

École polytechnique de Louvain

Simulations pour calculer l'enfoncement de pieux dans le sol océanique

Auteurs: **Leïla SCHNEIDESCH, Marie-Ombeline WILMET**

Promoteurs: **Jonathan LAMBRECHTS, Vincent LEGAT**

Lecteurs: **Nathan COPPIN, Paul FISETTE**

Année académique 2021–2022

Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Résumé

Ce mémoire présente un modèle permettant de simuler l'enfoncement d'un pieu dans un sol océanique. Ce modèle est réalisé à l'aide de méthodes numériques combinant le calcul de la dynamique du fluide (méthode des éléments finis) et le calcul des réactions inter-particulaires (méthode des éléments discrets). Lors de la modélisation du sol, chaque grain représente un paquet de sable. De plus, dans cette étude, le pieu est fixe et les grains montent de manière à simuler la pénétration.

La résolution des forces de contact par les méthodes numériques a permis d'obtenir la force exercée par le sol sur le pieu. Par la suite, différents paramètres (tels que la vitesse de pénétration ou le frottement) ont été analysés afin de déterminer lesquels influençaient majoritairement la résistance à la pointe du pieu (c'est-à-dire la force verticale s'exerçant sur la partie oblique du pieu). Dans un même temps, le mouvement des grains composant le sol a été observé ainsi que le réseau des forces de contact entre particules mettant en avant la variation du comportement du sol en fonction des paramètres. Le modèle présente des résultats similaires à ceux trouvés dans la littérature.

Remerciements

Tout d’abord, nous souhaitons remercier nos promoteurs, Vincent Legat et Jonathan Lambrechts, pour leurs conseils tout au long de l’année. Également un tout grand merci à Nathan Coppin et Michel Henry pour leur disponibilité et leur aide sans faille.

Un merci particulier à Paul Fisette qui a accepté d’être membre de notre jury.

Merci à Blanche Raucent, Riana Randresihaja et Francis Detaille pour avoir relu ce travail.

Pour finir, nous aimerions remercier nos familles pour leur soutien moral durant ces longues années d’études. Et plus que tout, un grand merci à Guillaume André et Maxime Verachttert pour leurs encouragements et leurs conseils qui n’ont jamais cessé.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Etat de l’art	5
2.1	Modélisation du sol	5
2.2	Modélisation de la dynamique du fluide	7
2.3	Couplage des méthodes des éléments finis et discrets	8
3	Méthodes numériques	11
3.1	GMSH	11
3.1.1	Création de la géométrie	11
3.1.2	Formation du maillage	12
3.1.3	Qualité du maillage	13
3.2	MigFlow	15
3.2.1	Phase fluide	15
3.2.2	Phase grains	16
3.2.3	Méthode d’intégration temporelle	18
4	Modélisation de l’enfoncement d’un pieu	21
4.1	Paramètres initiaux	21
4.2	Maillage	24
4.3	Simulation numérique	25
4.3.1	Injection des grains dans le domaine	25
4.3.2	Calcul du poids des grains retirés	27
5	Résultats du cas de base	31
5.1	Forces s’appliquant sur le pieu	31
5.2	Résistance de la pointe	35
5.3	Réseau de forces de contact	38
5.4	Déformation du sol	40
5.5	Vitesse par à-coups	41
6	Analyses paramétriques	43
6.1	Présence de fluide ou non	44
6.1.1	Résistance de la pointe	44

6.1.2	Réseau des forces de contact	45
6.1.3	Mélange des particules	46
6.2	Vitesse de pénétration	47
6.3	Polydispersité des rayons de grains	49
6.3.1	Résistance de la pointe	49
6.3.2	Mélange des particules	51
6.4	Frottement entre les grains	53
6.4.1	Résistance de la pointe	53
6.4.2	Réseau des forces de contact	54
6.4.3	Mélange des particules	54
6.5	Frottement sur le pieu	55
6.5.1	Résistance de la pointe	55
6.5.2	Réseau des forces de contact	56
6.5.3	Mélange des particules	57
6.6	Densité des particules	58
7	Conclusion	61

Chapitre 1

Introduction

Le potentiel éolien est un véritable atout pour notre société de plus en plus dépendante de l'électricité. La technologie des parcs éoliens en pleine mer permet d'obtenir de l'énergie renouvelable, remplaçant petit à petit les énergies fossiles.

Au sein de l'Europe, et plus particulièrement de la Belgique, le pacte vert présenté en 2019 a poussé le gouvernement à prendre des mesures afin d'augmenter la capacité de production d'énergie renouvelable. Le but que s'est fixé notre pays est d'arriver à produire 50% de nos besoins énergétiques à partir d'énergies renouvelables sachant que la proportion est actuellement de 20%. Pour atteindre cet objectif, le pays va devoir favoriser l'installation de nouveaux champs éoliens en mer présentant de nouvelles technologies et de meilleurs rendements. Actuellement, les parcs éoliens de la mer du Nord permettent de produire 10% de l'électricité consommée (2262 [MW]) en Belgique, et malgré l'espace maritime limité, la volonté est d'atteindre 6000 [MW] de capacité d'éoliennes offshore d'ici 2030 [1].

Cependant, c'est au secteur pétrolier que l'on doit la première structure construite en mer. Il s'agit de la plateforme "Superior" installée en 1947 au large de la Louisiane (USA). Il faudra attendre 1991 pour la mise en service du premier parc éolien offshore (situé dans la mer danoise) [2]. En 64 ans, plus de 7000 plateformes ont vu le jour dans les différentes mers et océans du monde. Pendant cette période, l'industrie offshore a fait de grands progrès notamment sur la profondeur atteignable entre la surface de l'eau et celle du sable. Celle-ci allant maintenant jusqu'à 1500 [m] pour les fondations en eaux "ultra-profondes". En regard de ces informations, il y a des éléments à prendre en compte pour les analyses dans le domaine de la géotechnie offshore [3] :

- L'expertise du sol est très coûteuse, elle nécessite des travailleurs qualifiés ainsi que des bateaux spécifiques.
- Les caractéristiques du sol sont différentes suivant l'endroit étudié.
- Les charges appliquées sont importantes.
- La géométrie du pieu doit être bien pensée avant la construction de la plateforme car, une fois en cours, il ne sera plus possible de la modifier.

Ces marqueurs montrent l'importance de la simulation numérique dans ce domaine laborieux à analyser et à prédire. Beaucoup d'études sont donc menées notamment pour améliorer la connaissance des contraintes et des déformations subies par les piliers lorsque ces derniers se retrouvent enfoncés dans le sol sableux.

À l'heure actuelle, il existe différents types de fondation de pieu. Les 3 principaux sont la fondation monopieu, la fondation gravitaire et la fondation en structure métallique. Dans ce mémoire, seule la fondation monopieu sera abordée. Tout d'abord, parce qu'elle représente entre 75 et 80% des fondations. Ensuite, elle est fort utilisée pour les éoliennes ayant une capacité de production d'énergie petite à moyenne et elle revient à un prix de construction plus bas pour celles-ci. Enfin, la surface dont elle a besoin pour être enfoncée est la plus petite des 3 types de fondation de pieu [4].

L'étude des écoulements granulaires peut s'avérer compliquée en raison de la potentielle inhomogénéité due aux grains qui créent des discontinuités dans le régime du fluide. Au fil des ans, plusieurs méthodes ont été mises en place pour modéliser ces grains. Dans cette étude, la méthode des éléments discrets (DEM) va être utilisée. Il s'agit d'une formulation mathématique qui permet de reproduire le comportement à petite échelle des sols et matériaux granulaires, ceci inclut les contacts entre les grains et le déplacement des particules. Bien que cette méthode ait fait ses preuves au cours des années, elle comporte certaines limites comme l'idéalisation de la forme des particules mais également le coût élevé pour une simulation 3D. Pour palier ce dernier défaut, des analyses ont déjà démontré que les simulations en 2D amenaient des résultats qualitatifs avec un coût moins important dû à la diminution du nombre de contacts à prendre en compte [5]. La méthode des éléments discrets permet de résoudre la trajectoire des grains de manière lagrangienne. La vitesse de chaque grain est calculée grâce à la seconde loi de Newton et est dite "vitesse libre", car elle ne tient compte d'aucun contact. Il faut donc corriger la vitesse calculée. Pour ce faire, une méthode appelée dynamique de contact non lisse (NSCD) est utilisée. Il s'agit de repérer toutes les paires de grains pouvant rentrer en contact en définissant une distance alerte (qui sera le rayon des grains), les réactions de contact sont alors calculées de manière itérative pour vérifier les lois de contact (relation liant la force au déplacement des particules) [6].

Ce mémoire a pour but d'implémenter une simulation de pénétration d'un pieu dans un sol immergé avec comme volonté d'approfondir la connaissance de l'influence de certains paramètres (comme la vitesse d'enfoncement, la saturation, le frottement,...) sur la déformation du sol et du pieu.

Au chapitre 2 sera présenté un état de l'art dans lequel vous pourrez lire les avancées de la modélisation du sol à l'aide des éléments discrets, celles de la modélisation de la dynamique du fluide à l'aide des éléments finis ainsi que les avancées dans le couplage des éléments discrets avec les éléments finis. Au chapitre 3, une explication sur les méthodes numériques utilisées pour l'implémentation du modèle sera donnée. Elle

comprend le fonctionnement du logiciel pour faire le maillage, GMSH, ainsi que les principales équations utilisées dans le logiciel MigFlow. Une présentation du domaine et des paramètres du cas de base ainsi que les étapes clés de la simulation numérique se retrouveront au chapitre 4. Les résultats de notre cas de base pourront être vus au chapitre 5 avec une explication sur les forces, la résistance de la pointe, le réseau de force de contact, la déformation du sol ou encore la vitesse par à-coups, tandis qu'une analyse paramétrique sera réalisée au chapitre 6, analyse permettant de déterminer les paramètres les plus influents au niveau de la variation de la résistance à la pointe du pieu.

Chapitre 2

Etat de l'art

Cette étude peut être divisée en deux parties. Pour la première, il s'agit de la modélisation d'un sol granulaire qui se fait avec l'aide de la méthode des éléments discrets (DEM). Pour la seconde, c'est l'analyse de la phase fluide du problème, qui est effectuée par la méthode des éléments finis (FEM). De nombreux travaux ont été réalisés au cours du temps afin d'obtenir les méthodes telles que nous les connaissons aujourd'hui. De plus, ces dernières années les avantages respectifs de ces deux méthodes ont poussé les scientifiques à concevoir puis améliorer le couplage FEM-DEM.

2.1 Modélisation du sol

L'élaboration et le développement des éléments finis ont permis d'obtenir les premiers modèles utilisés pour l'analyse des sols. Par la suite, des chercheurs ont trouvé une méthode plus efficace pour modéliser les matériaux granulaires, il s'agit de la méthode des éléments discrets.

La méthode des éléments finis a vu le jour dans les années 1850 afin d'améliorer l'analyse des structures, celle-ci permettait notamment d'analyser des petites déformations sur différents matériaux. Schellback a eu l'idée en 1851 de discrétiser les problèmes physiques en petits triangles qui seront appelés éléments. Cependant, cette méthode ne se développera fortement qu'un siècle plus tard grâce à l'apparition de l'ordinateur. En 1953, Turner travaille sur la rigidité des ailes d'avions pour la compagnie d'aviation Boeing. Comme les approches précédentes n'ont pas donné de résultat probant, il décide de diviser la structure de l'aile en divers éléments triangulaires. Il fait l'hypothèse que les états de contrainte et le cisaillement sont constants au sein de chaque élément. Il a ensuite additionné les rigidités obtenues pour chaque composante afin d'obtenir celle du système complet. Ce travail a été le premier à mettre en avant la méthode des éléments finis.

En 1960, l'article de Clough a introduit la méthode des éléments finis dans le domaine

de l'ingénierie civile. Il n'a pas amené d'idée fondamentalement nouvelle mais a prouvé l'utilité des éléments finis grâce à son analyse du barrage de Norfolk dans lequel il analysait la propagation d'une fissure due aux changements de température lors de la construction. Au cours de ses recherches, il a utilisé des mailles rectangulaires pour discrétiser des coques cylindriques. Jusqu'alors, les éléments triangulaires étaient utilisés pour toutes les formes [7].

En 1968, Roscoe et Burland ont créé un modèle permettant de prédire numériquement la réponse d'un sol sous l'effet d'une compression tri-axiale. Ce modèle permettait, d'une part, de prendre en compte le cisaillement qui apparaît lorsque l'état de contrainte limite est atteint et, d'autre part, d'inclure le critère de Mohr-Coulomb qui permet de prédire la résistance à la rupture des matériaux fragiles comme des sols sableux [8]. Le graphe qui liait les contraintes effectives et les contraintes déviatoriques était jusqu'alors une courbe logarithmique mais en considérant ces changements, ils se sont rendus compte qu'une courbe elliptique serait plus proche du comportement réel du sol. Cette surface elliptique se prête également mieux à une étude complète de la plasticité et facilite l'utilisation des éléments finis [9].

Jusqu'ici, les programmes d'éléments finis traitaient des problèmes qui ne subissaient que des petites déformations, car peu d'entre eux savaient gérer les non-linéarités. Néanmoins, en 1970, Hibbitt, Marcal et Rice ont développé une théorie pour les structures subissant de grandes déformations grâce à une étude sur le comportement élastoplastique des métaux. Ils ont rajouté aux équations, précédemment développées dans la théorie des éléments finis linéaires, un terme représentant la matrice de rigidité de la charge appliquée [10].

Le problème de la méthode des éléments finis pour la modélisation d'un sol, c'est que ce dernier y est considéré comme un milieu continu. Le souci avec cette hypothèse est que le sol est en réalité un matériau discret composé de particules, de pores et de fractures. Pour contourner ce problème, Cundall a eu l'idée, en 1971, d'une méthode qui approxime les sols et les roches comme des ensembles de particules distinctes de forme polygonale et rigide. Il s'agit du modèle à la base de la méthode des éléments discrets développée par Cundall et Strack en 1979. Cette méthode est un modèle numérique explicite qui simule le déplacement des particules une à une et qui résout les contacts un par un. L'élasticité linéaire y est implémentée comme deux ressorts élastiques qui agissent aussi bien au contact entre deux particules qu'au contact entre les particules et la paroi. Le frottement est représenté par le critère de glissement de Coulomb [11]. L'étude réalisée par Cundall et Strack sur les tracés de vecteurs de force a permis de valider la DEM en montrant des résultats proches de ceux obtenus expérimentalement par les chercheurs de Josselin de Jong et Verruijt en 1969 [12].

Entre 1984 et 1988, plusieurs chercheurs ont effectué des travaux visant à développer les lois constitutives pour les sols en utilisant la DEM. En 1984, Zhang et Cundall ont tra-

vaillé sur des simulations numériques pour reproduire le comportement du sol lorsqu'il subit une déformation lente. Oner a analysé le chargement cyclique d'un matériau granulaire, en particulier la manière dont la structure va être modifiée au cours des cycles [13]. Bathurst et Rothenburg (1988) ont, quant à eux, démontré que le coefficient de poisson (paramètre qui permet de caractériser la déformation perpendiculaire à l'effort appliqué) dépend du rapport entre la rigidité de contact tangentielle et normale pour les assemblages à densité élevée [14].

En 1998, Iwashita et Oda ont modifié la méthode des éléments discrets pour y ajouter la résistance au roulement des particules lors des contacts. Ceci permettait d'obtenir numériquement les bandes de cisaillement et également les vides (plus ou moins importants) qui peuvent se former à l'intérieur de ces bandes lors du mouvement du sol. Suite à leurs recherches, ils ont pu généraliser la loi de conservation du moment angulaire en supposant que les mouvements des particules pouvaient être transmis par les contacts [15].

En 1992, Tsuji va étendre la méthode des éléments discrets en appliquant la théorie du contact hertzien à la force entre les particules [16]. Cela veut dire que la rigidité du contact peut dorénavant varier en fonction du mouvement des particules et donc les effets non-linéaires peuvent être pris en compte au niveau des forces normales et du cisaillement [11]. Pour valider ce modèle, il a effectué une simulation de l'écoulement piston de particules 3D (sphériques) sans cohésion dans un tuyau horizontal et les résultats ainsi obtenus étaient semblables aux observations faites préalablement par plusieurs autres chercheurs [16].

2.2 Modélisation de la dynamique du fluide

L'avantage de la méthode des éléments finis, c'est qu'elle est efficace même pour des géométries complexes et qu'elle aboutit à des résultats de grandes précisions. Cependant, elle est assez difficile à mettre en place pour le calcul des fluides car ces derniers ne sont pas toujours descriptibles par une formulation variationnelle. Dans l'histoire de l'étude numérique des fluides (CFD), il peut être remarqué que les avancées ont été réalisées soit avec la méthode des différences finies soit avec la méthode des volumes finis. Il faudra attendre parfois longtemps pour que ces avancées soient réalisables avec la FEM. Néanmoins, une fois qu'une bonne formulation a été trouvée pour la FEM, c'est, en général, celle-ci qui sera utilisée car ses avantages sont plus intéressants que les autres méthodes citées [17].

Dans les années 1970, de nombreux chercheurs ont travaillé pour résoudre les équations de Navier-Stokes en utilisant la méthode des éléments finis [18]. Dès 1972, Oden et Wellford ont présenté plusieurs modèles de fluides compressibles et incompressibles résolus

à l'aide des éléments finis. Ces simulations numériques prenaient en compte le champ de vitesse, la densité et la température des fluides ainsi que la pression pour les fluides incompressibles. Ces travaux ont démontré que la FEM présente un grand intérêt dans l'étude de la dynamique des fluides, notamment pour les écoulements visqueux [19]. En 1982, Hughe et Brooks ont développé une nouvelle formulation pour les écoulements forcés. Cette nouvelle formulation a ensuite été étendue aux équations de Navier-Stokes pour les fluides incompressibles avec plusieurs conditions initiales. Ils ont validé leur modèle grâce à la simulation de l'éjection de tourbillons depuis un cylindre circulaire [20].

Avec les années, le développement du “machine learning”, c'est-à-dire de la méthode d'apprentissage automatique, permet d'améliorer la méthode des éléments finis [18]. En 1994, Takuchi et Kosugi [21] ont créé un modèle de réseaux neuronaux basé sur la FEM. Ils ont inversé le réseau afin que les données d'entrées inconnues soient mises à jour continuellement dans le but de satisfaire les conditions limites et les équations du mouvement du fluide pour obtenir la solution du problème. Ils ont validé leur travail en appliquant ce réseau à la résolution de l'équation de Poisson.

2.3 Couplage des méthodes des éléments finis et discrets

La distance entre la DEM et la méthode de calcul de dynamique des fluides, CFD, (FEM inclus) est grande et beaucoup de recherches ont été faites pour combiner les deux, le but étant de garder les avantages des deux méthodes numériques [22]. La partie intéressante est le couplage des deux combinant fluide et solide.

