021	36.2122	42.2558
	0.0661	0.0001	774.7965	0.0755	0.0020	36.9925	44.4490

Annexe 9. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 500 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.432	0.007	62.581	0.444	0.009	46.941	48.001
	0.421	0.005	90.224	0.443	0.009	48.678	54.149
	0.432	0.007	62.148	0.439	0.008	52.673	52.740
	0.438	0.008	53.437	0.444	0.010	46.682	39.930
	0.434	0.007	58.011	0.446	0.010	45.540	47.360
S ₂	0.450	0.011	42.074	0.463	0.013	34.865	33.144
	0.443	0.009	48.225	0.452	0.011	40.881	39.303
	0.417	0.004	104.785	0.437	0.008	54.491	51.051
	0.456	0.012	38.253	0.467	0.014	32.970	30.572
	0.444	0.009	47.111	0.445	0.010	46.597	16.772
S ₃	0.439	0.008	52.115	0.451	0.011	41.339	41.393
	0.431	0.007	64.244	0.451	0.011	41.741	44.529
	0.410	0.003	161.994	0.438	0.008	53.452	53.042
	0.443	0.009	47.811	0.458	0.012	37.320	37.340
	0.441	0.009	50.121	0.457	0.012	38.089	36.434

Annexe 10. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]	E ₁₂₅₀ [J]	Enf ₁₂₅₀ [m]	F _{d1250} [N]
S ₁	1.752	0.036	48.608	1.757	0.037	47.418	36.754	1.295	0.022	57.663
	1.746	0.035	50.312	1.752	0.036	48.915	37.961	1.287	0.021	62.065
	1.747	0.035	50.227	1.750	0.035	49.393	43.683	1.288	0.021	61.768
	1.721	0.030	58.273	1.750	0.035	49.338	44.388	1.292	0.022	59.479
	1.765	0.038	45.880	1.769	0.039	44.940	42.708	1.322	0.028	47.431
S ₂	1.772	0.040	44.335	1.786	0.043	41.720	40.161	1.334	0.030	43.817
	1.715	0.028	60.459	1.729	0.031	55.243	45.449	1.279	0.019	66.743
	1.757	0.037	47.366	1.759	0.037	46.977	29.005	1.298	0.023	55.887
	1.738	0.033	52.647	1.755	0.036	48.104	42.663	1.295	0.022	57.623
	1.757	0.037	47.609	1.763	0.038	46.214	33.057	1.277	0.019	68.071
S ₃	1.746	0.035	50.379	1.759	0.037	47.112	43.430	1.304	0.024	53.780
	1.733	0.032	54.462	1.749	0.035	49.700	48.550	1.292	0.022	59.636
	1.715	0.028	60.920	1.743	0.034	51.402	46.366	1.282	0.020	65.113
	1.737	0.033	53.139	1.751	0.036	49.153	43.773	1.272	0.018	71.766
	1.743	0.034	51.012	1.758	0.037	47.322	45.792	1.308	0.025	51.878

Annexe 11. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 2500 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]	E ₁₂₅₀ [J]	Enf ₁₂₅₀ [m]	F _{d1250} [N]
S ₁	6.918	0.131	52.937	6.938	0.135	51.485	50.493	6.514	0.128	50.907
S ₂	6.923	0.132	52.604	6.950	0.137	50.694	48.482	6.500	0.125	52.025
S ₃	6.911	0.129	53.395	6.923	0.132	52.506	46.446	6.481	0.121	53.484

Annexe 12. Forces de pointe obtenues sur 3 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 5000 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour le modèle 6002

V_i [mm.s ⁻¹]	Echantillon	F_{dres} [N]	ΔF_{dres} [N]	F_{dmax} [N]	ΔF_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]	$\Delta F_{dpalier}$ [N]	F_{d1250} [N]	ΔF_{d1250} [N]
100	S ₁	-7.285	221.925	13.346	0.735	16.154	1.253		
	S ₂	38.249	69.198	12.649	0.856	14.192	1.708		
	S ₃	-501.133	1092.897	14.373	0.591	16.873	1.094		
	3S	-156.723	648.552	13.456	1.000	15.740	1.732		
250	S ₁	-152.884	132.932	19.163	1.908	22.831	1.867		
	S ₂	127.593	160.088	20.781	1.445	23.850	1.772		
	S ₃	24.374	352.138	23.127	1.758	27.256	1.654		
	3S	-0.306	249.347	21.024	2.314	24.646	2.551		
500	S ₁	28.197	192.959	30.289	5.882	36.166	7.474		
	S ₂	-9.822	108.535	32.051	2.278	39.017	2.713		
	S ₃	38.282	745.411	35.545	1.895	39.733	3.736		
	3S	18.886	416.193	32.628	4.184	38.305	4.959		
1250	S ₁	65.280	14.426	48.103	2.791	48.436	5.587		
	S ₂	56.089	27.515	41.961	8.816	34.168	12.530		
	S ₃	75.257	48.901	42.388	6.483	42.547	6.706		
	3S	65.542	32.010	44.151	6.696	41.717	10.166		
2500	S ₁	50.660	4.619	48.001	1.889	41.099	3.493	57.681	6.004
	S ₂	50.483	6.324	47.652	4.887	38.067	6.842	58.428	9.782
	S ₃	53.982	4.209	48.938	1.778	45.582	2.084	60.435	8.192
	3S	51.708	5.036	48.197	3.010	41.583	5.321	58.848	7.633
5000	S ₁	52.937		51.485		50.493		50.907	
	S ₂	52.604		50.694		48.482		52.025	
	S ₃	53.395		52.506		46.446		53.484	
	3S	52.978	0.397	51.562	0.909	48.474	2.024	52.139	1.292

Annexe 13. Force de pointe dynamique moyenne en fonction de la vitesse d'impact pour 3 échantillons et pour le modèle 6002.

Annexe 4. Essai de pénétration dynamique : influence du frottement

Simulation	Condition limites				Caractéristique du matériau					
	L [cm]	H [cm]	$\frac{k_N^p}{k_N^w}$ [-]	Confinement	D_{max} [mm]	$\frac{D_{max}}{D_{min}}$ [-]	Méthode de génération de la particule	Compacité ϕ [-]	N_P [-]	μ [-]
$\mu = 5 \%$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	0.05
$\mu = 25 \%$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	0.25
$\mu = 50 \%$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	0.50
$\mu = 75 \%$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	0.75
$\mu = 100 \%$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	1.00

Annexe 14. Simulations réalisées pour différents coefficients de frottement

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.589	0.039	15.110	0.591	0.039	14.974	12.969
	0.597	0.041	14.691	0.598	0.041	14.611	13.975
	0.600	0.041	14.546	0.610	0.043	14.060	14.398
	0.591	0.039	15.009	0.593	0.040	14.885	14.130
	0.603	0.042	14.393	0.603	0.042	14.381	12.666
S ₂	0.609	0.043	14.125	0.611	0.043	14.056	12.267
	0.594	0.040	14.820	0.595	0.040	14.781	12.685
	0.608	0.043	14.167	0.610	0.043	14.082	12.664
	0.548	0.031	17.813	0.560	0.033	16.932	16.010
	0.568	0.035	16.354	0.574	0.036	15.938	15.450
S ₃	0.587	0.039	15.187	0.588	0.039	15.114	13.934
	0.553	0.032	17.399	0.557	0.032	17.152	15.687
	0.571	0.035	16.132	0.575	0.036	15.901	14.613
	0.587	0.039	15.174	0.590	0.039	15.029	14.143
	0.561	0.033	16.806	0.564	0.034	16.635	15.633

Annexe 15. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 5\%$

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.470	0.015	31.912	0.476	0.016	29.641	29.446
	0.446	0.010	44.981	0.462	0.013	35.053	33.326
	0.462	0.013	35.424	0.469	0.015	32.086	27.680
	0.469	0.015	32.290	0.475	0.016	30.059	24.892
	0.448	0.010	43.588	0.459	0.013	36.538	32.147
S ₂	0.466	0.014	33.530	0.471	0.015	31.550	29.686
	0.457	0.012	37.809	0.470	0.015	32.004	31.239
	0.465	0.014	34.094	0.472	0.015	31.037	30.302
	0.458	0.012	37.393	0.466	0.014	33.417	28.746
	0.461	0.013	35.831	0.467	0.014	32.891	28.161
S ₃	0.462	0.013	35.205	0.469	0.015	32.261	28.503
	0.456	0.012	38.583	0.474	0.016	30.511	32.142
	0.462	0.013	35.105	0.471	0.015	31.597	31.637
	0.457	0.012	37.590	0.466	0.014	33.250	30.535
	0.452	0.011	40.586	0.460	0.013	36.289	29.381

Annexe 16. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 25\%$

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.440	0.009	51.000	0.450	0.011	42.490	42.512
	0.443	0.009	48.460	0.444	0.009	47.421	40.899
	0.449	0.010	42.806	0.461	0.013	35.589	30.586
	0.442	0.009	49.470	0.450	0.011	42.584	35.438
	0.450	0.011	42.282	0.459	0.012	36.928	35.931
S ₂	0.435	0.008	57.781	0.453	0.011	40.421	47.337
	0.436	0.008	56.517	0.440	0.009	51.008	46.223
	0.452	0.011	40.455	0.464	0.014	34.146	31.253
	0.448	0.010	43.766	0.457	0.012	38.098	37.074
	0.424	0.005	80.259	0.447	0.010	45.293	51.483
S ₃	0.428	0.006	69.480	0.438	0.008	53.187	51.681
	0.449	0.010	42.779	0.459	0.013	36.342	35.917
	0.444	0.010	46.628	0.451	0.011	41.582	40.125
	0.442	0.009	48.910	0.453	0.011	39.588	39.341
	0.432	0.007	61.895	0.446	0.010	45.492	46.254

Annexe 17. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 50\%$

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.443	0.009	47.885	0.462	0.013	35.583	40.990
	0.436	0.008	56.197	0.448	0.010	43.770	41.748
	0.434	0.007	59.529	0.443	0.009	48.106	42.624
	0.425	0.005	78.407	0.437	0.008	54.612	57.610
	0.449	0.010	42.921	0.460	0.013	36.132	34.333
S ₂	0.440	0.009	51.443	0.451	0.011	41.632	39.072
	0.450	0.011	42.200	0.456	0.012	38.615	32.892
	0.414	0.003	119.886	0.435	0.008	56.007	42.637
	0.436	0.008	55.489	0.451	0.011	41.636	41.256
	0.442	0.009	49.228	0.454	0.011	40.048	40.328
S ₃	0.448	0.010	43.830	0.457	0.012	38.258	42.179
	0.435	0.007	58.147	0.444	0.009	46.983	45.957
	0.433	0.007	59.207	0.443	0.009	47.868	42.141
	0.432	0.007	61.794	0.440	0.009	51.621	44.797
	0.455	0.012	38.821	0.461	0.013	35.761	34.425