En 2000, Cook, Noble, Preece et Williams [23] ont réalisé une simulation de fluides chargés de particules. Pour ce faire, ils combinent les CFD, dans lesquelles ils utilisent la méthode de Boltzman sur réseau (LBM), avec la DEM. Cette méthode utilise un schéma de couplage proposé en 1998 par Noble et Torczynski [24]. Ce schéma modifie l'opération de collision de la LBM pour y inclure un élément qui dépend de la porosité des cellules du réseau, permettant ainsi une résolution pour les particules solides.

Casagrande et al. [25] ont, en 2015, contribué, à leur tour, à l'étude des écoulements de fluides chargés de particules. Leur étude est basée sur une approche lagrangienne-eulérienne. La description lagrangienne est utilisée pour les particules en utilisant la DEM, tandis qu'un maillage eulérien fixe est utilisé pour modéliser le fluide grâce aux FEM. Leur but est d'intégrer le modèle DEM-FEM couplé dans le temps avec un schéma de sous-cyclage pour simuler un courant de fond marin et analyser certains mécanismes (comme celui de la suspension des sédiments) ou encore quantifier la viscosité effective du fond marin. Une simulation est aussi faite, avec un paquet de sel tombant dans une colonne de fluide.

Le modèle est donc vérifié avec des cas tests (notamment celui de la sédimentation). Finalement, pour un écoulement en régime laminaire, il y avait un bon raccord entre les solutions numériques, les données expérimentales et celles obtenues analytiquement. Par contre, pour des écoulements transitoires ou turbulents, les données analytiques n'étaient plus valables. Cependant, les résultats recueillis numériquement correspondaient à ceux de l'expérience. Cela permettait ainsi de valider le modèle pour des nombres de Reynolds plus élevés. Ils ont aussi évalué l'influence de la taille des mailles du maillage de la partie FEM sur le diamètre d'une particule et ont remarqué que les résultats n'étaient plus en accord quand le diamètre se rapprochait de la taille des mailles. Les résultats étaient, quant à eux, meilleurs lorsque la taille d'une maille était environ 10 fois plus grande que le diamètre des particules.

Il est tout autant possible d'avoir un maillage non fixe. Dans ce cas-là, les méthodes sont élaborées par une description arbitraire lagrangienne-eulérienne (ALE). Le fluide est alors résolu en fonction de la déformation de son maillage, lorsqu'il suit le mouvement et la déformation du maillage du solide. Il faut donc remailler, adapter le maillage ou le régulariser. Ce sont des opérations coûteuses, mais nécessaires [26].

Chapitre 3

Méthodes numériques

Les méthodes numériques sont des outils informatiques aidant à la résolution de certains problèmes complexes. Les simulations numériques qui en découlent sont obtenues par divers moyens de discrétisation. Dans le cadre de ce travail, un maillage triangulaire sera appliqué sur la géométrie du problème grâce au logiciel GMSH. Ensuite, à l'aide de ce maillage, MigFlow résoudra les principales équations qui régissent le fluide et celles qui s'appliquent aux grains.

3.1 GMSH

Le logiciel GMSH [27] permet de créer des maillages sur des géométries en deux ou en trois dimensions. Ces maillages pourront ensuite être utilisés dans des solveurs d'éléments finis.

GMSH dessine la géométrie du modèle à l'aide de l'interface conception assistée par ordinateur (CAO) puis réalise le maillage à l'intérieur de cette géométrie en utilisant la triangulation de Delaunay.

3.1.1 Création de la géométrie

Ce module se base sur le fait que toutes les géométries, qu'elles soient en 2D ou en 3D, peuvent être définies par leurs frontières. On y trouvera 4 entités, G_i^d , différentes qui permettront de construire ces frontières :

- Les vortex ou sommets du modèle G_i^0 : il s'agit de points et sont donc de dimension 0.
- Les bords du modèle G_i^1 : ils permettent de relier 2 points préalablement dessinés. Ils sont en une dimension.
- Les surfaces du modèle G_i^2 : elles sont entourées par les bordures et représentent un espace fermé en 2D.
- La région du modèle G_i^3 : elle représente le volume total du problème étudié lorsqu'il est en 3D. Si la problématique nécessite seulement un calcul en 2 dimensions, alors cette entité n'est pas représentée.

Ces 4 entités ne prennent en compte que les entités adjacentes dans le modèle. C'est à dire que chaque entité de dimension d peut être en relation avec les entités de dimension $d-1$ ou $d+1$ mais pas avec celles d'autres dimensions :

$$G_i^0 \iff G_i^1 \iff G_i^2 \iff G_i^3$$

3.1.2 Formation du maillage

La triangulation de Delaunay est une technique pour créer un maillage en formant des triangles dont le cercle circonscrit ne contient aucun autre sommet de ce maillage. Pour obtenir une triangulation de Delaunay, il faut que tous les bords des triangles respectent localement cette règle.

La figure 3.1 permet d'illustrer cela. Deux triangles du maillage y sont montrés ainsi que leur cercle circonscrit respectif (cercle rouge pour le triangle $p_j p_i p_k$ et bleu pour le triangle $p_j p_i p_l$). L'arrête $p_j p_i$ serait considérée comme respectant localement la triangulation de Delaunay si le sommet p_l était hors du cercle rouge (ce qui est similaire à dire que le sommet p_k doit être hors du cercle bleu), or ce n'est pas le cas ici, cette arrête ne respecte donc pas la condition et doit être retirée.

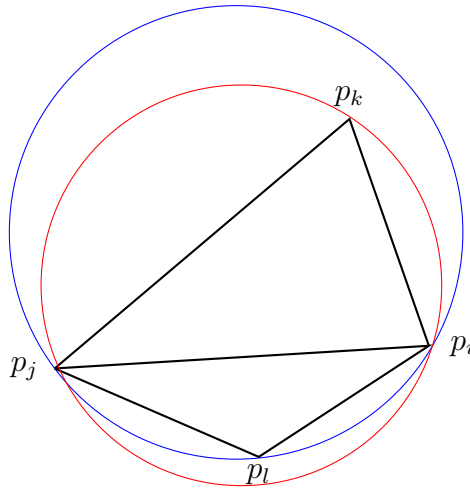


FIGURE 3.1 – Exemple de non respect de la triangulation de Delaunay

Du point de vue de l'algorithme, un certain nombre d'événements (de points) sont insérés au sein de la géométrie puis ceux-ci sont reliés par des arrêtes afin de ne former que des triangles. Ensuite, toutes les arrêtes sont rassemblées dans une pile. La première arrête de la pile ($p_i p_j$) est analysée pour déterminer si elle répond au critère de Delaunay. Si ce n'est pas le cas, elle est supprimée et l'arrête $p_k p_l$ est ajoutée à la pile. Ce processus est visible sur la figure 3.2.

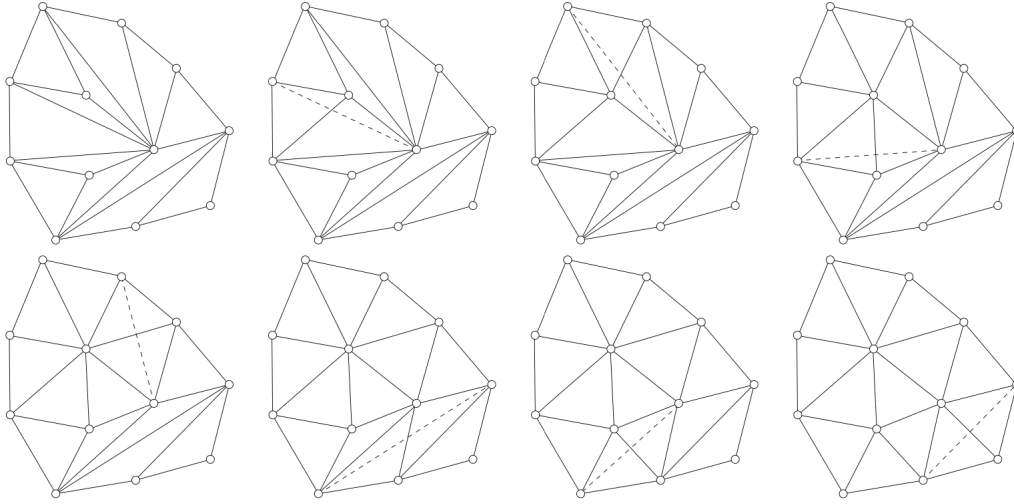


FIGURE 3.2 – Illustration de la formation du maillage grâce à la triangulation de Delaunay [28]

3.1.3 Qualité du maillage

Pour obtenir un maillage conforme, chaque triangle qui le compose peut croiser un autre triangle uniquement le long d'une arrête ou d'un sommet. Le but recherché à la fin de la construction de ce maillage est d'obtenir une taille de maillage qui est totalement adaptée aux dimensions du modèle. Ceci revient à dire que l'index d'efficacité (τ) doit être le plus proche possible de 1. Cet index est défini par la formule :

$$\tau = \exp\left(\frac{1}{ne} \sum_{e=1}^{ne} \tau_e\right) \quad (3.1)$$

Où e est un bord de la maille et τ_e est l'efficacité du bord e considéré.

Il est important que ce maillage soit de bonne qualité afin d'obtenir des résultats précis lors des simulations. Pour tester la qualité des éléments géométriques composant le maillage, plusieurs formules existent. Dans le cas d'un maillage de forme triangulaire, l'équation ci-dessous peut être utilisée :

$$\gamma_K = 4 \frac{\sin(\hat{a}) \sin(\hat{b}) \sin(\hat{c})}{\sin(\hat{a}) + \sin(\hat{b}) + \sin(\hat{c})} \quad (3.2)$$

Il s'agit d'une formule qui compare les rayons des cercles inscrits (r) et circonscrits (R) ; et où $\hat{a}$, $\hat{b}$ et $\hat{c}$ sont les cotés du triangle analysé. Ces paramètres sont illustrés sur la figure 3.3.

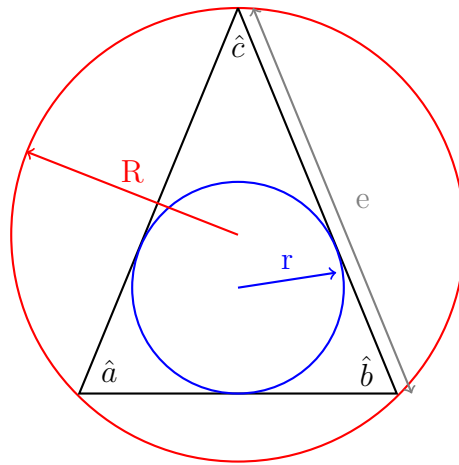


FIGURE 3.3 – Illustration d'une maille du maillage

3.2 MigFlow

MigFlow [6] est un logiciel libre de droit permettant de simuler des grains immergés dans un fluide. Cet outil peut être utilisé dans diverses configurations et différents domaines tels que le domaine médical, la géotechnique ou encore dans les phénomènes environnementaux.

3.2.1 Phase fluide

Les flux physiques calculés par les équations de Navier-Stokes sont moyennés en utilisant une fonction de pondération sur un volume de contrôle local (un triangle du maillage). Elle va permettre de lisser l'influence des grains en chaque point du fluide. La porosité ϕ va être utilisée comme variable de pondération. Cela représente la fraction volumique de fluide à l'intérieur du volume de contrôle local. En supposant une densité ρ du fluide constante et $u = \phi w$ la vitesse moyenne du fluide, les lois de conservation du fluide sont :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \frac{uu}{\phi} \right) = \nabla \cdot [2\mu\phi d(u) - pI] + f + \phi\rho g \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \quad (3.4)$$

où p est la pression, f est la force de densité venant de l'interaction fluide-grains, g est la gravité, I le tenseur d'identité et $d(u)$ est le tenseur de taux de déformation : $d(u) \triangleq \frac{1}{2}(\nabla \frac{u}{\phi} + (\nabla \frac{u}{\phi})^T)$

Quant à la force de densité f venant de l'interaction grains/fluide, elle est liée par la troisième loi du mouvement de Newton à la force d'interaction des grains sur le fluide (f_i) et est calculée ainsi :

$$f = \sum_{i \in \mathcal{G}} (V_i \nabla p|_{x_i} + f_i) \delta|_{x_i} \quad (3.5)$$

où $\mathcal{G}$ représente le set complet de grains et $\delta|_{x_i}$ est la fonction de Dirac centrée sur la position des grains. La particularité de cette formule est qu'elle va permettre le couplage entre les grains et le fluide. Cela sera discuté dans une future section (3.2.3).

p et u sont deux champs inconnus qui dépendent du champ de porosité et sont donc calculés à chaque pas de temps. Pour ce faire, les positions des grains dans le maillage sont utilisées.

En les approximant sur le maillage, il est possible d'obtenir une forme faible à résoudre par la méthode des éléments finis stabilisés P1-P1.

En effet :

$$p(x, t) \approx p^h(x, t) \quad (3.6)$$

$$u(x, t) \approx u^h(x, t) \quad (3.7)$$

Il faut alors trouver (u^h, p^h) grâce à des fonctions tests $(\hat{u}^h, \hat{p}^h)$:

$$(\hat{u}^h(\rho \frac{\partial u^h}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \frac{u^h u^h}{\phi} - f^h - \phi \rho g)) + (\nabla \hat{u}^h \cdot (2\mu \phi d(u^h) - p^h I)) = 0 \quad \forall \hat{u}^h \quad (3.8)$$

où f^h est l'approximation de f , visible à l'équation (3.5), de la même manière que p^h pour p (équation (3.6)) et u^h pour u (équation (3.7)).

$$(\hat{p}^h \frac{\partial \phi}{\partial t}) + (\nabla \hat{p}^h \cdot (-u^h + \epsilon \nabla p^h)) = 0 \quad \forall \hat{p}^h \quad (3.9)$$

Un laplacien de pression est utilisé dans l'équation (3.9) de manière à stabiliser la formulation d'éléments finis P1-P1 pour respecter la condition LBB, condition qui permet d'avoir une unique solution. C'est pourquoi le terme ϵ est introduit, sa valeur est déterminée de manière à coupler les inconnues de pression et à rendre le problème stable. Il faut donc qu'il ne soit ni trop petit, ni trop grand.

3.2.2 Phase grains

La vitesse des grains est d'abord calculée grâce à la seconde loi de mouvement de Newton :

$$\frac{d}{dt}(m_i v_i) = m_i g - V_i \nabla p|_{x_i} - f_i \quad (3.10)$$

où m_i est la masse du grain, V_i son volume, x_i sa position et v_i sa vitesse. L'interaction de la force fluide-grains est représentée par les termes $V_i \nabla p|_{x_i}$ et f_i .

Cette vitesse ne prend en compte aucun contact, c'est ce qu'on appelle la "vitesse libre". Il faut donc la corriger.

Interaction grains-grains

Imaginons un grain i et un grain j (comme représentés à la figure 3.4).

Un solveur de contact est utilisé pour corriger la vitesse des grains à chaque pas de temps en fonction des collisions avec les autres grains et pour éviter l'interpénétration. Ce solveur de contact va d'abord créer une liste contenant tous les contacts potentiels en calculant la distance centre-à-centre entre deux grains d_q et la normale entre ces deux-ci n_q .

$$d_q = \|x_j - x_i\| - (r_j + r_i) \quad (3.11)$$

$$n_q = \frac{x_j - x_i}{\|x_j - x_i\|} \quad (3.12)$$

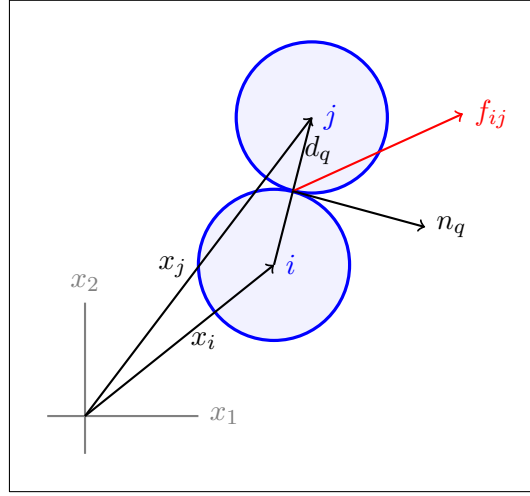


FIGURE 3.4 – Géométrie du point de contact entre 2 grains

Ensuite, si cette liste n'est pas vide, le solveur va vérifier la loi d'interactions pour modifier la vitesse des grains impliqués dans le contact.

Le solveur va d'abord supprimer l'ancienne correction de vitesse venant du contact q :

$$v_i \leftarrow v_i + \frac{m_j}{m_i + m_j} \delta v_q n_q \quad (3.13)$$

$$v_j \leftarrow v_j - \frac{m_i}{m_i + m_j} \delta v_q n_q \quad (3.14)$$

Il va ensuite calculer les contributions du contact q pour vérifier la loi d'interaction (qui sera expliquée plus en détail dans la section 3.2.2 ("Interaction grains-fluide")) pour la vitesse modifiée par tous les autres contacts :

$$\delta v_q \leftarrow \max(0, (v_i - v_j) \cdot n_q - \frac{d_q}{\Delta t}) \quad (3.15)$$

Enfin, il va mettre à jour les vitesses des grains concernés par ce contact :

$$v_i \leftarrow v_i - \frac{m_j}{m_i + m_j} \delta v_q n_q \quad (3.16)$$

$$v_j \leftarrow v_j + \frac{m_i}{m_i + m_j} \delta v_q n_q \quad (3.17)$$

Une fois que le contact est résolu, si la correction de vitesse nécessaire est la même qu'à la résolution précédente du même contact, alors le contact est supprimé de la liste. Dans le cas contraire, on réinjecte dans la liste tous les contacts liés à chacun des deux grains.

Le frottement présent lors du contact entre deux particules est modélisé par la loi de Coulomb [29]. C'est à dire la relation entre la composante normale (f_{ij}^N) et tangentielle (f_{ij}^T) de la force de contact :

$$f_{ij}^T = -\mu f_{ij}^N \quad (3.18)$$

Où μ est le coefficient de friction.

Interaction grains-fluide

L'influence exercée par les grains voisins sur la force d'interaction grains/fluide que subit un grain unique est à prendre en compte pour pouvoir traiter un milieu multigrains. Pour ce faire, il faut multiplier la force d'interaction grains/fluide subie par le grain par une fonction de porosité $g(\phi)$. La force d'interaction grains/fluide peut alors s'écrire :

$$f_i = g(\phi|_{x_i}) C_d \pi r_i^2 \frac{\rho}{2} \left\| v_i - \frac{u}{\phi}|_{x_i} \right\| \left(v_i - \frac{u}{\phi}|_{x_i} \right) \quad (3.19)$$

où r_i est le rayon du grain et C_d son coefficient de trainée :

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_i}} \right)^2 \quad (3.20)$$

avec $Re_i = \frac{2r_i \rho \phi|_{x_i}}{\mu} \left\| v_i - \frac{u}{\phi}|_{x_i} \right\|$

Quant à la fonction de porosité, elle se calcule ainsi :

$$g(\phi|_{x_i}) = \phi^{-\beta} \quad (3.21)$$

où $\beta = 1.8$.

Ce sont Wen & Yu [30] qui ont proposé cette loi de puissance simple, comme fonction multiplicatrice indépendante de la porosité. Elle convient aussi bien aux régimes avec un Reynolds haut et bas.