Annexe 18. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 75\%$

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.432	0.007	62.581	0.444	0.009	46.941	48.001
	0.421	0.005	90.224	0.443	0.009	48.678	54.149
	0.432	0.007	62.148	0.439	0.008	52.673	52.740
	0.438	0.008	53.437	0.444	0.010	46.682	39.930
	0.434	0.007	58.011	0.446	0.010	45.540	47.360
S ₂	0.450	0.011	42.074	0.463	0.013	34.865	33.144
	0.443	0.009	48.225	0.452	0.011	40.881	39.303
	0.417	0.004	104.785	0.437	0.008	54.491	51.051
	0.456	0.012	38.253	0.467	0.014	32.970	30.572
	0.444	0.009	47.111	0.445	0.010	46.597	16.772
S ₃	0.439	0.008	52.115	0.451	0.011	41.339	41.393
	0.431	0.007	64.244	0.451	0.011	41.741	44.529
	0.410	0.003	161.994	0.438	0.008	53.452	53.042
	0.443	0.009	47.811	0.458	0.012	37.320	37.340
	0.441	0.009	50.121	0.457	0.012	38.089	36.434

Annexe 19. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un frottement $\mu = 100\%$

Simulation	Echantillon	F_{dres} [N]	ΔF_{dres} [N]	F_{dmax} [N]	ΔF_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]	$\Delta F_{dpalier}$ [N]
$\mu = 5\%$.	S ₁	14.750	0.304	14.582	0.374	13.648	0.744
	S ₂	15.456	1.597	15.158	1.252	13.833	1.774
	S ₃	16.140	0.984	15.966	0.930	14.826	0.829
	3S	15.448	1.173	15.235	1.040	14.102	1.241
$\mu = 25\%$.	S ₁	37.639	6.237	32.675	3.040	29.606	3.499
	S ₂	35.731	1.911	32.180	0.971	29.729	1.178
	S ₃	37.414	2.328	32.782	2.200	30.461	1.494
	3S	36.928	3.806	32.546	2.090	29.932	2.164
$\mu = 50\%$.	S ₁	46.804	3.996	41.003	4.791	37.271	4.802
	S ₂	55.755	15.676	41.793	6.542	42.773	8.313
	S ₃	53.938	11.271	43.238	6.474	42.727	6.243
	3S	52.166	11.272	42.011	5.629	40.924	6.679
$\mu = 75\%$.	S ₁	56.988	13.662	43.640	8.087	43.496	8.527
	S ₂	63.649	31.805	43.588	7.055	39.340	3.821
	S ₃	52.360	10.313	44.098	6.759	41.978	4.510
	3S	57.666	19.893	43.775	6.784	41.604	5.824
$\mu = 100\%$.	S ₁	65.280	14.426	48.103	2.791	48.436	5.587
	S ₂	56.089	27.515	41.961	8.816	34.168	12.530
	S ₃	75.257	48.901	42.388	6.483	42.547	6.706
	3S	65.542	32.010	44.151	6.696	41.717	10.166

Annexe 20. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour différents coefficients de frottement.

Annexe 5. Essai de pénétration dynamique : influence de la compacité

Simulation°	Condition limites				Caractéristique du matériau					
	L [cm]	H [cm]	$\frac{k_N^p}{k_N^w}$ [-]	Confinement	D_{max} [mm]	$\frac{D_{max}}{D_{min}}$ [-]	Méthode de génération de la particule	Compacité ϕ [-]	N_P [-]	μ [-]
$\phi = 0.844$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	1.00
$\phi = 0.842$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.842	10 000	1.00
$\phi = 0.839$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.839	10 000	1.00
$\phi = 0.823$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.823	10 000	1.00
$\phi = 0.817$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.817	10 000	1.00

Annexe 21. Simulations réalisées pour différents états de compacité

Annexe – Tableau de calcul

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.432	0.007	62.581	0.444	0.009	46.941	48.001
	0.421	0.005	90.224	0.443	0.009	48.678	54.149
	0.432	0.007	62.148	0.439	0.008	52.673	52.740
	0.438	0.008	53.437	0.444	0.010	46.682	39.930
	0.434	0.007	58.011	0.446	0.010	45.540	47.360
S ₂	0.450	0.011	42.074	0.463	0.013	34.865	33.144
	0.443	0.009	48.225	0.452	0.011	40.881	39.303
	0.417	0.004	104.785	0.437	0.008	54.491	51.051
	0.456	0.012	38.253	0.467	0.014	32.970	30.572
	0.444	0.009	47.111	0.445	0.010	46.597	16.772
S ₃	0.439	0.008	52.115	0.451	0.011	41.339	41.393
	0.431	0.007	64.244	0.451	0.011	41.741	44.529
	0.410	0.003	161.994	0.438	0.008	53.452	53.042
	0.443	0.009	47.811	0.458	0.012	37.320	37.340
	0.441	0.009	50.121	0.457	0.012	38.089	36.434

Annexe 22. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.844$

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.430	0.007	64.996	0.448	0.010	43.641	44.288
	0.450	0.011	42.559	0.464	0.013	34.576	30.974
	0.434	0.007	59.893	0.445	0.010	46.688	48.111
	0.414	0.003	129.480	0.435	0.008	57.881	63.884
	0.431	0.007	63.833	0.449	0.010	42.977	50.971
S ₂	0.436	0.008	55.804	0.442	0.009	48.771	31.827
	0.444	0.009	46.894	0.454	0.012	39.406	39.665
	0.437	0.008	55.069	0.445	0.010	46.166	42.377
	0.437	0.008	54.952	0.441	0.009	49.912	40.496
	0.409	0.002	180.984	0.434	0.007	59.788	61.426
S ₃	0.448	0.010	43.501	0.462	0.013	35.134	37.177
	0.436	0.008	56.682	0.451	0.011	41.952	46.643
	0.440	0.009	50.714	0.444	0.009	46.891	38.325
	0.441	0.009	49.684	0.448	0.010	43.683	36.097
	0.426	0.006	75.987	0.437	0.008	55.831	56.148