3.2.3 Méthode d'intégration temporelle

La première étape consiste à obtenir la porosité ϕ^n sur base de la position x^n des grains. Il faut ensuite coupler la phase fluide et la phase solide. Pour ce faire, un schéma implicite d'Euler est utilisé pour calculer la nouvelle vitesse du fluide u^{n+1} , la pression p^{n+1} et les forces d'interaction f_i^{n+1} sur base des anciennes valeurs (u^n , p^n , v_i^n et ϕ^n).

Le schéma d'Euler implicite est défini ainsi :

$$y_{n+1} = y_n + (t_{n+1} - t_n) * f(t_{n+1}, y_{n+1}) \quad (3.22)$$

Cela consiste en la recherche de la solution y_{n+1} au temps t_{n+1} , en connaissant la solution précédente y_n au temps t_n , le tout pour une fonction f donnée. Pour ce faire, il faut résoudre une équation. Elle peut se résoudre de différentes manières, soit par équation différentielle, soit avec une méthode itérative (par exemple celle de Newton-Raphson), soit de manière numérique [31].

Après quoi, la vitesse v_i^{n+1} des grains (tout en prévenant l'interpénétration) est recalculée à partir de v_i^n et f_i^{n+1} grâce à l'algorithme du solveur de contact, expliqué à la

section 3.2.2. Enfin, les positions x_i^{n+1} des grains sont recalculées grâce à leur vitesse v_i^n .

Il est à savoir que l'élément qui va influencer le plus la vitesse des grains est f_i^{n+1} , le terme source de l'interaction entre le fluide et les grains. Il doit être traité de manière à pouvoir en déduire une vitesse des grains au pas de temps suivant. Il est calculé ainsi :

$$f_i^{n+1} = \left(\frac{1}{\gamma_i^n} + \frac{\Delta t}{m_i} \right)^{-1} * \left(v_i^n - \frac{u^{n+1}}{\phi^n} |_{x_i} + \Delta t \left(g - \frac{V_i \nabla p^{n+1}}{m_i} |_{x_i} \right) \right) \quad (3.23)$$

où $\gamma_i = g(\phi|_{x_i}) C_d \pi r_i^2 \frac{\rho}{2} \left\| v_i - \frac{u}{\phi} |_{x_i} \right\|$

Chapitre 4

Modélisation de l'enfoncement d'un pieu

Ce chapitre présente la mise en place d'une solution au problème d'enfoncement de pieu dans un sol granulaire immergé. La simulation numérique développée permettra une visualisation des efforts repris par le pieu et le sol lors de la pénétration.

Les paramètres de la simulation seront exposés, en particulier le domaine utilisé ainsi que les conditions frontières appliquées sur celui-ci. Le maillage utilisé pour ce problème sera montré et expliqué. Par la suite, le modèle numérique sera développé en partant des méthodes numériques expliquées au chapitre 3 puis en rajoutant les éléments spécifiques à ce problème.

4.1 Paramètres initiaux

Le domaine est de forme rectangulaire coupé en son centre par un pieu à bout conique. Au vu de la symétrie du problème, la décision a été prise de ne travailler que sur la moitié gauche du domaine comme illustré par la figure 4.1.

Au temps initial, le domaine est rempli d'eau mais il n'y a pas encore de grains (un grain représente un amas de plusieurs particules de sable). Ceux-ci vont rentrer dans le domaine au cours du temps. Il a en effet été décidé de laisser le pieu statique et de faire monter les grains (sous forme de blocs tassés) dans le domaine pour simuler l'enfoncement du pieu. Ceci sera expliqué plus en profondeur dans la section 4.3 évoquant la simulation numérique.

Les frontières représentées en noir sur la figure 4.1 sont des frontières qui laissent passer le fluide, celui-ci ne réagit donc en aucun cas avec elles. Tandis que le pieu, en rouge sur cette même figure, représente une frontière solide qui va donc avoir un impact dans le comportement du fluide et des grains. Le pieu est considéré comme étant de l'acier, ce qui correspond à un coefficient de friction à sa surface de 0.3 [-].

L'écoulement du fluide au sein du domaine se fera avec une vitesse d'entrée continue (représentée par les flèches bleues dans la figure 4.1). Ensuite, pour que l'écoulement du fluide colle le long de la paroi du pieu, les composantes de vitesse horizontale (u) et verticale (v) imposées sur cette frontière seront nulles. Pour finir, la pression au sommet du domaine est également imposée à 0 afin d'obtenir, au sein de la structure, une pression hydrostatique (force exercée par l'eau sur les parois, elle augmente quand la profondeur s'accroît).

Sur cette même figure (la 4.1), les différents paramètres du modèle sont donnés, ce sont ceux du cas de base présenté au chapitre 5. Ils sont divisés en deux catégories : les paramètres fixes, qui seront identiques dans toutes les simulations réalisées, ainsi que les paramètres variables. Ceux-ci feront l'objet d'un autre chapitre (le chapitre 6).

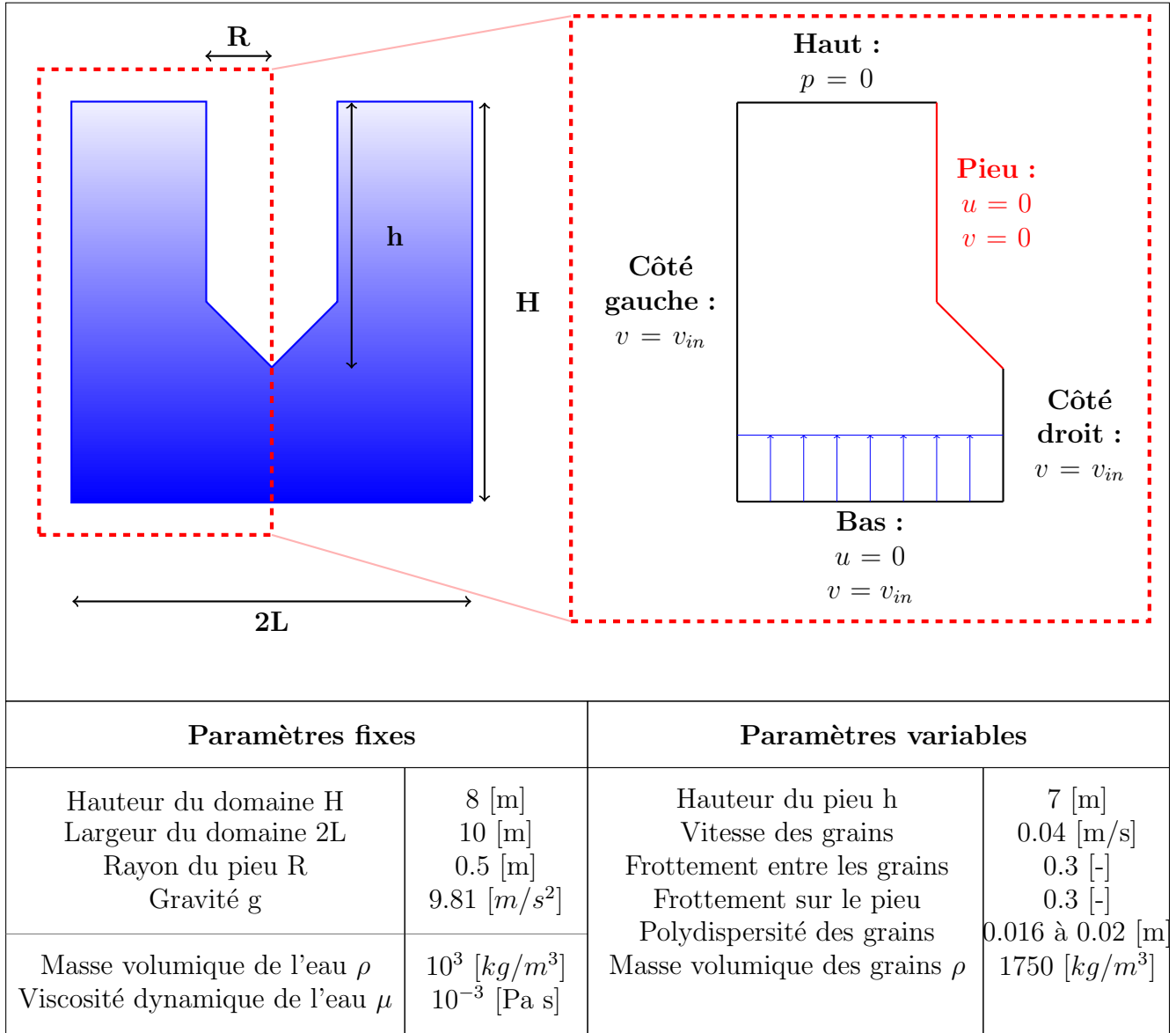


FIGURE 4.1 – Illustration du domaine et des conditions frontières

4.2 Maillage

L'avantage d'avoir modélisé le problème avec un pieu fixe est qu'il est possible de simuler l'enfoncement du pieu en utilisant un maillage statique, c'est à dire qu'il ne devra pas être adapté au cours du temps. Bien que le problème réel implique une géométrie en trois dimensions, le maillage ainsi que les simulations seront générés en deux dimensions car, comme expliqué dans l'introduction, cela permettra d'obtenir des résultats proches de la réalité avec un coût plus faible.

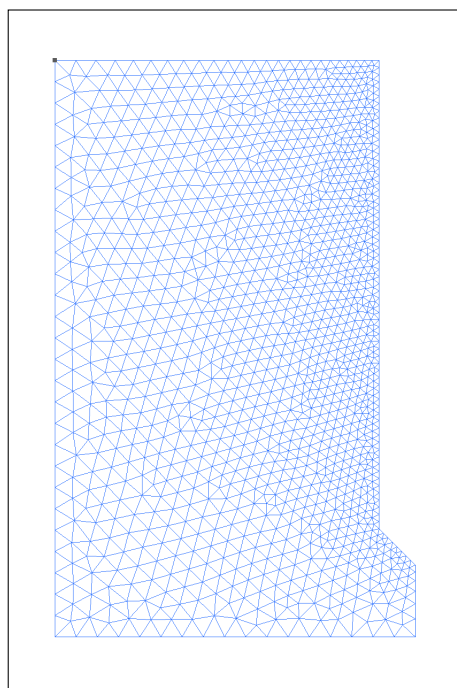


FIGURE 4.2 – Maillage du problème

La figure 4.2 montre le maillage utilisé pour toutes les simulations qui vont être présentées. Il est composé de 1404 noeuds et de 2813 éléments. Ce maillage n'est pas uniforme, il est plus fin proche du pieu afin que les analyses réalisées sur ce dernier soit plus précises. En effet lorsque les éléments sont plus petits, la phase fluide est résolue de manière plus fine. Cependant il faut porter attention à la taille des grains ainsi qu'au pas de temps lorsqu'on affine le maillage. Les grains ne peuvent pas être plus grands que les éléments triangulaires qui forment le maillage car cela entraînerait une erreur dans le calcul de la porosité. En effet, chaque triangle du maillage est considéré comme un volume de contrôle local or si le grain remplit l'entièreté de ce triangle, la porosité y sera considérée

comme nulle. Étant donné le moyennement par la porosité, le résultat est divisé par celle-ci. Si elle est nulle, le résultat final sera un nombre indéfini et la simulation ne pourra pas continuer.

De plus, le pas de temps est contraint par la vitesse d'enfoncement ainsi que par la taille du maillage (et donc la taille des grains) car lorsqu'un grain passe par un élément, il doit être pris en compte à nouveau pour la résolution de la fonction de porosité.

4.3 Simulation numérique

Une fois le maillage généré, il a fallu implémenter le modèle. Afin de modéliser le sol, des grains ont été ajoutés dans le domaine. Dans le but de simuler l'enfoncement du pieu, les grains vont être poussés à travers le domaine (de bas en haut) puis supprimés une fois qu'ils atteindront la frontière du haut. Pour faire cela, deux étapes ont été réalisées au cours de l'année : la première a consisté en l'ajout de grains dans le domaine et la deuxième a eu pour objectif de prendre en compte le poids des grains qui disparaissaient.

4.3.1 Injection des grains dans le domaine

Au début, les grains étaient envoyés par paquet, comme illustré par la figure 4.3. En d'autres termes, un dépôt de grains était créé. Ce dernier était soumis à une gravité positive afin que les grains viennent se tasser au sommet de ce dépôt. Ensuite, ce bloc de grains stocké était injecté d'un coup dans le domaine. Une fois les grains dans le domaine, la gravité était remise sous forme naturelle (négative) car le mouvement du fluide permettait aux grains de monter jusqu'à la frontière du haut et aussi de rester bien tassés au sein du bloc. Lorsque la dernière ligne du paquet avait atteint une certaine distance de la frontière du bas, un autre bloc de grains était à son tour introduit dans le domaine.

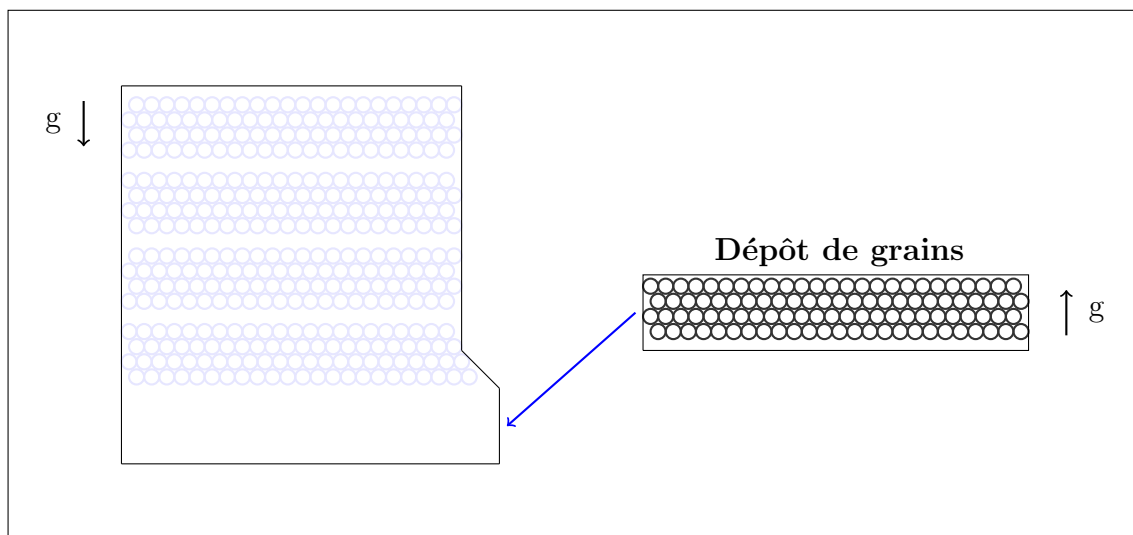


FIGURE 4.3 – Illustration du dépôt de grains

Cependant, cette méthode s’est avérée ne pas être optimale car les grains n’étaient dans l’ensemble pas assez tassés en raison de l’espacement entre les différents paquets. Pour palier à ce problème, une nouvelle méthode a été mise en place. Il s’agit de propulser les grains en continu à travers la frontière du bas. Pour ce faire, le domaine a été étendu vers le bas, les grains qui arrivent en-dessous de $x = 0$ (présents en noir, sur la figure 4.6) ont une gravité positive, tandis qu’une fois qu’ils ont passé la barre du 0 (grains en gris clair, sur la figure 4.6), leur gravité devient négative. Ces grains sont maintenant dans le domaine à proprement parlé. Pour s’assurer que les grains soient bien tassés et qu’ils le restent au cours de la simulation, ils sont soumis à une vitesse d’injection plus élevée et ils sont forcés de garder cette vitesse jusqu’à une hauteur de 0.2 [m].

La vitesse d’injection doit être bien choisie. En effet, si les grains arrivent trop lentement, les grains ne sont pas suffisamment tassés, tandis que si les grains arrivent trop vite, il est possible d’avoir la formation d’un “bouchon”. Celui-ci pourrait alors bloquer les simulations car les grains n’arriveraient plus à rentrer dans le domaine. Ce problème est visible sur la figure 4.4. Les grains les plus bas et représentés en rouge ne savent plus rentrer dans le domaine.

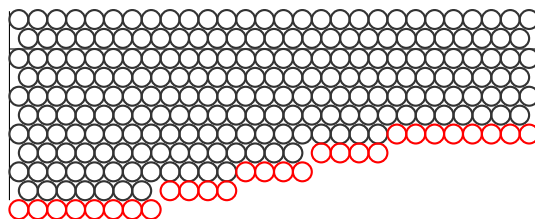


FIGURE 4.4 – Problème avec une trop grande vitesse d’injection

4.3.2 Calcul du poids des grains retirés

Plusieurs simulations ont été réalisées avec des hauteurs de pieu différentes et les résultats ont montré que la force appliquée sur le pieu augmente lorsque la taille du pieu grandit (voir figure 4.5). C'est cohérent car plus un objet pénètre dans un matériau granulaire, plus il sera difficile de l'enfoncer davantage. Cela est dû au poids des grains présents dans les couches qui ont été pénétrées par le pieu. Plus il pousse sur les grains profonds, plus il augmente le tassement des grains, ainsi que la résistance au sol.

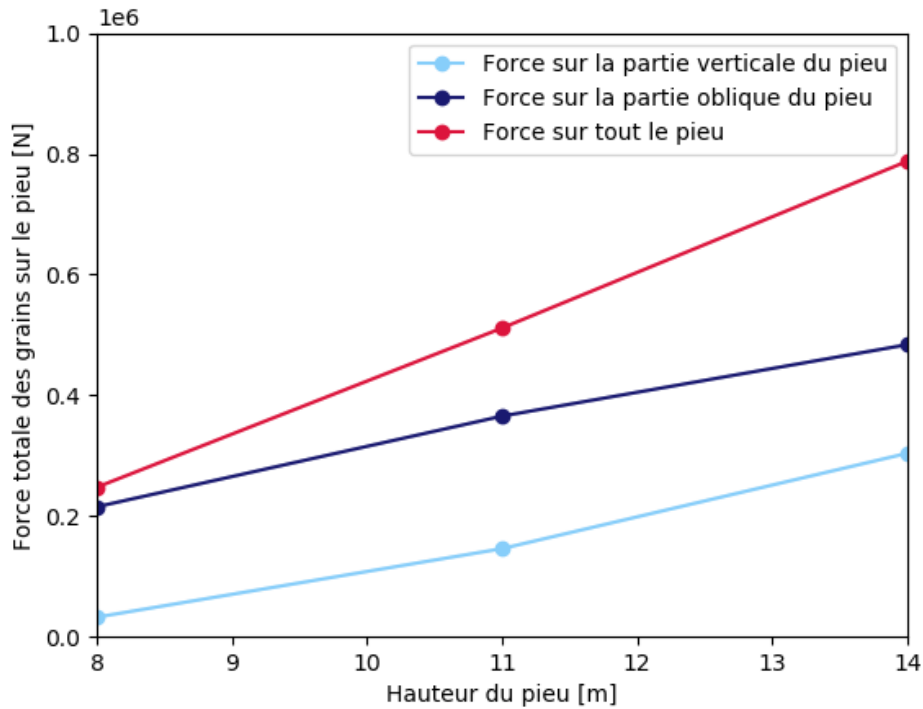


FIGURE 4.5 – Force en fonction de la hauteur du pieu

Comme les simulations suivantes vont être réalisées sur une hauteur de pieu fixe, il a fallu trouver un moyen pour prendre en compte le poids des grains qui sont supprimés quand ils arrivent à la frontière du haut. La première étape a été de sauvegarder le poids des grains qui quittent le domaine (grains en rouge sur la figure 4.6). Pour ce faire, le poids de tout grain qui dépasse une certaine limite est ajouté dans une variable. Une fois la masse sauvegardée, il faut trouver un moyen pour la redistribuer dans le domaine. Plusieurs méthodes ont été testées, telles que partager cette masse uniformément sur tout le domaine mais cela n'amenait pas aux résultats souhaités (c'est-à-dire des résultats semblables à ceux de la figure 4.5). De plus, en raison du nombre important de grains dans le domaine, cette méthode était coûteuse à mettre en place.