Annexe 23. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.842$

Annexe – Tableau de calcul

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.442	0.009	48.697	0.454	0.011	39.756	37.055
	0.439	0.008	52.237	0.448	0.010	43.448	31.424
	0.451	0.011	41.426	0.452	0.011	40.988	37.004
	0.438	0.008	52.658	0.445	0.010	45.758	41.610
	0.437	0.008	55.539	0.445	0.010	46.540	45.552
S ₂	0.441	0.009	49.655	0.449	0.010	43.294	39.957
	0.449	0.010	43.313	0.457	0.012	37.978	37.664
	0.439	0.008	51.975	0.444	0.009	47.175	30.171
	0.437	0.008	54.673	0.441	0.009	50.473	44.375
	0.441	0.009	49.221	0.444	0.009	46.765	40.929
S ₃	0.439	0.008	52.803	0.445	0.010	46.287	42.996
	0.441	0.009	49.829	0.445	0.010	46.101	30.321
	0.431	0.007	65.100	0.442	0.009	49.805	48.034
	0.437	0.008	54.679	0.449	0.010	43.245	44.709
	0.448	0.010	43.243	0.461	0.013	35.603	31.364

Annexe 24. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.838$

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.459	0.013	36.493	0.464	0.014	34.054	30.323
	0.462	0.013	35.294	0.467	0.014	33.113	27.560
	0.462	0.013	35.234	0.468	0.014	32.417	26.552
	0.449	0.010	43.213	0.458	0.012	37.462	31.701
	0.448	0.010	43.154	0.461	0.013	35.588	30.317
S ₂	0.467	0.014	32.952	0.473	0.015	30.644	27.759
	0.466	0.014	33.547	0.475	0.016	30.113	28.471
	0.460	0.013	36.115	0.469	0.015	32.160	29.917
	0.443	0.009	47.998	0.456	0.012	38.657	37.001
	0.461	0.013	35.704	0.472	0.015	31.083	29.014
S ₃	0.462	0.013	35.198	0.471	0.015	31.486	29.394
	0.461	0.013	35.588	0.468	0.014	32.548	28.048
	0.450	0.011	42.592	0.460	0.013	36.075	34.813
	0.448	0.010	43.281	0.461	0.013	35.578	29.814
	0.441	0.009	50.310	0.450	0.011	42.370	38.659

Annexe 25. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.823$

Annexe – Tableau de calcul

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.466	0.014	33.700	0.478	0.016	29.153	28.175
	0.475	0.016	29.884	0.480	0.017	28.539	24.445
	0.459	0.012	36.926	0.474	0.015	30.576	28.842
	0.450	0.011	42.375	0.464	0.014	34.264	32.383
	0.464	0.014	34.317	0.471	0.015	31.449	29.094
S ₂	0.454	0.011	39.823	0.468	0.014	32.536	32.876
	0.443	0.009	47.693	0.459	0.013	36.447	35.626
	0.438	0.008	53.651	0.449	0.010	42.899	34.696
	0.452	0.011	40.612	0.475	0.016	30.123	32.025
	0.437	0.008	54.232	0.450	0.011	42.015	45.360
S ₃	0.492	0.019	25.640	0.497	0.020	24.451	23.829
	0.470	0.015	31.813	0.475	0.016	30.107	26.887
	0.463	0.013	34.935	0.472	0.015	31.088	29.278
	0.462	0.013	35.067	0.470	0.015	31.910	27.286
	0.456	0.012	38.070	0.464	0.013	34.508	31.791

Annexe 26. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour un état de compacité $\phi = 0.816$

Simulation	Echantillon	F_{dres} [N]	ΔF_{dres} [N]	F_{dmax} [N]	ΔF_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]	$\Delta F_{dpalier}$ [N]
$\phi = 0.844$	S ₁	65.280	14.426	48.103	2.791	48.436	5.587
	S ₂	56.089	27.515	41.961	8.816	34.168	12.530
	S ₃	75.257	48.901	42.388	6.483	42.547	6.706
	3S	65.542	32.010	44.151	6.696	41.717	10.166
$\phi = 0.842$	S ₁	72.152	33.290	45.153	8.415	47.688	11.866
	S ₂	78.740	57.272	48.808	7.368	43.257	10.949
	S ₃	55.313	12.467	44.698	7.563	42.953	8.452
	3S	68.735	37.450	46.220	7.464	44.633	9.995
$\phi = 0.839$	S ₁	50.111	5.429	43.298	2.936	38.827	5.166
	S ₂	49.768	4.210	45.137	4.741	38.814	5.376
	S ₃	53.131	7.976	44.208	5.343	39.632	8.165
	3S	51.003	5.840	44.214	4.201	39.091	5.923
$\phi = 0.823$	S ₁	38.677	4.144	34.527	2.026	29.348	2.188
	S ₂	37.263	6.152	32.532	3.506	30.502	3.857
	S ₃	41.394	6.257	35.611	4.252	32.279	4.549
	3S	39.111	5.482	34.223	3.405	30.710	3.618
$\phi = 0.817$	S ₁	35.440	4.622	30.796	2.253	28.572	2.834
	S ₂	47.202	6.876	36.804	5.641	36.184	5.472
	S ₃	33.105	4.724	30.413	3.712	27.857	2.979
	3S	38.582	8.171	32.671	4.864	30.871	5.348

Annexe 27. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse de l'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour différents états de compacité.

Annexe 6. Essai de pénétration dynamique : influence de la granulométrie

Simulation	Condition limites				Caractéristique du matériau					
	L [cm]	H [cm]	$\frac{k_N^p}{k_N^w}$ [-]	Confinement	D_{max} [mm]	$\frac{D_{max}}{D_{min}}$ [-]	Méthode de génération de la particule	Compacité ϕ [-]	N_P [-]	μ [-]
Granulo1 - $N_P=25\ 000$	60	45	100	Avec	14.04	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.843	2 500	1.00
Granulo2 - $N_P=10\ 000$	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.844	10 000	1.00
Granulo3 - $N_P=10\ 000$	60	45	100	Avec	3.51	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1) \times (D_{max} - D_{min})$	0.843	40 000	1.00
Granulo4	60	45	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1)^2 \times (D_{max} - D_{min})$	0.843	14 700	1.00
Granulo5	60	225	100	Avec	7.02	2	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1)^3 \times (D_{max} - D_{min})$	0.842	18 252	1.00
Granulo6	60	45	100	Avec	7.02	5	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1)^2 \times (D_{max} - D_{min})$	0.856	30 000	1.00
Granulo7	60	45	100	Avec	7.02	10	$D_i = D_{min} + \text{Rand}(0,1)^3 \times (D_{max} - D_{min})$	0.869	97 831	1.00

Annexe 28. Liste des simulations réalisées pour l'étude de l'effet de la granulométrie

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.410	0.002	184.914	0.432	0.007	64.583	70.411
	0.387	-0.003	-143.325	0.431	0.007	66.001	76.816
	0.428	0.006	72.190	0.439	0.008	53.956	55.863
	0.434	0.007	59.533	0.442	0.009	48.891	45.956
	0.426	0.006	74.917	0.436	0.008	56.551	52.149
S ₂	0.436	0.007	60.548	0.460	0.012	37.336	49.998
	0.406	0.001	287.781	0.436	0.008	56.960	60.663
	0.417	0.004	115.171	0.434	0.007	60.093	70.700
	0.390	-0.002	-204.703	0.429	0.006	68.390	76.115
	0.404	0.001	535.454	0.434	0.007	60.891	72.178
S ₃	0.492	0.019	25.803	0.496	0.020	24.986	31.705
	0.422	0.005	88.735	0.438	0.008	53.653	52.786
	0.417	0.004	113.435	0.441	0.009	50.977	56.934
	0.426	0.006	76.340	0.439	0.008	52.576	55.623
	0.426	0.006	75.425	0.436	0.008	55.929	56.339

Annexe 29. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo1 – N_P=2 500

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.432	0.007	62.581	0.444	0.009	46.941	48.001
	0.421	0.005	90.224	0.443	0.009	48.678	54.149
	0.432	0.007	62.148	0.439	0.008	52.673	52.740
	0.438	0.008	53.437	0.444	0.010	46.682	39.930
	0.434	0.007	58.011	0.446	0.010	45.540	47.360
S ₂	0.450	0.011	42.074	0.463	0.013	34.865	33.144
	0.443	0.009	48.225	0.452	0.011	40.881	39.303
	0.417	0.004	104.785	0.437	0.008	54.491	51.051
	0.456	0.012	38.253	0.467	0.014	32.970	30.572
	0.444	0.009	47.111	0.445	0.010	46.597	16.772
S ₃	0.439	0.008	52.115	0.451	0.011	41.339	41.393
	0.431	0.007	64.244	0.451	0.011	41.741	44.529
	0.410	0.003	161.994	0.438	0.008	53.452	53.042
	0.443	0.009	47.811	0.458	0.012	37.320	37.340
	0.441	0.009	50.121	0.457	0.012	38.089	36.434

Annexe 30. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiqués effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo2 – N_P=10 000

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.451	0.011	41.766	0.457	0.012	37.694	35.094
	0.434	0.007	58.397	0.446	0.010	45.276	38.672
	0.446	0.010	45.225	0.453	0.011	40.146	36.538
	0.446	0.010	45.611	0.457	0.012	37.530	35.672
	0.444	0.009	47.024	0.451	0.011	41.662	38.901
S ₂	0.446	0.010	45.000	0.459	0.012	36.844	37.107
	0.444	0.009	46.921	0.453	0.011	39.990	35.919
	0.445	0.010	46.650	0.453	0.011	40.223	37.187
	0.447	0.010	44.422	0.455	0.012	38.711	34.501
	0.443	0.009	47.702	0.452	0.011	40.559	38.785
S ₃	0.442	0.009	48.770	0.453	0.011	40.199	38.153
	0.446	0.010	45.266	0.453	0.011	40.147	36.338
	0.441	0.009	49.976	0.451	0.011	41.034	35.738
	0.451	0.011	41.221	0.458	0.012	37.143	35.408
	0.444	0.010	46.701	0.453	0.011	39.866	36.276

Annexe 31. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo3 – N_P=40 000

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.460	0.013	36.061	0.467	0.014	32.749	32.761
	0.440	0.009	51.151	0.447	0.010	43.992	36.288
	0.438	0.008	52.423	0.448	0.010	43.358	43.059
	0.446	0.010	45.357	0.451	0.011	41.091	36.751
	0.437	0.008	54.272	0.444	0.009	46.827	42.663
S ₂	0.447	0.010	44.287	0.454	0.011	39.652	44.208
	0.442	0.009	49.021	0.446	0.010	45.065	31.795
	0.427	0.006	70.459	0.444	0.009	47.106	54.507
	0.430	0.007	64.745	0.442	0.009	49.262	44.827
	0.437	0.008	54.006	0.449	0.011	42.516	38.434
S ₃	0.458	0.012	37.025	0.463	0.013	34.656	35.085
	0.444	0.009	47.229	0.455	0.012	38.710	36.413
	0.441	0.009	49.402	0.450	0.011	42.364	39.963
	0.448	0.010	43.226	0.454	0.012	39.220	35.589
	0.399	0.000	2213.356	0.429	0.006	66.426	75.537