Finalement, la méthode retenue consiste à compter les grains contenus dans la couche supérieure du domaine (grains en bleu sur la figure 4.6) puis à répartir le poids des grains qui ont quitté le domaine uniformément sur les grains compris dans cette limite. Ce modèle présentait cependant un problème majeur : comme les grains du haut étaient plus lourds, ils avaient tendance à retomber dans le domaine. Pour éliminer ce souci, une limite a été fixée (il s'agit d'une ligne qui se trouve juste sous la couche des grains bleus) et lorsque les grains descendent plus bas que cette limite, leur poids est réinitialisé et le poids ajouté au fur et à mesure est redistribué dans la couche de grains bleus.

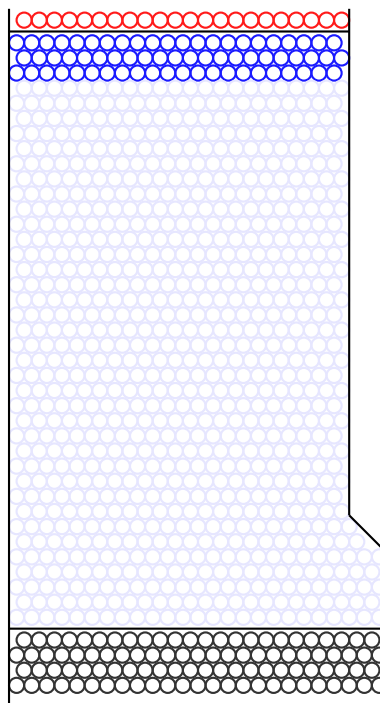


FIGURE 4.6 – Schéma théorique de la méthode de prise en compte des grains retirés

La méthode a été validée par une simulation. Sur les figures 4.7, les grains présents dans le haut du domaine ont une masse plus importante (le gris représente la masse initiale des grains et plus ils sont lourds, plus ils deviennent bleu foncé) au fur et à mesure que le temps augmente et que les grains disparaissent. L'algorithme complet de la méthode mise en place pour la prise en compte du poids des grains qui sont supprimés est l'algorithme 1.



FIGURE 4.7 – Représentation du poids des grains à $t = 40$ [s], $t = 41$ [s] et $t = 41.5$ [s] (de gauche à droite) (Plus les grains sont lourds, plus ils sont bleu foncé)

Algorithm 1 Redistribution du poids des grains disparus

```

masse  $\leftarrow$  0
for all  $i$  pour lesquels  $h_i > h_{sup}$  do
    masse  $\leftarrow$  masse + masse du grain  $i$ 
end for
if  $masse > 0$  then
    particules  $\leftarrow$  0
    delta  $\leftarrow$  0
    for  $i = 0$  to  $n_{tot}$  do
        if  $h_{inf} < h < h_{sup}$  then
            particules  $\leftarrow$  particules + 1
        end if
        if  $h_i < h_{inf}$  and  $m_i > r_i^2 * \pi * \rho$  then
            delta  $\leftarrow$  delta +  $m_i - r_i^2 * \pi * \rho$ 
             $m_i \leftarrow r_i^2 * \pi * \rho$ 
        end if
    end for
    if  $particules > 0$  then
        for all  $i$  pour lesquels  $h_{inf} < h < h_{sup}$  do
            masse du grain  $i \leftarrow$  masse du grain  $i$  + (masse + delta) / particules
        end for
    end if
end if

```

Chapitre 5

Résultats du cas de base

Le cas de base est une simulation réalisée à partir des conditions présentées au début du chapitre 4 dans la figure 4.1. Pour résumer les paramètres importants, il s'agira de la simulation d'un pieu s'enfonçant avec une vitesse de 0.04 [m/s] dans un sol dense dont les grains sont de rayons compris entre 0.016 [m] et 0.02 [m]. Pour finir, le coefficient de frottement entre les grains eux-mêmes et celui entre les grains et le pieu vaut 0.3 [-].

Le but de cette simulation est d'obtenir des résultats sur les efforts qui s'appliquent sur le pieu mais également de voir la manière dont le sol réagit au cours de l'enfoncement.

5.1 Forces s'appliquant sur le pieu

Le fluide et les grains agissent tous les deux sur les parois du pieu en y appliquant un effort. La force totale que subit le pieu peut donc être décomposée en une force f_{eau} provenant du fluide et une force f_{grains} provenant des grains. Ces deux forces peuvent encore être partagées en fonction de leurs composantes en x et en y. Sur la figure 5.1, toutes les forces ainsi décomposées sont illustrées.

Le calcul des forces sur le pieu a été effectué en sommant la force de chaque particule sur la paroi, ainsi que la force de l'eau sur la paroi. Cependant, la force exercée sur la partie verticale du pieu n'est regardée que sur une petite partie du pieu (2 mètres). En effet, étant donné qu'on augmente le poids des grains en haut du domaine, voir l'effet des grains plus lourds qui tapent sur la paroi du pieu n'est pas intéressant. De plus, le calcul de la force se fait par intégrale, c'est pourquoi une longueur a été déterminée, de manière à pouvoir comparer cette force dans différents cas.

La force des grains sur les parties oblique et verticale du pieu est visible à la figure 5.2. Sur ces figures, deux tracés différents sont observables. Le premier, plus clair, est la force brute des grains sur le pieu (toutes les 0.001 secondes), le second, plus foncé, est la force moyennée sur un pas de temps (ici, toutes les 0.2 secondes). La force a été divisée

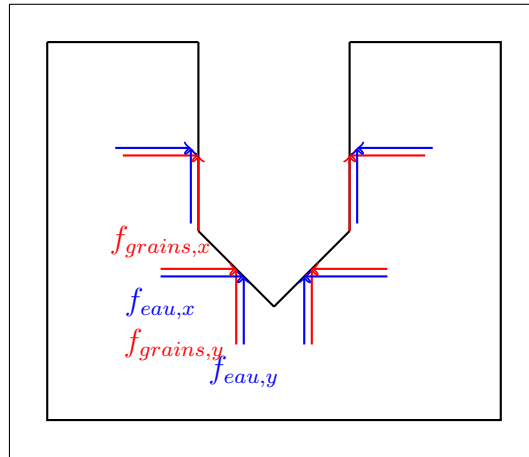
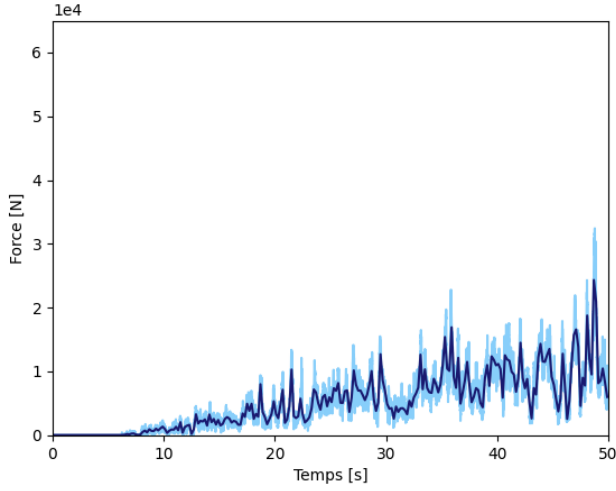


FIGURE 5.1 – Forces sur le pieu

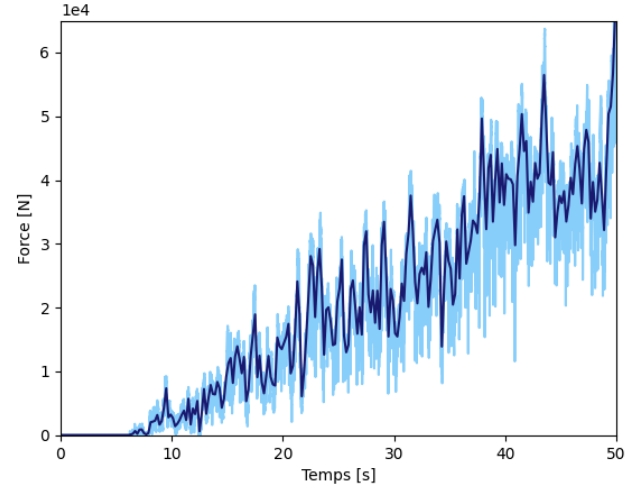
par composantes de manière à analyser laquelle a le plus de poids. La partie oblique du pieu subit une contrainte plus importante de la part de la composante verticale de la force et c'est l'inverse pour la paroi verticale. La force appliquée par l'eau est, quant à elle, visible à la figure 5.3.

Sur base des figures 5.2 et 5.3, la force appliquée par l'eau sur le pieu est fort négligeable comparée à celle appliquée par les grains. Cette force sera donc négligée pour la suite. Quant à la force appliquée par les grains, elle est loin d'être négligeable et va augmenter au fil du temps, ce qui signifie qu'il est de plus en plus compliqué d'enfoncer le pieu dans le sol.

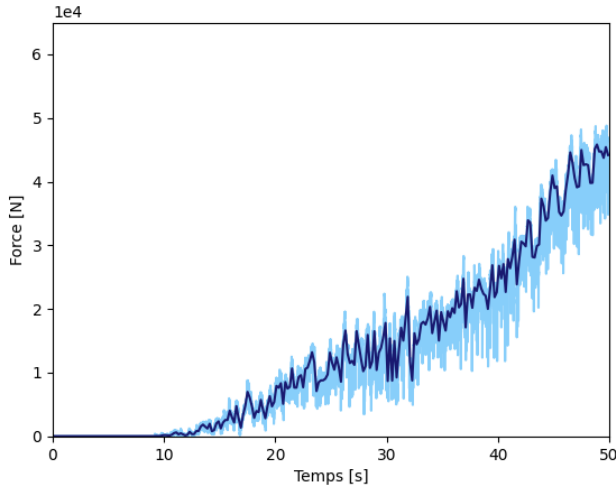
Le but étant de pouvoir caractériser le comportement mécanique du sol, mais aussi celui du pieu, la partie la plus intéressante à garder est la force agissant verticalement sur la paroi oblique du pieu. Ainsi, seule la partie oblique du pieu va être étudiée pour la suite, c'est ce qui va être appelé "Résistance de la pointe" et est introduit à la section suivante.



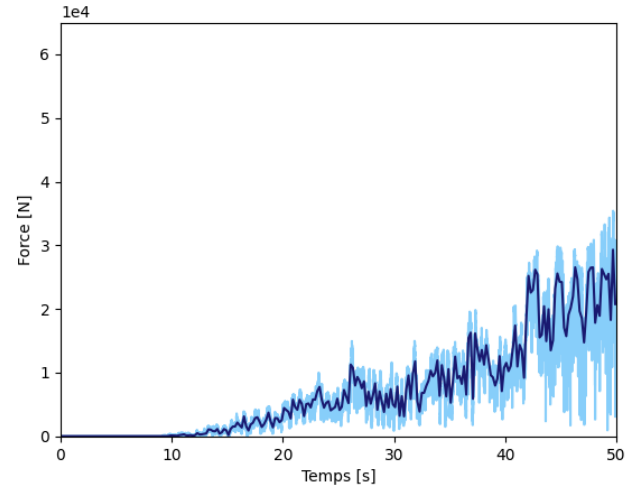
(a) Force en x de la partie oblique du pieu



(b) Force en y de la partie oblique du pieu



(c) Force en x d'un morceau de la partie verticale du pieu



(d) Force en y d'un morceau de la partie verticale du pieu

FIGURE 5.2 – Forces des grains sur le pieu (bleu clair = signal brut, bleu foncé = signal discrétisé)

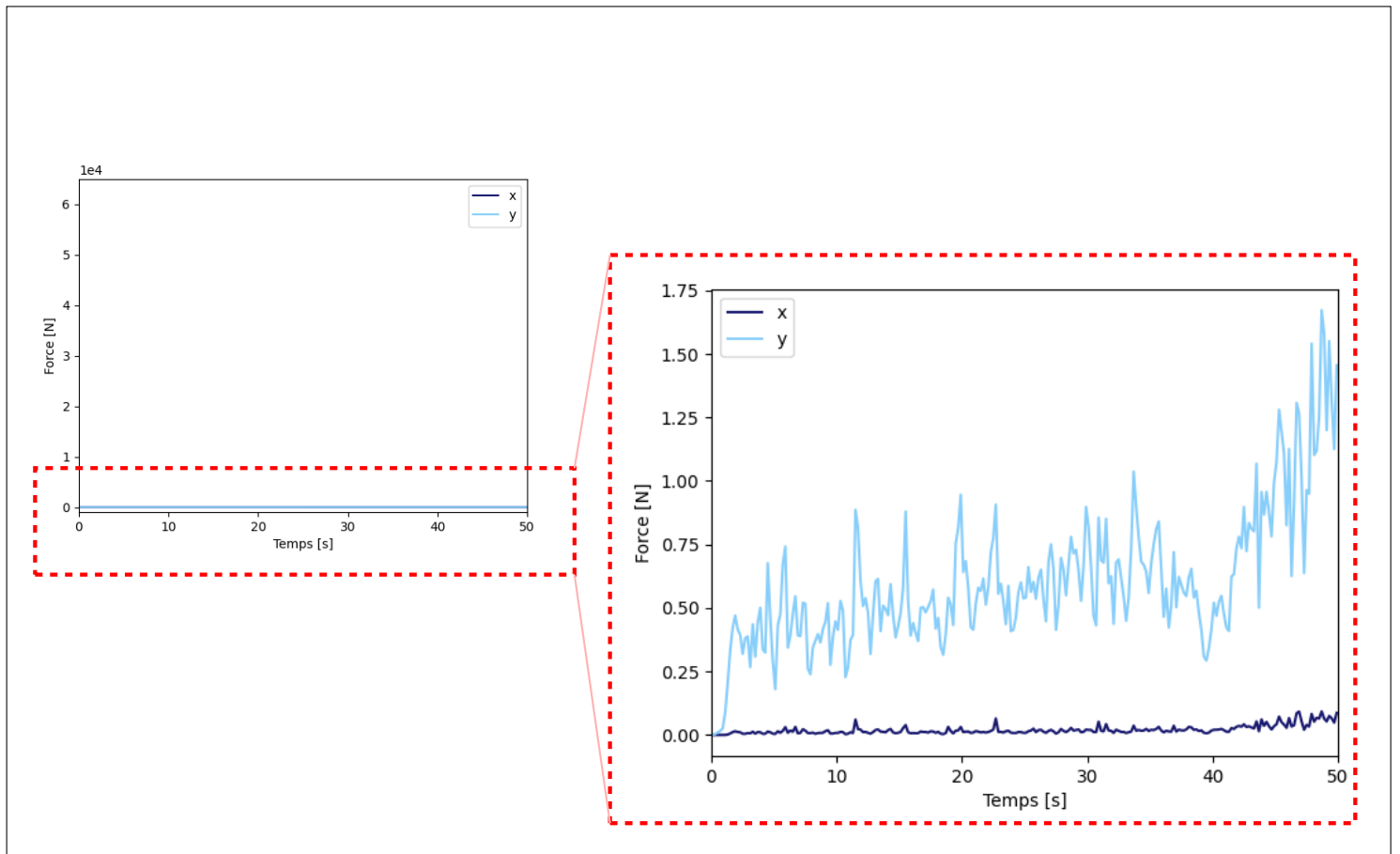


FIGURE 5.3 – Force de l’eau sur le pieu

5.2 Résistance de la pointe

Du point de vue ingénierie, le calcul de la résistance de la pointe du pieu, q_c , du pieu est très importante car elle permet de définir le matériau à choisir. En effet, il s'agit de la force la plus importante reprise par le pieu, elle définira donc la qualité et la dureté nécessaire lors de la fabrication du pieu. Cette résistance est calculée par la formule :

$$q_c = \frac{\sum f_y}{R}$$

Où f_y est la composante verticale de la force appliquée sur la partie oblique du pieu. On somme ces forces durant tout le temps de la pénétration et sur toute la longueur oblique du pieu. R étant le rayon du pieu, la résistance de la pointe sera donc exprimée en $[\frac{N}{m}] = [MPa]$ ce qui est cohérent avec la dimension du modèle étudié ici, c'est-à-dire un modèle en 2D. Pour obtenir des Pa ; il suffira de diviser les données obtenues par la profondeur du pieu [32].

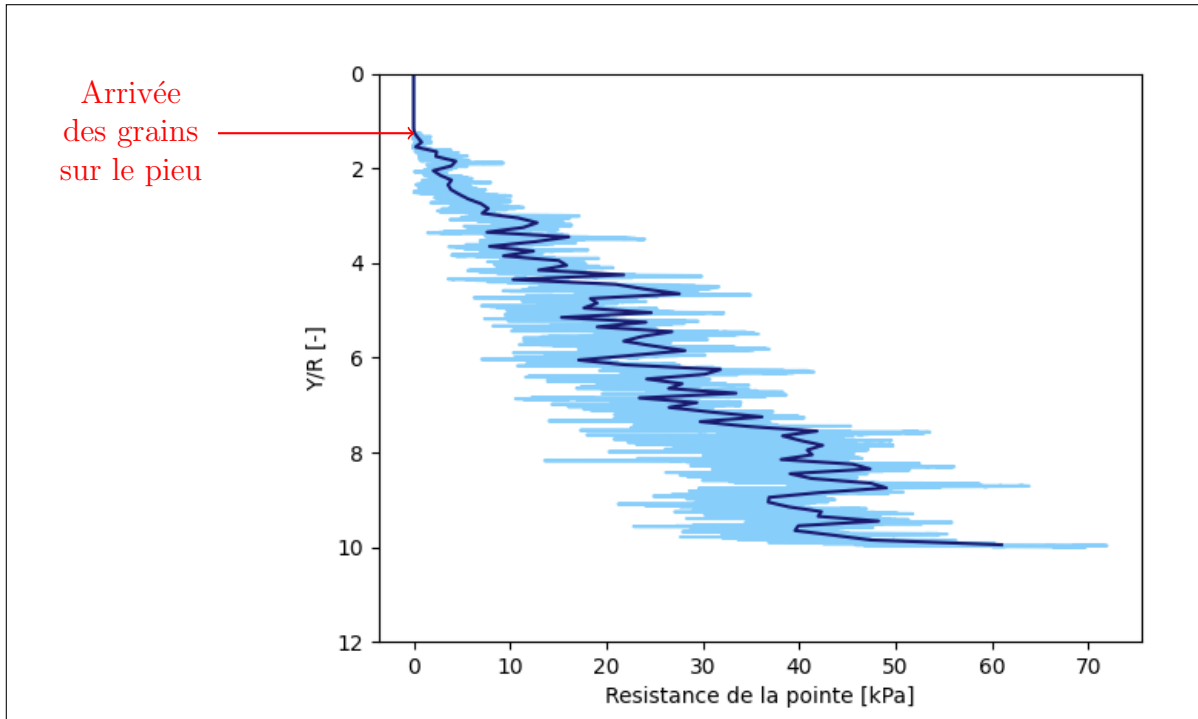


FIGURE 5.4 – Résistance de la pointe (bleu clair = signal brut, bleu foncé = signal discrétisé)

Au regard de la figure 5.4, une conclusion peut être tirée : au fur et à mesure que le pieu est enfoncé, il faut de plus en plus de force pour qu'il puisse continuer à s'enfoncer.