Annexe 32. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo4

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.445	0.010	45.989	0.459	0.013	36.415	37.639
	0.449	0.011	42.583	0.457	0.012	37.942	34.882
	0.435	0.008	56.997	0.439	0.008	51.742	43.540
	0.430	0.007	65.569	0.438	0.008	53.513	45.728
	0.447	0.010	44.365	0.452	0.011	40.843	37.588
S ₂	0.437	0.008	53.999	0.459	0.012	36.770	38.275
	0.446	0.010	45.468	0.452	0.011	40.503	37.434
	0.444	0.009	47.092	0.451	0.011	41.429	40.424
	0.439	0.008	51.898	0.448	0.010	43.805	40.885
	0.439	0.008	52.575	0.446	0.010	45.288	34.719
S ₃	0.456	0.012	38.159	0.465	0.014	34.006	35.520
	0.436	0.008	55.604	0.447	0.010	44.596	39.407
	0.446	0.010	45.355	0.448	0.010	43.813	26.479
	0.433	0.007	59.297	0.447	0.010	44.091	43.470
	0.444	0.009	46.803	0.458	0.012	37.091	35.895

Annexe 33. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo5

Echantillon	E _{res} [J]	Enf _{res} [m]	F _{dres} [N]	E _{max} [J]	Enf _{max} [m]	F _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]
S ₁	0.450	0.011	42.112	0.462	0.013	35.205	36.912
	0.442	0.009	48.327	0.450	0.011	42.352	42.487
	0.438	0.008	52.820	0.449	0.010	42.879	38.313
	0.440	0.009	50.379	0.444	0.009	46.846	35.484
	0.438	0.008	53.525	0.443	0.009	47.261	42.685
S ₂	0.453	0.011	40.174	0.456	0.012	38.157	35.984
	0.443	0.009	47.403	0.456	0.012	38.261	35.063
	0.448	0.010	43.283	0.452	0.011	40.812	32.622
	0.435	0.008	56.680	0.444	0.009	46.776	41.975
	0.436	0.008	55.009	0.449	0.010	43.092	42.763
S ₃	0.448	0.010	43.492	0.454	0.012	39.175	33.483
	0.438	0.008	53.408	0.450	0.011	42.281	39.494
	0.439	0.008	52.457	0.444	0.009	47.073	41.706
	0.436	0.008	54.833	0.446	0.010	44.722	40.984
	0.445	0.010	45.791	0.450	0.011	42.359	36.783

Annexe 34. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo6

Echantillon	E_{res} [J]	Enf_{res} [m]	F_{dres} [N]	E_{max} [J]	Enf_{max} [m]	F_{dmax} [N]	$F_{dpalier}$ [N]
S ₁	0.451	0.011	41.599	0.457	0.012	37.769	37.289
	0.439	0.009	51.385	0.448	0.010	43.526	41.423
	0.442	0.009	48.477	0.452	0.011	40.847	39.030
	0.443	0.009	47.489	0.451	0.011	41.246	36.268
	0.442	0.009	48.653	0.453	0.011	39.593	38.779
S ₂	0.448	0.010	43.152	0.459	0.012	36.730	37.622
	0.440	0.009	50.186	0.449	0.011	42.730	39.531
	0.444	0.009	46.944	0.452	0.011	40.531	36.895
	0.441	0.009	50.178	0.451	0.011	41.590	37.028
	0.441	0.009	49.588	0.451	0.011	41.575	35.839
S ₃	0.453	0.011	40.099	0.464	0.014	34.034	37.153
	0.446	0.010	44.870	0.455	0.012	39.054	36.922
	0.440	0.009	50.527	0.447	0.010	44.447	37.642
	0.439	0.008	51.992	0.449	0.011	42.655	40.512
	0.440	0.009	50.335	0.445	0.010	45.680	38.163

Annexe 35. Forces de pointe obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour la granulométrie Granulo7

Simulation	Echantillon	F _{dres} [N]	ΔF _{dres} [N]	F _{dmax} [N]	ΔF _{dmax} [N]	F _{dpalier} [N]	ΔF _{dpalier} [N]
Granulo1	S ₁	49.646	119.143	57.997	7.225	60.248	12.872
	S ₂	158.850	274.862	56.734	11.627	65.902	10.626
	S ₃	75.948	31.952	47.624	12.783	50.682	10.713
	3S	94.815	168.086	54.118	11.095	58.944	12.437
Granulo2	S ₁	65.280	14.426	48.103	2.791	48.436	5.587
	S ₂	56.089	27.515	41.961	8.816	34.168	12.530
	S ₃	75.257	48.901	42.388	6.483	42.547	6.706
	3S	65.542	32.010	44.151	6.696	41.717	10.166
Granulo3	S ₁	47.605	6.335	40.462	3.200	37.011	1.769
	S ₂	46.139	1.375	39.266	1.524	36.857	1.616
	S ₃	46.387	3.413	39.678	1.482	36.522	1.054
	3S	46.710	3.972	39.802	2.117	36.797	1.415
Granulo4	S ₁	47.853	7.387	41.603	5.356	38.408	4.523
	S ₂	56.504	10.887	44.720	3.775	42.839	8.395
	S ₃	478.048	970.078	44.275	12.682	44.630	17.395
	3S	194.135	558.674	43.533	7.762	41.959	10.943
Granulo5	S ₁	51.100	9.851	44.091	7.978	39.992	4.669
	S ₂	50.206	3.708	41.559	3.279	38.435	2.516
	S ₃	49.044	8.445	40.719	4.853	39.154	3.530
	3S	50.117	7.266	42.123	5.494	39.194	3.469
Granulo6	S ₁	49.433	4.581	42.909	4.850	39.297	3.351
	S ₂	48.510	7.194	41.420	3.622	37.817	4.387
	S ₃	49.996	5.027	43.122	2.960	38.566	3.329
	3S	49.313	5.329	42.483	3.686	38.560	3.502
Granulo7	S ₁	47.521	3.612	40.596	2.125	38.558	1.958
	S ₂	48.010	3.027	40.631	2.315	37.383	1.362
	S ₃	47.565	4.976	41.174	4.709	38.078	1.442
	3S	47.698	3.671	40.800	3.039	38.006	1.571

Annexe 36. Forces de pointe moyennes obtenues sur 15 essais dynamiques effectués avec une masse d'impactant de 0.5 kg et une vitesse d'impact de 1250 mm.s⁻¹ pour 3 échantillons et pour les différentes granulométries.

Bibliographie

- Agnolin, I., & Roux, J. N. (2007). Internal states of model isotropic granular packings. I. Assembling process, geometry, and contact networks. *Physical Review E*, 76(6), 061302.
- Ali, H. (2010). Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piézocône. Application au calcul des fondations profondes. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Armero, F., & Love, E. (2003). An arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element method for finite strain plasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(4), 471-508.
- Arroyo, M., Butlanska, J., Gens, A., Calvetti, F., & Jamiolkowski, M. (2010). Cone penetration tests in a virtual calibration chamber. *Géotechnique*, 61(6), 525-531.
- Azéma, E. (2007). Étude numérique des matériaux granulaires à grains polyédriques: rhéologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au procédé de bourrage du ballast. PhD, Université Montpellier, 2.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M., & Lo Presti, D. C. (1991). Modulus of sands from CPTs and DMTs. In *Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro (Vol. 1, p. 170)*.
- Baligh, M. M. (1976). Cavity expansion in sands with curved envelopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(11), 1131-1146.
- Bemben, S. M., & Myers, H. J. (1974). The influence of rate of penetration on static cone resistance in Connecticut River Valley varved clay. In *Proc., European Symp. on Penetration Testing (Vol. 2, No. 2, pp. 33-43)*. Stockholm: National Swedish Council for Building Research.
- Benz-Navarrete, M. A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre PANDA 2. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Benz, M. A., Escobar, E., Gourvès, R., Haddani, Y., Breul, P., & Bacconnet, C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique—Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013*.
- Bishop, R. F., Hill, R., & Mott, N. F. (1945). The theory of indentation and hardness tests. *Proceedings of the Physical Society*, 57(3), 147.
- Breul, P., Benz, M., Gourvès, R., & Saussine, G. (2009, June). Penetration Test Modelling in a Coarse Granular Medium. In *Powders and Grains 2009: Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media (Vol. 1145, No. 1, pp. 173-176)*. AIP Publishing.
- Butlanska, J., Arroyo, M., Gens, A., & O'Sullivan, C. (2013). Multi-scale analysis of cone penetration test (CPT) in a virtual calibration chamber. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(1), 51-66.
- Calvetti, F., & Nova, R. (1993). Micro-macro relationships from DEM simulated element and in-situ tests. In *Powders and Grains, 5th. International Conference on Micromechanics of Granular Media, Stuttgart (Vol. 1, pp. 245-249)*.
- Cassan, M. (1988). Essai in-situ en mécanique des sols. Tome 1 Réalisation et Interprétation, EYROLLES, 1988.
- Chaigneau, L. (2001). Caractérisation des milieux granulaires de surface à l'aide d'un pénétromètre. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont - Ferrand.
- Chaigneau, L., Bacconnet, C., & Gourvès, R. (2000, November). Penetration Test Coupled With Geotechnical Classification For Compaction Control. In *ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics*.
- Combe, G. (2002). Mécanique des matériaux granulaires et origines microscopiques de la déformation. *Etudes et Recherches Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées. Série Sciences de L'ingénieur. Laboratoire central des ponts et chaussées*.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.

- Da Cruz, F. (2004). Frottement et blocage des écoulements de grains secs. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Danziger, F.A.B, & Lunne, T. (1997). Rate effect in cone penetration testing.
- Dayal, U., & Allen, J. H. (1975). The effect of penetration rate on the strength of remolded clay and sand samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 12(3), 336–348.
- Durgunoglu, H. T., & Mitchell, J. K. (1975). Static penetration resistance of soils: I-analysis. In *In Situ Measurement of Soil Properties* (pp. 151–171). ASCE.
- EN ISO 22476-1. (2007). *Geotechnical Investigation and Testing-Field Testing*—part, 1.
- Escobar, E., Benz, M., Gourvès, R., & Breul, P. (2013). Dynamic cone penetration tests in granular media: Determination of the tip's dynamic load-penetration curve (pp. 389–392).
- Frazer, B. (1971). Formulas de hinca dinámica, *Revista de obras publicas de España*, Diciembre.
- Gourves, R. (1991). Le Panda: Pénétrömètre dynamique léger à energie variable pour la reconnaissance des sols. Université Blaise Pascal.
- Gourves, R., Zhou, S. (1997). The in situ characterization of the mechanical properties of granular media with the help of penetrometer. In *3rd International conférence on Micromécanique of granular média* (pp. 57-60).
- Gourvès, R. et Richard, B. (1995). Le pénétromètre dynamique léger PANDA. *Proceeding of ECSMFE, Copenhagen, Denmark, 1995*, pp 83-88.
- Huang, A.-B., Ma, M. Y. (1994). An analytical study of cone penetration tests in granular material. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(1), 91–103.
- Huang, W., Sheng, D., Sloan, S. W., & Yu, H. S. (2004). Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 31(7), 517–528.
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., & Manassero, M. (2003). Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. In *Soil behavior and soft ground construction* (pp. 201–238). ASCE.
- Jean, M. (1999). The non smooth contact dynamics method. *Computer Methods in Applied Mechanic and Engineering*, 177 :235–257.
- Jiang, M., Dai, Y., Cui, L., Shen, Z., & Wang, X. (2014). Investigating mechanism of inclined CPT in granular ground using DEM. *Granular Matter*.
- Jiang, M. J., Harris, D., & Zhu, H. (2007). Future continuum models for granular materials in penetration analyses. *Granular Matter*, 9(1), 97–108.
- Jiang, M. J., Yu, H. S., & Harris, D. (2006). Discrete element modelling of deep penetration in granular soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(4), 335–361.
- Juran, I., & Turnay, M. T. (1989). Soil stratification using the dual-pore-pressure piezocone test. *Transportation Research Record*, (1235).
- Kinloch, C. O. and H. (2007). A Micro-Mechanical Study of the Influence of Penetrometer Geometry on Failure Mechanisms in Granular Soils. In *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior* (pp. 1–11).
- Liyanaathirana, D. S. (2009). Arbitrary Lagrangian Eulerian based finite element analysis of cone penetration in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 851–860.
- Llanca-Vargas, D. (2014). Caractérisation de tunnels anciens en maçonnerie par des techniques d'auscultation non conventionnelles. Application au réseau RATP. Clermont-Ferrand 2.
- Lu, Q., Randolph, M. F., Hu, Y., & Bugarski, I. C. (2004). A numerical study of cone penetration in clay. *Geotechnique*, 54(4), 257–267.
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). Cone penetration testing. *Geotechnical Practice*.
- Mcdowell, G. R., Falagush, O., & Yu, H.-S. (2012). A particle refinement method for simulating DEM of cone penetration testing in granular materials. *Géotechnique Letters*, 2(July-September), 141–147.
- Minasny, B. (2012). Contrasting soil penetration resistance values acquired from dynamic and motor-operated penetrometers. *Geoderma*, 177–178(0), 57–62.

- Muromachi, T. (1981). Cone penetration testing in Japan. In *Cone Penetration Testing and Experience* (pp. 49–75). ASCE.
- NF P 94-114. (1990). *Géotechnique-Sols: Reconnaissance et essais - Essai de pénétration type A*, Décembre.
- NF P 94-115. (1990). *Géotechnique-Sols: Reconnaissance et essais - Essai de pénétration type B*, Décembre.
- Nguyen, V. P. (n.d.). *Material point method: basics and applications*.
- Ogawa, S. (1978). *Multitemperature theory of granular materials*.
- Peters, J. F., Muthuswamy, M., Wibowo, J., & Tordesillas, A. (2005). Characterization of force chains in granular material. *Physical Review E*, 72(4), 41307.
- Quezada, J. C. (2012). *Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité*. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2.
- Quezada, J. C., Breul, P., Saussine, G., & Radjai, F. (2014). Penetration test in coarse granular material using Contact Dynamics Method. *Computers and Geotechnics*, 55, 248–253.
- Quezada, J. C., Saussine, G., Breul, P., & Radjai, F. (2013). Penetration strength of coarse granular materials from DEM simulations (pp. 241–244).
- Renzi, R. (1999). *Centrifuge cone penetration tests in sand*.
- Robertson, P., & Campanella, R. . (1983). Interpretation of cone penetration tests. Part T : Sand, CGJ, Ottawa, Vol.20, n°4, Novembre.
- Rocha Filho, P. (1982). Influence of excess pore pressure on cone measurements. In *Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam (pp. 805–811).
- Roux, J.-N., & Chevoir, F. (2005). Simulation numérique discrète et comportement mécanique des matériaux granulaires. *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, (254), 109–138.
- Salgado, R. (2013). The mechanics of cone penetration: Contributions from experimental and theoretical studies. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, 131–153.
- Salgado, R., Mitchell, J. K., & Jamiolkowski, M. (1997). Cavity expansion and penetration resistance in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 344–354.
- Salgado, R., & Prezzi, M. (2007). Computation of cavity expansion pressure and penetration resistance in sands. *International Journal of Geomechanics*, 7(4), 251–265.
- Salgado, R., & Randolph, M. F. (2001). Analysis of cavity expansion in sand. *International Journal of Geomechanics*, 1(2), 175–192.
- Sasaki, Y., Koga, Y., Itoh, Y., Shimazu, T., & Kondo, M. (1985). In-situ test assessing liquefaction potential using vibratory cone penetrometer (p. 18).
- Shäfer, J., Dippel, S., & Wolf, D. E. (1996). Force schemes in simulations of granular materials. *Journal de Physique I*, 6(1), 5–20.
- Sun, Y., Cheng, Q., Lin, J., Lammers, P. S., Berg, A., Meng, F., ... Li, L. (2011). Energy-based comparison between a dynamic cone penetrometer and a motor-operated static cone penetrometer. *Soil and Tillage Research*, 115–116(0), 105–109.
- Susila, E., & Hryciw, R. D. (2003). Large displacement FEM modelling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(7), 585–602.
- Tcheng, Y. (1962). Fondations profondes en milieu pulvérulent à diverses compacités. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Série : Sols et Fondations*, pp.332-360.
- Te Kamp, W. G. B. (1982). The influence of the rate of penetration on the cone resistance “qc” in sand. In *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, the Netherlands* (pp. 24–27).
- Tokimatsu, K. (1990). Penetration tests for dynamic problems: Proc 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 20–24 March 1988 V1, P117–136. Rotterdam: AA Balkema, 1988. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 27, p. A90). Pergamon.

- Tolooiyan, A., & Gavin, K. (2011). Modelling the Cone Penetration Test in sand using Cavity Expansion and Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Methods. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 482–490.
- Tordesillas, A., Steer, C. A. H., & Walker, D. M. (2014). Force chain and contact cycle evolution in a dense granular material under shallow penetration. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21(2), 505–519.
- Torstensson, B.-A. (1975). Pore pressure sounding instrument. In *Proceedings* (Vol. 2, pp. 48–54).
- Vesic, A. S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm3).
- Voivret, C. (2008). *Texture et comportement des matériaux granulaires à grande polydispersité*. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Yu, H. S., & Mitchell, J. K. (1998). Analysis of cone resistance: review of methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), 140–149.
- Zhou, J., Jian, Q., Zhang, J., & Guo, J. (2012). Coupled 3D discrete-continuum numerical modeling of pile penetration in sand. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(1), 44–55.