Un autre aspect intéressant à regarder est la résistance de la pointe normalisée, c'est-à-dire l'évolution de la résistance de la pointe divisée par la pression au sein du milieu.

Le milieu est divisé en 2 sections visibles à la figure 5.5. La première ne contient que de l'eau et la seconde comprend du sable saturé. La pression expérimentée par cet environnement est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$p = \gamma_w * z_w + \gamma_{ss} * z_{ss}$$

où γ_w et γ_{ss} sont les poids unitaires de l'eau et du sable saturé en eau et z_w et z_{ss} sont les positions dans l'eau et dans le sable saturé en eau [33].

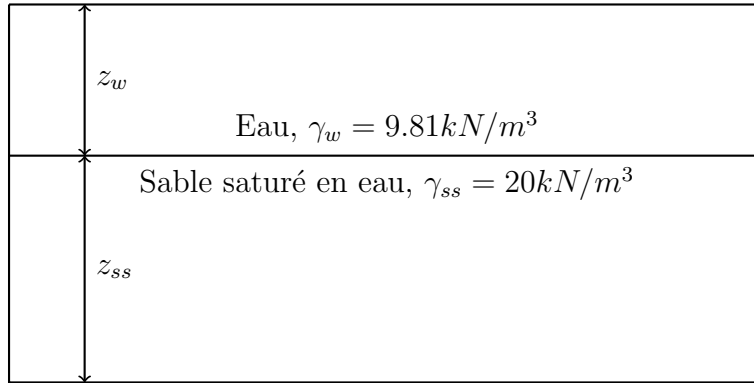


FIGURE 5.5 – Caractéristiques physiques du milieu

Le but de cette démarche est d'observer la manière dont la résistance de la pointe évolue par rapport à la pression sous le pieu.

Comme illustré sur la figure 5.6, q_c normalisé augmente au début pour se stabiliser par la suite ($Y/R \approx 5[-]$). Lorsque le pieu pénètre dans le milieu, la pression exercée au sein de celui-ci vient majoritairement de l'eau et ensuite, la pression exercée par le matériau granulaire prend de plus en plus de poids. Le résultat obtenu montre que la tension dans le domaine s'accroît de manière analogue à la résistance de la pointe du pieu.

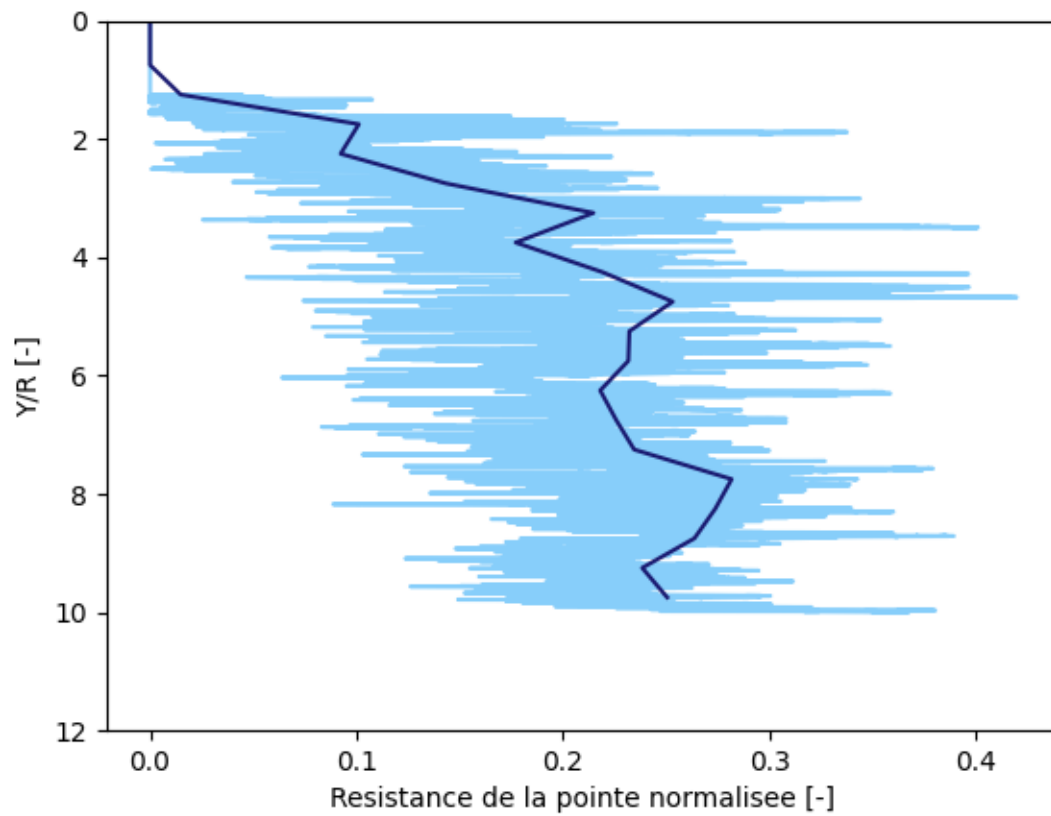


FIGURE 5.6 – Résistance normalisée de la pointe (bleu clair = signal brut, bleu foncé = signal discrétisé)

5.3 Réseau de forces de contact

Dans un matériau granulaire non drainé et qui n'est soumis à aucune charge extérieure, la contrainte totale (σ) peut être décomposée en une pression interstitielle (u) induite par l'eau et une contrainte effective du sol (σ'). Il s'agit de la loi de Terzaghi :

$$\sigma = u + \sigma'$$

Cette relation est illustrée par la figure 5.7.

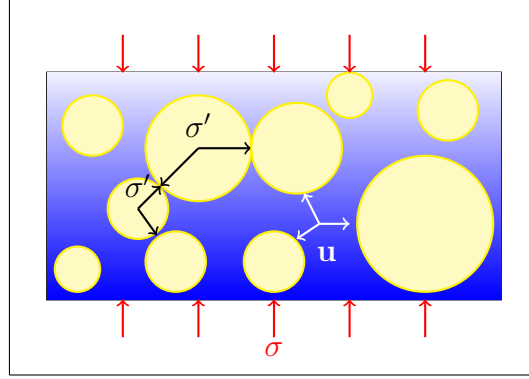


FIGURE 5.7 – Contrainte dans un sol non drainé (eau en bleu et grains en jaune)

Sous l'apport de charge induit par l'enfoncement du pieu, le sol va subir une variation de volume et cela est dû à trois phénomènes distincts :

1. Le réarrangement des grains. Cette étape est instantanée.
2. L'expulsion de l'eau interstitielle car le tassement des grains réduit l'indice des vides. Le sol est ainsi consolidé.
3. Le fluage, c'est-à-dire la capacité du sol à se mouvoir dans le temps afin de relâcher la contrainte qu'il subit.

Le dépôt de sable des fonds marins peut être considéré comme un matériau avec une perméabilité élevée c'est-à-dire que l'eau se déplace avec facilité dans ses espaces interstitiels. La pression exercée sur le sol sera donc reprise par le sable et non par le fluide présent entre les grains. Cette caractéristique permet de faire l'hypothèse que la contrainte totale s'appliquant sur un grain ne dépend que de la contrainte effective du sol [3]. Sur la figure 3.4, il est possible de voir la force f^{ij} qui représente la force exercée par le grain i sur le grain j . Pour obtenir la contrainte totale sur le grain, il faut donc sommer les moments induits par les différentes forces de contact sur le grain j au temps considéré puis enfin diviser cette somme par le volume étudié [34].

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{\beta \in V} x_i^\beta f_j^\beta$$

Où V est le volume considéré, f_j^β est la composante j de la force de contact et x_i^β la i -ème composante de son vecteur centre à centre.

Dans le but d'avoir une vision plus étendue du réseau des forces de contact sous le pieu, le domaine a été décalé. C'est à dire que le domaine garde la même hauteur totale mais que la longueur du pieu a été réduite à 4 [m].

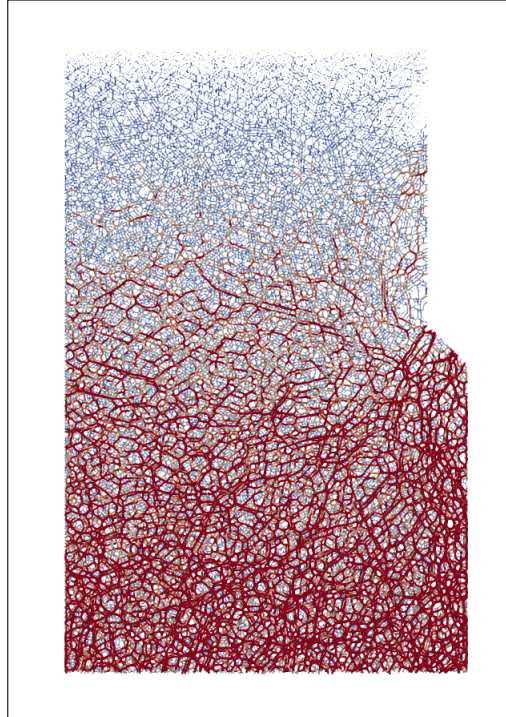


FIGURE 5.8 – Réseau de forces de contact (Les forces de contact élevée sont représentées en rouge foncé)

La figure 5.8 montre le réseau de forces de contact lorsque le pieu est totalement enfoncé dans le sol et qu'il continue sa pénétration à vitesse constante. Plus la chaîne représentant les forces de contact est rouge foncé, plus la valeur maximale de la force de contact entre les particules est élevée.

Le tassement est très important sous le pieu mais cette contrainte est transmise de proche en proche par les forces de contact. Ce qui a pour conséquence que la compression n'est pas subie exclusivement par les grains sous le pieu mais également par des particules plus proches de la surface.

5.4 Déformation du sol

Afin d'observer la déformation que subit le sol pendant la simulation, celui-ci a été fractionné en dix colonnes de 0.5 [m] de large chacune (ce qui représente en moyenne 11 particules par largeur de colonne). Ces sections ont été mises en évidence à l'aide de différentes couleurs (voir figure 5.9) pour obtenir une visualisation claire du déplacement des particules lors de la pénétration du pieu.

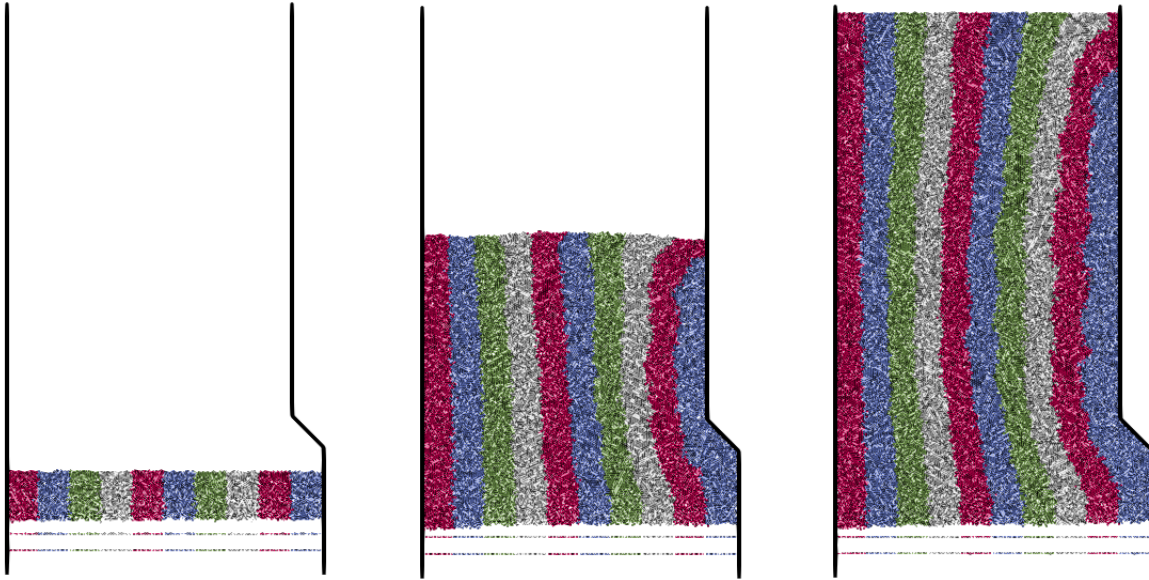


FIGURE 5.9 – Déformation du sol à $t = 4$ [s], $t = 25$ [s] et $t = 40$ [s] (de gauche à droite)

Comme il peut être remarqué sur les résultats de la simulation, les particules présentes dans la colonne de grains la plus proche du pieu se déplacent plus lentement que les autres particules du domaine. Deux explications peuvent être apportées à cela : la première, c'est que les grains compris dans cette colonne se trouvent sous le pieu, ils sont donc poussés vers la gauche lorsqu'ils subissent la pénétration du pieu. Ils doivent donc à leur tour faire pression sur leurs grains voisins et perdent ainsi de la vitesse. En plus de faire pression, ils doivent parcourir une plus grande distance pour arriver en haut du domaine et vont donc forcément mettre plus de temps. La seconde raison, c'est le frottement ressenti par les grains et venant du pieu. La surface du pieu étant importante, le frottement qui s'y applique entraîne les grains dans le sens de la pénétration (vers le bas) réduisant ainsi leur mouvement initial car celui-ci était vers le haut. Ce mouvement donné aux premiers grains est ensuite transmis aux voisins grâce au frottement présent entre les particules.

5.5 Vitesse par à-coups

Les pieux sont généralement enfoncés par battage (donc par à-coups) et non avec une vitesse continue [3].

En effet, il existe 3 méthodes principales pour enfoncer un monopieu dans le sol marin : le battage avec un marteau hydraulique, le forage et la cimentation, ou le vibro-fonçage. Le battage est la méthode la plus répandue et est adapté à la majorité des sols, mais a pour risque d'endommager le monopieu dans les sols rocheux ou glaciaires et cela implique une pollution sonore sous-marine [35].

Afin de le modéliser, la vitesse des grains entrant dans le domaine a été modifiée pour suivre le signal carré défini sur la figure 5.10. La vitesse du fluide a également été modifiée afin de suivre le même signal.

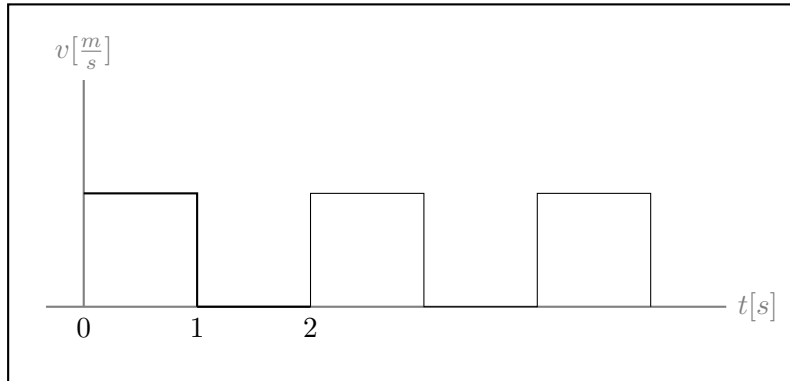


FIGURE 5.10 – Signal carré de la vitesse par à-coups

Pour pouvoir faire une comparaison de la résistance de la pointe d'un pieu enfoncé en continu avec la résistance de la pointe d'un pieu enfoncé par à-coups, la vitesse moyenne des deux cas doit être identique. Etant donné que l'enfoncement se fait durant une seconde et qu'il est stoppé durant une seconde, que la vitesse (moyenne) du cas de base est de 0.04 m/s, la vitesse de l'enfoncement sera de 0.08 m/s. Le résultat obtenu est montré sur la figure 5.11.

La résistance de la pointe augmente à chaque à-coup. Il faut donc une force de plus en plus grande pour que le pieu puisse s'enfoncer dans le sol.

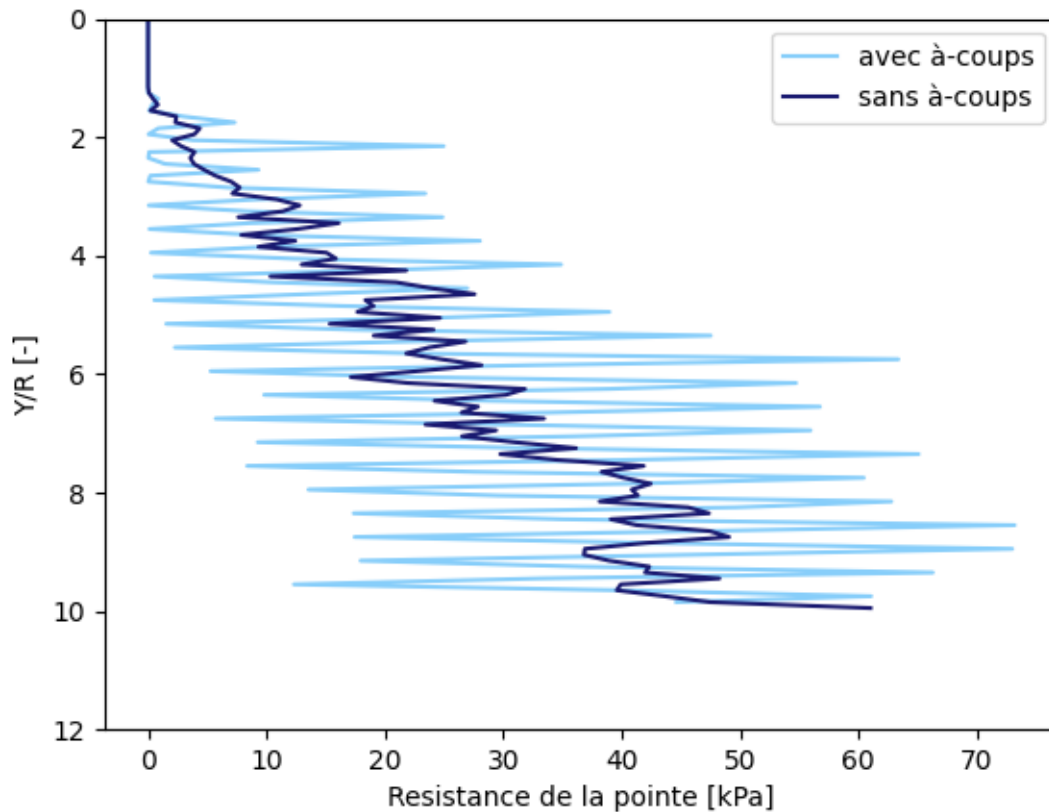


FIGURE 5.11 – Comparaison de la résistance de la pointe par à-coups et en continu

La question à se poser est alors la suivante : est-il plus intéressant d'enfoncer le pieu par à-coups ou en continu ?

Il faut donc comparer les 2 résultats présentés sur la figure 5.11. Pour connaître le cas le plus intéressant, il est possible de calculer l'aire présente sous la courbe en additionnant toutes les résistances. On trouve ainsi 2094.33 kPa pour le cas en continu et 2067.31 kPa pour le cas par à-coups.

La différence est très minime et, comme il est visible sur la figure 5.11, la résistance maximale est plus élevée dans le cas avec à-coups, ce qui signifie que la contrainte maximale est plus grande et donc le risque de fracture du pieu l'est aussi. Il a donc été décidé de rester sur un modèle avec un enfoncement continu pour la suite.

Chapitre 6

Analyses paramétriques

De nombreux paramètres doivent être pris en compte pour simuler l'enfoncement d'un pieu dans un sol granulaire. Plusieurs études ont été réalisées afin d'observer l'influence de ces éléments sur les résultats de la simulation, notamment la résistance de la pointe du pieu, le réseau des forces de contact dans le sol ainsi que sa déformation. Pour ce faire, chaque paramètre a été modifié un à un.

Il a d'abord été vérifié que le fluide jouait un rôle crucial dans les résultats obtenus en les comparant avec un modèle qui ne comporte pas de fluide. Ensuite, les paramétrisations ont porté sur les éléments variables présents sur la figure 4.1 : la vitesse des grains, la polydispersité au sein du sol (donc la différence des dimensions des particules), le frottement entre les grains, le frottement sur le pieu ainsi que la masse volumique des grains.

Certaines des simulations ont présenté le problème du bouchon expliqué à la section 4.3.1. Cela a pour conséquence que certains graphes ne vont pas jusqu'aux 5 [m] de profondeur. Cependant, le début des courbes permet quand même de tirer des conclusions utiles sur l'influence des paramètres.

6.1 Présence de fluide ou non

Il est intéressant d'évaluer l'influence du fluide sur le comportement du sol et la manière dont le pieu va être affecté. Le but de cela est de savoir si il est utile de prendre en compte la phase fluide dans l'analyse car cet élément rend les simulations plus longues à obtenir. D'après les travaux effectués par Pournaghiazar, Russell et Khalili [36] sur l'influence de la saturation dans le sable, la succion induite par la pénétration du pieu dans un sol sec va augmenter les contraintes au sein de celui-ci et sur le pieu.

6.1.1 Résistance de la pointe

Sur le graphe présenté à la figure 6.1, la résistance de la pointe est bien moindre lorsque le fluide est présent. En effet, le mouvement donné au fluide par le pieu va entraîner les grains qui vont donc se mouvoir plus facilement et plus rapidement rendant plus facile l'enfoncement du pieu dans le sol lorsque celui-ci est saturé.

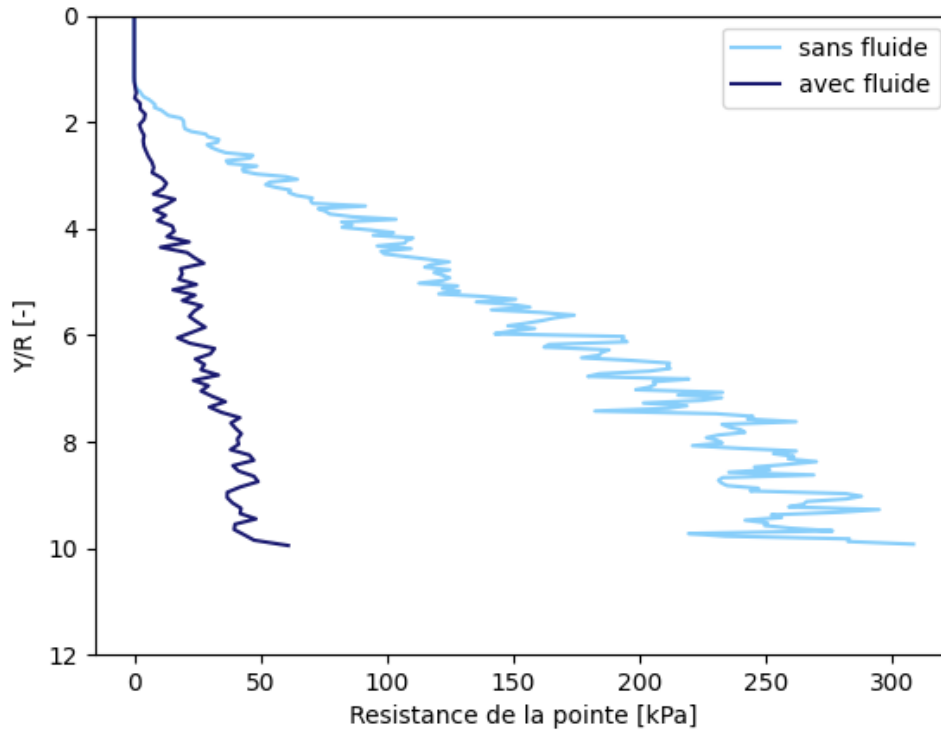


FIGURE 6.1 – Résistance de la pointe avec et sans fluide

Cela démontre l'importance de ne pas omettre la phase fluide dans les modèles qui tentent de simuler, au plus proche de la réalité, l'enfoncement de pieux dans des sols saturés.

6.1.2 Réseau des forces de contact

Lorsque le sable est saturé, les grains peuvent être en suspension dans l'eau tandis que lorsque le sol est sec, les grains n'ont pas d'autre choix que de reposer sur d'autres grains créant ainsi un réseau de forces de contact plus important, c'est-à-dire plus dense et avec une valeur maximale de forces plus élevée.

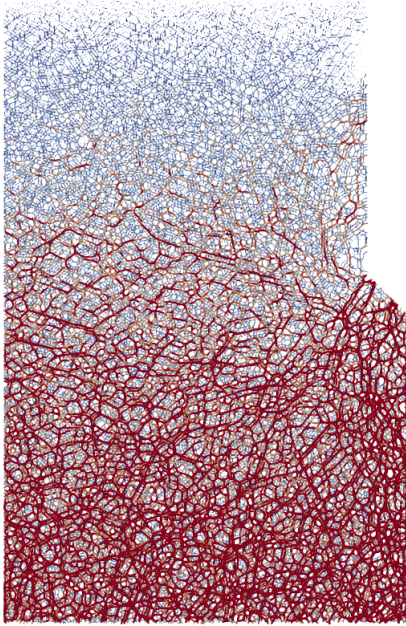


FIGURE 6.2 – Forces de contact dans un sol saturé

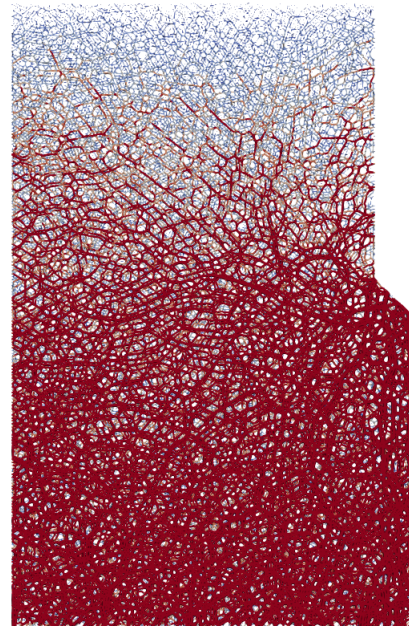


FIGURE 6.3 – Forces de contact dans un sol sec

Il est à remarquer sur la figure 6.2, qui représente un sol saturé, que la compression induite par la pénétration du pieu entraîne une transmission des forces de contact moins importante. C'est-à-dire que les couches de grains supérieures (vers le haut du domaine) ne seront pas très impactées durant l'enfoncement, à l'inverse du comportement d'un sol sec visible à la figure 6.3.

6.1.3 Mélange des particules

Lorsque le fluide est présent (visible à la figure 6.4), il s'insère entre les particules au cours du mouvement de celles-ci rendant ainsi leur déplacement plus facile. De plus, la vitesse de l'eau permet également aux grains de se mouvoir. Au contraire, dans un sol sec, les grains seront plus influencés par le frottement car la viscosité du fluide ne viendra pas diminuer cette force. La figure 6.5 montre que les grains collent fortement à la paroi mais également que le frottement interparticulaire est plus prononcé ce qui impacte aussi les grains plus éloignés du pieu.

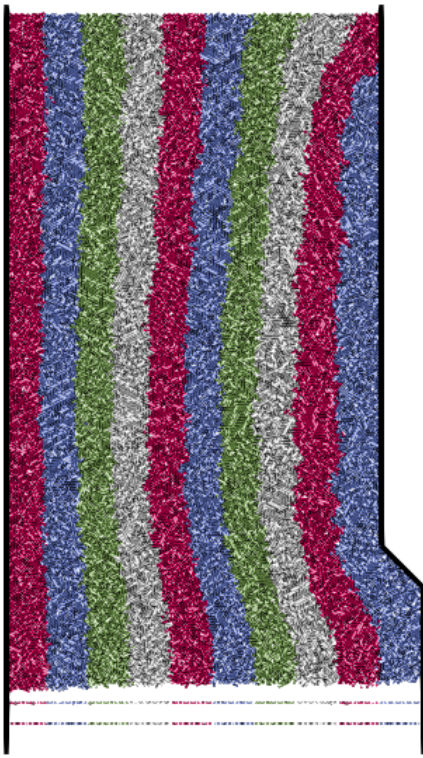


FIGURE 6.4 – Mélange des particules avec fluide

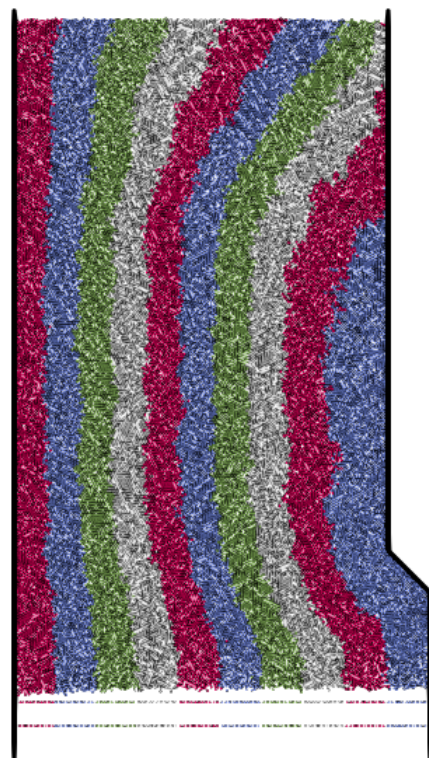


FIGURE 6.5 – Mélange des particules sans fluide

6.2 Vitesse de pénétration

Étant donné notre modèle, la vitesse de pénétration représente la vitesse à laquelle les grains montent dans le domaine. À l'échelle réelle, cette vitesse serait celle de l'enfoncement du pieu dans le sol.

Esposito, Velloso et al. [5] ont fait une analyse de sensibilité numérique afin de mieux comprendre le phénomène de pénétration du pieu avec les éléments finis. Parmi les aspects qu'ils ont analysés, la variation de vitesse d'enfoncement a été étudiée. Il en est sorti que la résistance augmentait avec la vitesse.

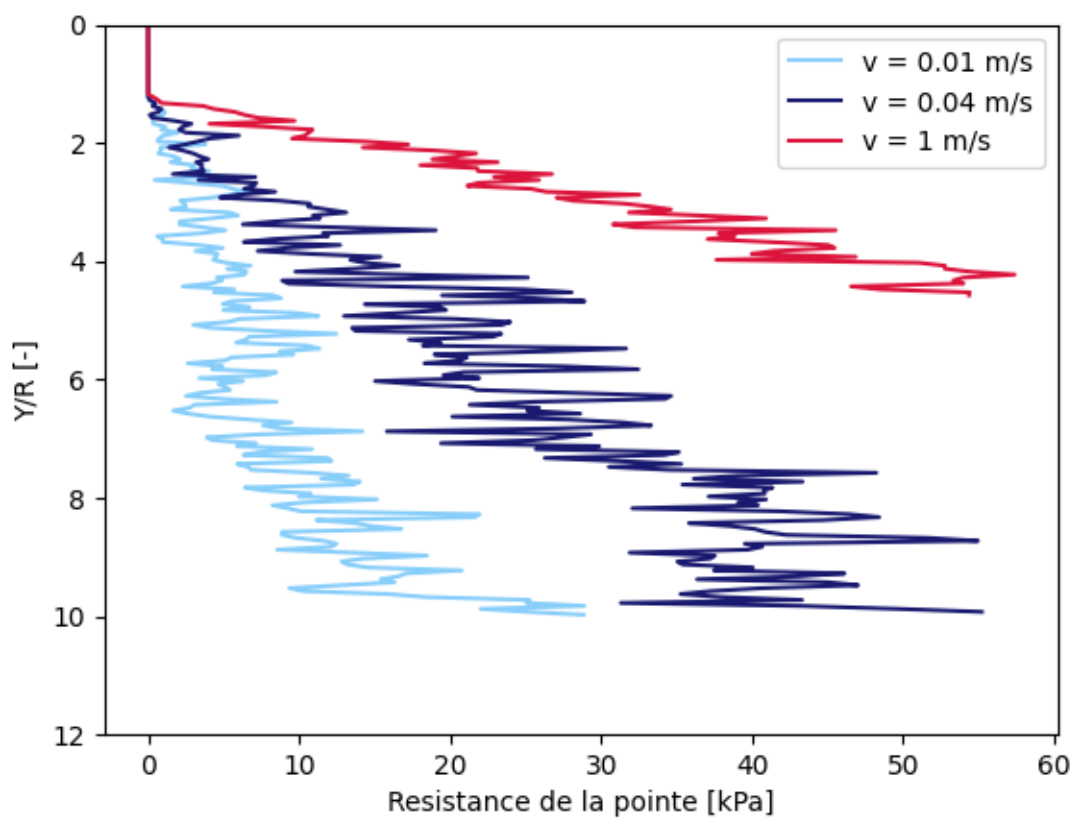


FIGURE 6.6 – Résistance de la pointe avec différentes vitesses

La vitesse des grains va influencer fortement la résistance de la pointe. En effet, au vu de la figure 6.6, plus la vitesse d'enfoncement sera rapide, plus il y aura de résistance de la part du sol. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans l'étude citée précédemment [5].

Les figures 6.7 et 6.8 permettent d'illustrer la vitesse des grains dans le domaine lors de l'enfoncement du pieu. L'échelle est la même pour les deux figures et plus les grains sont rouges, plus ils sont rapides. A l'inverse, plus le bleu est foncé, plus ils sont lents. Sur la figure 6.8, les grains sous le pieu se déplacent avec une vitesse plus faible et sont plus proches les uns des autres que ceux au même endroit sur la figure 6.7. Ceci montre l'influence de la vitesse de pénétration sur le comportement des grains, en particulier sur leur vitesse. Le mouvement des particules étant ainsi freiné, il sera plus compliqué pour le pieu de pénétrer au sein du sol. La résistance à la pointe sera donc plus importante.

De plus, physiquement, il est possible de faire un parallèle avec la mécanique du choc contre la paroi [37]. En effet, pour une vitesse plus élevée, le choc sera plus grand. La force appliquée étant une fonction de la vitesse et la résistance de la pointe étant liée de manière linéaire à la force exercée sur la paroi, cela induira une résistance plus élevée.

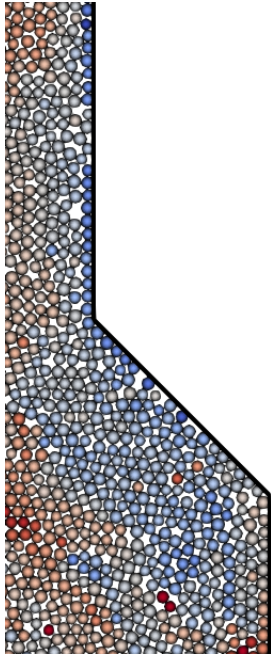


FIGURE 6.7 – Grains présents sous la pointe avec une vitesse de 0.01 m/s

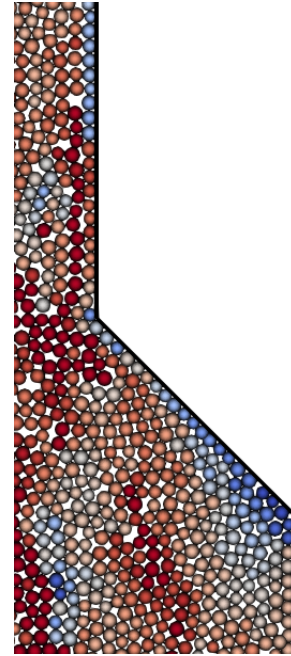


FIGURE 6.8 – Grains présents sous la pointe avec une vitesse de 1 m/s

6.3 Polydispersité des rayons de grains

La polydispersité des grains a été modélisée en mettant des rayons aléatoires compris entre des bornes choisies à l'avance.

McDowell et Bolton [38] ont fait des recherches en centrifugeuse sur l'effet de la distribution initiale des tailles de grains et ont fait différents essais allant d'un sol fortement hétérogène à un sol uniforme. Selon eux, la résistance de la pointe est fonction de la distribution granulométrique initiale (elle a été montrée par des tests oedométriques, pouvant alors affecter la limite d'élasticité, ainsi que la compressibilité du sol).

6.3.1 Résistance de la pointe

Les résultats illustrés à la figure 6.9 sont en adéquation avec ceux obtenus par McDowell et Bolton. En effet, ce graphe montre une diminution de la résistance à la pointe lorsque la polydispersité de la taille des grains injectés dans le domaine augmente.

Les simulations avec des particules de rayon plus grand entraînent une diminution du nombre de contacts sur le pieu. Cela a pour conséquence de diminuer le nombre d'oscillations sur la courbe. A partir de là, il semblerait logique que q_c baisse vu que la résistance à la pointe est calculée sur base de la somme des forces agissant sur la frontière et que ces dernières sont moins nombreuses. Cependant, ces particules étant plus lourdes, la pression qu'elles exercent sur la paroi est plus importante [39].

Ces remarques sont valables pour des modèles de sol homogène, c'est-à-dire où tous les grains ont le même rayon. Il est tout de même possible de se baser sur ces observations pour expliquer les résultats des simulations obtenues pour les différentes polydispersités. Lorsque celle-ci est élevée, il y a une plus grande probabilité de trouver des grains de petite taille qui auront donc moins d'impact lors du contact avec le pieu.

De plus, lorsque la polydispersité augmente, le taux de vide s'accroît également. C'est-à-dire qu'il y a plus d'espace dans le sol occupé par de l'eau. Cet effet est visible sur la figure 6.12 où les particules ont des rayons compris entre 0.016 [m] et 0.02 [m], illustrés par les différentes couleurs. Les contraintes appliquées sur le pieu diminuent donc, car les particules ont plus de facilité (plus d'espace) pour se mouvoir.

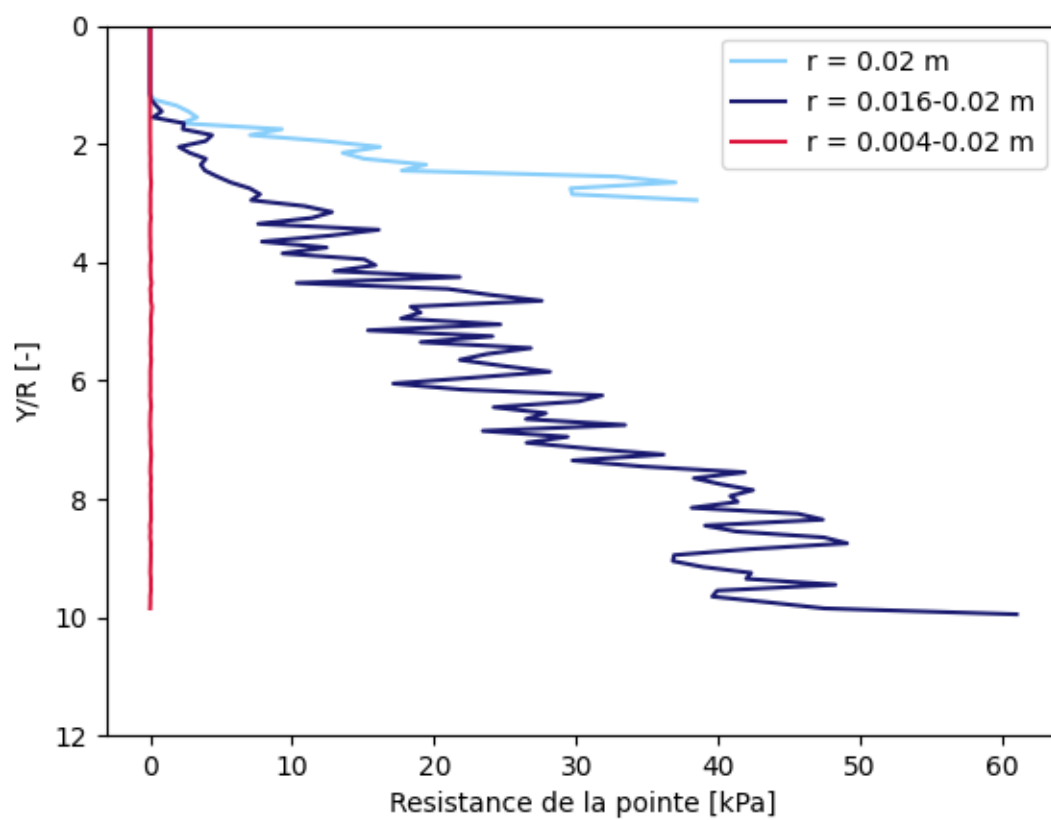


FIGURE 6.9 – Résistance de la pointe avec différentes polydispersités de rayons de grains

6.3.2 Mélange des particules

La polydispersité des grains va avoir un impact sur l'arrangement de ceux-ci durant l'enfoncement. Sur la figure 6.10 où tous les grains ont des rayons de particules identiques, un phénomène de cristallisation apparaît en gris sur la figure.



FIGURE 6.10 – Mélange des particules sans polydispersité ($r = 0.02$ m)

Pour expliquer le phénomène de cristallisation, il est possible de faire un parallèle avec les atomes. Les gaz et liquides sont dans un état désordonné (ou amorphe), tandis que les solides sont dans un état ordonné (ou cristallin) [40].

Lorsque les particules ont toutes le même rayon, le phénomène de cristallisation va apparaître, il est visible à la figure 6.11. Les particules vont être organisées en rangées, telles les solides. Cela signifie donc qu'il y aura bien plus de résistance lorsque le pieu voudra s'y enfoncer. En effet, comme montré sur la figure 6.12, lorsque les particules n'ont pas toutes le même rayon, elles sont plus désordonnées et ont donc plus faciles à se déplacer durant l'enfoncement du pieu.

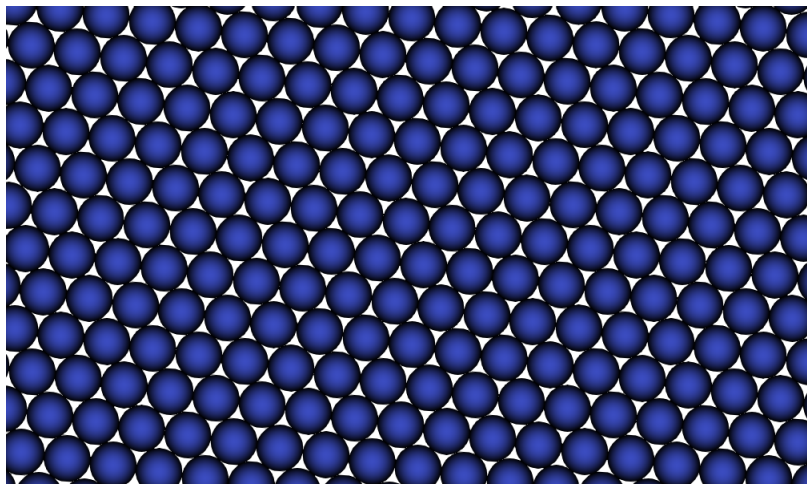


FIGURE 6.11 – Cristallisation

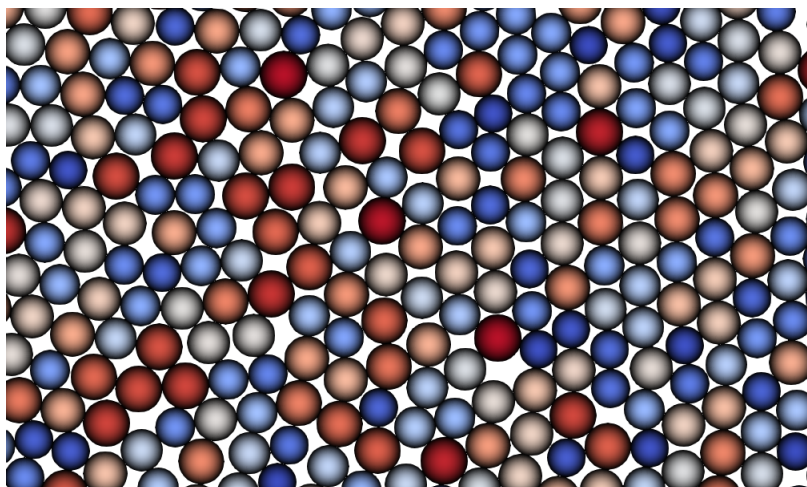


FIGURE 6.12 – Pas de cristallisation

6.4 Frottement entre les grains

En se référant aux travaux réalisés par Yang et al. [41] dans son étude des effets du frottement interparticulaire sur le comportement d'un matériau granulaire, il est à prévoir que le coefficient de friction va influencer la résistance du pieu et du sol ainsi que le mouvement dilatoire des particules.

6.4.1 Résistance de la pointe

Comme le montre la figure 6.13, la résistance à la pointe est sensible aux variations du coefficient de friction entre les particules. La différence de valeur de q_c est beaucoup plus importante entre $\mu = 0$ et $\mu = 0.3$ qu'entre ce dernier et $\mu = 0.45$. Ces résultats sont en adéquation avec les observations faites par Khosravi, Martinez et DeJong dans leur étude sur la classification des sols pour les tests de pénétration de cône [39]. Ceci est expliqué par le fait que l'augmentation du coefficient de frottement entre les particules n'augmente pas la quantité d'énergie dissipée lors d'un mouvement mais diminue le glissement subi par celles-ci. L'accroissement de cette friction au niveau des contacts permet de rendre le système plus stable. A partir d'une certaine valeur de μ , le sol atteindra une stabilité suffisamment élevée et sera donc de moins en moins influencé par la variation de μ [42].

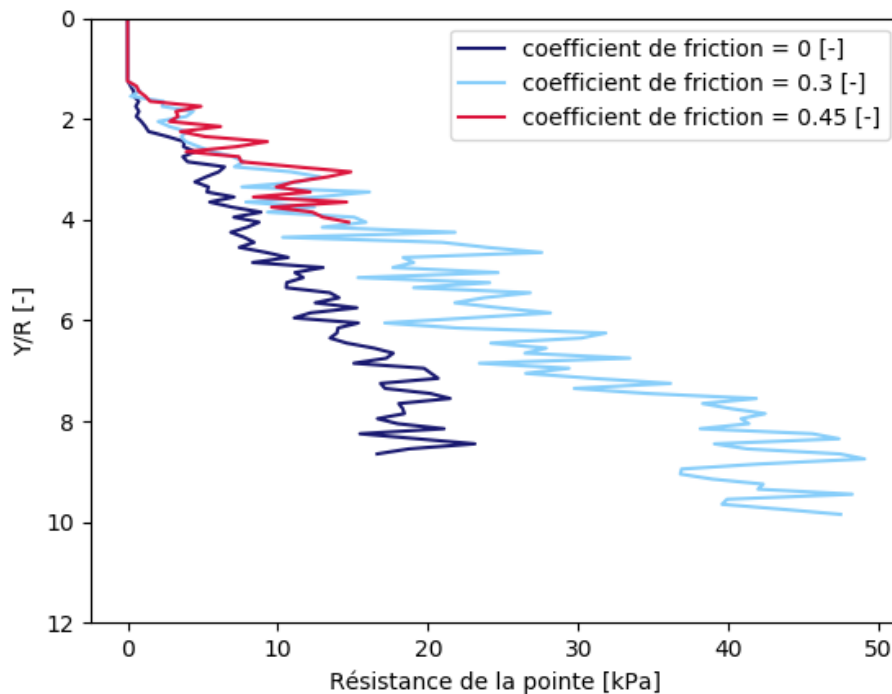


FIGURE 6.13 – Résistance de la pointe en fonction du coefficient de frottement

6.4.2 Réseau des forces de contact

Le coefficient de frottement entre les particules va également avoir un impact sur l'interaction entre le pieu et le sol. Les figures 6.14 et 6.15 dévoilent les réseaux des forces de contact pour différents μ . Sur ces figures, il est à remarquer que la valeur maximale de force de contact n'est pas très différente. Cependant, pour un μ plus élevé, les chaînes de forces de contact sont plus longues montrant ainsi que la charge due à l'enfoncement du pieu est transférée loin de la pointe de celui-ci.

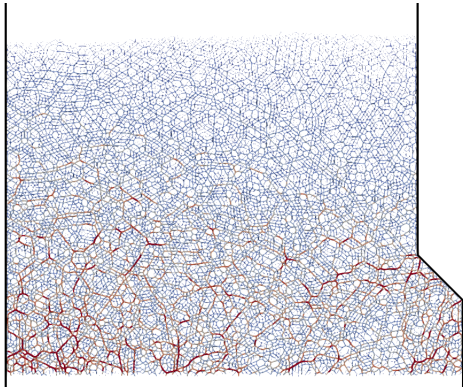


FIGURE 6.14 – Réseau de contact avec $\mu = 0$ [-]

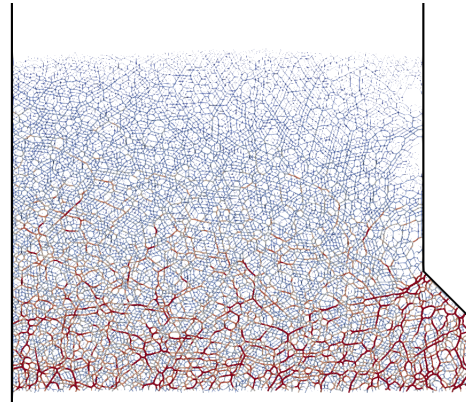


FIGURE 6.15 – Réseau de contact avec $\mu = 0.45$ [-]

6.4.3 Mélange des particules

La dilatation est un aspect important des sols granulaires. Lorsque ce dernier subit du cisaillement, il va se contracter, s'il s'agit d'un sol lâche, ou se dilater, s'il s'agit d'un sol dense. En plus de la nature du sol, le rapport de contraintes et le coefficient de frottement entre les grains vont également modifier ce mouvement en l'amplifiant ou, au contraire, en le diminuant.

Quand le frottement entre les particules est élevé, les grains ont tendance à subir une rotation plutôt qu'un glissement. Or, lorsque le pieu est enfoncé dans le sol, il induit un certain mouvement aux particules. Les grains les plus proches du pieu vont ainsi expérimenter une rotation importante sur eux-même réduisant donc leur vitesse puis ce mouvement va être transmis de proche en proche mais en diminuant d'intensité au fur et à mesure de la transmission. Cela explique les figures 6.16 et 6.17 où l'on remarque que les grains plus loin du pieu passent au dessus de ceux qui sont les plus proches de celui-ci.

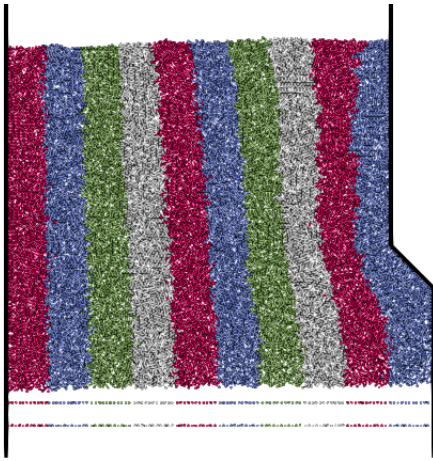


FIGURE 6.16 – Mélange des particules avec $\mu = 0$ [-]

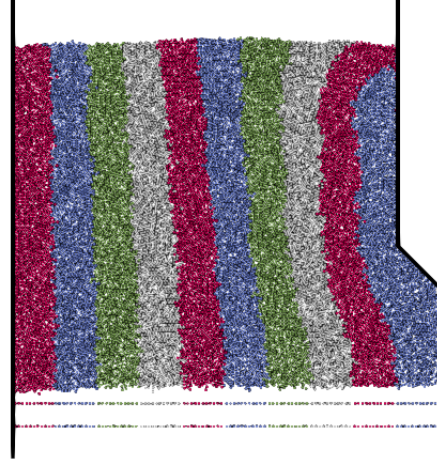


FIGURE 6.17 – Mélange des particules avec $\mu = 0.45$ [-]

6.5 Frottement sur le pieu

La rugosité de la surface du pieu a été modélisée en insérant dans la simulation un coefficient de frottement entre les particules et la frontière représentant le pieu.

Les chercheurs Khosravi, Martinez et DeJong [39] ont travaillé sur l'influence de ce paramètre dans les tests de pénétration d'un sol non-drainé. Ils en ont conclu que la rugosité du pieu a un effet négligeable sur la résistance de la pointe. Cependant, d'après leurs études, μ jouerait un rôle dans le tassement du sol. Ainsi donc, modifier sa valeur entraînerait un changement au niveau des forces de contact.

6.5.1 Résistance de la pointe

Comme le montre la figure 6.18, la variation du coefficient de frottement entre le pieu et les grains affecte peu la pression exercée sur la pointe. C'est principalement le cas lorsque le pieu est en faible profondeur et cela s'explique par le fait que ce paramètre n'est pas une caractéristique intrinsèque au sol. Or, comme décrit dans la section 5.2, la résistance de la pointe est calculée à partir de la force verticale exercée par le sol sur le pieu. La rugosité de la paroi influe directement sur la composante horizontale de cette force qui n'est donc pas prise en compte dans ce calcul.

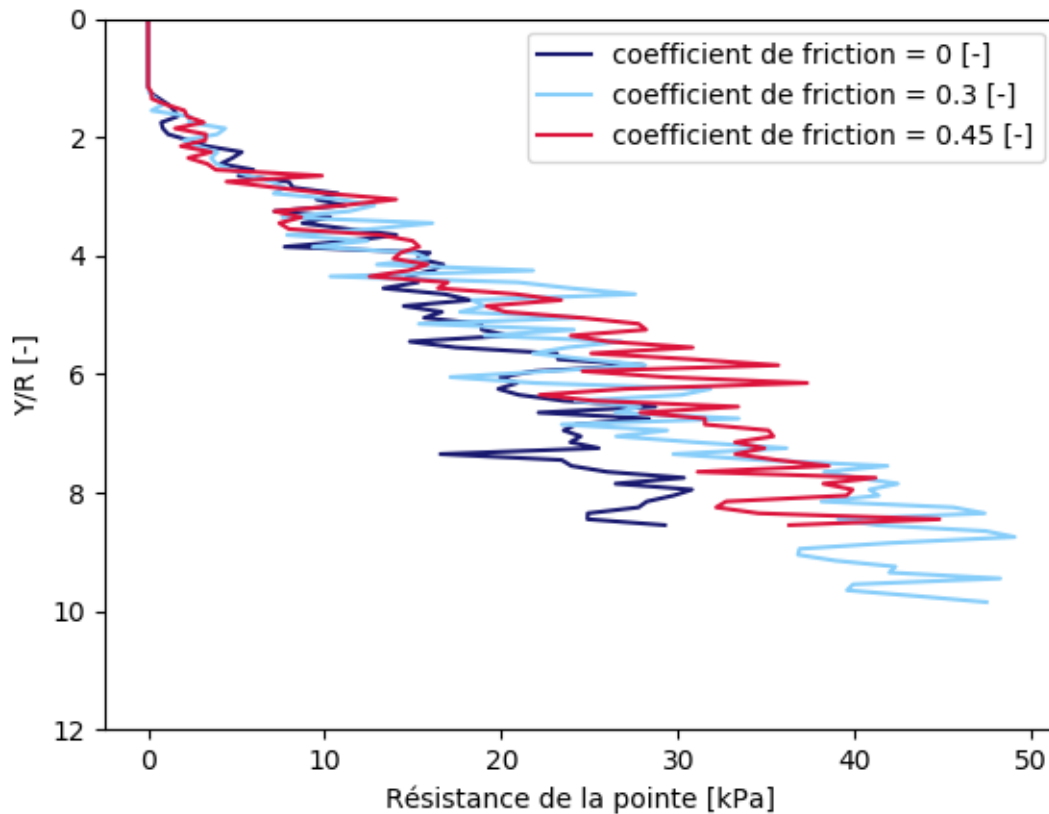


FIGURE 6.18 – Résistance de la pointe en fonction du coefficient de frottement

Cependant, la figure 6.18 montre que plus le pieu est enfoncé profondément, plus q_c va être influencé par μ . Ceci ne contredit pas l'étude préalablement citée car ces recherches portaient uniquement sur une faible profondeur (60 cm).

6.5.2 Réseau des forces de contact

L'augmentation de l'influence du coefficient de frottement au cours de la pénétration peut s'expliquer en analysant les figures 6.19 et 6.20. La valeur maximale de la force de contact est visiblement plus grande lorsque $\mu = 0.45$ [-]. C'est le résultat d'un tassement plus important du sol, lui même induit par la diminution de la vitesse des grains. Ce ralentissement est dû à la rugosité de la paroi du pieu.

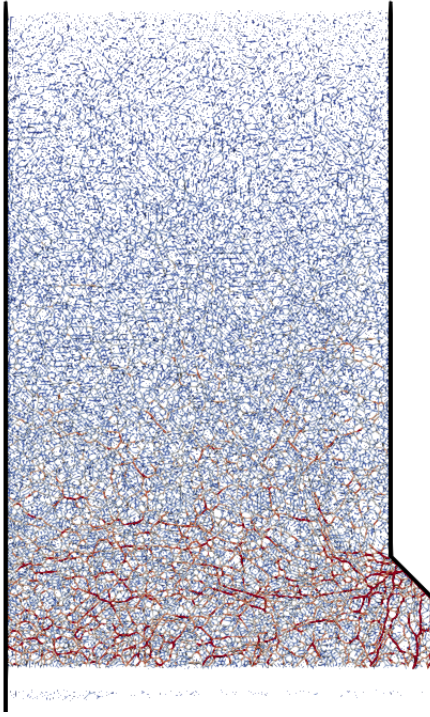


FIGURE 6.19 – Forces de contact avec $\mu = 0$

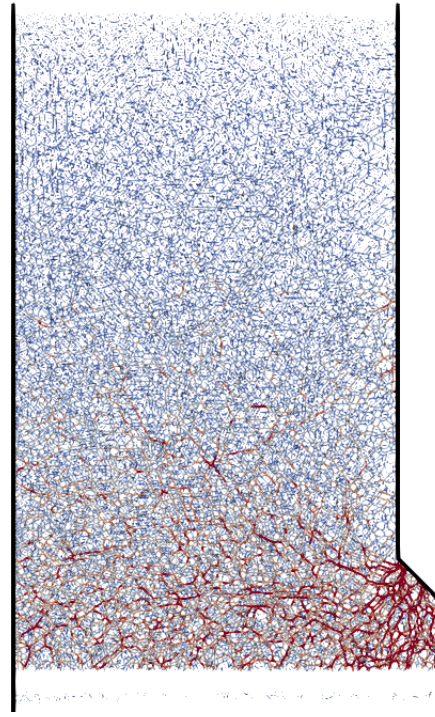


FIGURE 6.20 – Forces de contact avec $\mu = 0.45$ [-]

6.5.3 Mélange des particules

Les figures représentant le déplacement des particules ne seront pas affichées ici car celles-ci sont très semblables aux images 6.16 et 6.17 obtenues dans le cadre de l'analyse du coefficient de frottement entre particules.

Comme expliqué dans la section concernée, l'augmentation de μ interparticulaire va induire un plus grand mouvement rotationnel des grains tout en diminuant le glissement entre ceux-ci. À l'inverse, lorsque le coefficient représentant le frottement entre les grains et le pieu est augmenté, il amplifiera le phénomène de rupture à l'interface entre le sol et la paroi, induisant ainsi un glissement plus important entre les grains les plus proches du pieu.

6.6 Densité des particules

Toutes les analyses ont été faites avec une densité pour les particules de 1750 kg/m^3 , valeur comprise entre la densité d'un sable tassé (1682 kg/m^3) et celle d'un sable humide (1922 kg/m^3).

Cependant, la masse volumique étant un paramètre intrinsèque du sol, il peut être intéressant d'analyser la manière dont il va influencer la résistance de ce sol lors de la pénétration. Pour cela, le cas de base va être comparé à une simulation réalisée avec une densité de 2082 kg/m^3 pour les grains. Cette valeur est celle du sable compact humide, c'est-à-dire du sable tassé presque saturé en eau [43].

Les grains ayant une densité massique plus élevée seront plus lourds. Comme visible sur la figure 6.21, ils appliqueront une force plus grande sur le pieu. La résistance de la pointe sera donc augmentée.

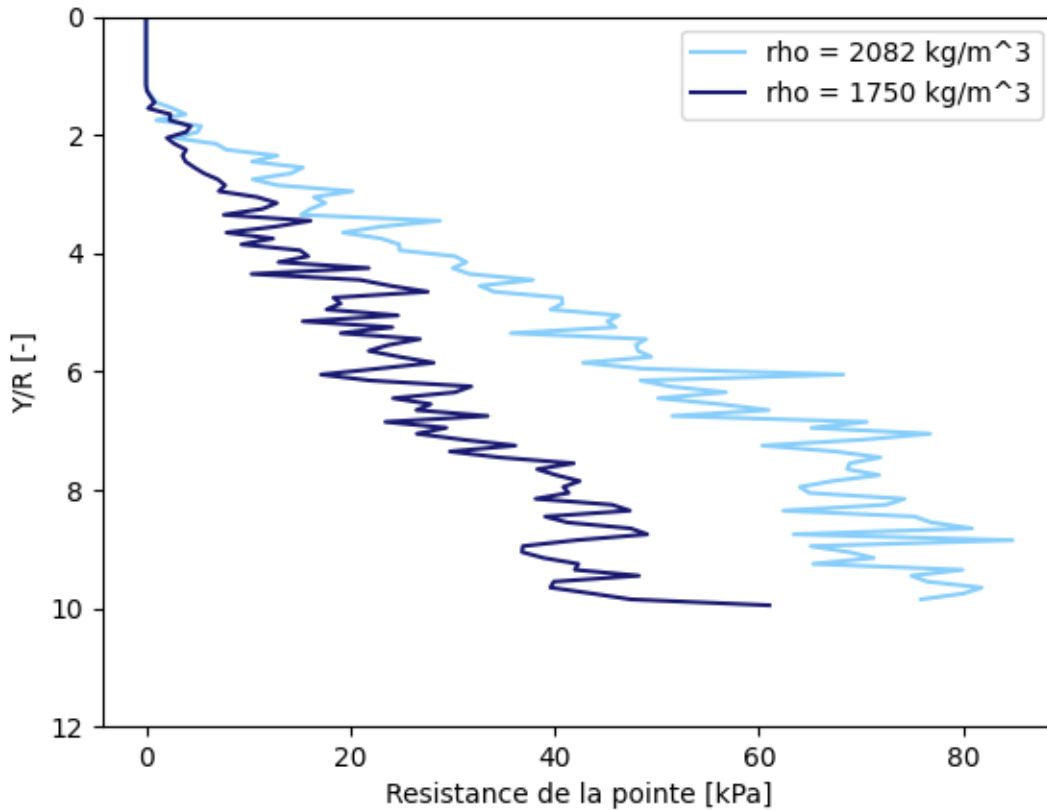


FIGURE 6.21 – Comparaison de la résistance de la pointe pour du sable humide compact avec notre cas de base

L'augmentation de la résistance de la pointe lorsque la densité augmente peut être expliquée physiquement. Elle peut être assimilée à la troisième loi de Newton abordant le principe d'action-réaction : "Si un corps exerce une force F sur un second corps, celui-ci exerce une force $-F$ sur le premier" [44]. En effet, la force appliquée sur le pieu dépend de la masse et de l'accélération ($F = m * a$). Pour une accélération identique, si la masse augmente, la force augmente et donc la force de réaction aussi. C'est pourquoi la résistance de la pointe est plus élevée.

Lorsqu'une densité pour le sol est mentionnée, c'est bien sa densité initiale. En effet, lors de la pénétration du pieu, le sol présent juste en-dessous de celui-ci va être comprimé et parfois même broyé, sa densité va donc changer aussi [45].

Chapitre 7

Conclusion

Le but de ce mémoire était de simuler l'enfoncement d'un pieu dans un matériau granulaire saturé. La base de ce modèle a pu être bâtie grâce au logiciel MigFlow. Ensuite, des spécifications ont été ajoutées au code afin de l'améliorer. Tout ceci a été réalisé pour approfondir la connaissance de l'influence de certains paramètres sur la résistance de la pointe du pieu, ainsi que le tassement du sol.

L'étude du cas de base a mis en avant certains aspects importants de l'enfoncement d'un pieu. La force de l'eau sur le pieu est négligeable par rapport à celle appliquée par les grains sur la paroi. De plus, il existe plusieurs méthodes pour pénétrer le sol. Les résultats pour le battage montrent qu'il est plus efficace d'utiliser une vitesse continue pour diminuer les contraintes sur le pieu et ainsi réduire le risque de rupture du matériau.

Les analyses paramétriques ont permis de tirer plusieurs conclusions quant à la validité de notre modèle. En premier lieu, le fluide joue un rôle important dans le modèle. Même si la force exercée par l'eau seule est négligeable par rapport à la force totale, la présence du fluide change l'amplitude de la pression subie par le pieu. En second lieu, la diminution de la vitesse de pénétration permettra de réduire la contrainte imposée à la paroi oblique du pieu. Troisièmement, l'analyse de la polydispersité des grains a permis de mettre en avant le phénomène de cristallisation. Ce dernier impacte grandement le comportement du sol en le rendant plus compact et donc plus difficile à pénétrer. Quatrièmement, bien que la variation des différents coefficients de frottement montre que ces derniers influent sur la façon dont le sol va se mouvoir, ils n'ont qu'un impact très modéré sur le niveau de difficulté d'enfoncement du pieu. Pour finir, le graphe de la résistance de la pointe obtenu pour des densités de particules différentes montre l'importance de la bonne estimation des paramètres intrinsèques des grains.

Des limites ont été rencontrées durant cette année écoulée. Tout d'abord, la puissance des ordinateurs ne permettait pas de faire des simulations avec un petit pas de temps et des grandes vitesses. Ensuite, le problème rencontré avec la vitesse d'injection (le

problème de bouchon) à entraîner des résultats incomplets pour certaines simulations ce qui a abouti à des graphes qui n'ont pas atteint les 5 [m] de profondeur.

Au vu des différents problèmes rencontrés et de la difficulté d'obtenir un sol bien tassé, il est probablement plus judicieux de simuler l'enfoncement de pieu en faisant bouger ce pieu et non les grains. Bien que cela implique l'utilisation d'un maillage non fixe, c'est à dire qu'il devra s'adapter au pieu en fonction de son déplacement, certains paramètres seront ainsi plus faciles à contrôler.

Ce mémoire nous a permis d'analyser les forces s'appliquant dans un sol et sur un pieu lors de la pénétration de ce dernier à l'aide de la DEM et de la FEM. Nous avons pu tirer des conclusions intéressantes sur leur comportement en fonction de différents paramètres (tels que la vitesse de pénétration ou le frottement). Tout cela permettra une meilleure compréhension de la mise en place de pieu d'éoliennes off-shore contribuant ainsi à améliorer l'efficacité des énergies renouvelables dans le monde.

Bibliographie

- [1] BOP. *La moitié de l'électricité belge de sources éolienne et solaire en 2030*. 2021. URL : <https://www.belgianoffshoreplatform.be/fr/news/la-moitie-de-lelectricite-belge-de-sources-eolienne-et-solaire-en-2030/>.
- [2] T EWING. *Offshore Wind – A Brief History*. 2019. URL : <https://www.marinetechnews.com/news/offshore-brief-history-590397>.
- [3] Mark RANDOLPH et Susan GOURVENEC. *Offshore geotechnical engineering*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN : Spon Press, 2011.
- [4] Société « Eoliennes en mer ILES D'YEU ET DE NOIRMOUTIER ». *Les différents types de fondations existants*. 2015. URL : https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-eolienmer-pyn/sites/debat.eolienmer_pyn/files/les_types_de_fondations_existants_0.pdf.
- [5] Ricardo G. ESPOSITO et al. “Multi-scale sensitivity analysis of pile installation using DEM.” In : *Comp. Part. Mech.* 5, 375–386 (2017).
- [6] Matthieu CONSTANT et AL. “Implementation of an unresolved stabilised FEM–DEM model to solve immersed granular flows”. In : *Computational Particle Mechanics* 6 (2018).
- [7] W. CLOUGH. “The finite element method after twenty-five years : a personal view”. In : *Computers & Structures vol. 12, pp. 361-370* (1980).
- [8] K.H. ROSCOE et J.B. BURLAND. “On the generalized stress-strain behaviour of wet clay”. In : eds : J.Heyman and F. A. Leckie, *Cambridge University Press*, pp. 535-609 (1968).
- [9] J.S. TEMPLETON. “Finite Element Analysis in Offshore Geotechnics – A Thirty-Year Retrospective”. In : *Simulia Customer Conference* (2012).
- [10] H. D. HIBBIT, P. V. MARCAL et J. R. RICE. “A finite element formulation for problems of large strain and large displacement”. In : *Solids Structures Vol. 6, pp. 1069-1086* (1970).
- [11] T WANG et AL. “A review of methods, applications and limitations for incorporating fluid flow in the discrete element method”. In : *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2021).

- [12] P.A. CUNDALL et O.D.L STRACK. “A discrete numerical model for granular assemblies”. In : *Journal of Geotechnique* 29, pp. 47-65 (1979).
- [13] M. TING et al. “Discrete Numerical Model for Soil Mechanics”. In : *Journal of Geotechnical Engineering* 115, pp. 379-398 (1989).
- [14] R. J. BATHURST et L. ROTHENBURG. “Micromechanical Aspects of Isotropic Granular Assemblies With Linear Contact Interactions”. In : *Journal of Applied Mechanics* 55, pp. 17-23 (1988).
- [15] K. IWASHITA et M. ODA. “Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM”. In : *Journal of Engineering Mechanics* 124, pp. 285-292 (1998).
- [16] Y TSUJI et AL. “Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe”. In : *Powder Technol.* 71, pp. 239-250 (1992).
- [17] J. ANDERSON. *Computational Fluid Dynamics : the Basics with Applications*. New York, USA : McGrawhill Inc., 1995.
- [18] W.K. LIU, S. LI et S.H. PARK. *Eighty Years of the Finite Element Method : Birth, Evolution, and Future*. 2021. URL : https://arxiv.org/pdf/2107.04960.pdf?fbclid=IwAR10KRUSWCW5oM7m_-sPkKBYZotAM_OFv1qH1syir9Fg0k0XHNIxX0DBEw.
- [19] J.T. ODEN et L.C. WELLFORD. “Analysis of flow of viscous fluids by the finite-element method”. In : *AIAA Journal* 10, pp. 1590-1599 (1972).
- [20] N.A. BROOKS et Hughes J.R.T. “Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations”. In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 32, pp. 199-259 (1982).
- [21] J. TAKEUCHI et Y. KOSUGI. “Neural network representation of finite element method”. In : *Neural Network* 7, pp.389395 (1994).
- [22] E. ONATE et al. “Advances in the DEM and coupled DEM and FEM techniques in non linear solid mechanics”. In : *Publication CIMNE No-416, May 2017* (2017).
- [23] B.K. COOK et al. “Direct simulation of particle-laden fluids”. In : *4th North American Rock Mechanics Symposium* (2000).
- [24] D. NOBLE et J. TORCZYNSKI. “A lattice Boltzmann method for partially saturated computational cells”. In : *International Journal of Modern Physics C vol. 9 n°8 : 1189-1201* (1998).
- [25] Marcus V. S. CASAGRANDE et al. “A hybrid FEM-DEM approach to the simulation of fluid flow laden with many particles”. In : *Computational particle mechanics, vol 4, issue 2* (2015).
- [26] Ana C.S. FERNANDES et al. “A coupled FEM-DEM method for the modeling of fluids laden with particles”. In : *Computational particle mechanics* (2020).

- [27] C. GEUZAIN et J.-F. REMACLE. “Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities”. In : *International Journal for Numerical Methods in Engineering* vol. 79, pp. 1309–1331 (2009).
- [28] V. LEGAT et J.F. REMACLE. “Delaunay Triangulations”. In : *Numerical Geometry (LMECA2170) slide 43* (2020).
- [29] Nathan COPPIN et AL. “Numerical analysis of the drag on a rigid body in an immersed granular flow”. In : *Computational Particle Mechanics* 6 (2021).
- [30] CY WEN et HY YU. “Chemical engineering progress symposium series.” In : *Mechanics of Fluidization* 62 :100–111 (1966).
- [31] Frédéric LEGRAND. *Euler implicite*. URL : <https://www.f-legrand.fr/scidoc/docimg/numerique/euler/implicite/implicite.html>.
- [32] M.J. JIANG, H.-S. YU et D. HARRIS. “Discrete element modelling of deep penetration in granular soils”. In : *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* vol. 30, pp. 335–361 (2006).
- [33] John ATKINSON. *Stress in the ground*. URL : <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/soilmech/stresses/stresses.htm>.
- [34] Nemat S. NASSER et Morteza MEHRABADI. “A Micromechanical Description of Granular Material Behavior”. In : *Journal of Applied Mechanics* vol. 48, pp. 339–344 (1981).
- [35] Patrick BERTHELOT et al. “Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d’éoliennes offshore”. In : *Groupe de Travail « Fondations d’éoliennes offshore »* (2019).
- [36] M. POURNAGHIAZAR, A.R. RUSSELL et N. KHALILI. “CPT in unsaturated soils using a new calibration chamber”. In : *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach* (2010).
- [37] Hassina ZEGHLACHE. *Mécanique du choc contre la paroi*. 2012. URL : http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M01_G03/co/Contenu31.html.
- [38] G. R. McDOWELL et M. D. BOLTON. “Effect of particle size distribution on pile tip resistance in calcareous sand in the geotechnical centrifuge”. In : *Granular Matter* 2, 179–187 (2000).
- [39] A. KHOSRAVI, A. MARTINEZ et J.T. DEJONG. “Discrete element model (DEM) simulations of cone penetration test (CPT) measurements and soil classification”. In : *Can. Geotech.* 57, pp. 1369–1387 (2020).
- [40] A. RASKIN. *Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques*. 2010. URL : <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap1/site/html/1.html>.
- [41] Z.X. YANG et AL. “On the influence of inter-particle friction and dilatancy in granular materials : a numerical analysis”. In : *Granular Matter* 14, pp. 433–447 (2012).

- [42] C. THORNTON. “Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media”. In : *Géotechnique* 50, pp 43-53 (2000).
- [43] Artisan BÉTON. *Densité du sable*. URL : <https://www.artisanbeton.fr/densite-sable.html#:~:text=Sable%5C%20humide%5C%3A%5C%201922%5C%20kg%5C%20%5C%2F%5C%20m3,humide%5C%3A%5C%202082%5C%20kg%5C%20%5C%2F%5C%20m3..>
- [44] Aurélio BAY. *Les lois de Newton*. 2010. URL : <https://lphe.epfl.ch/bay/cours/cours/p-2.pdf>.
- [45] Faisal I. SHALABI et Talat A. BADER. “Effect of Sand Densification Due to Pile-Driving on Pile Resistance”. In : *International Journal of Civil Engineering* (2014).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl