

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire De Fin D'études
En Vue De L'obtention Du Diplôme D'ingénieur Et Du Master En
Sciences De La Mer
Option : Ingénierie De La Gestion Et De La Protection Du Littoral

Thème :

**Dimensionnement d'un quai sur pieux -
Étude comparative des méthodes de calcul -
Cas du Marina Bay d'Alger**

Présenté par : **Kharroubi Chourouk Chaimaa**
Laghouti Mohammed

Soutenue publiquement, le 09 /07 /2025 devant le jury composé de :

A. DAHMANI Maitre de conférence classe "B" à l'École Nationale Supérieure **Président**
Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

L. FERNANE Maitre de conférence classe "B" à l'École Nationale Supérieure **Examineur**
Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

A. LAOUEDJ Maitre de conférence classe "B" à l'École Nationale Supérieure **Encaderant**
Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire .

Tout d'abord , ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas vu voir le jour sans l'aide de l'encadrement de M. LAOUEDJ, nous le remercions pour la qualité de son accompagnement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nous remercions également M.ZERROUKI, chef de département, pour son écoute et son soutien, ainsi que l'ensemble des enseignants de l'ENSSMAL qui ont contribué à notre formation et à notre développement académique.

nous souhaitons également remercier A. DAHMANI, président du jury, et M. FERNANE, examinateur qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Un grand merci à nous-mêmes pour la patience, la persévérance et l'investissement que nous avons su mobiliser tout au long de ce travail. Malgré les difficultés et les moments de doute, nous avons su garder le cap et donner le meilleur de nous-mêmes afin de mener ce projet à son terme.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à nos familles, nos amis pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel, sans lesquels ce parcours n'aurait pas été possible.

Dédicace De Chourouk

À ma chère mère, pour sa fatigue et sa force qui m'ont porté jusqu'ici.

*Pour ses prières, son amour qui m'ont soutenu chaque jour Je prie Dieu de me
permettre un jour de lui rendre tout ce qu'elle a fait pour moi.*

*À mes petites sœurs Menana, Meriem et Israe, pour leurs prières, leur affection et
leurs encouragements précieux, qui m'ont donné la force d'avancer avec confiance.*

Dédicace De Mohammed

Je dédie ce travail À : Mes très chers parents que dieu les protège

À très cher petite frère yanis

À ma sœur fatima , À mes amis Ibrahim ,Khaled,Ahmed et tout mes collègues

À Club FicFolk notamment mohammed, Youcef , Abderahmen .

Table des matière :

Introduction Générale	I
Chapitre I : Revue bibliographique	1
1. Généralités sur les ouvrages portuaires	2
1.1. Types de quais et leurs fonctions	2
1.2. Spécificités des quais sur pieux dans le contexte algérois	2
2. Fondations sur pieux	3
2.1. Types de pieux adaptés aux conditions algéroises :	3
3. Interaction Sol-Pieu.....	4
3.1. Comportement du Sol sous Charge	4
3.1.1. Influence des conditions de drainage	4
3.1.2. Courbes de mobilisation.....	5
3.2. Facteurs d'influence.....	5
3.2.1. Paramètres géotechniques	5
3.2.2. Paramètres géométriques.....	5
3.2.3. Conditions aux limites.....	5
4. Capacité axiale	5
4.1. Le mode de fonctionnement des pieux.....	6
4.1.1. La friction latérale entre les parois du pieu et le sol environnant :	6
4.1.2. Résistance en pointe	6
4.2. Évaluation de la capacité axiale des pieux	6
4.3. Notion de charge verticale critique	7
5. Déflexion d'un pieu chargé latéralement	8
6. Conception des pieux pour des charges latérales	9
6.1. Méthodes basées sur la théorie de l'élasticité linéaire	9
6.2. Méthodes du module de réaction (théorie des courbes P-Y)	9
6.3. Approches de modélisation numérique	10
6.4. Méthodes empiriques	10

Normes et réglementations.....	10
6.5. Eurocode 7 (NF EN 1997)	10
6.6. Normes françaises	10
6.7. Normes internationales.....	11
6.8. Normes algériennes spécifiques	11
6.9. Réglementations environnementales.....	12
Chapitre II :Présentation du Projet et Étude Géotechnique.....	13
1. Présentation du Marina Baie d'Alger	14
1.1. Contexte du projet	14
1.1.1. Situation géographique de la zone d'étude :	14
1.1.2. Caractéristiques du quai sur pieux	15
1.2. Étude Géotechnique du Site	17
1.2.1. Programme de reconnaissance géotechnique	17
1.2.2. Caractérisation géotechnique	17
1.3. Modélisation géotechnique	22
2. Charges appliquées.....	24
2.1. Charges permanentes.....	24
2.2. Charges variables	25
2.3. Combinaisons de charges	25
3. Modélisation du terrain	25
3.1 Méthode de calcul.....	25
3.2. Modèle structural.....	26
4. Modélisation de la structure	26
4.1. Configuration générale	26
4.2. Caractéristiques géométriques.....	26
5. Dimensionnement géotechnique (ELU GEO)	27
5.1. Vérification de l'encastrement des pieux.....	27
5.1.1. Méthodologie de calcul	27

5.1.2.	Résistance par fût	27
5.1.3.	Résistance par pointe.....	29
5.2.	Vérification de la rupture horizontale du terrain	29
5.3.	Efforts de calcul et combinaisons	30
5.3.1.	Sollicitations de dimensionnement.....	30
5.3.2.	Combinaison quasi-permanente	30
6.	Conclusion.....	31
	Chapitre III:Méthodologie de calcul	32
1.	Généralités.....	33
1.1.	Caractéristique de notre cas d'étude.....	33
1.1.1.	Les caractéristiques des couches du sol	33
1.1.2.	Les caractéristiques des pieux	34
1.1.3.	Charges permanentes.....	34
2.	Capacité axiale	35
2.1.	Évaluation de la capacité portante verticale d'un pieu isolé	35
2.1.1.	Les méthodes empiriques	35
2.1.2.	Les méthodes de la théorie d'élasticité	35
2.1.3.	Les méthodes numériques	36
2.1.4.	Les méthodes des courbes t-z, q-z ou théorie de transfert des charges.....	36
2.2.	Présentation du logiciel APILE (2023.10.5)	37
2.2.1.	Fonctionnalités principales.....	37
2.2.2.	Résultats obtenus.....	40
3.	Conception des pieux pour des charges latérales	41
3.1.	Méthode au module de réaction (ou des courbes P-Y)	41
3.1.1.	Présentation du logiciel LPILE (2018.10.04).....	41
3.2.	Méthodes numériques	49
3.2.1.	Comportement de deux pieux	49
3.2.2.	Comportement des groupes de pieux	54

4. Comparaison des méthodes	60
4.1. Comparaison des méthodes selon les critères d'analyse	60
4.2. Avantages et limites de chaque méthode	61
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	62
1. Résultats et discussion.....	63
1.1. Comparaison entre la méthode	63
1.1.1. Comparaison des résultat des courbe P-Y :.....	63
1.1.2. Comparaison entre PLAXIS 2D/3D.....	74
1.2. Comparaison des méthodes selon la dimension (2D/3D) :	78
1.2.1. Le moment dans le Cas d'un pieu avant :	78
1.2.2. Le moment dans le Cas d'un pieu arrière :.....	79
1.2.3. Résultats de la capacité portante (KN).....	80
Conclusion Générale	81

Liste des figures :

Figure 1: Photo d'un pieux forcés(DE WAAL SOLID FOUNDATIONS).....	3
Figure 2: Photo d'un pieux Battus.....	4
Figure 3: Schéma d'équilibre du pieu sous une force verticale.....	7
Figure 4: Comportement schématique d'un pieu long et flexible.....	9
Figure 5: Flexion d'un pieu sous efforts horizontaux	9
Figure 6: Carte satellitaire représentative de la localisation géographique de la Marina Bay dans la Baie d'Alger (Base Map en ligne, 2022).....	15
Figure 7: Coupe type quai sur pieux adossé à la digue (BTP Infraestructuras, 2018).....	16
Figure 8: Sondage et essais CPT, le jour 26 février 2017 (BTP Infraestructuras, 2018).....	20
Figure 9: Essai CPT-01 et CPT-02 (BTP Infraestructuras,2018).....	20
Figure 10: Description du sondage SC05 (BTP Infraestructuras, 2018).	21
Figure 11: Schéma du modèle analytique de calcul employé pour le quai intérieur (BTP Infraestructuras, 2018).	26
Figure 12: Déformée de la structure des quais intérieurs. CT1-STR3(BTP Infraestructuras, 2018).....	30
Figure 13: Moments de flexion en direction transversale. CT1-STR3 (BTP Infraestructuras, 2018).....	31
Figure 14: Moments de flexion en direction longitudinale. CT1-STR3 (BTP Infraestructuras, 2018).....	31
Figure 15: Data menu de logiciel APILE.....	37
Figure 16: Data-pile materiel	39
Figure 17: Data-circular section pile.....	39
Figure 18: Résultat de la structure sol-Pieu avant et sol-pieu arrière	40
Figure 19: Fenêtre principale du logiciel LPILE	42
Figure 20: Data-menu-propriétés du sol.....	42
Figure 21: La forme caractéristique de la courbe P-Y sous chargement statique dans le sable (d'après REESE et al.1974).....	44
Figure 22: La courbe P-Y selon la méthode de Murchison et O'Neill pour un sable sous chargement statique.....	46
Figure 23: Le profil du sol-Pieu avant et sol-Pieu arrière (LPILE).....	48
Figure 24: L'interface du logiciel Plaxis 2D	50
Figure 25: Le maillage d'éléments finis dans la structure sol-Pieux	50
Figure 26: Les conditions d'écoulement de notre structure.....	51

Figure 27: L'affichage de résultats appliquées sur les deux pieux (PLAXIS 2D)	52
Figure 28: L'interface du logiciel GROUP 2D.	53
Figure 29: Data-menu-propriétés du sol	53
Figure 30: Le profil du sol-Pieux (GROUP 2D).....	54
Figure 31: : L'interface du logiciel Plaxis 3D.....	55
Figure 32: Le maillage d'éléments finis dans la structure sol-Pieux	56
Figure 33: Les conditions d'écoulement de notre structure.....	56
Figure 34: L'affichage de résultats appliquées sur les pieux avec PLAXIS 3D	57
Figure 35: L'interface du logiciel GROUP 3D.	58
Figure 36: Le profil du sol-Pieux GROUP 3D.....	59
Figure 37: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE.....	65
Figure 38: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE.....	65
Figure 39: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE	66
Figure 40: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode O'NEILL	67
Figure 41: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode O'NEILL	68
Figure 42: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de O'NEILL	68
Figure 43: Graphe de la comparaison de Moment des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE.....	70
Figure 44: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE	70
Figure 45: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE	71
Figure 46: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode O'NEILL	73
Figure 47: Graphe de la comparaison de moment des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode O'NEILL	73
Figure 48: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE.....	74

Figure 49: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	74
Figure 50: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	75
Figure 51: Graphe de la comparaison d'Effort tranchant des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	75
Figure 52: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	76
Figure 53: Graphe de la comparaison de moment des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	76
Figure 54: Graphe de la comparaison d'Effort tranchant des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	77
Figure 55: Graphe de comparaison des résultats du moment des logiciels (SAP ,PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)	78
Figure 56: Graphe de comparaison des résultats du moment des logiciels (SAP ,PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)	79
Figure 57: L'histogramme présente la capacité portante (kN) de (SAP,GROUP,SAP).....	81

Liste des tableaux

Tableau 1: Résultats de l'essai SPT dans le sondage SC05 (BTP Infraestructuras, 2018).	18
Tableau 2: Résultats de l'essai CPT-1 (BTP Infraestructuras, 2018).....	19
Tableau 3: Résultats de l'essai CPT-2 (BTP Infraestructuras 2018),.....	19
Tableau 4: Valeurs de constante du quai dans le pieu arrière	23
Tableau 5: Valeurs de constante du quai dans le pieu avant.....	24
Tableau 6: Résistance par fût en fonction du pieu et de la condition de travail (BTP Infraestructuras, 2018).	29
Tableau 7: Résistance par pointe en fonction du pieu et de la condition de travail (BTP Infraestructuras,2018)	29
Tableau 8: Efforts maximaux M, H, sur la tête des pieux (GEO) (BTP Infraestructuras, 2018) .	30
Tableau 9: Efforts maximaux M, H, sur la tête des pieux (GEO) (BTP Infraestructuras, 2018).	34
Tableau 10: Les valeurs représentatives pour les sables.....	43
Tableau 11: Les valeurs maximal pour chaque pieux arrière dans chaque logiciel avec la méthode REESE.....	64
Tableau 12: Les valeurs maximal de chaque pieux avant avec chaque logiciel avec la méthode O'NEILL.....	67
Tableau 13: Les valeurs maximal pour chaque pieux arrière dans chaque logiciel avec la méthode REESE.....	69
Tableau 14: Les valeurs maximal dans chaque pieux arrière pour chaque logiciel avec la méthode O'NEILL	72
Tableau 15: Les valeurs maximal dans chaque pieux arrière pour chaque logiciel avec la méthode O'NEILL	72
Tableau 16: Analyse comparative de proximité entre PLAXIS 3D et GROUP 3D par rapport à SAP2000.....	80

Liste des équations

(1) Capacité axiale totale de support	7
(2) La charge verticale limite	7
(3) La charge critique d'un pieux ne refoulant pas le sol	8
(4) La charge critique d'un pieux refoulant le sol	8
(5) La formule de Schmertmann, ROM 05-05 SPT	17
(6) Formule de Robertson, ROM 05-05 CPT	19
(7) Formule de Meyerhoff Densité relative	22
(8) Poussée des Terres Théorie de Rankine	24
(9) Moment de remblaye	24
(10) Coefficient de sécurité	27
(11) La résistance par fût	27
(12) La résistance par fût Conditions non drainées	28
(13) La résistance par fût Conditions drainées	28
(14) La résistance par pointe	29
(15) Facteur de la capacité portante	36
(16) Facteur de correction de diamètre du pieu	36
(17) Frottement latéral	36
(18) Pression verticale	36
(19) Tranche infinitésimale du pieu	37
(20) Constante de décroissance	41
(21) Déplacement vertical Tassement	43
(22) Réaction de déplacement latéral	44
(23) La première portion de la courbe P-Y REESE	44
(24) La deuxième portion de la courbe P-Y REESE	44
(25) Le pouvoir de la section parabolique REESE	44
(26) Le coefficient \bar{C} REESE	44
(27) Le point j P REESE	44
(28) Le point j Y REESE	45
(29) La troisième portion de la courbe P-Y REESE	45
(30) La réaction latérale du sol O'NEILL	46
(31) Facteur d'un chargement continu statique O'NEILL	46
(32) La résistance ultime d'un sable O'NEILL	46
(33) Coefficient C_1	46

(34) Coefficient C_2	46
(35) La capacité portante globale	55

Introduction Générale

Les infrastructures portuaires jouent un rôle crucial dans le développement économique et social d'un pays ou d'une région. Elles facilitent le commerce international, soutiennent les industries locales et contribuent à la croissance des villes côtières. Parmi les éléments clés de ces infrastructures, les ouvrages portuaires, tels que les quais, les terminaux et les digues, nécessitent des fondations solides pour assurer leur stabilité et leur durabilité. Dans ce contexte, les pieux sont largement utilisés comme éléments de fondation, en particulier dans les zones où le sol présente une faible portance.

L'étude du comportement des pieux dans les ouvrages portuaires implique une analyse approfondie de l'interaction entre le sol et les pieux. Cette interaction est influencée par plusieurs facteurs, notamment les propriétés du sol, les conditions de contact entre le pieu et le sol, et les charges appliquées. Pour garantir la stabilité des structures portuaires, il est essentiel de mener des études géotechniques rigoureuses, qui incluent la modélisation de l'interaction sol-pieux. Cette modélisation permet de prévoir le comportement des pieux sous différentes conditions de charge et de sol, et ainsi de concevoir des ouvrages sûrs et durables.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour étudier l'interaction sol-pieux, allant des approches théoriques, comme la méthode des éléments finis (**Zienkiewicz & Taylor,2000**), aux méthodes expérimentales, telles que les méthodes de réaction basse sur le modèle de winkler. Les outils numériques, tels que PLAXIS (**Brinkgreve et al.,2020**), offrent également des solutions efficaces pour simuler et analyser le comportement des pieux dans des conditions complexes par des méthode des éléments finis. Et Group (**Reese et al.,2004**) qui basse sur les méthodes de réaction des ressorts.

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser le logiciel PLAXIS et GROUP pour modéliser l'interaction sol-pieux dans le contexte spécifique du quai du port de Marina Baie Alger. Cette modélisation nous permettra de simuler le comportement des pieux sous différentes charges et de proposer des solutions optimisées pour la conception et la construction de l'ouvrage.

L'objectif de ce travail est de modéliser l'interaction sol-pieu dans le cadre d'un ouvrage portuaire, en prenant comme étude de cas le quai du port de Marina Baie Alger. Cette modélisation permettra de simuler le comportement du sol et des pieux dans un environnement marin, en tenant compte des charges verticales et horizontales auxquelles ils sont soumis. Pour atteindre cet objectif, le travail est structuré en plusieurs chapitres.

Chapitre 1 constitue une revue bibliographique, permettant de rassembler et d'analyser les connaissances existantes sur les ouvrages portuaires, avec un accent particulier sur les quais sur pieux et leurs fondations.

Chapitre 2 est consacré à la présentation du projet et à l'étude géotechnique du site, éléments essentiels pour la conception et le dimensionnement des pieux.

Chapitre 3 expose la méthodologie de calcul, en comparant deux approches : la méthode semi-empirique des courbes P-Y (**Matlock, 1970 ; Reese et al., 1974**) par GROUP et la modélisation par éléments finis sous PLAXIS, afin d'évaluer leur précision et leur pertinence pour le projet.

Le Chapitre 4 analyse les résultats obtenus, notamment en termes de capacité portante, de déformations et de tassements, et vérifie leur conformité aux normes en vigueur.

À travers cette étude, nous visons à contribuer à une meilleure compréhension de l'interaction sol-pieux dans les ouvrages portuaires, en proposant des solutions techniques adaptées aux conditions spécifiques du port de Marina Baie Alger.

Chapitre I : Revue bibliographique

1. Généralités sur les ouvrages portuaires

1.1. Les quais :

Les quais sont des infrastructures portuaires construites le long d'un plan d'eau (mer, fleuve, rivière), permettant l'amarrage des navires pour le chargement des marchandises ou l'embarquement et le débarquement des passagers.

1.1.1. Types de quais et leurs fonctions

Les ouvrages portuaires constituent l'interface essentielle entre les activités terrestres et maritimes. Ils assurent non seulement l'accostage et l'amarrage des navires, mais aussi le transfert des marchandises, des passagers et des équipements entre la mer et la terre ferme. Les quais jouent ainsi un rôle stratégique dans le fonctionnement et la performance des infrastructures portuaires.

Dans le contexte méditerranéen, et plus particulièrement pour la Marina Bay d'Alger, plusieurs types de quais sont couramment utilisés :

- **Quais-poids** : Structures massives en béton ou en enrochements, adaptées aux sols de fondation de bonne portance. Leur fonction principale est de résister par leur propre poids aux poussées exercées par les terres et les charges d'exploitation. Cependant, dans le contexte géologique d'Alger, caractérisé par la présence de vases molles quaternaires sur plusieurs mètres d'épaisseur, ces solutions présentent des limitations importantes (**Amar, 1999**).
- **Quais sur pieux** : Solution privilégiée pour la Marina Bay d'Alger en raison des conditions géotechniques spécifiques. Ces structures remplissent la fonction de transmission des charges verticales et horizontales vers les couches profondes résistantes, en traversant les formations argileuses superficielles pour atteindre les terrains miocènes plus compacts (**Kerzazi et al., 2018**).
- **Rideaux de palplanches** : Moins adaptés aux conditions marines agitées de la baie d'Alger, ils remplissent surtout une fonction de soutènement et de protection. Ils sont parfois utilisés en combinaison avec d'autres systèmes pour des ouvrages secondaires ou provisoires.

1.1.2. Spécificités des quais sur pieux dans le contexte algérois

La Marina Bay d'Alger présente des particularités géotechniques remarquables qui influencent directement la conception des quais sur pieux :

- Stratigraphie complexe : Alternance de couches argileuses molles quaternaires (0-15m) et de formations miocènes indurées (**Belouahri et al., 2020**)
- Conditions sismiques : Zone de sismicité modérée (Zone IIa selon RPA 99/2003) nécessitant une prise en compte spécifique des sollicitations dynamiques
- Environnement marin agressif : Exposition aux chlorures et aux cycles d'humidification-séchage caractéristiques du climat méditerranéen

1.2. Fondations sur pieux

Les pieux sont des éléments de fondation profonde, généralement de forme allongée et cylindrique, en acier, béton armé ou bois, enfoncé ou foré dans le sol afin de transférer les charges d'une structure vers des couches de sol plus résistantes situées en profondeur.

1.2.1. Types de pieux adaptés aux conditions algéroises :

Pieux forés : Solution préférentielle pour la Marina Bay d'Alger. Les pieux de diamètre 800-1200mm, réalisés à la tarière creuse, permettent de traverser efficacement les couches argileuses



Figure 1: Photo d'un pieux forés (DE WAAL SOLID FOUNDATIONS)

molles. L'utilisation de bentonite pour le maintien des parois lors du forage s'avère nécessaire dans les formations instables (**Mebarki et al., 2019**).

Pieux battus : Moins utilisés en raison des risques de refoulement des argiles molles et des nuisances sonores dans un environnement urbain dense. Cependant, les pieux métalliques battus H340 restent employés pour certains ouvrages secondaires.



Figure 2: Photo d'un pieux Battus (DE WAAL SOLID FOUNDATIONS)

Micropieux : Solution complémentaire pour la reprise en sous-œuvre d'ouvrages existants ou pour des zones d'accès difficile. Les micropieux de diamètre 200-300mm, injectés sous pression, présentent l'avantage de limiter les désordres sur les structures adjacentes.

2. Interaction Sol-Pieu

2.1.Comportement du Sol sous Charge

Le comportement du sol sous charge constitue un aspect fondamental de la géotechnique des fondations profondes. Les sollicitations transmises par les pieux au sol environnant génèrent des déformations et des contraintes qui gouvernent la capacité portante et la stabilité d'ouvrage. Cette interaction dépend fondamentalement des propriétés mécaniques du sol et des caractéristiques géométriques du pieu.

2.1.1. Influence des conditions de drainage

Le comportement du sol sous charge dépend fortement des conditions de drainage (**Lambe & Whitman, 1979**) :

- **Conditions drainées** : Applicable aux sols granulaires et aux chargements lents, où la dissipation des surpressions interstitielles est possible.
- **Conditions non drainées** : Caractéristique des sols cohérents ou des chargements rapides (séisme), où les surpressions interstitielles ne peuvent se dissiper.

2.1.2. Courbes de mobilisation

La mobilisation progressive de la résistance suit des lois non-linéaires caractérisées par :

- Une phase élastique initiale à faibles déformations.
- Une phase de mobilisation progressive avec plastification locale.
- Un palier plastique correspondant à la résistance limite.
- Le déplacement nécessaire à la mobilisation complète varie selon le type de sol :
 - Sols granulaires : 0,5 à 1,0% du diamètre pour le frottement, 5 à 10% pour la pointe.
 - Sols cohérents : 0,2 à 0,5% du diamètre pour le frottement, 10 à 20% pour la pointe.

2.2. Facteurs d'influence

L'interaction sol-pieu est influencée par plusieurs paramètres :

2.2.1. Paramètres géotechniques

- Densité relative et état de contrainte du sol.
- Angle de frottement interne et cohésion.
- Module de déformation et coefficient de Poisson.
- Conditions de drainage.

2.2.2. Paramètres géométriques

- Diamètre et élancement du pieu (L/D).
- Rugosité de surface et matériau constitutif.
- Mode de mise en œuvre (foré, battu, vissé).

2.2.3. Conditions aux limites

- Proximité d'autres pieux (effet de groupe).
- Stratification du sol.
- Conditions hydrauliques.

3. Capacité axiale

La conception des fondations sur pieux s'appuie sur les principes fondamentaux de la mécanique des structures et doit satisfaire aux exigences des états limites ultimes (ELU) et des

états limites de service (ELS). Cela implique que les charges de calcul ne doivent pas conduire à la rupture de la fondation ni générer des tassements ou déformations excessifs. La résistance au cisaillement du sol, en tant que paramètre géotechnique déterminant, joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la capacité portante et dans la stabilité globale de l'ouvrage.

3.1. Le mode de fonctionnement des pieux

La capacité de support des pieux dépend de deux facteurs : la friction latérale entre les parois du pieu et le sol environnant, et la résistance en pointe.

3.1.1. La friction latérale entre les parois du pieu et le sol environnant :

Dans des conditions géotechniques favorables, une longueur d'ancrage adéquate permet de mobiliser efficacement la résistance par frottement latéral. Cette dernière peut suffire à transmettre les efforts verticaux appliqués sans dépasser les limites admissibles de tassement. Dans ce cas, l'ancrage jusqu'au substratum n'est pas nécessaire. Ce type de fondation, qualifié de **pieu flottant** ou **pieu par frottement**, mise principalement sur la résistance au cisaillement développée le long de l'interface sol-pieu.

3.1.2. Résistance en pointe

La résistance en pointe devient dominante lorsque le pieu repose sur le substratum rocheux ou est ancré dans un sol dense à forte capacité portante. Ce mécanisme, propre aux **pieux de pointe**, permet une transmission directe des charges vers les couches profondes résistantes. Toutefois, lorsque la profondeur d'ancrage requise devient importante, cette solution peut entraîner des coûts élevés de réalisation, remettant en question sa faisabilité économique.

3.2. Évaluation de la capacité axiale des pieux

La conception des fondations sur pieux repose sur une analyse intégrée des paramètres géotechniques, structurels et économiques. Le choix du type de pieu dépend des conditions du site: profondeur et nature du substratum, stratigraphie, conditions hydrogéologiques, et coûts comparatifs des solutions.

Cette étude permet de définir le nombre de pieux, leurs dimensions et leur profondeur d'ancrage, notamment en cas d'encastrement requis dans le substratum rocheux.

Pour les pieux flottants, dont la portance dépend du frottement latéral, la détermination de la longueur optimale est complexe, en raison de la variabilité du sol avec la profondeur et de l'impact des techniques de mise en œuvre.

La conception théorique doit être validée sur chantier à travers des essais de contrôle (refus de battage, essais dynamiques ou statiques), qui permettent d’ajuster la longueur finale des pieux en fonction des performances réelles observées.

Comme nous l'expliquions au début du chapitre, les pieux développent leur capacité axiale totale de support (Q_{ult}) par la résistance en pointe (Q_p) et la résistance latérale totale (Q_s) :

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \tag{1}$$

La charge verticale limite Q_{ult} (ou capacité portante verticale) d’un pieu résulte de la mobilisation d’une pression verticale limite q_l en pointe, et des contraintes de frottement latéral limite $q_s(z)$ le long du fût du pieu, comme le schématise la **Figure 3** :

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s = Aq_l + P \int_0^D q_s(z) dz \tag{2}$$

P et A sont respectivement le périmètre du fût et l’aire de la section droite de la pointe du pieu.

Ces deux composantes de la capacité axiale dépendent, entre autres, de la résistance du sol au cisaillement et de la géométrie des pieux. L'apport de chacune des composantes à la capacité axiale totale est évaluée différemment, selon la nature du sol.

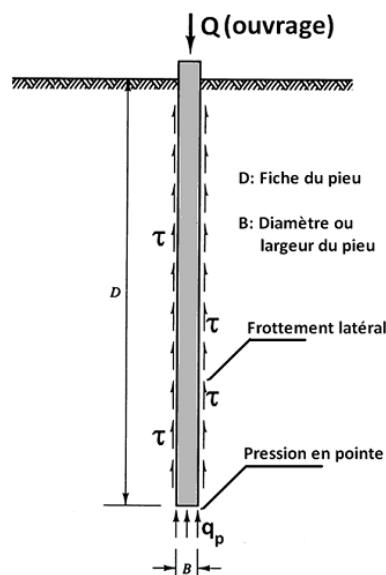


Figure 3: Schéma d'équilibre du pieu sous une force verticale

3.3. Notion de charge verticale critique

La charge critique Q_c , ou charge de fluage, correspond au seuil à partir duquel le pieu passe d’un comportement stable à une instabilité marquée par une accélération du tassement. Elle représente la limite entre le comportement élastique linéaire et non-linéaire sur la courbe charge-

tassement, Cette charge est généralement déterminée par interprétation des essais de chargement axial.

En l'absence d'essais in situ, Q_c peut être estimée à l'aide de formules empiriques, notamment celles proposées par le LCPC, différenciées selon la typologie de mise en œuvre des pieux :

-Pieux ne refoulant pas le sol :

$$Q_c = 0.5 Q_p + 0.7 Q_s \quad (3)$$

-Pieux refoulant le sol :

$$Q_c = 0.7 Q_p + 0.7 Q_s = 0.7 Q_{ult} \quad (4)$$

4. Déflexion d'un pieu chargé latéralement

Lorsqu'un pieu est soumis à une charge horizontale et/ou un moment fléchissant, il développe un déplacement latéral $u(z)$ et une rotation $u'(z)$ à chaque profondeur z , résultant respectivement du moment $M(z)$ et de l'effort tranchant $T(z)$. L'équilibre s'établit entre ces sollicitations et les réactions latérales du sol $P(z)$.

Cette interaction pieu-sol dépend de la rigidité relative du système et de la courbe P–Y, qui relie le déplacement latéral du pieu à la réaction du sol. Le modèle constitutif le plus courant est élastoplastique, avec une réponse linéaire initiale suivie d'une saturation vers la résistance passive du sol.

L'évaluation expérimentale du comportement en flexion des pieux se fait par des essais de chargement horizontal à pleine échelle.

Ceux-ci permettent d'obtenir les profils de déplacement, moment, effort tranchant et réaction latérale à partir de mesures instrumentées.

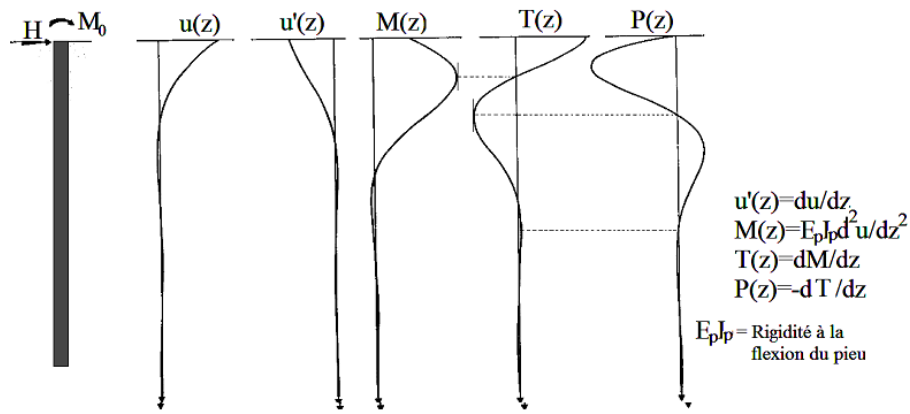


Figure 4: Comportement schématique d'un pieu long et flexible.

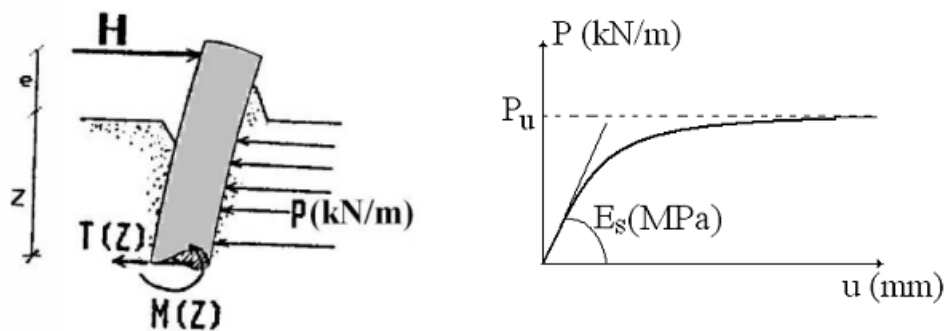


Figure 5: Flexion d'un pieu sous efforts horizontaux .

5. Conception des pieux pour des charges latérales

L'analyse du comportement des pieux sous sollicitations latérales peut être abordée selon quatre grandes familles de méthodes :

5.1.Méthodes basées sur la théorie de l'élasticité linéaire

Ces approches idéalisent le sol comme un milieu élastique semi-infini réagissant linéairement aux déplacements du pieu. Elles permettent une résolution analytique dans des cas simples, mais restent limitées face aux conditions réelles non linéaires du sol.

5.2.Méthodes du module de réaction (théorie des courbes P-Y)

La **méthode des courbes P-Y** est une approche semi-empirique utilisée pour analyser le comportement des pieux soumis à des charges latérales. Elle consiste à représenter la relation non linéaire entre :

- **P** : la réaction unitaire du sol (force par unité de longueur du pieu),
- **Y** : le déplacement latéral du pieu à la profondeur considérée.

Ces méthodes modélisent l'interaction pieu-sol par une série de ressorts latéraux dont la rigidité varie avec le déplacement, représentée par des courbes P-Y. Elles permettent de capter le comportement non linéaire du sol et sont largement utilisées dans les logiciels spécialisés comme **LPILE** ou **GROUP**.

5.3.Approches de modélisation numérique

Les méthodes par éléments finis ou différences finies permettent une modélisation avancée en 2D ou 3D, intégrant les non-linéarités du sol, les effets de groupe, les charges cycliques et les conditions de bord complexes. Des logiciels comme **PLAXIS** ou **FLAC** en sont des exemples.

5.4.Méthodes empiriques

Issues de résultats expérimentaux ou d'observations in situ, ces méthodes proposent des formules simplifiées pour estimer la déflexion ou la capacité latérale, principalement utilisées en phase préliminaire ou lorsque les données géotechniques sont limitées.

6. Normes et réglementations

6.1.Eurocode 7 (NF EN 1997)

- **Approches de calcul :**
 - **Approche 1 :** Application des facteurs aux actions et résistances.
 - **Approche 2 :** Application des facteurs aux actions et sol.
 - **Approche 3 :** Application des facteurs aux effets des actions.
- **États limites considérés :**
 - ELU : stabilité, résistance, soulèvement.
 - ELS : déplacements, vibrations.
- **Coefficients partiels types :**
 - Actions permanentes : $\gamma_G = 1,35$.
 - Actions variables : $\gamma_Q = 1,50$.
 - Résistance de pieu : $\gamma_R = 1,25$ à $1,60$.

6.2.Normes françaises

- **NF P94-262 (2012) :** Fondations profondes.

- Méthodes de calcul de la portance.
- Facteurs de corrélation avec les essais.
- Contrôles et épreuves.
- **DTU 13.2** : Travaux de fondations profondes
 - Règles de mise en œuvre.
 - Contrôles de qualité.
 - Réception des travaux.

6.3. Normes internationales

- **API RP2A** : Structures offshore
 - Courbes P-Y pour charges cycliques.
 - Prise en compte de l'environnement marin.
 - Facteurs de sécurité majorés.
- **FHWA (USA)** : Ponts et ouvrages d'art
 - Méthodes LRFD (Load and Resistance Factor Design).
 - Intégration de l'analyse probabiliste.
 - Recommandations pour les essais.

6.4. Normes algériennes spécifiques

- **RPA 99/2003 (version 2003)** :
 - Zone sismique IIa ($a = 0,15g$) pour la région d'Alger.
 - Facteur de site $S = 1,2$ à $1,4$ selon la nature des sols de fondation.
 - Coefficient de comportement $q = 1,5$ pour les structures de quais.
- **DTR BC 2.33.2 (Méthodes de calcul des fondations profondes)** :
 - Adaptations des méthodes de calcul aux sols algériens.
 - Coefficients de sécurité spécifiques : $\gamma = 2,0$ en statique, $\gamma = 1,5$ en sismique.
 - Prescriptions pour l'exécution et le contrôle.

6.5.Réglémentations environnementales

- **Protection du littoral** : Loi 02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral, imposant des études d'impact environnemental approfondies.

Qualité des matériaux : Utilisation de bétons spéciaux résistant aux chlorures (classes d'exposition XS2 et XS3 selon EN 206), avec des rapports E/C $\leq 0,45$ et des additions pouzzolaniques.

Chapitre II :Présentation du Projet et Étude Géotechnique

1. Présentation du Marina Baie d'Alger

1.1. Contexte du projet

Le projet Marina Baie d'Alger s'inscrit dans le cadre du développement des infrastructures portuaires algériennes, visant à moderniser et étendre les capacités d'accueil des embarcations de plaisance dans la région d'Alger. Ce projet stratégique répond aux exigences croissantes du tourisme nautique en Méditerranée et à la nécessité de diversifier l'économie nationale (**Ministère des Travaux Publics et des Transports, 2018**).

La marina est conçue pour accueillir des embarcations de diverses tailles, avec une capacité d'accostage optimisée pour les navires de plaisance jusqu'à 70 mètres de longueur. L'implantation géographique du projet tire parti de la protection naturelle de la baie d'Alger, tout en nécessitant des ouvrages de protection complémentaires pour assurer la sécurité des embarcations (**BTP Infrastructures, 2018**).

1.1.1. Situation géographique de la zone d'étude :

- Localisation administrative et urbaine

Le site d'étude est implanté sur le territoire de la commune de Mohammadia. Il se positionne entre deux repères urbains majeurs : l'hôtel Hilton situé à l'est et le centre commercial Ardis localisé à l'ouest.

- Délimitation géographique

La zone d'étude présente les limites naturelles et artificielles suivantes :

Nord : mer Méditerranée.

Sud : route nationale n° 05.

Est : camp militaire du Lido.

Ouest : Oued El-Harrach, à proximité de son embouchure (distance : 1 500 m).

- Caractéristiques du littoral

La Marina Baie développe un linéaire côtier d'environ 800 mètres (voir Figure 6).

- **Coordonnées géographiques** : Le site est référencé selon le système de coordonnées UTM WGS84 zone 31N :

- **Latitude** : comprise entre 36°44'30"N et 36°44'43,94"N

- **Longitude** : comprise entre 03°08'45"E et 03°09'20,34"E



Figure 6: Carte satellitaire représentative de la localisation géographique de la Marina Bay dans la Baie d'Alger (Base Map en ligne, 2022).

1.1.2. Caractéristiques du quai sur pieux

Le système de quai sur pieux adopté pour le Marina Baie d'Alger présente une configuration technique spécifique adaptée aux conditions locales :

- **Configuration géométrique :**
 - Deux files de pieux avec espacement transversal variable : 7,25 m pour les quais adossés à la digue de protection et 5,00 m pour les autres sections.
 - Espacement longitudinal constant de 9,00 m entre les pieux.
 - Pieux circulaires en acier S290JR de diamètre 813 mm et épaisseur 12,7 mm.
 - Fondation différentielle : pieu côté mer à la cote -12,50 m, pieu côté terre à -11,00 m.
- **Structure de couronnement :**
 - Poutres longitudinales en béton armé HA-35 : 1,0 x 0,95 m côté mer, 0,7 x 0,95 m côté terre
 - Dalle de couronnement de 0,35 m d'épaisseur à la cote +1,80 m

- Protection du talus par enrochement de 100-300 kg sur 0,75 m d'épaisseur (Eurocode 7, 2004 ; ROM 0.5-05, 2005)

Cette conception permet une flexibilité d'exploitation tout en assurant la résistance aux actions environnementales méditerranéennes.

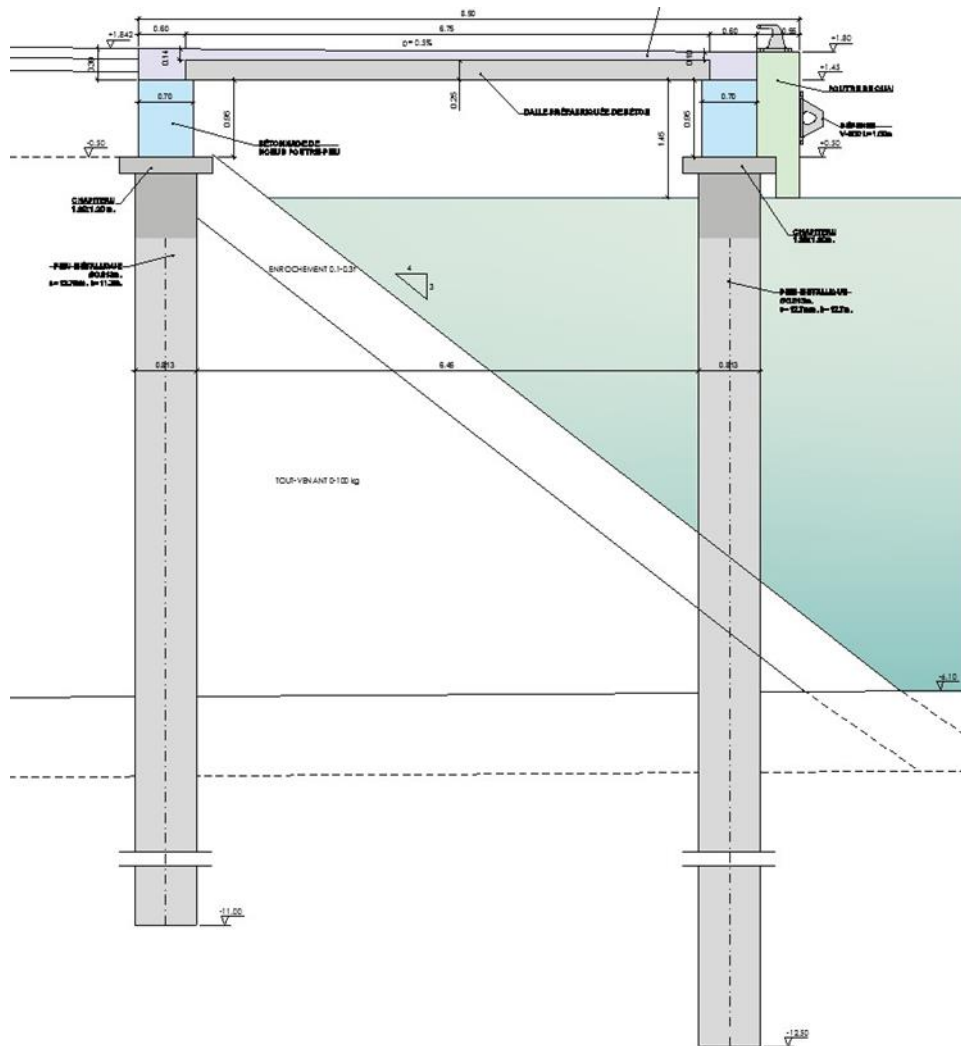


Figure 7: Coupe type quai sur pieux adossé à la digue (BTP Infraestructuras, 2018).

1.2. Étude Géotechnique du Site

1.2.1. Programme de reconnaissance géotechnique

La campagne de reconnaissance géotechnique réalisée pour le projet comprend :

- **Sondages et essais in-situ :**
 - Sondage carotté SC-05 avec récupération de témoins.
 - Essais de pénétration standard (SPT) à intervalles réguliers.
 - Profondeur d'investigation jusqu'à -14,37 m sous le niveau de référence.
- **Protocole d'essais :** Les essais SPT ont été réalisés selon la norme ASTM D1586-18, permettant l'évaluation de la densité relative et de l'angle de frottement interne des sols granulaires. Les essais CPT suivent la norme ISO 22476-1:2012 pour la caractérisation continue des propriétés mécaniques (ASTM, 2018 ; ISO, 2012).

1.2.2. Caractérisation géotechnique

- **Stratigraphie du site :** Le profil géotechnique révèle la présence homogène de sables fins à moyens, légèrement argileux, caractéristiques des formations littorales méditerranéennes. Cette formation présente une consistance variable de moyenne à dense avec la profondeur.
- **Paramètres géotechniques dérivés :**

1.2.2.1. Analyse des essais SPT

Le **SPT (Standard Penetration Test)** est un essai de pénétration dynamique in situ couramment utilisé en géotechnique. Il permet de relier directement les paramètres de résistance du sol (frottement latéral, résistance à la pointe) aux valeurs pratiques utilisées dans le calcul des pieux et pour estimer les pressions interstitielles dans certains contextes.

(formule de Schmertmann, ROM 05-05) :

$$\operatorname{tg} \phi = \left(\frac{N_{spt}}{12. v^2 + 20.3 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}} \right)^{0.34} \quad (5)$$

SONDEO SC 05						
h(m)	Clasificación	σ'_{vo} (t/m ²) SPT	SPT	SPT norm(N1)60	Dr	ϕ°
9.69(-8.24)	arena	10.688	15	15.51	61	37.16
11(-9.89)	arena	12.338	18	19.99	64	37.99
13.19(-11.75)	arena	14.198	23	27.41	69	39.4
15(-13.56)	arena	16.008	30	37.96	75	41.13
18.1(-16.66)	arena	19.108	38	52.53	80	42.14
20.80(-19.36)	arena	21.808	26	38.40	63	37.53
22.60(-21.16)	arena	23.608	22	33.80	56	35.4
MEDIA						38.68

Tableau 1: Résultats de l'essai SPT dans le sondage SC05 (BTP Infraestructuras, 2018).

- Résultats obtenus :

- Angle de frottement interne maximal : $\phi' = 42,14^{\circ}$
- Angle de frottement interne minimal : $\phi' = 35,04^{\circ}$
- Valeur moyenne représentative : $\phi' = 38,68^{\circ}$

1.2.2.2. Analyse des résultats des CPT

Le CPT (Cone Penetration Test), ou essai de pénétration au cône statique, est un essai in situ de reconnaissance géotechnique. Il permet d'estimer la résistance à la pointe et le frottement latéral

À partir de la résistance par pointe, l'angle de frottement interne est calculé selon la formule de Robertson conformément à la ROM 05 05 :

Dans les tableaux ci-dessous les résultats obtenus sont montrés :

CPT-1				
COTA	σ_{vo} (t/m ²)	σ'_{vo} (t/m ²)	q_p (t/m ²)	ϕ'
1.626	0.00	0.00		
-6.374	15.51	9.14	1700.00	43.86
-7.374	17.51	10.14	700.00	38.47
-8.374	19.51	11.14	1600.00	42.54
-9.374	21.51	12.14	900.00	38.39

CPT-1				
COTA	$\sigma_{vo}(t/m^2)$	$\sigma'_{vo}(t/m^2)$	$q_p(t/m^2)$	ϕ'
-10.374	23.51	13.14	1800.00	42.30
-11.374	25.51	14.14	1600.00	41.28
-12.374	27.51	15.14	1100.00	38.77
-13.374	29.51	16.14	2100.00	42.02
-14.374	31.51	17.14	3800.00	44.71
MEDIA				41.37

Tableau 2: Résultats de l'essai CPT-1 (BTP Infraestructuras, 2018).

CPT-2				
COTA	$\sigma_{vo}(t/m^2)$	$\sigma'_{vo}(t/m^2)$	$q_p(t/m^2)$	ϕ'
1.633	0.00	0.00		
-6.367	15.51	9.14	800.00	39.85
-7.367	17.51	10.14	1400.00	42.34
-8.367	19.51	11.14	1000.00	39.99
-9.367	21.51	12.14	1400.00	41.38
-10.367	23.51	13.14	1200.00	40.09
-11.367	25.51	14.14	1400.00	40.54
-12.367	27.51	15.14	1700.00	41.23
-13.367	29.51	16.14	1100.00	38.39
-14.367	31.50	17.14	2000.00	41.44
MEDIA				40.58

Tableau 3: Résultats de l'essai CPT-2 (BTP Infraestructuras 2018),

Analyse des essais CPT (formule de Robertson, ROM 05-05) :

$$\tan\phi' = 0.10 + 0.38 \log \left(\frac{q_c - \sigma'_{v_0}}{\sigma'_{v_0}} \right) \quad (6)$$

Résultats consolidés :

- CPT-1 : ϕ' moyen = 41,37°
- CPT-2 : ϕ' moyen = 40,58°
- Valeur de calcul retenue : $\phi' = 37,50^\circ$ (approche conservatrice)



Figure 8: Sondage et essais CPT, le jour 26 février 2017 (BTP Infraestructuras, 2018).

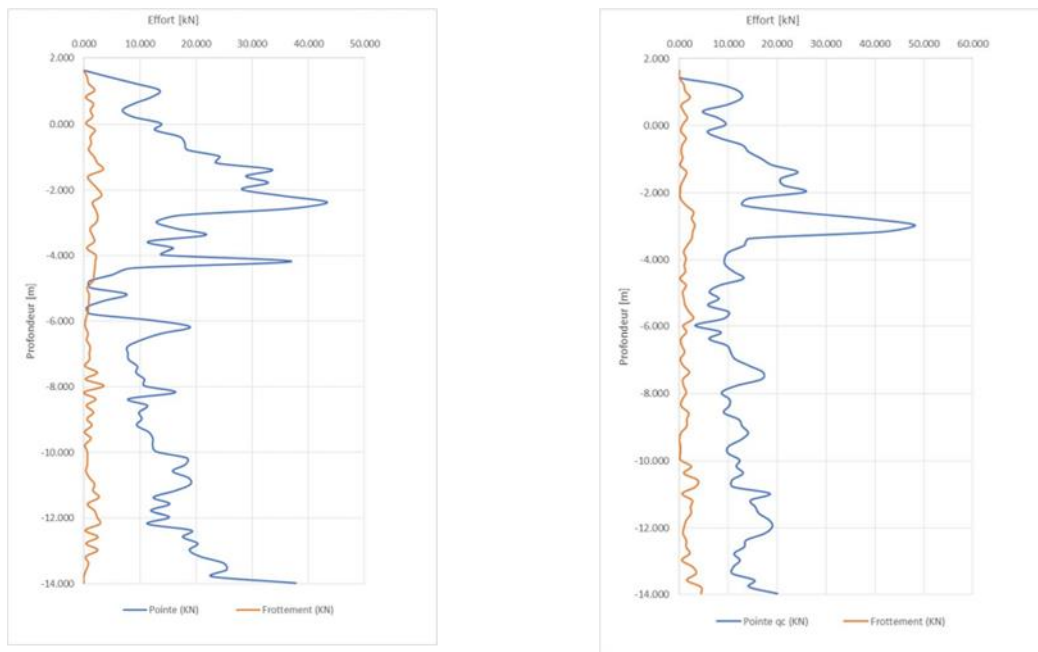


Figure 9: Essai CPT-01 et CPT-02 (BTP Infraestructuras,2018)

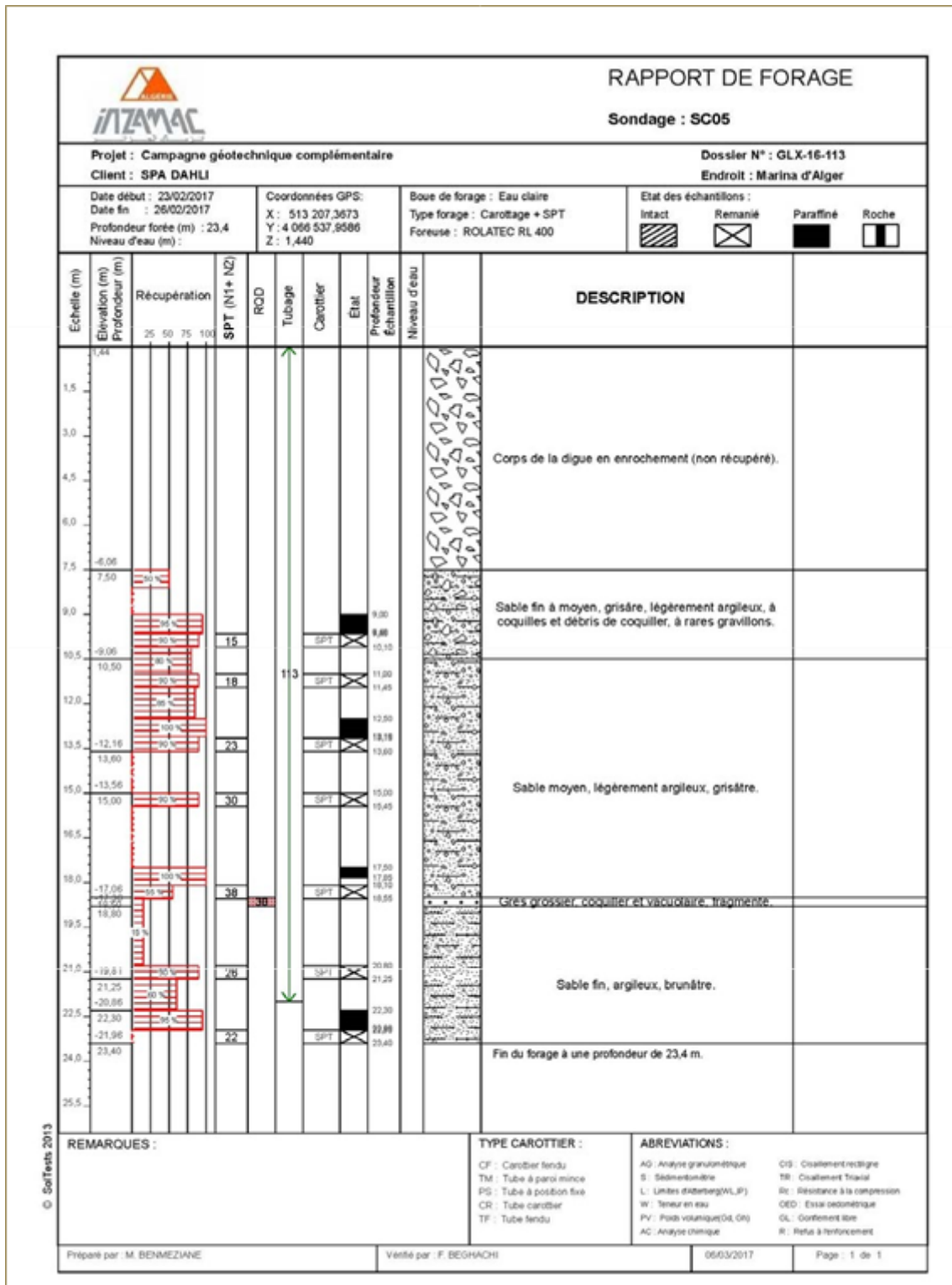


Figure 10: Description du sondage SC05 (BTP Infraestructuras, 2018).

- **Densité relative (formule de Meyerhoff) :**

$$DR = \sqrt{\frac{N_{spt}}{23\sigma'_{v_0} + 16}} \quad (7)$$

Les résultats indiquent un compactage de moyen à dense, compatible avec les formations sableuses littorales consolidées.

Synthèse :

L'analyse statistique des trois valeurs calculées permet d'établir une valeur moyenne de l'angle de frottement interne de $\varphi' = 40,21^\circ$.

La valeur représentative initialement retenue dans le cadre du projet s'élève à $\varphi' = 37,50^\circ$, soit une valeur légèrement inférieure à celle déterminée par les calculs actuels.

- **Recommandation technique**

Par souci de cohérence avec les hypothèses de conception initiales et compte tenu de l'existence d'une marge de sécurité appropriée, il est recommandé de maintenir la valeur représentative de l'angle de frottement interne à $\varphi' = 37,50^\circ$ pour l'ensemble des calculs d'encastrement des pieux.

Cette approche conservatrice garantit la continuité des hypothèses de dimensionnement tout en préservant un niveau de sécurité satisfaisant pour l'ouvrage.

1.3.Modélisation géotechnique

• **Module de réaction horizontal (méthode de Terzaghi, 1955) :**

Le **module de réaction horizontal** est un paramètre géotechnique qui traduit la **rigidité latérale du sol** face aux déplacements horizontaux d'un pieu. Il exprime la relation entre la pression horizontale exercée par le sol et le déplacement latéral correspondant du pieu, à une profondeur donnée.

$$K_h = 0.75 \cdot E_0 / D$$

Avec :

- $E_0 = 0.6 \cdot 1,60 \cdot Z$ (en cm) (correction pour sol immergé granulaire)
- D = diamètre du pieu (0.813 m)

Cette approche permet la modélisation de l'interaction sol-structure dans l'analyse par éléments finis, conformément aux recommandations de l'Eurocode 7 et de la ROM 0.5-05.

PIEU ARRIÈRE			
Z (m)	H (m)	E _o (kN/m ²)	K _m (KN·m)
0.5	0	0	0
-0.5	1	9600	7200
-1.5	2	19200	14400
-2.5	3	28800	21600
-3.5	4	38400	28800
-4.5	5	48000	36000
-5.5	6	57600	43200
-6.5	7	67200	50400
-7.5	8	76800	57600
-8.5	9	86400	64800
-9.5	10	96000	72000
-10.5	11	105600	79200
-11.5	12	115200	86400
-12.5	13	124800	93600

Tableau 4: Valeurs de constante du quai dans le pieu arrière

PIEU AVANT			
Z (m)	H (m)	E _o (kN/m ²)	K _m (KN·m)
0.5	0	0	0
-0.5	0	0	0
-1.5	0	0	0
-2.5	0	0	0
-3.5	0	0	0
PIEU AVANT			
Z (m)	H (m)	E _o (kN/m ²)	K _m (KN·m)
-4.5	1	9600	7200
-5.5	2	19200	14400
-6.5	3	28800	21600
-7.5	4	38400	28800
-8.5	5	48000	36000
-9.5	6	57600	43200
-10.5	7	67200	50400
-11.5	8	76800	57600

-12.5	9	86400	64800
-13.5	10	96000	72000
-14.5	11	105600	79200

Tableau 5: Valeurs de constante du quai dans le pieu avant

- Matériaux

Les matériaux à employer sont les suivants :

- Acier sur pieux: X42 ; acier de construction avec une limite d'élasticité d'environ **290 MPa**, adapté aux pieux tubulaires et aux milieux marins.
- Béton : HA35 ; béton armé de résistance **35 MPa** à 28 jours, présentant une bonne durabilité et une adhérence efficace aux armatures.
- Acier en armatures : B500S ; acier à haute adhérence, soudable, avec une limite d'élasticité de **500 MPa**, utilisé pour renforcer le béton armé.

2. Charges appliquées

2.1.Charges permanentes

- Poids propre des éléments structuraux :

- Poutre d'accostage : 23.75 kN/ml (section 1.0×0.95 m, $\gamma = 25$ kN/m³)
- Poutre arrière : 16.63 kN/ml (section 0.7×0.95 m, $\gamma = 25$ kN/m³)
- Dalle de couronnement : 70.88 kN/ml (section 0.35×8.1 m, $\gamma = 25$ kN/m³)

Total poids propre : **111.24 kN/ml**

- Poussée des terres (théorie de Rankine) :

- Conditions opérationnelles normales :

$$F_{H,R} = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma \cdot h \cdot \cos \delta = 4.97 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

$$M_{V,R} = \frac{F_{H,R} \cdot h}{3} = 2.15 \text{ KN/m.m} \quad (9)$$

- Conditions sismiques exceptionnelles

$$F_{H,R,séisme} = 8.07 \text{ KN/m}^2$$

$$M_{V,R,séisme} = 3.49 \text{ KN/m.m}$$

Avec $K_a = 0.507$ (coefficient de poussée active) selon **Eurocode 7 (CEN, 2004)**.

2.2.Charges variables

- **Surcharges d'exploitation :**
 - Surcharge d'utilisation générale : 10 kN/m²
 - Surcharge d'amarrage (bollards) : 98.1 kN par point d'amarrage
- **Actions sismiques :** Selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA 99/Version 2003):
 - Accélération sismique de référence : $a_g = 0.25g$
 - Coefficient de comportement : $\alpha = 0.5$

Charge sismique équivalente : **20.85 kN/ml**

- **Actions environnementales méditerranéennes :**

Les conditions d'exposition du site nécessitent la prise en compte des actions spécifiques au climat méditerranéen, notamment les variations thermiques et l'action de la houle résiduelle dans le bassin portuaire (**ROM 0.0-01, 2001**).

2.3.Combinaisons de charges

Le dimensionnement suit les approches de calcul de l'Eurocode 7 et de la ROM 0.5-05 :

- **États limites géotechniques (ELU GEO) :**
 - Combinaison fondamentale : $PP + 1.0 \cdot EMP + 1.3 \cdot BOL + 1.3 \cdot SC$
 - Combinaison sismique : $PP + 1.0 \cdot EMP_{\text{séisme}} + 0.5 \cdot BOL + 0.5 \cdot SC + SISM$
- **États limites structuraux (ELU STR) :**
 - Combinaison fondamentale : $1.35 \cdot PP + 1.5 \cdot EMP + 1.5 \cdot SC + 1.5 \cdot BOL$
 - Combinaison sismique : $PP + 1.0 \cdot EMP_{\text{séisme}} + 0.5 \cdot BOL + 0.5 \cdot SC + SISM$

Cette approche garantit la sécurité structurelle selon les standards européens et les spécificités réglementaires algériennes.

3. Modélisation du terrain

3.1.Méthode de calcul

L'évaluation des efforts et déplacements s'effectue par l'application de la méthode des éléments finis. L'analyse structurelle est menée à l'aide du logiciel SAP2000 développé par Computers & Structures de l'Université de Berkeley, permettant le calcul des contraintes et déformations en régime élastique linéaire.

3.2. Modèle structural

Un modèle tridimensionnel d'éléments finis de type "frame" intégrant l'ensemble des éléments structuraux a été développé. Le modèle considère une continuité parfaite entre les pieux et les poutres.

Le dimensionnement de ces éléments prend en compte les interactions sol-structure par la modélisation des déplacements latéraux du terrain. Cette approche utilise un système de ressorts disposés longitudinalement et transversalement, auxquels sont attribuées des rigidités calculées à partir des modules de ballast horizontal.

4. Modélisation de la structure

4.1. Configuration générale

Les quais, qu'ils soient implantés sur l'extrados de la digue de protection ou à l'intérieur du port, adoptent une configuration modulaire de 9 travées pour permettre l'installation de joints de dilatation.

4.2. Caractéristiques géométriques

La distinction principale entre les différents types de quais réside dans l'écartement transversal des pieux :

- Quais intérieurs : écartement de 5,013 m

L'implantation des bollards et des défenses varie selon la configuration :

- Pour les quais intérieurs : positionnement décalé par rapport aux pieux

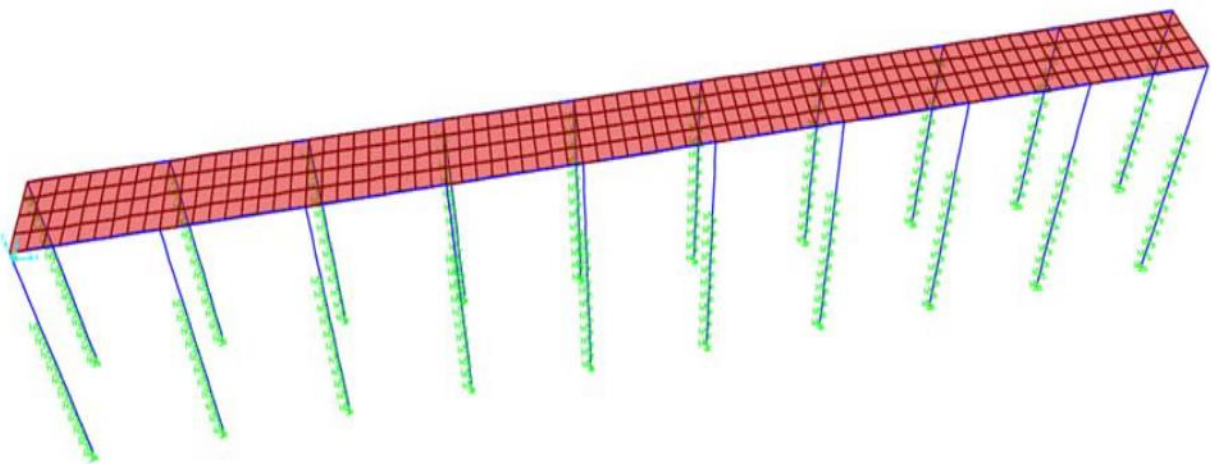


Figure 11: Schéma du modèle analytique de calcul employé pour le quai intérieur (BTP Infraestructuras, 2018).

5. Dimensionnement géotechnique (ELU GEO)

5.1. Vérification de l'encastrement des pieux

5.1.1. Méthodologie de calcul

La capacité portante du terrain est évaluée conformément aux recommandations de la ROM 0.5-05. La composante axiale de la charge individuelle de chaque pieu permet de déterminer le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture selon la procédure définie au point 3.6 de cette recommandation.

Le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture est calculé selon la formule suivante :

$$F_h = \frac{Q_h}{Q} = \frac{q_p A_p + \tau_f A_f - W'}{Q} \quad (10)$$

Étant :

- Q_h = Charge verticale appliquée sur la tête du pieu provoquant son effondrement
- q_p = Résistance unitaire par la pointe
- A_p = Are de la pointe
- τ_f = Résistance unitaire par le fût
- A_f = Are du fût
- W' = Poids effectif du pieu
- Q = Charge verticale agissant sur le pieu

5.1.2. Résistance par fût

5.1.2.1. Formulation générale

La résistance par fût dans les formations granulaires est évaluée selon l'expression fondamentale :

$$\tau_f = \sigma'_v \times K \times f \times \text{tg}\varphi \quad (11)$$

5.1.2.2. Limitation réglementaire

Pour les pieux encastrés, la contrainte de cisaillement τ_s ne doit pas excéder la valeur limite de 125 kPa.

5.1.2.3. Méthodes de calcul selon les conditions de sollicitation

La résistance par fût est déterminée par les expressions suivantes en fonction des conditions de drainage :

- **Conditions non drainées (EXCEPTIONNELLES - SÉISME)**

Expression de calcul :

$$\tau_f = \sigma'_v \times K \times f \times \text{tg}\varphi + c' \quad (12)$$

Cette formulation s'applique aux terrains granulaires soumis à des conditions drainées exceptionnelles.

- **Définition des paramètres :**

- σ'_v : pression verticale effective au niveau considéré
- **K** : coefficient de poussée empirique
 - Valeur adoptée : $K = 0,75$ pour des pieux encastrés
- **f** : facteur de réduction du frottement du fût
 - Valeur adoptée : $f = 1$ pour des pieux en acier
- φ : angle de frottement interne du sol granulaire
 - Calculé selon : $\varphi = \text{arctg}(0,75 \times \text{tg } \varphi') = 30^\circ$
- **c'** : cohésion effective du terrain

- **Conditions drainées (OPÉRATIONNELLES)**

Expression de calcul :

$$\tau_f = \sigma'_v \times K \times f \times \text{tg}\varphi + c' \quad (13)$$

Cette formulation s'applique aux terrains granulaires dans des conditions drainées normales.

- **Définition des paramètres :**

- σ'_v : pression verticale effective au niveau considéré
- **K** : coefficient de poussée empirique
 - Valeur adoptée : $K = 0,75$ pour des pieux encastrés
- **f** : facteur de réduction du frottement du fût
 - Valeur adoptée : $f = 1$ pour des pieux en acier
- φ : angle de frottement interne du sol granulaire
 - Valeur caractéristique : $\varphi = 37,5^\circ$

- c' : cohésion effective du terrain

Le résultat des résistances par fût est synthétisé dans le tableau suivant :

	CONDITION DE TRAVAIL	Ø	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	σ'vo (kN/m ²)	q _f (kN/m ²)	Q _F (kN)
Pieu arrière	Opérationnelle	37.5	0	11	44.51	20.99	436.25
Pieu arrière	Exceptionnelle	30	0	11	44.51	17.36	359.73
Pieu avant	Opérationnelle	37.5	0	11	35.07	16.57	270.75
Pieu avant	Exceptionnelle	30	0	11	35.07	13.63	223.27

Tableau 6: Résistance par fût en fonction du pieu et de la condition de travail (BTP Infraestructuras, 2018).

5.1.3. Résistance par pointe

Les pieux sont encastés dans un sol de sables limoneux de nature granulaire. La capacité portante de pointe est évaluée selon la formule de l'article 3.6.4.7 de la ROM 0.5-05 :

$$q_p = \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q \cdot f_D) \leq 20 \text{MPa} \quad (14)$$

- $N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot e^{\pi \cdot 2 \cdot g \cdot \phi}$
- $f_D = \frac{D}{D_0} > 0.7$
- D = diamètre du pieu
- D₀ = diamètre de référence, D₀ = 3m

Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau ci-dessous:

	CONDITION DE TRAVAIL	Ø	c (kN/m ²)	N _q	γ (kN/m ³)	σ'vo (kN/m ²)	q _p (kN/m ²)	Q _p (kN)
Pieu arrière	Opérationnelle	37.5	0	33.30	11	44.51	614.97	6032.84
Pieu arrière	Exceptionnelle	30	0	18.40	11	44.51	252.66	2478.55
Pieu avant	Opérationnelle	37.5	0	33.30	11	35.07	499.94	4904.42
Pieu avant	Exceptionnelle	30	0	18.40	11	35.07	252.66	2478.55

Tableau 7: Résistance par pointe en fonction du pieu et de la condition de travail (BTP Infraestructuras, 2018)

5.2. Vérification de la rupture horizontale du terrain

- Analyse structurale et extraction des efforts maximaux

Suite à la modélisation numérique de la structure, les efforts maximaux appliqués en tête des pieux ont été extraits pour les combinaisons de charges les plus critiques de chaque condition de service. Cette analyse a été menée en appliquant les coefficients de majoration des actions correspondant aux modes de défaillance géotechnique (GEO) avec $\gamma = 1,3$.

- Efforts maximaux sur la tête des pieux

Les efforts maximaux résultants appliqués sur la tête des pieux et leurs éléments concomitants, calculés pour les hypothèses de charge les plus défavorables, sont présentés ci-après selon les conditions de service :

	PIEU AVANT		PIEU ARRIÈRE	
	M (KN·m)	H (KN)	M (KN·m)	H (KN)
CONDITIONS OPÉRATIONNELLES	0	19.69	0	113
CONDITIONS EXCEPTIONNELLES	0	37.52	0	216.16

Tableau 8: Efforts maximaux M , H , sur la tête des pieux (GEO) (BTP Infraestructuras, 2018)

5.3.Efforts de calcul et combinaisons

5.3.1. Sollicitations de dimensionnement

L'ensemble des efforts considérés dans le dimensionnement est détaillé au point 3.7 du document de référence.

5.3.2. Combinaison quasi-permanente

Les résultats obtenus pour la combinaison quasi-permanente, permettant la vérification de la fissuration, sont présentés au point 3.7 du document de référence

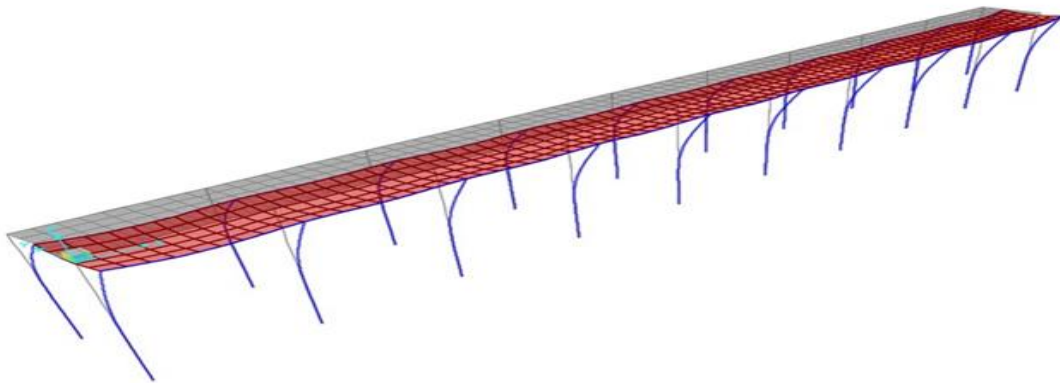


Figure 12: Déformée de la structure des quais intérieurs. CT1-STR3(BTP Infraestructuras, 2018).

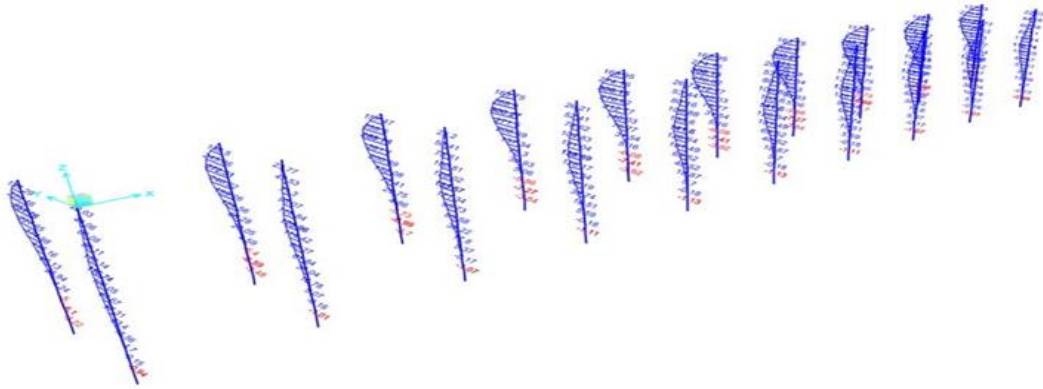


Figure 13: Moments de flexion en direction transversale. CT1-STR3 (BTP Infraestructuras, 2018).

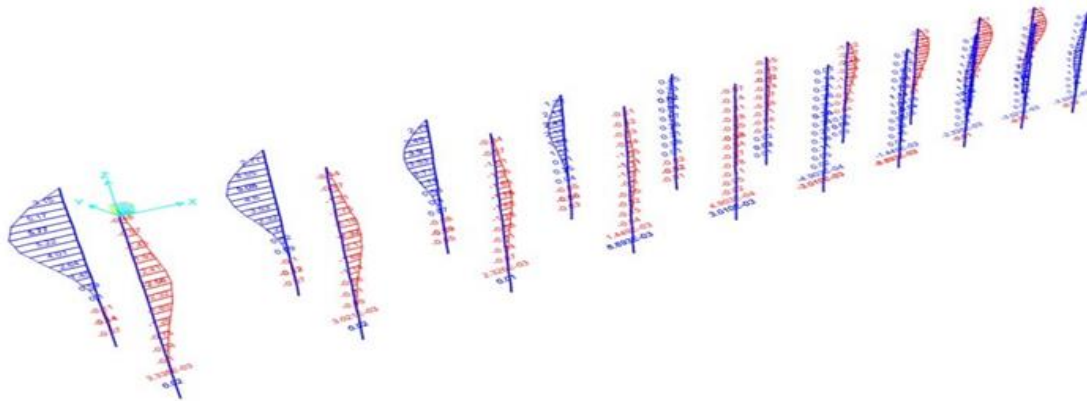


Figure 14: Moments de flexion en direction longitudinale. CT1-STR3 (BTP Infraestructuras, 2018).

6. Conclusion

Vérification avec SAP2000 - Quais intérieurs : L'analyse structurelle révèle que le ratio maximum observé sur l'ensemble des pieux pour les deux combinaisons de charge est $R_{max} = 0,482$. Cette valeur confirme que tous les pieux satisfont aux exigences de sécurité structurelle.

Chapitre III: Méthodologie de calcul

1. Généralités

Dans le domaine du génie civil, le sol constitue un élément fondamental qui remplit deux fonctions principales : il peut être utilisé soit comme matériau de construction, soit comme support structural pour les ouvrages. Cette dualité fonctionnelle concerne l'ensemble des disciplines du génie civil, notamment les structures, l'hydraulique et le génie maritime, qui s'appuient sur les principes théoriques et les méthodes techniques développés en géotechnique.

Les systèmes de fondation, qu'ils soient superficiels ou profonds, représentent des composants géotechniques essentiels dans la conception et la réalisation des projets de construction. Bien que la diversité des configurations de fondation soit considérable et dépende étroitement des caractéristiques géotechniques du sol et des spécificités structurelles de l'ouvrage, la présente étude se limitera à l'analyse des configurations conventionnelles les plus couramment mises en œuvre sur les chantiers de construction maritime .

1.1. Caractéristique de notre cas d'étude

Lors de l'analyse de notre étude des quais sur pieux du cas de Marina Bay d'Alger, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

1.1.1. Les caractéristiques des couches du sol

On doit prendre en compte tous les propriétés géotechniques du sol influencent directement la conception des pieux et la stabilité de la structure, sont basés sur les essais SPT (sondage SC05) et CPT (CPT-1 et CPT-2), les paramètres suivants sont introduits :

1.1.1.1. Propriétés de Résistance

- **Angle de frottement interne (φ')** : $37,50^\circ$ (valeur de sécurité retenue) .
 - Valeurs calculées : SPT = $38,68^\circ$, CPT-1 = $41,37^\circ$, CPT-2 = $40,58^\circ$
 - Moyenne des essais : $40,21^\circ$
- **Cohésion effective (c')** : 0 kN/m^2 (sol granulaire)
- **Densité relative** : Compactage moyen à dense (valeurs SPT entre $35,04^\circ$ et $42,14^\circ$ alors ce sol est moyen argileux)

1.1.1.2. Propriétés Physiques

- **Poids volumique (γ)** : 11 kN/m^3 (sol immergé)

1.1.1.3. Propriétés mécaniques

- **Module de déformation (E_0)** : Variable avec la profondeur selon la formule de Terzaghi
 - $E_0 = 0,6 \times 1,60 \times Z$ (en cm) pour sol granulaire immergé
 - Exemple : à -6,5 m, $E_0 = 67\,200$ kN/m²

1.1.2. Les caractéristiques des pieux

- **Géométrie :**
 - Diamètre : 0,813 m (pieux circulaires)
 - Épaisseur de paroi : 12,7 mm
 - Espacement longitudinal : 9,00 m
 - Espacement transversal : 7,25 m (quai adossé) / 5,00 m (autres zones)
- **Matériau Acier S290JR :**
 - Module d'élasticité (E) : 210 000 MPa
 - Limite élastique : 290 MPa
 - Coefficient de Poisson (ν) : 0,30 (c'est le rapport de transformation transversal et longitudinal)
 - Poids volumique : 78,5 kN/m³
- **Fondation :**
 - Pieu côté mer : Fondé à la cote -12,50 m
 - Pieu côté terre : Fondé à la cote -11,00 m
 - Couronnement : Cote +0,50 m pour les deux files

1.1.3. Charges permanentes

- Poids propre de la structure : 111,24 kN/m linéaire
- Poussée des terres : 4,97 kN/m²
- Surcharge d'utilisation : 10 kN/m²
- Charges d'amarrage : 9,81 kN/m

	PIEU AVANT		PIEU ARRIÈRE	
	M (KN·m)	H (KN)	M (KN·m)	H (KN)
CONDITIONS OPÉRATIONNELLES	0	19.69	0	113.45
CONDITIONS EXCEPTIONNELLES	0	37.52	0	216.16

Tableau 9: Efforts maximaux M, H, sur la tête des pieux (GEO) (BTP Infraestructuras, 2018)

2. Capacité axiale

La capacité portante d'un élément de fondation profonde résulte de la combinaison de deux mécanismes de transfert de charge : la résistance de pointe mobilisée sous la base du pieu et la résistance de frottement latéral développée le long du fût. Cette dualité des mécanismes de portance complexifie considérablement l'approche de dimensionnement, nécessitant la détermination optimale de trois paramètres interdépendants : le diamètre, la longueur d'ancrage et le nombre d'éléments constitutifs du groupe de pieux.

Par ailleurs, ces éléments de fondation doivent également satisfaire aux exigences de limitation des tassements différentiels susceptibles de compromettre l'intégrité fonctionnelle et structurelle de l'ouvrage supporté.

2.1. Évaluation de la capacité portante verticale d'un pieu isolé

On peut aussi évaluer la capacité axiale par calcul, en utilisant les différentes méthodes vues ci-après. Ces dernières peuvent être subdivisées en quatre catégories principales :

- Méthodes empiriques,
- Méthodes de la théorie de l'élasticité,
- Méthodes de la théorie de transfert des charges,
- Méthodes numériques.

2.1.1. Les méthodes empiriques

Les méthodes empiriques constituent des outils d'estimation préliminaire du comportement en tassement des fondations profondes, fondées sur l'exploitation statistique d'une base de données constituée à partir de l'analyse de cas d'études documentés et de retours d'expérience sur le comportement observé d'ouvrages de fondation similaires.

2.1.2. Les méthodes de la théorie d'élasticité

Les approches analytiques fondées sur la théorie de l'élasticité considèrent le système d'interaction pieu-sol comme un milieu continu élastique, linéaire et isotrope. Parmi les formulations théoriques les plus largement adoptées dans la pratique géotechnique, on distingue notamment les développements proposés par Poulos (1968), Banerjee et Butterfield (1978), ainsi que Randolph (1978). Ces méthodes analytiques s'appuient sur l'exploitation de la solution fondamentale établie par Mindlin (1936) pour le problème de la répartition des contraintes et des

déplacements générés par une charge ponctuelle verticale appliquée à l'intérieur d'un massif élastique semi-infini.

2.1.3. Les méthodes numériques

Les méthodes de calcul numérique, telles que les éléments finis et les différences finies, sont devenues des outils essentiels pour modéliser l'interaction sol-structure dans les fondations profondes. Elles permettent d'analyser des comportements complexes à l'aide de maillages axisymétriques. Des logiciels spécialisés comme **PLAXIS 2D**, Crisp ou Flac 2D sont couramment utilisés, intégrant des lois de comportement adaptées aux sols. Cette approche offre une modélisation précise, tenant compte des non-linéarités, et s'applique aussi bien à la recherche qu'à la conception de projets géotechniques spécifiques.

2.1.4. Les méthodes des courbes t-z, q-z ou théorie de transfert des charges

En discrétisant l'interface sol/pieu en une infinité de ressorts indépendants, reprenant les contraintes de frottement latéral τ et les pressions verticales q_p à la base du pieu, la continuité du sol est ignorée.

Le transfert des charges du pieu au sol se fait par le biais de ces ressorts. On suppose que les contraintes mobilisées à l'interface sol/pieu, à une profondeur donnée, sont proportionnelles au tassement correspondant, telles que :

$$\tau(z) = B_0(z)v(z) \quad (15)$$

$$q_p = R_0 v(D)/B \quad (16)$$

- $\tau(z)$: contrainte de frottement latéral mobilisée à l'interface sol-pieu à la profondeur z.
- $B_0(z)$: module de réaction latérale du sol (raideur de contact sol-pieu en cisaillement) à la profondeur z.
- $v(z)$: déplacement axial (tassement) du pieu à la profondeur z.
- q_p : contrainte verticale en pointe (pression de base du pieu).
- R_0 : module de réaction en pointe (raideur du sol à la base du pieu).
- $v(D)$: déplacement axial du pieu en tête de la pointe (profondeur totale D).
- B : périmètre du pieu en contact avec le sol (pour un pieu circulaire de diamètre d, $B=\pi d$).

L'équilibre d'une tranche infinitésimale du pieu se traduit par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d^2v}{dz^2} - a^2v = 0 \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{4B_0}{E_p B}} \quad (18)$$

- $\frac{d^2v}{dz^2}$: dérivée seconde du déplacement $v(z)$ par rapport à la profondeur z .
- a : paramètre caractéristique qui traduit l'équilibre entre la rigidité du pieu et la raideur du sol.
- $v(z)$: déplacement axial du pieu.
- a : paramètre caractéristique de l'équation différentielle (coefficient d'atténuation).
- B_0 : module de réaction latérale (raideur sol-pieu supposée constante avec la profondeur).
- E_p : module d'élasticité du matériau du pieu.
- B : périmètre du pieu.

Dans le cas d'un sol caractérisé par une raideur B_0 constante avec la profondeur, cette équation s'intègre analytiquement et a une solution générale de la forme :

$$v(z) = a_1 \text{Cosh}(az) + a_2 \text{Sinh}(az) \quad (19)$$

- $v(z)$: déplacement axial du pieu à la profondeur z .
- a_1, a_2 : constantes d'intégration déterminées par les conditions aux limites (charge appliquée en tête, continuité des efforts, etc.).

En considérant l'équilibre global du pieu sous la force axiale Q , les équations des contraintes de cisaillement le long du fut et de la pression verticale en pointe.

2.2. Présentation du logiciel APILE (2023.10.5)

APILE est un logiciel développé par Ensoft pour le calcul de la capacité portante axiale des pieux. Il permet d'estimer la résistance en pointe et par frottement latéral en tenant compte des propriétés du sol et des caractéristiques du pieu. Le programme s'appuie sur des méthodes empiriques reconnues comme celles de l'API RP 2A, et il est utilisé principalement pour des pieux isolés soumis à des charges verticales. L'analyse prend en compte la stratigraphie, les paramètres mécaniques du sol et les conditions d'encastrement. En revanche, il ne traite pas les effets de groupe ni les sollicitations horizontales, ce qui en limite l'usage aux calculs axiaux.

2.2.1. Fonctionnalités principales

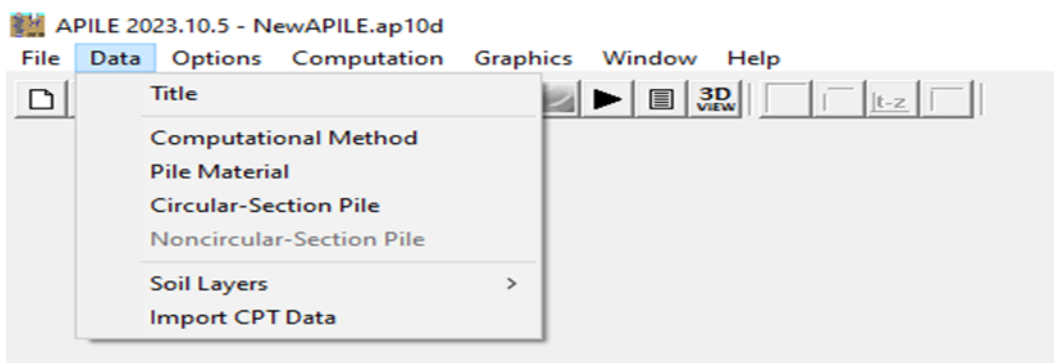


Figure 15: Data menu de logiciel APILE

2.2.1.1. Computational Methods

Cette tool contient deux onglets :

- **Methods for pile capacity :**

Pour le calcul de la capacité axiale des pieux, le programme APILE propose des méthodes de calcul automatisé de la capacité des pieux :

- FHWA: utilise les recommandations de la Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis.
- API RP 2A : Utilise la pratique recommandée 2A de l'American Petroleum Institute, également appelée « méthode API révisée » (2007).

- **Méthodes pour calcul de tassement : (Method for load settlement) :**

Les calculs de la relation charge/tassement impliquent deux procédures :

- 1) le calcul des transferts de charge unitaires
- 2) le calcul de la forme des courbes de transfert de charge non linéaires (t-z et Q-w).

Le programme APILE sélectionne automatiquement la forme non linéaire des courbes de transfert de charge (t-z et Q-w) selon deux méthodes .

Toutes les deux méthodes (FHWA, API) sont basées sur les recommandations de l'American Petroleum Institute (API RP 2A-WSD, 2014)

2.2.1.2. Pile materiel

Cette option permet de sélectionner le type et le matériau du pieu battu.

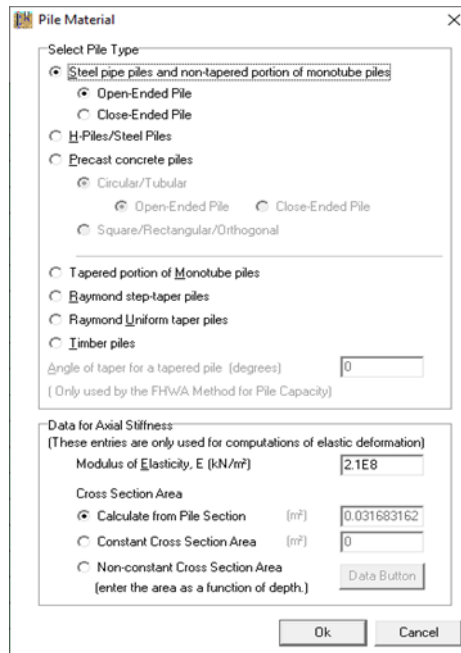


Figure 16: Data-pile materiel

2.2.1.3. Circular-Section Pile

Cette option permet de saisir les dimensions et les propriétés de notre section des pieux .

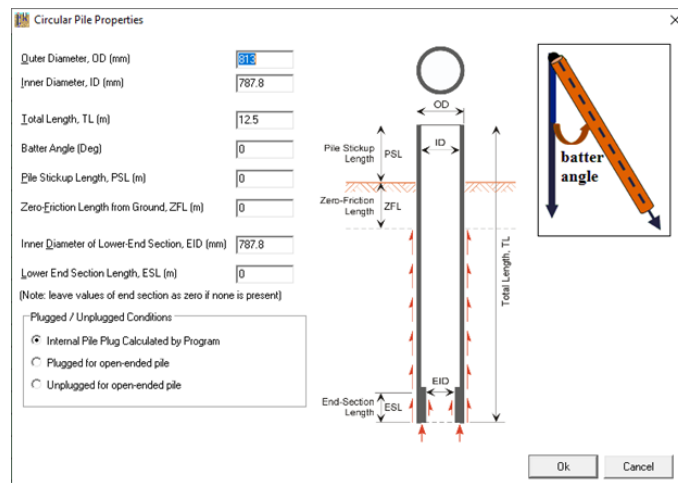


Figure 17: Data-circular section pile

2.2.1.4. Soil Layers

Cette option permet de définir un système de stratification et de spécifier les différents types de sol et leurs propriétés mécaniques. Les couches de sol peuvent être modifiées à l'aide de la table des sols APILE standard (Edit Soil Layer Table) ou du nouvel interpréteur CPT (test de pénétration au cône) (Edit Soil Layers with CPT).

2.2.2. Résultats obtenus

L'analyse de logiciel APILE nous a permis d'obtenir les résultats ci-joints {Annexe 1}, on peut dire que l'augmentation de la longueur du pieu de 11 m à 12,5 m améliore significativement la capacité portante, principalement grâce à une résistance de pointe plus élevée. Le frottement latéral, bien que présent, devient secondaire à grande profondeur.

Les méthodes API et LAMBDA restent cohérentes entre elles, tandis que FHWA se montre plus conservatrice.

Le tassement reste modéré, confirmant une bonne rigidité même sous fortes charges.

Ainsi, la longueur du pieu et la méthode de calcul influencent directement la sécurité et la justification du projet.

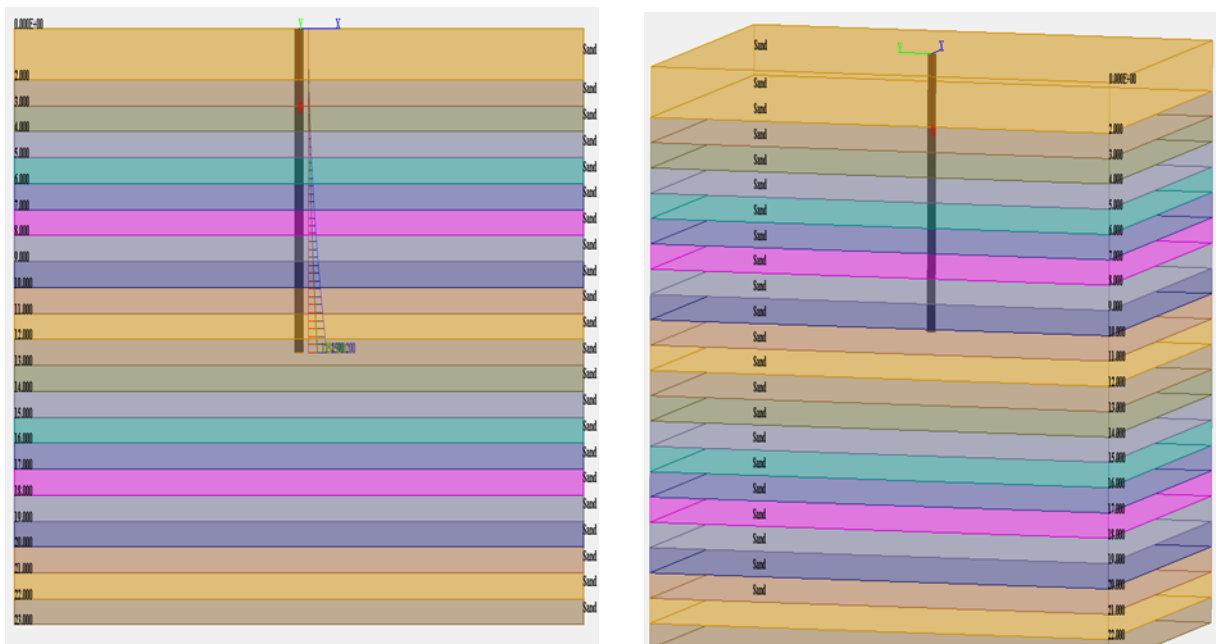


Figure 18: Résultat de la structure sol-Pieu avant et sol-pieu arrière .

3. Conception des pieux pour des charges latérales

Grâce aux avancées dans la compréhension du comportement des fondations profondes, il est désormais reconnu que les pieux verticaux sont capables de supporter des charges horizontales.

3.1. Méthode au module de réaction (ou des courbes P-Y)

Les méthodes analytiques basées sur le concept de module de réaction constituent une approche fondamentale dans l'ingénierie géotechnique pour l'analyse des fondations profondes et des ouvrages de soutènement souples. Cette approche théorique, formalisée par Winkler en 1867, modélise le comportement mécanique du sol par un système d'éléments ressorts élastiques indépendants de rigidité E_s , distribués continûment le long de l'interface sol-structure. L'élément de fondation interagit ainsi avec le milieu environnant par l'intermédiaire de ce système de ressorts lors de ses déformations latérales, permettant une représentation mathématique accessible du phénomène d'interaction sol-structure tout en conservant une précision suffisante pour les applications pratiques.

Pour une section transversale située à la profondeur z , le déplacement latéral u induit une réaction distribuée P (exprimée en force par unité de longueur) selon la relation constitutive linéaire suivante :

$$P(z) = E_s(z) \times u(z) \quad (20)$$

Où $E_s(z)$ représente le module de réaction du sol à la profondeur considérée .

Présentation du logiciel LPILE (2018.10.04)

LPile est un logiciel développé par Ensoft Inc , utilisé pour l'analyse des pieux soumis à des charges latérales. Il permet de modéliser le comportement sol-pieu de manière non linéaire à l'aide de la méthode dite P-Y.

3.1.1.1. Fonctionnalités principales

Parmi les principales fonctionnalités du logiciel, on peut citer :

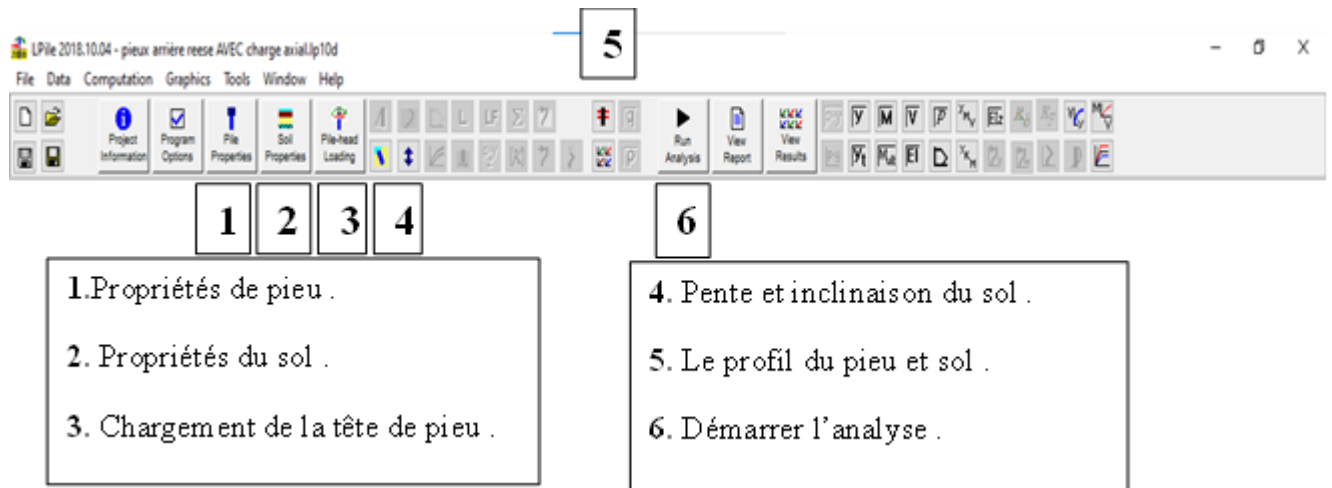


Figure 19: Fenêtre principale du logiciel LPILE

3.1.1.1.1. Propriétés de pieu (Pile Properties)

Dans cette outil on définit les caractéristiques géométriques et mécaniques de chaque pieu que on a déjà mentionnées précédemment ci-dessus.

3.1.1.1.2. Propriétés du sol

Dans cet outil on permet de pré-remplir automatiquement les paramètres nécessaires pour les modèles de comportement sol-pieu (courbes p-y, t-z, q-z) en fonction du type de notre sol (sable (REESE), API sable (O'NEILL)).

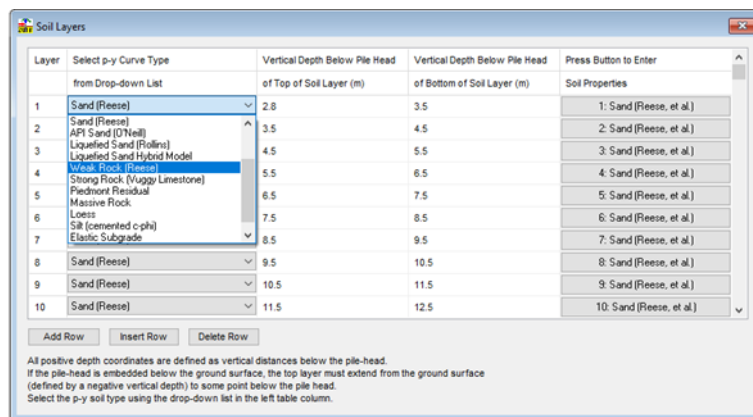


Figure 20: Data-menu-propriétés du sol

Après avoir sélectionné le type de sol, on ajoute les paramètres géotechniques de base de chaque sol (densité, angle de frottement, cohésion, etc.).

a) La Méthode de Reese (1974) pour l'Analyse des Pieux Chargés Latéralement

La méthode de Reese, développée par Lymon C. Reese dans les années 1974, constitue l'une des approches les plus reconnues et largement utilisées pour l'analyse des pieux soumis à des chargements latéraux.

Les travaux expérimentaux menés par Reese et al. (1974) sur le site de l'île Mustang au Texas ont consisté en des essais de chargement latéral réalisés sur deux pieux circulaires de diamètre D et de longueur L , implantés dans un massif de sable fin dense présentant des caractéristiques géotechniques spécifiques. Ces investigations ont permis d'établir une méthodologie de détermination des courbes de réaction P-Y applicables aux sols pulvérulents soumis à des chargements statiques de courte durée. La résistance ultime du sable est évaluée selon les formulations analytiques proposées par Reese et al., constituant ainsi un cadre de référence pour l'analyse du comportement latéral des pieux dans ce type de formation géologique.

La méthodologie des calculs est comme suit :

- Établir la première portion de la courbe P-Y qui utilise l'équation suivante :

$$P = (k_s z)Y \quad (21)$$

- P : pression latérale du sol exercée sur le pieu à une profondeur z (kN/m ou kPa).
- k_s : module de réaction horizontale unitaire du sol (MPa/m).
- z : profondeur sous la surface du sol (m).
- Y : déplacement latéral du pieu à la profondeur z (m).

Nous utilisons la valeur appropriée de k_s de tableau pour établissement le module de réaction de cette équation.

Les valeurs représentatives de k_s (MPa / m)	Lâche $D_r < 35$	Moyen $35 < D_r < 65$	Dense $D_r > 65$
Au-dessous de la nappe phréatique	5.43	16.30	33.90
Au-dessus de la nappe phréatique	6.79	24.43	61.00

Tableau 10: Les valeurs représentatives pour les sables

- Établir la deuxième portion de la courbe P-Y qui utilise l'équation suivante :

$$P = \bar{C} Y^{1/n} \tag{22}$$

n est le pouvoir de la section parabolique définie par :

$$n = \frac{P_v}{m Y_v} \tag{23}$$

Le coefficient \bar{C} est défini par :

$$\bar{C} = \frac{P_v}{Y_v^{1/n}} \tag{24}$$

- Déterminer le point j par les coordonnées suivantes :

$$P_j = k_s z Y_j \tag{25}$$

$$Y_j = \left(\frac{\bar{C}}{k_s z} \right)^{n/n-1} \tag{26}$$

- Établir la troisième portion de la courbe P-Y et de pente m .

$$m = \frac{P_w - P_v}{Y_w - Y_v} \tag{27}$$

- L'intersection entre les courbes P-Y :

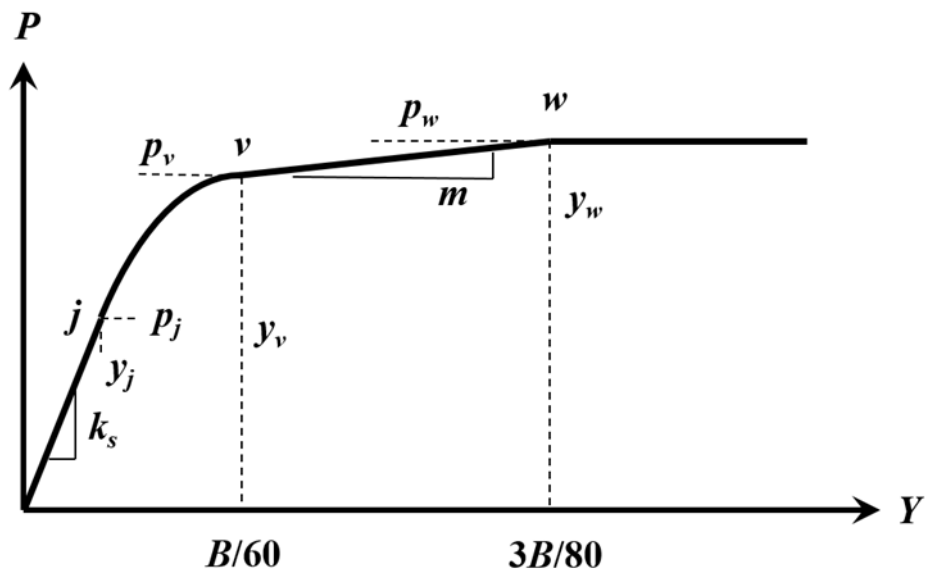


Figure 21: La forme caractéristique de la courbe P-Y sous chargement statique dans le sable (d'après REESE et al.1974)

b) La Méthode d'O'Neill (1984) pour l'Analyse des Pieux Chargés Latéralement

Michael W. O'Neill a proposé une amélioration à la méthode p-y pour les sables, fondée sur des essais en conditions plus réalistes, cette approche méthodologique a été officiellement adoptée par la réglementation américaine (A.P.I.) en 1991.

La réaction latérale du sol pour le sable est définie comme étant une fonction non linéaire, elle est approchée à toute profondeur z par l'expression suivante :

$$P = \mu A_s P_{ult} \tanh\left(\frac{k_s z}{\mu A_s P_{ult}} Y\right) \quad (28)$$

$\mu = 1$ pour les pieux circulaires ou prismatiques

$\mu = 1.5$ pour les pieux coniques ou H-pieux.

A_s : Facteur pour la prise en compte d'un chargement continu statique, la valeur retenue est celle étant le plus grand nombre issu de l'une ou l'autre de ces équations :

$$A_s = \text{Max}\left\{\left(3 - 0.8 \frac{z}{B}\right), 0.9\right\} \quad (29)$$

Le module initial de la réaction du sol k_s est déterminé en fonction de l'angle de frottement et de la densité relative du sable.

Le calcul de la résistance ultime d'un sable se fait par les équations recommandées par Murchison et al. La valeur retenue est celle étant le plus petit nombre issu de l'une ou l'autre de ces équations :

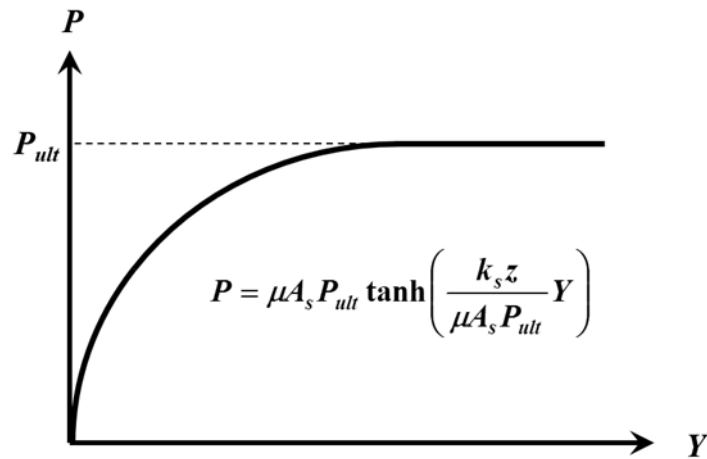


Figure 22: La courbe P-Y selon la méthode de Murchison et O'Neill pour un sable sous chargement statique

Avec :

$$P_{us} = (C_1 z + C_2 B) \gamma' z \quad (30)$$

$$P_{ud} = C_3 B \gamma' z \quad (31)$$

C_1, C_2 et C_3 : Les coefficients déterminés à partir d'abaques qui sont fonction de l'angle de frottement du sable (**Figure 22**) ou par les formules suivantes :

$$C_1 = 0.115 * 10^{0.0405\phi} \quad (32)$$

$$C_2 = 0.571 * 10^{0.022\phi} \quad (33)$$

$$C_3 = 0.646 * 10^{0.055\phi} \quad (34)$$

3.1.1.1.3. Pile-head loading

Cet outil permet de spécifier les conditions de chargement en tête ainsi que le type de liaison entre le pieu et la structure qu'il supporte.

3.1.1.2. Résultats obtenus

L'analyse de logiciel LPILE nous a permis d'obtenir les résultats ci-joints {**Annexe 2**} , on peut dire que les deux analyses de pieu avant et pieu arrière montrent une bonne cohérence entre les modèles Reese et O'Neill, avec des comportements mécaniques similaires sous charges latérales et axiales.

Les deux cas confirment :

- Une déflexion maximale en tête décroissant avec la profondeur.
- Une localisation du moment maximal dans une plage de profondeur spécifique (2-2,5 m pour le pieu avant, 4-4,5 m pour le pieu arrière).
- Une rigidité en flexion constante ($EI = 536\,921 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$) dans les deux cas, confirmant un comportement élastique non fissuré.

Bien que les modèles convergent globalement, des divergences apparaissent sous charges élevées :

- Pieu avant : Écarts de +13% sur la déflexion et +10% sur les moments.
- Pieu arrière : Écarts moindres (+6,5% sur la déflexion, +4,2% sur les moments), mais avec des différences marquées dans la réaction du sol (jusqu'à +8% pour Reese).

Ces écarts suggèrent des différences dans la modélisation de l'interaction sol-pieu ou des conditions aux limites, particulièrement en conditions extrêmes.

- Comportement de l'interaction sol-pieu :
 - Pieu avant : Résistance négative près de la surface et positive en profondeur, et une mobilisation passive entre 3,5-5 m.
 - Pieu arrière : Aucune réaction sur les premiers 2,75 m (contre mobilisation immédiate pour le pieu avant), et une résistance négative entre 3-6 m, annulation vers 12,5 m.

Ces différences pourraient s'expliquer par :

- Des hypothèses différentes sur les modules de réaction du sol.
- Une longueur critique variable (6 m pour O'Neill vs 7,5 m pour Reese, soit +25% pour le pieu arrière).
- Sensibilité aux paramètres géotechniques et aux limites :
 - Pieu avant : Plus sensible aux charges axiales élevées, avec une réduction marquée de la capacité portante.
 - Pieu arrière : Plus sensible à la longueur du pieu (impact économique potentiel).

Les deux cas montrent des seuils de non-linéarité différents (1800 kN·m pour O'Neill vs >2000 kN·m pour Reese).

Conclusion

Les résultats des pieux avant et arrière sont globalement cohérents, mais présentent des écarts significatifs sous fortes charges, notamment sur :

- La déflexion (écarts jusqu'à +13%).
- La localisation et l'intensité des moments.
- La réaction du sol (résistance négative vs positive).

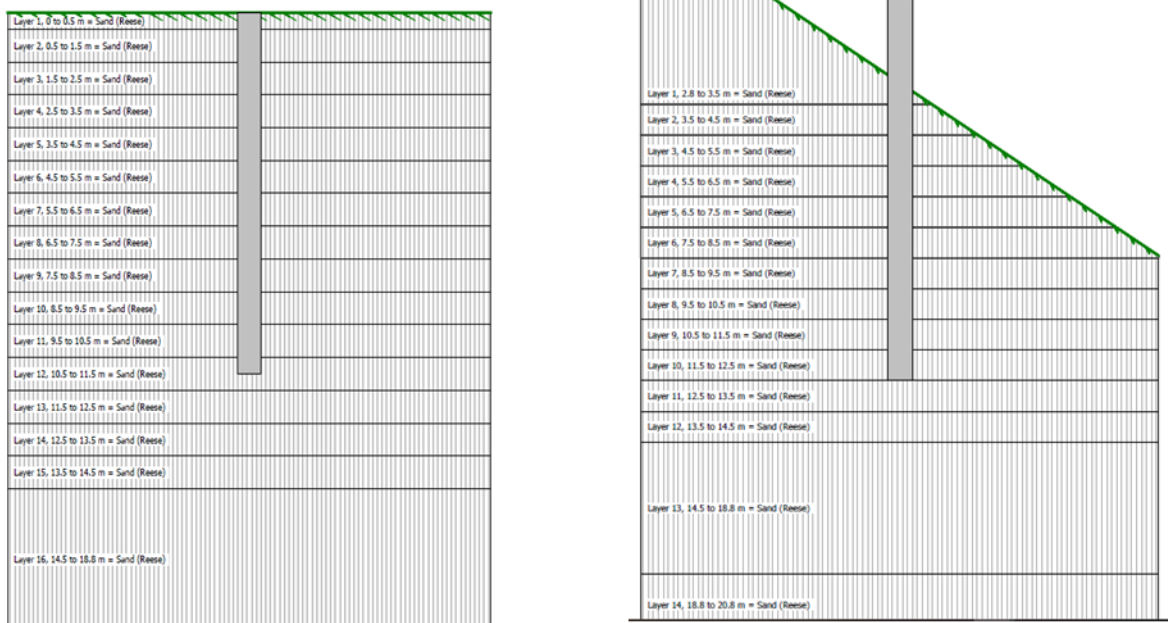


Figure 23: Le profil du sol-Pieu avant et sol-Pieu arrière (LPILE)

3.2. Méthodes numériques

La complexité tridimensionnelle du comportement des pieux sous chargement latéral rend la modélisation par éléments finis particulièrement appropriée pour cette problématique. Cette approche numérique s'est imposée tant dans le domaine de la recherche que dans les applications pratiques de dimensionnement.

L'utilisation de cette méthode demeure conditionnée par l'accès à des outils logiciels performants et par l'importance du projet justifiant une telle approche. Elle est généralement réservée aux projets requérant une analyse approfondie et réaliste du comportement des fondations sur pieux soumises aux sollicitations latérales.

Certaines configurations particulières, non résolues par les méthodes de calcul conventionnelles, nécessitent impérativement le recours à la modélisation par éléments finis. C'est notamment le cas des groupes de pieux implantés à proximité de terrains présentant une géométrie en pente.

3.2.1. Comportement de deux pieux

3.2.1.1. Présentation du logiciel PLAXIS 2D (2023.2)

PLAXIS 2D représente un logiciel de référence dans l'analyse géotechnique par éléments finis, développé pour la modélisation à deux dimensions des problèmes de déformation et de stabilité en ingénierie géotechnique. L'interface présentée constitue le module Input, composant essentiel du flux de travail de modélisation numérique (**Bentley Systems, 2022**).

3.2.1.1.1. Fonctionnalités principales

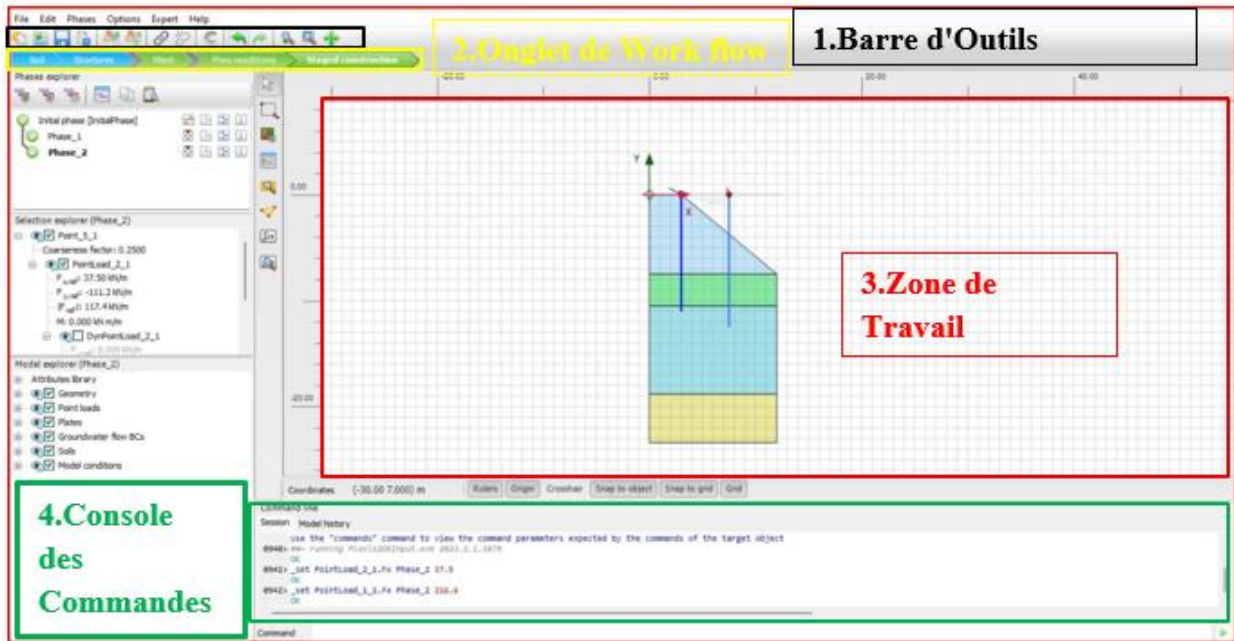


Figure 24: L'interface du logiciel Plaxis 2D .

- a) **Geometry (Géométrie)** : Phase initiale de construction du modèle géométrie simplifiée à deux dimensions et on incluant la définition du domaine d'étude et des éléments structuraux.
- b) **Mesh (Maillage)** : Génération du maillage d'éléments finis, étape critique déterminant la précision des résultats numériques.

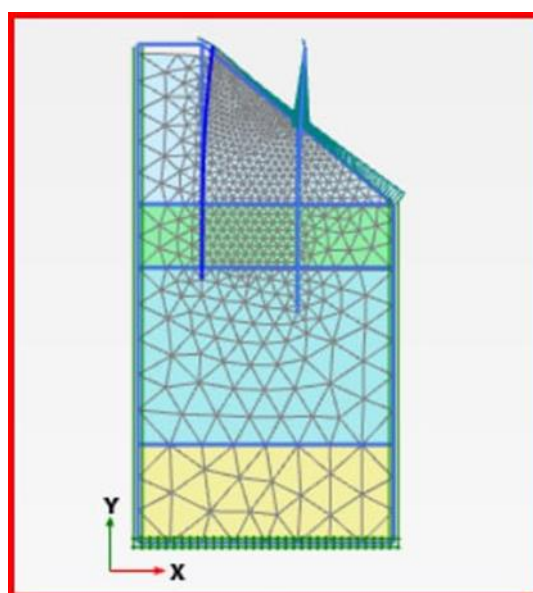


Figure 25: Le maillage d'éléments finis dans la structure sol-Pieux

- c) **Flow Conditions (Conditions d'Écoulement)** : Définition des conditions hydrauliques pour les analyses couplées hydro-mécaniques.

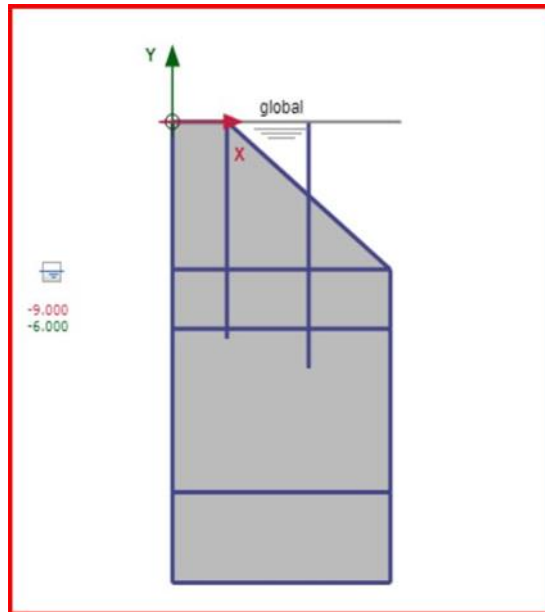


Figure 26: Les conditions d'écoulement de notre structure

1) Importation des Données du Sol

On intègre les caractéristiques géotechniques déterminées lors des campagnes de reconnaissance, basées sur les essais SPT (sondage SC05) et CPT (CPT-1 et CPT-2) et on a introduits les paramètres qu'on a déjà mentionné précédemment : (Angle de frottement interne (ϕ'), Cohésion effective (c'), Densité relative....).

2) Paramètres des Pieux

On a saisi toutes les caractéristiques des pieux de notre cas d'étude

3) Les charges

On a respectée tous les conditions opérationnelles normales (CT1) avec les charges permanentes de notre étude .

3.2.1.1.2. Résultats Obtenus

Après l'intégration de toute les données nécessaires dans le logiciel PLAXIS 2D on a avoir les résultats représentée dans (L'ANNEXE 3) , les résultats de PLAXIS 2D montrent que le pieu avant subit des moments fléchissant beaucoup plus élevés que le pieu arrière, avec un pic d'environ 301 KN.m contre 119 KN.m pour le pieu arrière. Cette différence traduit une sollicitation latérale plus importante sur le pieu avant, probablement liée à sa position face à la charge ou à la direction de l'effort appliqué.

Concernant les déplacements, les deux pieux présentent des valeurs similaires en tête (environ 9 cm), mais le déplacement diminue plus rapidement en profondeur pour le pieu arrière. Cela suggère que le pieu avant joue un rôle plus significatif dans la reprise des efforts horizontaux. En conception, il faudra donc particulièrement renforcer le pieu avant pour résister aux moments maximaux et vérifier les déplacements admissibles pour les deux pieux

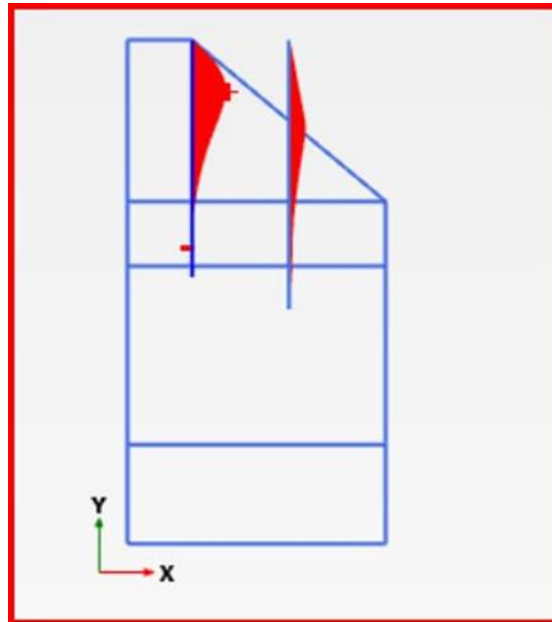
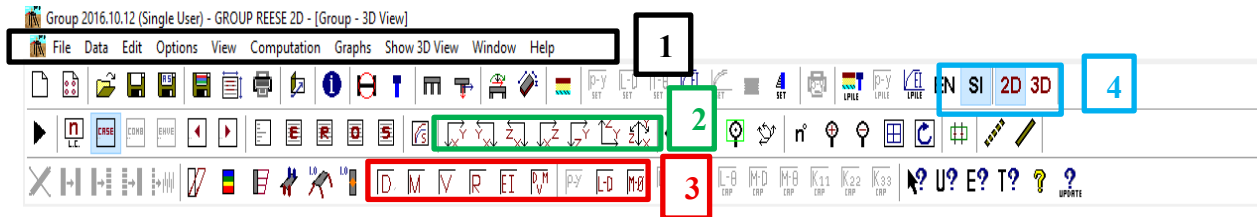


Figure 27: L'affichage de résultats appliquées sur les deux pieux (PLAXIS 2D)

3.2.1.2. Présentation du logiciel GROUP 2D (2016.10.12)

Le logiciel **GROUP 2D** est un outil de calcul développé par **Ensoft Inc.**, spécialisé dans l'analyse du comportement des groupes de pieux soumis à des charges latérales. Il est basé sur une modélisation en deux dimensions du système sol-pieux, ce qui permet de représenter l'interaction complexe entre plusieurs pieux disposés en groupe, en tenant compte des effets d'interaction latérale (effet d'ombrage, redistribution des charges, etc.).

3.2.1.2.1. Fonctionnalités principales :



1. Barre d'Outils Principale.
2. Les angles de vue du modèle.
3. Les résultats des graphes.

Figure 28: L'interface du logiciel GROUP 2D.

1) Pile propriétés

Dans la première étape on a saisi les dimensions et les propriétés des sections de pieu correspondant à chaque type de pieu utilisé dans l'analyse de groupe (avant , arrière) , après les propriétés du groupe de pieux et le types de fixations de tête de pieu entre le pieu et son chapeau avec les dimensions de la semelle de pieu.

2) Soil Layers

On a saisi le type de sol avec les deux méthodes (REESE , O'NEILL) pour la génération automatique des courbes de résistance du sol (p-y), des courbes de charge axiale-déplacement et des courbes de couple-rotation.

Layer	Soil Type	Depth for Top of Soil Layer (m)	Depth for Bottom of Soil Layer (m)	Properties of Layer
1	API Sand (O'Neil)	0	0.5	1: API Sand
2	API Sand (O'Neil)	0.5	1.5	2: API Sand
3	API Sand (O'Neil)	1.5	2.5	3: API Sand
4	API Sand (O'Neil)	2.5	3.5	4: API Sand
5	Sand (Reese)	3.5	4.5	5: API Sand
6	User Input p-y Curves	4.5	5.5	6: API Sand
7	Strong Rock (Vuggy Limestone)	5.5	6.5	7: API Sand
8	Silt (cemented c-phi)	6.5	7.5	8: API Sand
9	API Sand (O'Neil)	7.5	8.5	9: API Sand
10	Weak Rock (Reese)	8.5	9.5	10: API Sand

Figure 29: Data-menu-propriétés du sol

3) Loading

On ajouter deux types des charges concentrée dans la semelle et le long des pieux et dans chaque charge on a appliquée deux forces dans les directions x et y (verticale, horizontale)

- Le cas de la charge 1 : $f(x) = 111.24 \text{ KN.}$, $f(y) = 216.16 \text{ KN.}$

- Le cas de la charge 2 : $f(x) = 20.58 \text{ KN}$, $f(y) = 113.45 \text{ KN}$.

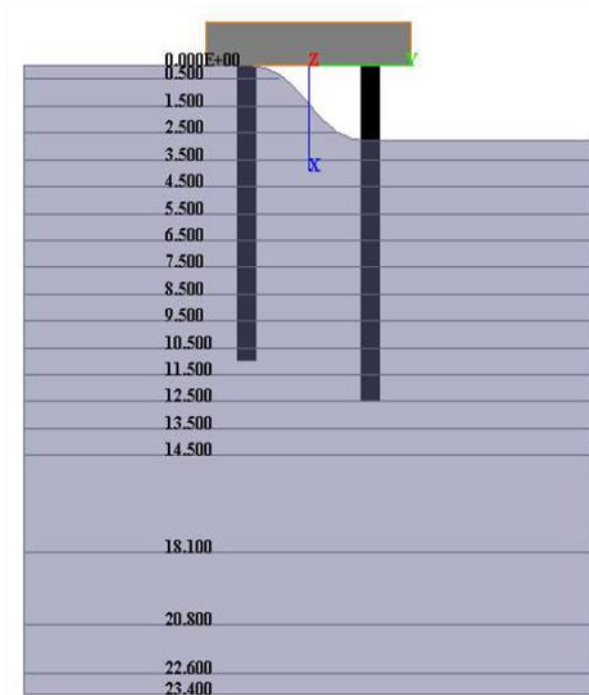


Figure 30: Le profil du sol-Pieux (GROUP 2D)

3.2.1.2.2. Résultats obtenus

L'analyse de logiciel GROUP 2D nous a permis d'obtenir les résultats ci-joints {Annexe 4}, Les résultats de GROUP 2D montrent que les déplacements maximaux sont systématiquement plus élevés avec la méthode REESE, avec un écart relatif de 10,5 % par rapport à O'NEILL, pour les deux pieux.

Concernant le moment fléchissant maximal, REESE fournit également des valeurs supérieures, avec une différence de 8 à 9 %, traduisant une approche plus conservatrice , ces écarts s'expliquent par des hypothèses différentes sur le comportement du sol et la rigidité des pieux. Les moments maximaux sont atteints à des profondeurs intermédiaires ($Y = 2,2$ à 4 m), tandis que les déplacements sont maximaux en tête de pieu.

En pratique, REESE est à privilégier pour un dimensionnement sécurisé, tandis qu'O'NEILL peut être retenue pour une approche optimisée, à condition de bien encadrer les vérifications.

3.2.2. Comportement des groupes de pieux

La charge ou capacité portante globale Q_1^g d'un groupe de N pieux est différente de N fois la charge limite Q_1^∞ d'un pieu isolé travaillant dans les mêmes conditions. Le coefficient d'efficacité C_g d'un pieu, en termes de capacité portante, est défini par :

$$C_g = \frac{Q_l^g}{NQ_l^\infty} \quad (35)$$

3.2.2.1. Présentation du logiciel PLAXIS 3D (2023.2)

PLAXIS 3D représente un logiciel de référence dans ce domaine, développé spécifiquement pour la modélisation tridimensionnelle des problèmes de déformation et de stabilité en ingénierie géotechnique. Cette analyse s'appuie sur les données géotechniques et structurales issues des études préliminaires du projet (Bentley Systems, 2022).

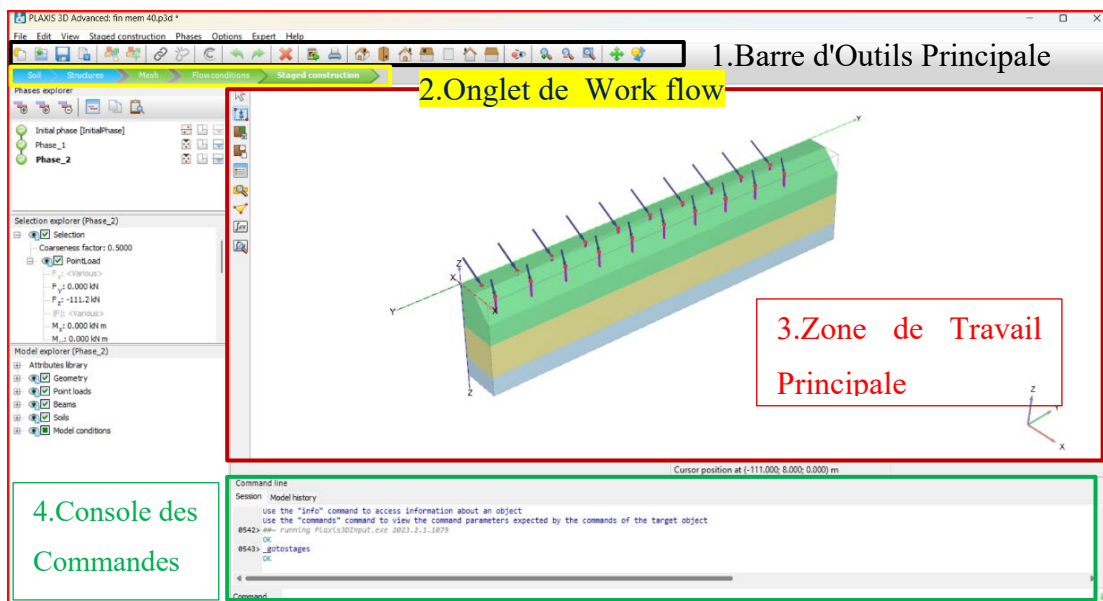


Figure 31: : L'interface du logiciel Plaxis 3D

- Geometry (Géométrie) :** Phase initiale de construction du modèle géométrique tridimensionnel, incluant la définition du domaine d'étude et des éléments structuraux.
- Mesh (Maillage) :** Génération du maillage d'éléments finis, étape critique déterminant la précision des résultats numériques.

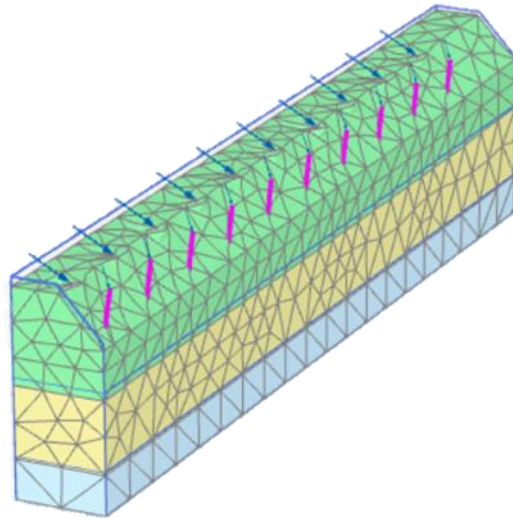


Figure 32: Le maillage d'éléments finis dans la structure sol-Pieux

- c) **Flow Conditions (Conditions d'Écoulement)** : Définition des conditions hydrauliques pour les analyses couplées hydro-mécaniques.

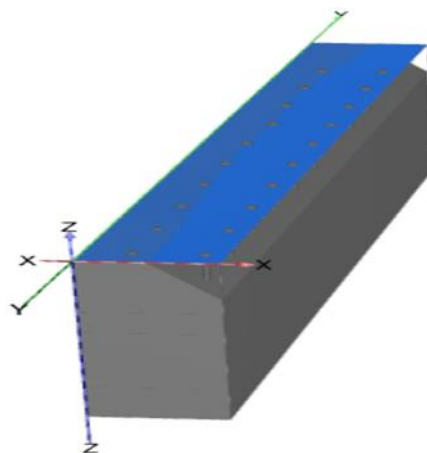


Figure 33: Les conditions d'écoulement de notre structure

1) Importation des Données du Sol

On intègre les caractéristiques géotechniques déterminées lors des campagnes de reconnaissance, basés sur les essais SPT (sondage SC05) et CPT (CPT-1 et CPT-2) et on a introduits les paramètres qu'on a déjà mentionné précédemment : (Angle de frottement interne (ϕ'), Cohésion effective (c'), Densité relative....).

2) Paramètres des Pieux

On a saisi toutes les caractéristiques des pieux de notre cas d'étude

3) Les charges

On a respectée tous les conditions opérationnelles normales (CT1) avec les charges permanentes de notre étude .

3.2.2.1.2. Résultat obtenue

Après l'intégration de toute les données nécessaires dans le logiciel PLAXIS 3D on a avoir les résultats représentée dans (Annexe 5) , Les résultats issus de PLAXIS 3D montrent que les pieux centraux (par exemple, Pieu 1, 3, 5...) présentent des déplacements horizontaux en tête compris entre 8 et 9 mm, qui diminuent progressivement avec la profondeur. Les moments fléchissant maximaux sont atteints vers -2,5 à -3,75 m, avec des valeurs pouvant dépasser 370 kN·m/m pour certains pieux, puis décroissent en profondeur. Les pieux latéraux (Pieu 2, 4, 6...) affichent des déplacements plus faibles en tête (autour de 4 à 5 mm) et des moments maximaux nettement inférieurs, généralement inférieurs à 140 kN·m/m. Cette différence s'explique par la répartition non uniforme des efforts horizontaux, les pieux centraux reprenant la majeure partie de la charge. En conception, il faudra donc renforcer les pieux centraux pour résister aux moments élevés et vérifier la limitation des déplacements admissibles pour l'ensemble du groupe.

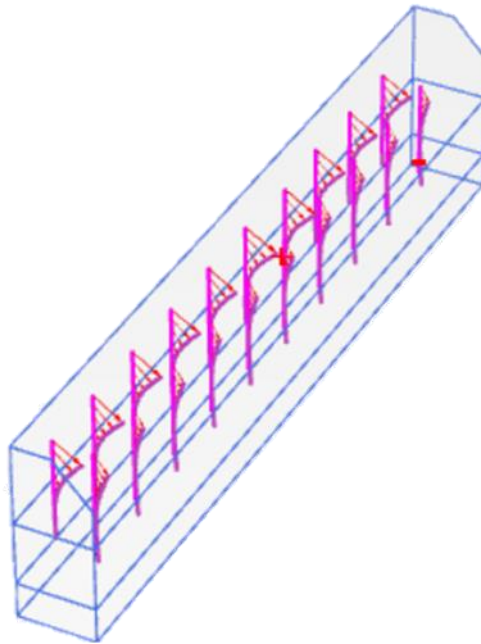


Figure 34: L'affichage de résultats appliquées sur les pieux avec PLAXIS 3D

3.2.2.1.3. Conclusion :

La modélisation avec PLAXIS 3D permet une analyse tridimensionnelle complète du comportement du quai sur pieux, intégrant les données géotechniques spécifiques du site de la

Marina d'Alger. Cette approche numérique valide les hypothèses de dimensionnement et confirme la sécurité structurelle de l'ouvrage sous les différentes conditions de chargement.

3.2.2.2. Présentation du logiciel GROUP 3D (2016.10.12)

GROUP 3D est logiciel développé par Ensoft Inc., Il y a pas une différence entre le 2D et 3D parce que c'est le même logiciel , GROUP 3D est pour la modélisation tridimensionnelle complète des groupes et le calcul des effets de groupe en trois dimensions .

3.2.2.2.1. Fonctionnalités principale

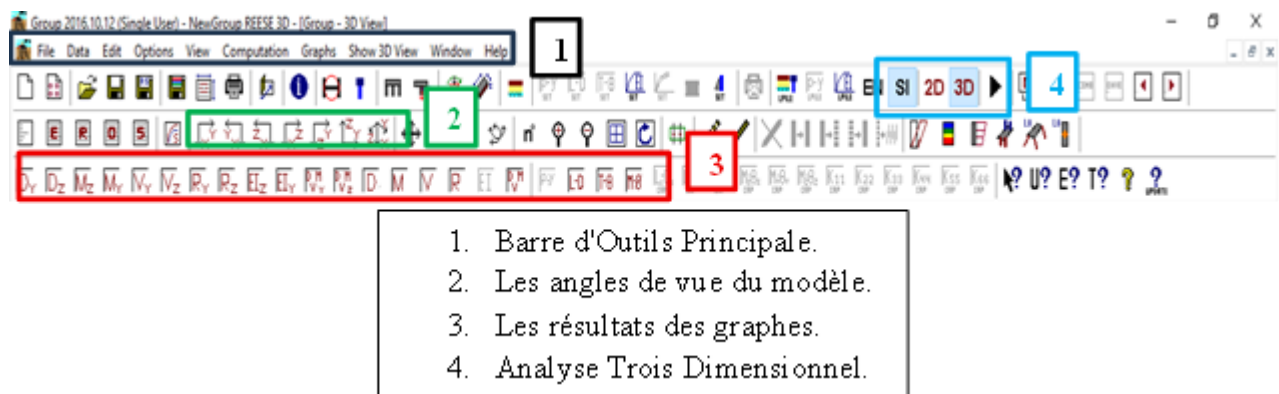


Figure 35: L'interface du logiciel GROUP 3D.

1) Pile properties

Dans la première étape on a saisi les dimensions et les propriétés des sections de pieu correspondant à chaque type de pieu utilisé dans l'analyse de groupe (avant , arrière) , après les propriétés du groupe de pieux et le types de fixations de tête de pieu entre le pieu et son chapeau avec les dimensions de la semelle de pieu, avec la troisième dimension (z) .

2) Soil Layers

On a saisi le type de sol avec les deux méthodes (REESE , O'NEILL) pour la génération automatique des courbes de résistance du sol (p-y), des courbes de charge axiale-déplacement et des courbes de couple-rotation.

3) Loading

On ajouter deux types des charges concentrée dans la semelle et le long des pieux et dans chaque charge on a appliquée deux forces dans les directions x et y (verticale, horizontale) pour chaque pieux (notre cas 20 pieux) .

- Le cas de la charge 1 : $f(x)= 111.24 \text{ KN.}$, $f(y)= 37.52 \text{ KN}$ (Pieux avant)
 $f(y)= 216.16 \text{ KN}$ (Pieux arrière)
- Le cas de la charge 2 : $f(x)= 20.58 \text{ KN}$, $f(y)= 113.45 \text{ KN}$ (Pieux avant)
 $f(y)= 19.69 \text{ KN}$ (Pieux arrière)

3.2.2.2.2. Résultat obtenue

L'analyse de logiciel GROUP 3D nous a permis d'obtenir les résultats de {Annexe 6}, les résultats de GROUP 3D montrent que L'analyse des pieux de 1 à 20 montre que la méthode REESE fournit systématiquement des moments fléchissant et déplacements maximaux plus élevés que O'NEILL, avec des écarts relatifs stables entre 8 % et 12 %.

Cette tendance reflète une approche plus conservatrice de REESE, adaptée aux contextes nécessitant une sécurité accrue, les écarts restent constants quel que soit le pieu, ce qui renforce la fiabilité comparative des deux méthodes.

Les déplacements et moments maximaux diminuent progressivement dans le groupe, mais la différence entre les méthodes reste proportionnelle.

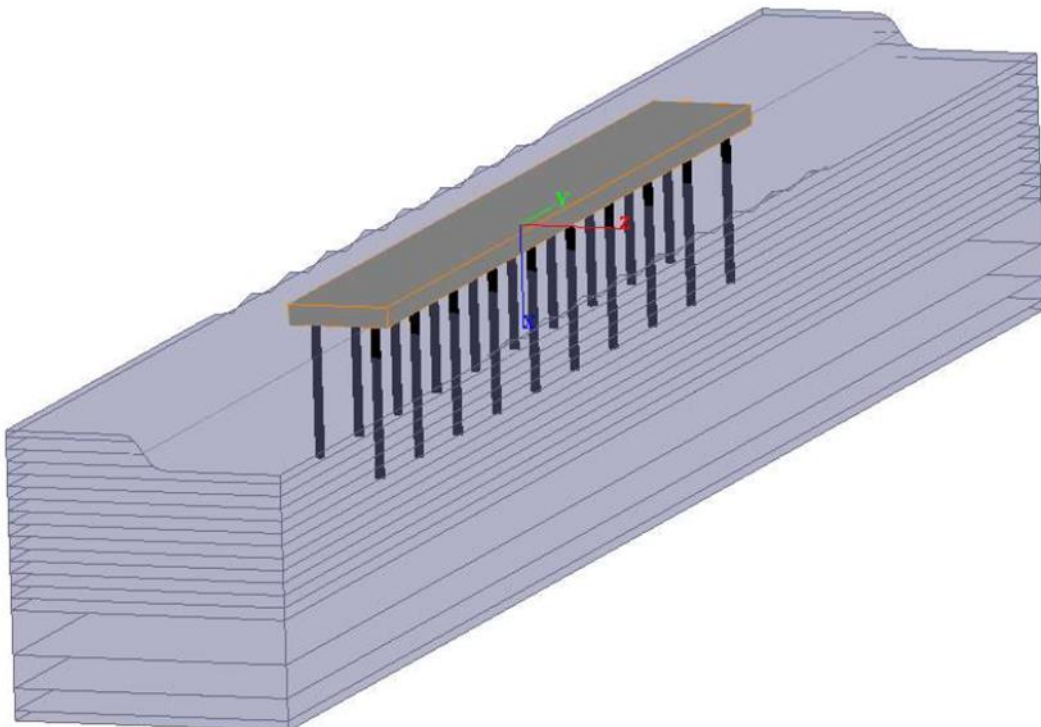


Figure 36: Le profil du sol-Pieux GROUP 3D

4. Comparaison des méthodes

4.1. Comparaison des méthodes selon les critères d'analyse

Critère	GROUP 2D	GROUP 3D	LPILE	APILE	PLAXIS 3D	PLAXIS 2D
Type de méthode	Modèle de Winkler (P-Y, T-Z, Q-Z)	Modèle de Winkler (P-Y, T-Z, Q-Z) + interactions 3D	Modèle de Winkler (P-Y, T-Z, Q-Z)	Méthodes empiriques (API, FHWA, etc.)	Méthode des éléments finis (FEM)	Méthode des éléments finis (FEM)
Type d'analyse	Plan 2D simplifié – groupe aligné	Groupe de pieux complet en 3D	Latérale uniquement – t – pieu isolé	Axiale uniquement – pieu isolé	Axiale, latérale, torsion, interactions 3D	Analyse 2D (coupes planes, conditions de symétrie)
Effets de groupe	Oui (limités au plan)	Oui (répartition spatiale complète)	Non	Non	Oui (3D complet)	Non (analyse bidimensionnelle uniquement)
Calcul de capacité portante	Oui (axiale + latérale)	Oui (axiale + latérale)	Oui (latérale)	Oui (axiale uniquement)	Oui (totale, via FEM)	Oui (via modélisation FEM)
Calcul des tassements	Estimé (simplifié)	Estimé (meilleure distribution)	Oui (tête de pieu)	Oui (relation charge/tassement axiale)	Oui (précis, déformation du sol complète)	Oui (mais limité à des géométries simples)
Précision des résultats	Moyenne à bonne	Bonne à très bonne (selon le modèle)	Bonne pour les cas latéraux	Moyenne (selon méthode choisie)	Très élevée (réponse non linéaire du sol)	Bonne à très bonne (selon simplifications)
Coût en temps de calcul	Faible	Modéré	Faible	Très faible	Élevé (simulation 3D complexe)	Modéré à élevé (selon complexité du maillage)

Courbes utilisées	P-Y, T-Z, Q-Z	P-Y, T-Z, Q-Z + interaction spatiale	P-Y, T-Z, Q-Z	Aucune courbe – formules empiriques	Modèles constitutifs (ex. Mohr-Coulomb)	Modèles constitutifs (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, etc.)
-------------------	---------------	--------------------------------------	---------------	-------------------------------------	-----------------------------------------	-----------------------------------------------------------

4.2. Avantages et limites de chaque méthode

Logiciel	Avantages	Limites
GROUP 2D	<ul style="list-style-type: none"> - Rapide et simple à utiliser - Suffisant pour configurations linéaires ou symétriques 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne modélise pas l'effet spatial complet du groupe - Moins adapté aux géométries complexes
GROUP 3D	<ul style="list-style-type: none"> - Gère la répartition 3D des pieux - Simule les effets d'interaction avec précision 	<ul style="list-style-type: none"> - Restreint à des modèles Winkler simplifiés - Pas aussi détaillé qu'un modèle éléments finis
LPile	<ul style="list-style-type: none"> - Spécialisé pour les pieux isolés - Facile à utiliser 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'effet de groupe - Ne traite pas la capacité axiale complète
APILE	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul rapide de la capacité axiale - Multiples méthodes empiriques intégrées 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne traite que les efforts verticaux - Pas d'analyse des déformations
Plaxis 3D	<ul style="list-style-type: none"> - Modélisation 3D complète – Très grande précision - Prise en compte des interactions 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût en calcul élevé - Demande des compétences avancées
Plaxis 2D	<ul style="list-style-type: none"> - Très utile pour cas plans - Moins exigeant que Plaxis 3D - Bonne précision en 2D 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas l'analyse spatiale réelle - Ne convient pas aux groupes de pieux dissymétriques

Chapitre IV : Résultats et discussion

1. Résultats et discussion

Dans ce chapitre, les résultats issus des différents logiciels de modélisation sont présentés, analysés et comparés. L'objectif est de mettre en évidence les similitudes et les écarts entre les diverses approches numériques, tout en évaluant leur pertinence pour l'étude du comportement des pieux sous charges latérales.

Cette analyse comparative permet d'apprécier la façon dont chaque logiciel traite l'interaction sol-structure, en tenant compte des hypothèses de calcul, des lois de comportement du sol, des dimensions géométriques et des conditions aux limites spécifiques à chaque modèle. Elle vise également à identifier les écarts de résultats qui peuvent découler des différences de formulation, qu'il s'agisse de modèles simplifiés basés sur des courbes P-Y, de méthodes analytiques comme la méthode de Reese et O'Neill, ou encore de modèles numériques plus sophistiqués fondés sur la méthode des éléments finis ou des schémas tridimensionnels complexes.

L'intégration de la méthode de Reese et O'Neill dans cette étude permet notamment de comparer une approche semi-empirique reconnue pour l'évaluation de la capacité latérale des pieux avec les résultats issus des logiciels LPILE, GROUP 2D/3D, PLAXIS 2D/3D et SAP2000, chacun basé sur des principes de modélisation différents. Cette confrontation méthodologique enrichit la discussion sur la fiabilité, les limites et les domaines d'application optimaux de chaque outil ou méthode

1.1. Comparaison entre la méthode

1.1.1. Comparaison des résultat des courbe P-Y :

1.1.1.1. Etude de pieu avant

1.1.1.1.1. Avec la méthode de REESE

L'analyse des résultats pour les pieux avant selon la méthode de Reese montrent que la modélisation tridimensionnelle (GROUP 3D) conduit à une réduction notable des déplacements par rapport aux approches unidimensionnelle (LPILE) et bidimensionnelle (GROUP 2D), ce qui reflète une rigidité globale accrue du système de pieux. En contrepartie, cette modélisation engendre des valeurs plus élevées de moments fléchissants et d'efforts tranchants, traduisant une meilleure prise en compte des effets d'interaction sol-structure. La constance des valeurs observées pour les différents pieux en 3D met également en évidence la stabilité numérique et la répartition homogène des sollicitations. Ces observations confirment la pertinence de la modélisation 3D pour

une représentation plus réaliste du comportement mécanique des pieux, voire le tableau ci-dessous :

Logiciel	PIEU	Déplacement (m)	Moment (KN.m)	Shear (kN)
LPILE	2	0.0058643	148.09465	37.52
GROUP 2D	2	0.00473944	147.51727	41.36495
GROUP 3D	2	0.00489294	152.02385	42.46879
GROUP 3D	10	0.00489294	152.09263	42.532409
GROUP 3D	12	0.00489294	152.09263	42.532409
GROUP 3D	20	0.00489294	152.02385	42.46879

Tableau 11: Les valeurs maximal pour chaque pieu avant dans chaque logiciel avec la méthode REESE

- Les résultats de déplacement de GROUP 2D montre un écart plus important de (19%) que GROUP 3D (16.5 %), confirmant que la modélisation 3D réduit davantage les déplacements estimés par le pieu isolé (LPILE) .
- Les écarts de moments pour GROUP 3D (2.69%), bien plus marqué que pour GROUP 2D (3.90%). Cela révèle que la modélisation 3D atténue fortement les moments dans les pieux périphériques par rapport à pieu isolé (LPILE) .
- Par rapport au efforts tranchants les écarts GROUP 2D sont (10,2 %) et de GROUP 3D (13 %) par rapport à pieu isolé (LPILE) .

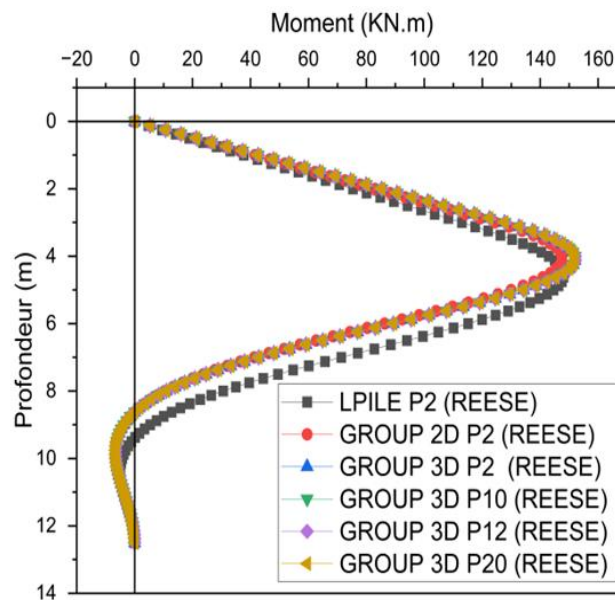


Figure 37: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE

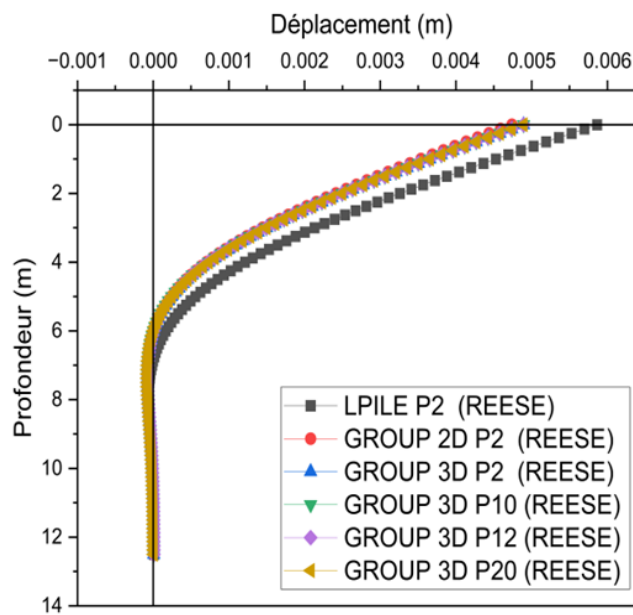


Figure 38: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE

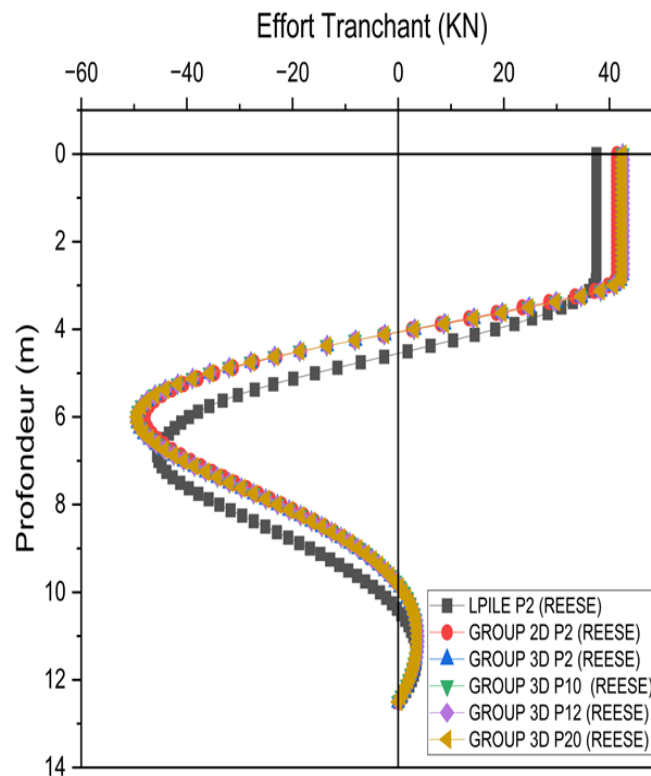


Figure 39: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de REESE

1.1.1.1.2. Avec la méthode de O'NEILL

Pour la méthode d'O'Neill, les résultats indiquent que la modélisation tridimensionnelle (GROUP 3D) procure une réduction relativement modérée des déplacements par rapport aux approches unidimensionnelle (LPILE) et bidimensionnelle (GROUP 2D). Cette tendance traduit une rigidité globale légèrement améliorée du système de fondation. Toutefois, comme pour la méthode de Reese, l'approche 3D conduit à des moments fléchissants et des efforts tranchants plus importants, mettant en évidence une meilleure prise en considération des interactions sol-structure. La constance des valeurs relevées entre les différents pieux en 3D illustre aussi la robustesse numérique du modèle et une répartition plus uniforme des sollicitations. Ces éléments confirment la valeur ajoutée de la modélisation 3D pour une représentation réaliste du comportement mécanique des pieux. voir le tableau ci-dessous :

Logiciel	PIEU	Déplacement (m)	Moment (KN.m)	Shear (kN)
LPILE	2	0.00454153	137.65017	37.52
GROUP 2D	2	0.00424383	133.83432	38.723538

GROUP 3D	2	0.00433346	136.64622	39.522796
GROUP 3D	10	0.00433346	136.68328	39.552953
GROUP 3D	12	0.00433346	136.68328	39.552953
GROUP 3D	20	0.00433346	136.64622	39.522796

Tableau 12: Les valeurs maximal de chaque pieux avant avec chaque logiciel avec la méthode O'NEILL

- Les résultats de déplacement de GROUP 2D donne exactement le même résultat que GROUP 3D avec un écart de (6,6 %) par rapport au pieu isolé (LPILE).
- Les résultats de moment de GROUP 2D donne un écart de (2,77 %) plus faible que les résultat de GROUP 3D avec un écart de (5,9 %) par rapport au pieu isolé (LPILE).
- Les écarts des efforts tranchants sont (3,2 %) de GROUP 2D, et (5 %) pour GROUP 3D par rapport au pieu isolé (LPILE).

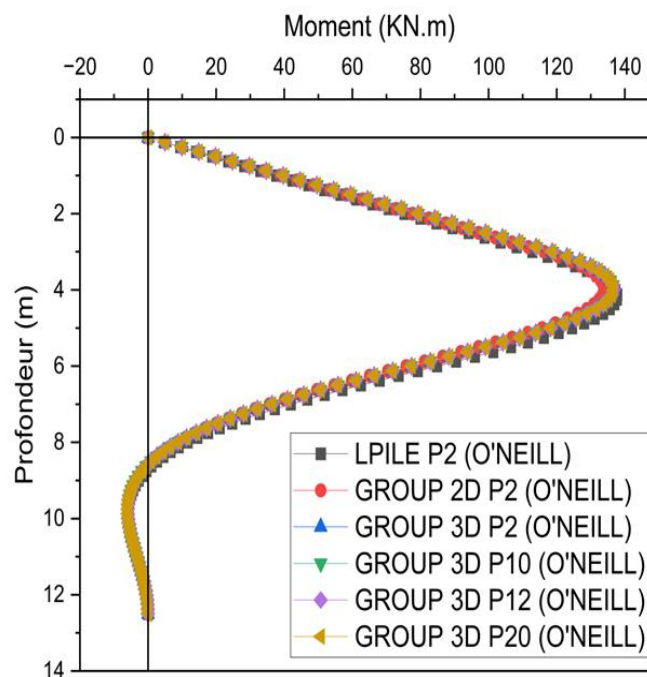


Figure 40: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode O'NEILL

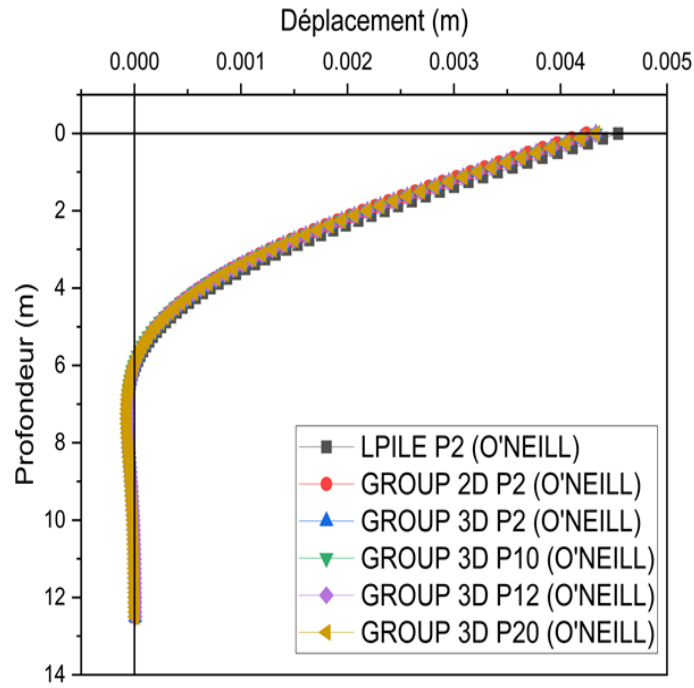


Figure 41: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode O'NEILL

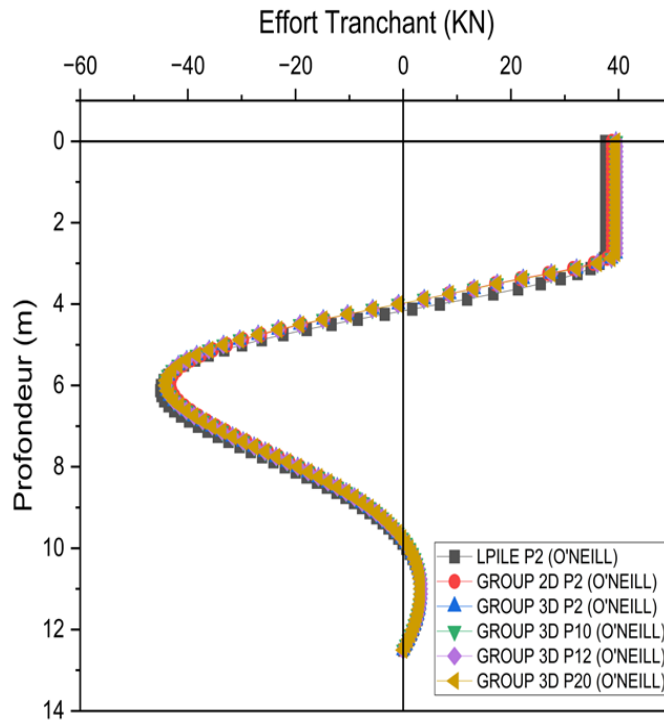


Figure 42: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux avant avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (2,2,2,10,12,20) avec la méthode de O'NEILL

1.1.1.2. Etude de pieu arrière :

1.1.1.2.1. Avec la méthode de REESE

L'analyse des résultats obtenus des pieux arrière selon la méthode de Reese montre que pour un pieu isolé et des configurations en groupe, les logiciels ne produisent pas les mêmes estimations des déplacements, des moments fléchissant et des efforts tranchants, de façon générale, le logiciel LPILE tend à fournir les valeurs les plus élevées, traduisant un résultat plus conservateur. Les logiciels GROUP 2D et surtout GROUP 3D donnent des valeurs légèrement plus faibles, ce qui reflète une modélisation plus réaliste de l'interaction sol-pieu. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de pieux dans les analyses tridimensionnelles n'a pas d'effet significatif sur les valeurs unitaires maximales, qui restent constantes quelle que soit la configuration du groupe. Ces observations soulignent l'importance du choix du logiciel et du type de modélisation dans l'évaluation des performances des fondations profondes.

Logiciel	PIEU	Déplacement (m)	Moment (kN.m)	Effort tranchant (kN)
LPILE	1	0.00483	308.13	216.16
GROUP 2D	1	0.00474	301.98	214.92
GROUP 3D	1	0.00456	277.78	213.83
GROUP 3D	9	0.00456	277.78	213.83
GROUP 3D	11	0.00456	277.78	213.83
GROUP 3D	19	0.00456	277.78	213.83

Tableau 13: Les valeurs maximal pour chaque pieux arrière dans chaque logiciel avec la méthode REESE

Le logiciel GROUP 2D appliqué à un pieu unique réduit légèrement ces valeurs : le déplacement diminue de 1,86 %, le moment de 1,99 % et l'effort tranchant de 0,57 % par rapport à LPILE.

Le logiciel GROUP 3D, également appliqué à un pieu unique, présente des réductions plus marquées, avec un déplacement inférieur de 5,59 %, un moment plus faible de 9,84 % et un cisaillement diminué de 1,08 % par rapport aux valeurs issues de LPILE.

L'augmentation du nombre de pieux dans la modélisation tridimensionnelle n'a aucun impact sur le déplacement, le moment ou le cisaillement unitaire maximal, qui demeurent respectivement à 0,00456 m, 277,78 kN·m et 213,83 kN. Cette stabilité des résultats suggère que le modèle 3D répartit les charges de manière homogène sur les pieux sans générer d'effet amplificateur par la multiplication des appuis.

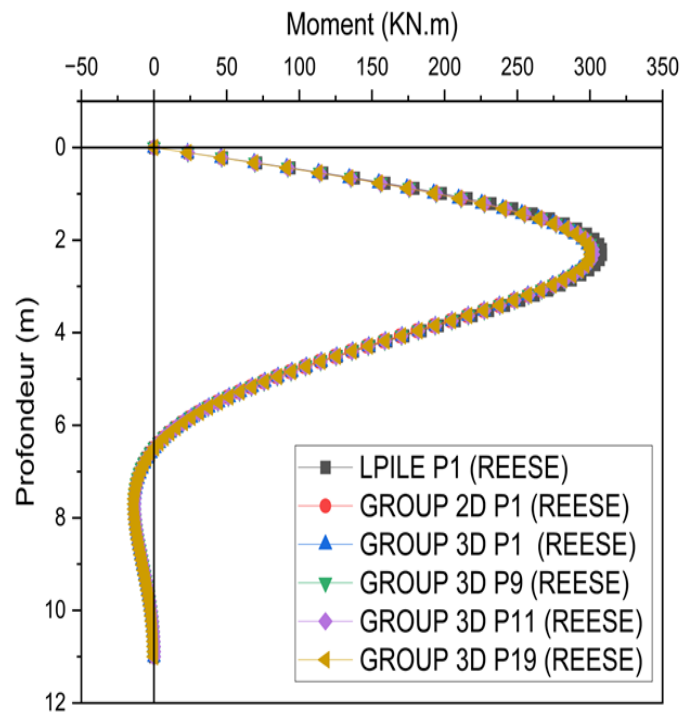


Figure 43: Graphe de la comparaison de Moment des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE

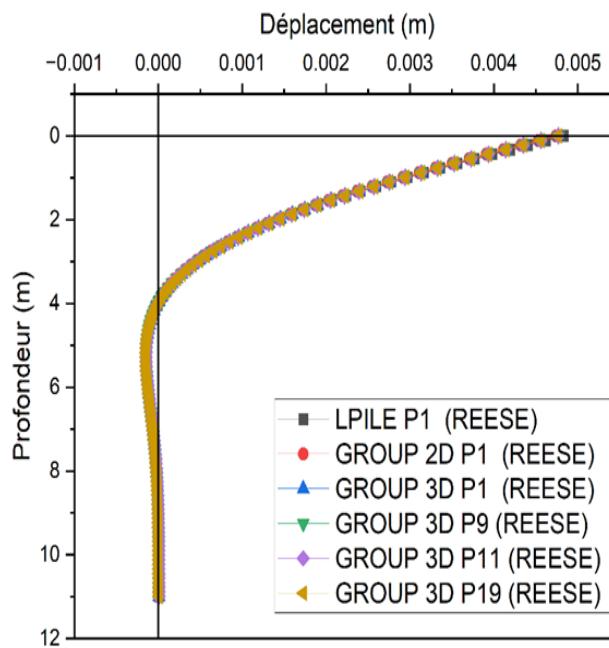


Figure 44: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE

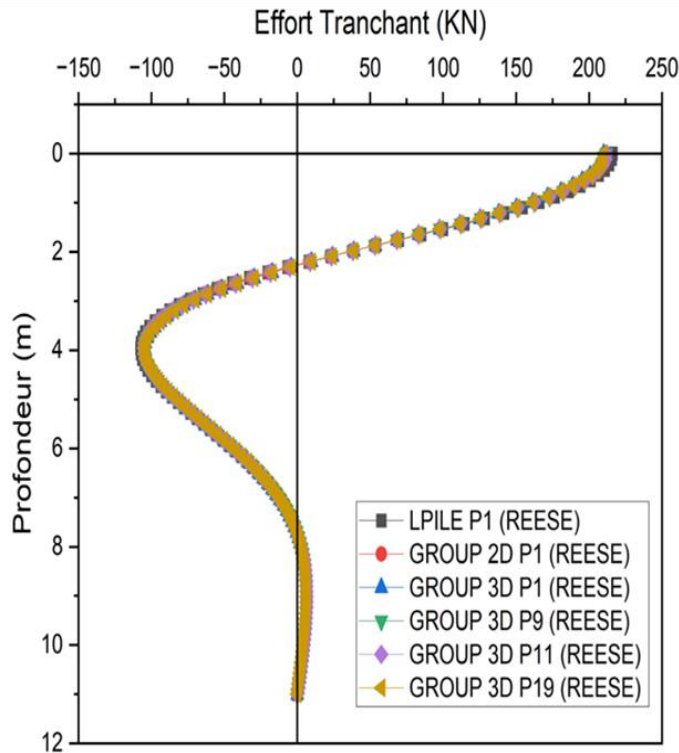


Figure 45: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE

1.1.1.2.2. Avec la méthode de O'NEILL

Les résultats issus de la méthode de O'Neill par rapport au pieux arrière mettent en évidence que les déplacements calculés avec les logiciels GROUP 2D et GROUP 3D sont globalement inférieurs à ceux obtenus avec LPILE, la différence étant plus marquée pour la modélisation tridimensionnelle, ce qui confirme le caractère moins conservateur de GROUP 3D par rapport à l'approche du pieu isolé. Les écarts observés sur les moments fléchissant et les efforts tranchants restent faibles, mais systématiquement en retrait par rapport aux valeurs fournies par LPILE, traduisant une certaine cohérence et une convergence satisfaisante entre les logiciels. Enfin, l'analyse comparative des configurations comportant plusieurs pieux montre que les résultats unitaires obtenus pour les groupes sont identiques à ceux du pieu unique modélisé dans GROUP 3D, ce qui traduit une répartition uniforme des charges et un comportement homogène de la fondation selon cette méthode.

Logiciel	PIEU	Déplacement (m)	Moment (KN.m)	Shear (kN)
LPILE	1	0.00426	279.28	216.16

GROUP 2D	1	0.00422	277.78	214.42
GROUP 3D	1	0.00403	277.78	213.83
GROUP 3D	9	0.00403	277.78	213.82
GROUP 3D	11	0.00403	277.78	213.83
GROUP 3D	19	0.00403	277.78	213.83

Tableau 14: Les valeurs maximal dans chaque pieux arrière pour chaque logiciel avec la méthode O'NEILL

Tableau 15: Les valeurs maximal dans chaque pieux arrière pour chaque logiciel avec la méthode O'NEILL

- Les résultats de déplacement de GROUP 2D et GROUP 3D sont inférieurs à LPILE, avec un écart plus marqué pour GROUP 3D (5.40%). Cela confirme que la modélisation 3D est moins conservative que LPILE (pieu isolé)
- Les écarts de moments et efforts tranchants sont faibles ($\leq 1.1\%$), mais systématiquement inférieurs à LPILE. La cohérence entre GROUP 2D et GROUP 3D suggère une bonne convergence des modèles.
- Les pieux 9, 11, et 19 ont exactement les mêmes résultats que le pieu 1 dans GROUP 3D (écart 0%). Cela indique une répartition uniforme des charges dans le groupe de pieux pour cette méthode.

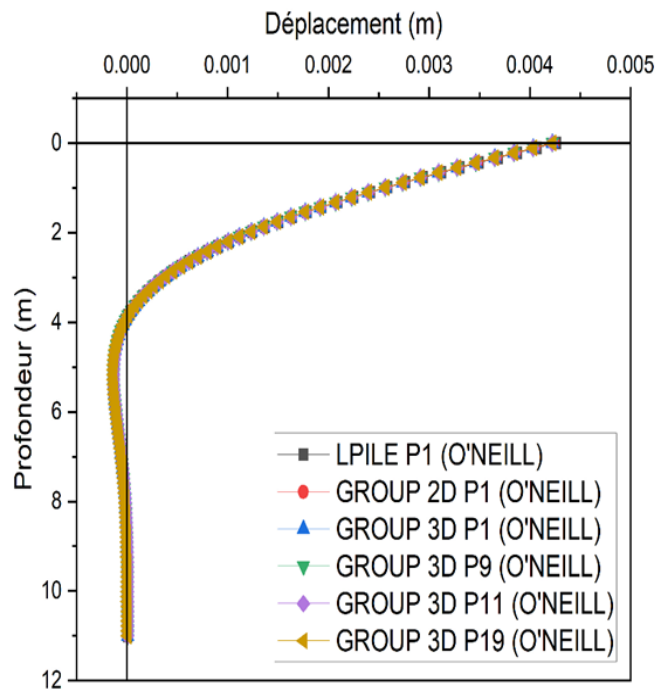


Figure 46: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode O'NEILL

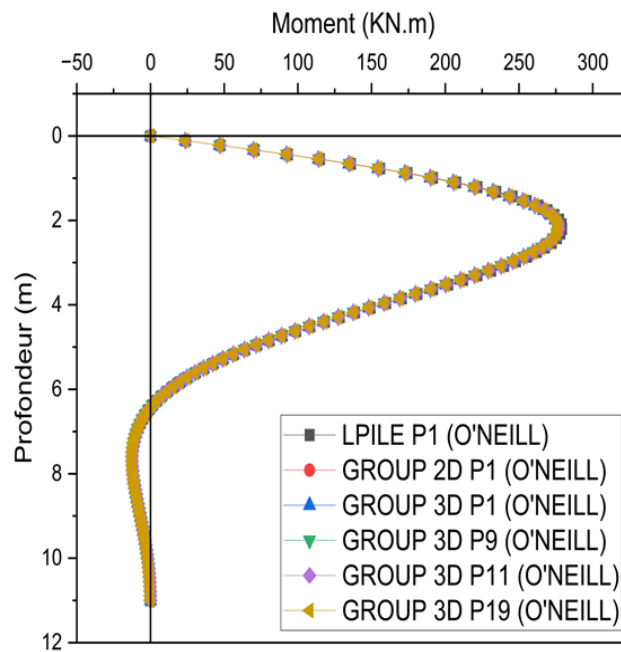


Figure 47: Graphe de la comparaison de moment des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode O'NEILL

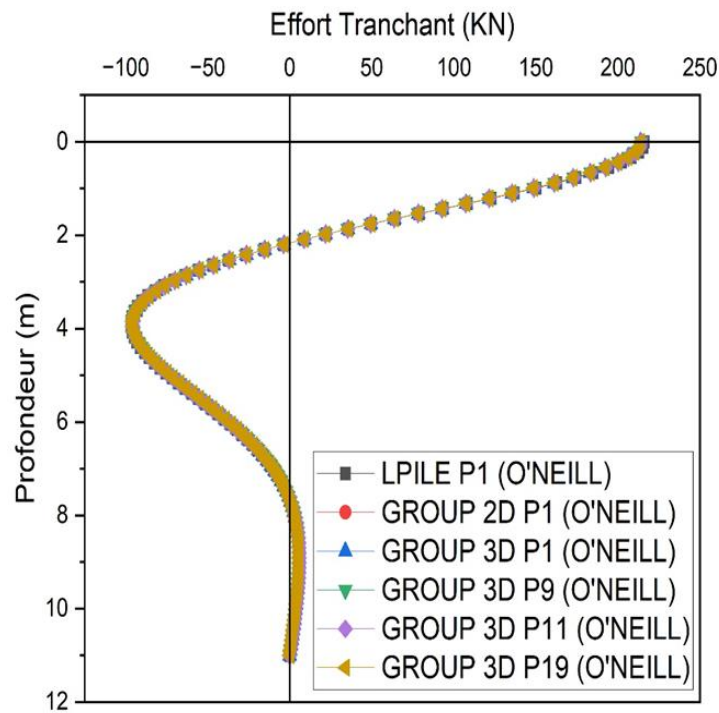


Figure 48: Graphe de la comparaison de l'effort tranchant des Pieux arrière avec LPILE, GROUP 2D et GROUP 3D (1,1,1,9,11,19) avec la méthode de REESE

1.1.2. Comparaison entre PLAXIS 2D/3D

Les résultats numériques des simulations PLAXIS 2D et 3D révèlent des différences significatives dans le comportement des pieux, notamment pour les déplacements latéraux et les moments fléchissant. L'analyse comparative montre que le modèle 3D capture des interactions géométriques et des effets tridimensionnels absents en 2D, conduisant à des écarts notables.

1.1.2.1. Pour le pieu avant

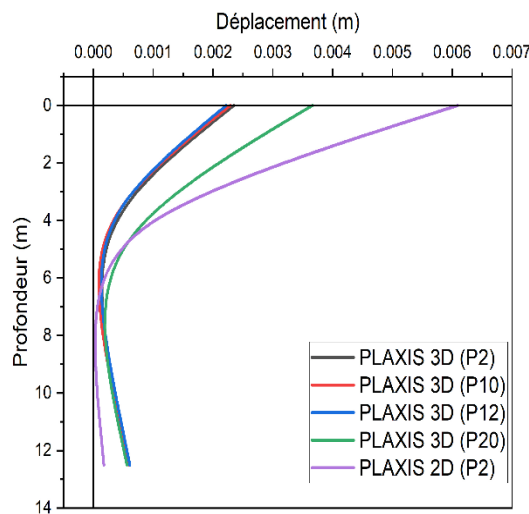


Figure 49: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

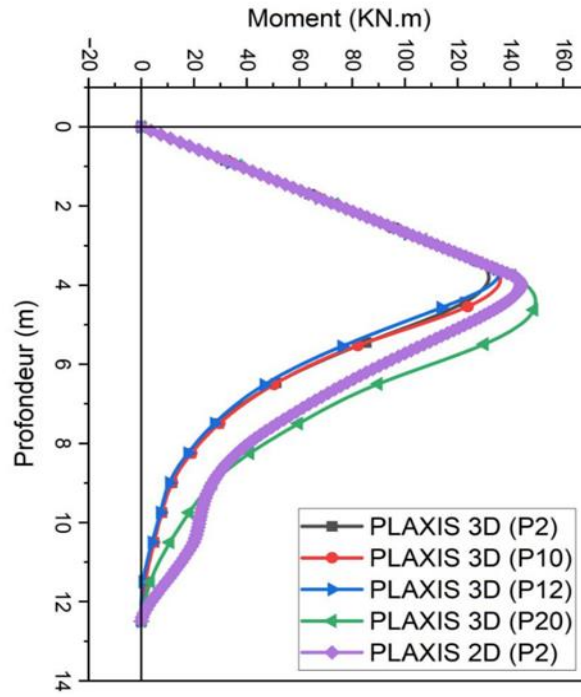


Figure 50: Graphe de la comparaison de moment des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

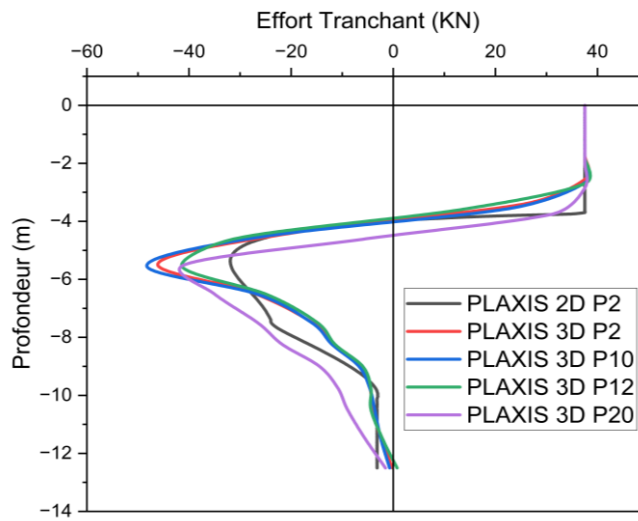


Figure 51: Graphe de la comparaison d'Effort tranchant des Pieux avant (2,2,10,12,20) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

1.1.2.2. Pour le pieu arrière :

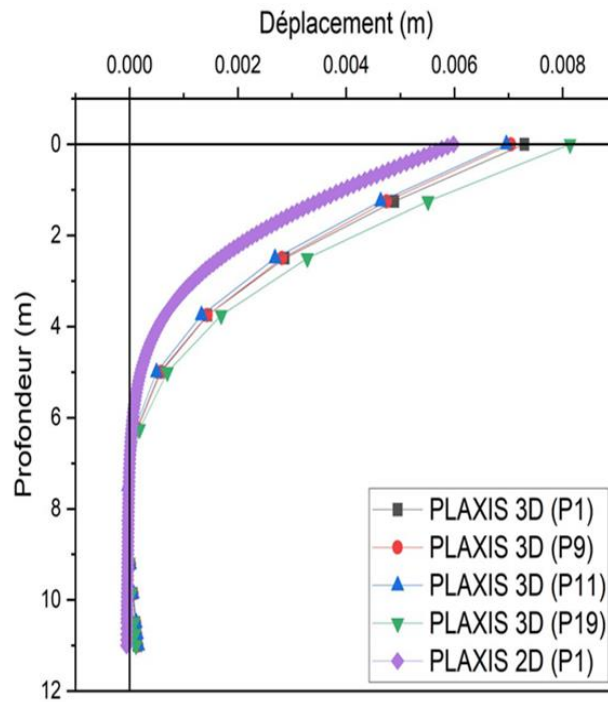


Figure 52: Graphe de la comparaison de déplacement des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

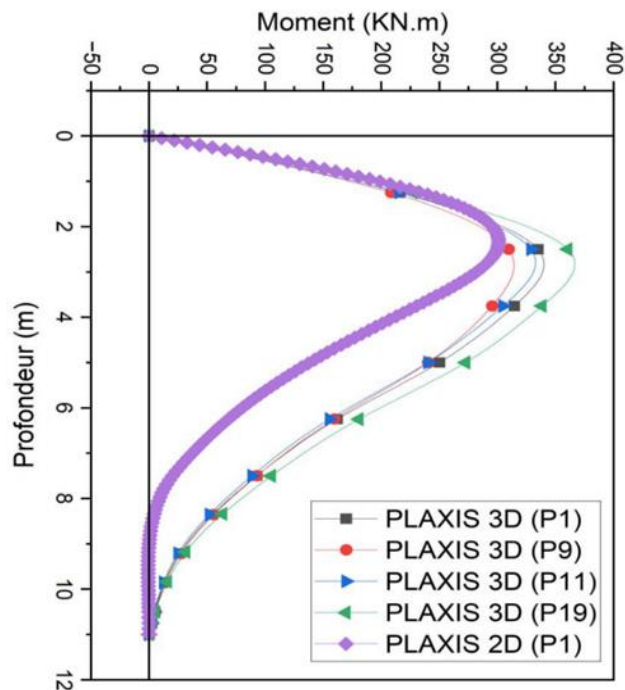


Figure 53: Graphe de la comparaison de moment des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

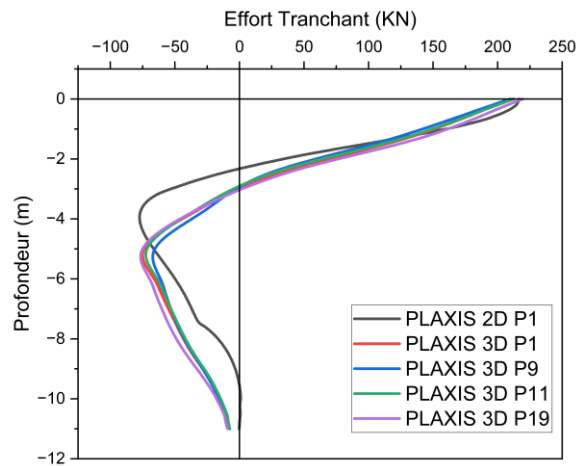


Figure 54: Graphe de la comparaison d'Effort tranchant des Pieux arrière (1,1,1,9,11,19) avec PLAXIS 2D et PLAXIS 3D

Discussion des résultats :

Les déplacements en tête de pieu sont systématiquement plus élevés en 3D qu'en 2D. Par exemple, pour PIEU 1 à Y=0 m :

- PLAXIS 3D : 0.00729 m
- PLAXIS 2D : 0.00598 m (écart relatif de 18%).

Les profils de déplacement en 3D présentent une décroissance non-linéaire avec la profondeur, tandis que le 2D montre une atténuation plus régulière. À Y=5 m, PIEU 1 accuse 0.00056 m (3D) contre 0.00058 m (2D), indiquant une rigidité apparente différente

Les moments maximaux en 3D dépassent significativement ceux du 2D. Pour PIEU 1 à Y=5 m :

- 3D : 127.70 KN.m
- 2D : 43.46 KN.m (écart de 66%)

Les résultats obtenus avec PLAXIS 2D et 3D montrent des différences notables en termes de déplacements et de moments fléchissant. Globalement, les déplacements maximaux calculés en 3D sont supérieurs à ceux du modèle 2D, ce qui s'explique par une meilleure prise en compte des effets tridimensionnels et des interactions sol-structure. De même, les moments fléchissant atteignent des valeurs plus élevées en 3D, notamment entre 2,5 m et 5 m de profondeur, alors qu'en 2D, les pics sont plus proches de la surface. Cette comparaison met en évidence la nécessité d'utiliser la modélisation 3D pour des analyses précises des structures soumises à des sollicitations complexes.

1.2. Comparaison des méthodes selon la dimension (2D/3D) :

Dans le cas de Marina Bay d'Alger le projet a été réalisé en utilisant la méthode des éléments finis les résultats issus du logiciel SAP 2000, on a travaillé avec la méthode des courbes P-Y par le logiciels GROUP 2D/3D, et la méthode des éléments finis avec PLAXIS 2D/3D pour évaluer les différences et les convergences entre les résultats obtenus , cette comparaison permet de mieux comprendre les capacités et les limitations de chaque logiciel.

Concernant les dimensions de notre analyse on a capté que l'analyse tridimensionnel 3D offre une modélisation plus précis par rapport à l'analyse bidimensionnel 2D , donc notre but vise à une comparaison détaillée des résultats pour évaluer les performance de chaque méthode et chaque logiciel pour chaque pieux dans notre cas d'étude tous les résultats sont dans (L'ANNEXE 7).

1.2.1. Le moment dans le Cas d'un pieu avant :

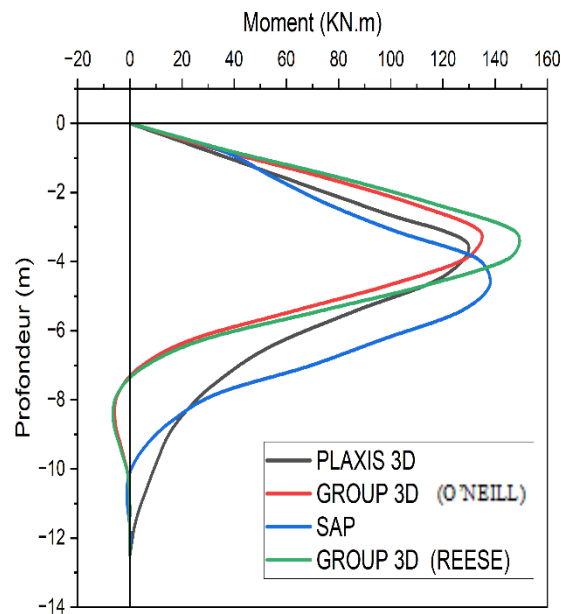


Figure 55: Graphe de comparaison des résultats du moment des logiciels (SAP ,PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

1.2.2. Le moment dans le Cas d'un pieu arrière :

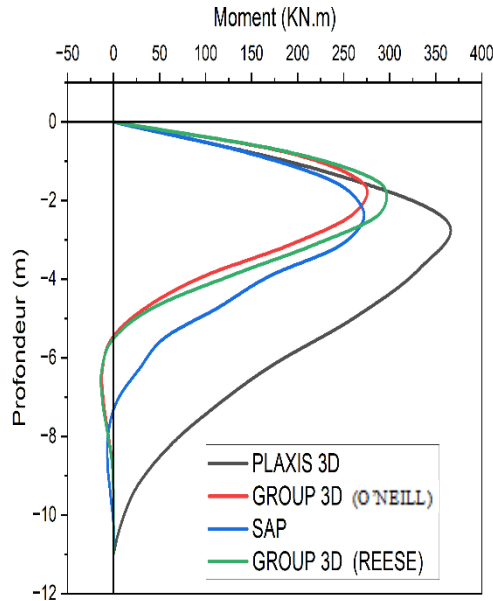


Figure 56: Graphe de comparaison des résultats du moment des logiciels (SAP ,PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

1.2.2.1. Discussion des résultats

- Analyse comparative de proximité entre PLAXIS 3D et GROUP 3D par rapport à SAP2000

GROUP O'NEILL est systématiquement plus proche de SAP2000 que PLAXIS 3D pour l'ensemble des 20 pieux analysés.

PIEU	Ecart PLAXIS 3D	Ecart GROUP REESE	Ecart GROUP O'NEILL	Le plus proche du SAP2000
1	51 %	40 %	38 %	G- O'NEILL
2	26 %	28 %	20 %	G- O'NEILL
3	57 %	33%	31 %	G- O'NEILL
4	46 %	57 %	46 %	PLAXIS/G-O'NEILL
5	38 %	23 %	21 %	G- O'NEILL
6	37 %	48 %	38 %	PLAXIS
7	58 %	43 %	40 %	G- O'NEILL
8	30 %	42 %	32 %	PLAXIS
9	23 %	14 %	12 %	G- O'NEILL
10	26 %	40 %	30 %	PLAXIS

11	43 %	21 %	18 %	G- O'NEILL
12	28 %	44 %	33 %	PLAXIS
13	39 %	18 %	16 %	G- O'NEILL
14	8 %	4 %	4 %	G- O'NEILL
15	39 %	23 %	21 %	G- O'NEILL
16	13 %	1 %	6 %	G- O'NEILL
17	47 %	32 %	30%	G- O'NEILL
18	8 %	7 %	1%	G- O'NEILL
19	42 %	27 %	25%	G- O'NEILL
20	1 %	16 %	8 %	PLAXIS

Tableau 16: Analyse comparative de proximité entre PLAXIS 3D et GROUP 3D par rapport à SAP2000

- PLAXIS donne systématiquement des moments maximaux plus élevés que SAP , les écarts entre PLAXIS et SAP varient de +23% à +58% (sauf cas particuliers).
- Les écarts entre REESE et SAP sont généralement compris entre +14% et +57%.
- GROUP O'NEILL est le plus proche de SAP dans la majorité des cas **avec des** écarts entre O'NEILL et SAP les plus faibles, souvent entre +8% et +38%.

• Discussion :

Les écarts entre les logiciels proviennent principalement du niveau de sophistication de la modélisation du sol et de l'interaction sol-pieu : PLAXIS utilise une modélisation avancée par éléments finis et prend en compte les conditions hydrauliques avec une marge d'erreur plus importante , SAP applique une approche simplifiée par ressorts, et GROUP REESE/O'NEILL emploient des méthodes semi-empiriques intermédiaires.

Ainsi, PLAXIS tend à donner des moments plus élevés, SAP des moments plus faibles, et GROUP REESE/O'NEILL des valeurs intermédiaires, O'NEILL étant souvent le plus proche de SAP.

Ces différences reflètent la capacité de chaque logiciel à représenter la complexité réelle du comportement sol-structure.

1.2.3. Résultats de la capacité portante (KN)

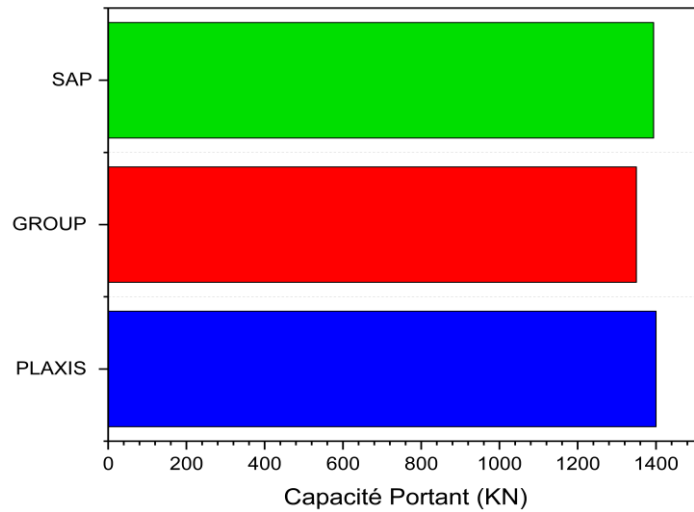


Figure 57: L'histogramme présente la capacité portante (kN) de (SAP, GROUP, SAP)

- PLAXIS donne la capacité portante la plus élevée, 1400 kN, ce qui reflète probablement une modélisation plus raffinée prenant en compte les non-linéarités du sol.
- SAP donne une capacité légèrement inférieure : 1400 kN, très proche de PLAXIS. Cela peut signifier que les hypothèses de modélisation dans SAP sont comparables à celles de PLAXIS en termes de rigidité et de résistance du sol.
- GROUP fournit une valeur bien plus basse, 1390 kN, ce qui pourrait être dû à des hypothèses plus conservatrices ou une simplification des interactions sol-structure.

Parmi les trois logiciels, PLAXIS donne une capacité portante très proche de celle de SAP, avec un écart d'environ 0,67 %, tandis que GROUP s'en écarte davantage (≈ 6 %). Cela suggère une meilleure corrélation entre SAP et PLAXIS dans le contexte de votre modélisation.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude comparative a évalué trois méthodes de calcul pour le dimensionnement de quais sur pieux en prenant le projet Marina Bay d'Alger comme cas d'application : la modélisation simplifiée par ressorts (SAP 2000), la méthode semi-empirique des courbes P-Y (GROUP/LPILE), et la modélisation par éléments finis (PLAXIS 2D/3D et GROUP 2D/3D). L'objectif principal consistait à analyser et confronter ces approches distinctes à travers l'évaluation de la capacité portante, des déformations et des moments de flexion dans les pieux, permettant d'appréhender les spécificités de chaque méthode dans le contexte géotechnique particulier du site d'étude.

L'analyse comparative révèle des écarts significatifs entre les différentes méthodes de calcul, expliqués principalement par le niveau de sophistication de la modélisation de l'interaction sol-pieu adopté par chaque approche. PLAXIS génère des moments de flexion plus élevés en raison de sa modélisation avancée par éléments finis qui prend en compte la complexité du comportement du sol et les conditions hydrauliques, bien qu'avec une marge d'erreur potentiellement plus importante. SAP 2000 produit des moments plus faibles du fait de son approche simplifiée par ressorts qui ne capture pas pleinement la redistribution des contraintes dans le sol. GROUP REESE/O'NEILL fournit des valeurs intermédiaires, avec la méthode O'NEILL montrant une convergence notable avec les résultats de SAP 2000. Ces différences reflètent la capacité variable de chaque logiciel à représenter la complexité réelle du comportement sol-structure et mettent en évidence l'importance du choix méthodologique dans le processus de dimensionnement.

Cette recherche contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine de la géotechnique portuaire à plusieurs niveaux. Sur le plan méthodologique, l'étude propose une grille d'analyse comparative rigoureuse permettant d'évaluer la pertinence de différentes approches de calcul selon les spécificités du projet et les contraintes opérationnelles. Sur le plan technique, les résultats obtenus constituent une base de données de référence pour le dimensionnement d'ouvrages similaires dans le contexte géotechnique algérien, particulièrement pour les sols marins de la région d'Alger. Sur le plan pratique, l'investigation fournit aux ingénieurs praticiens un cadre décisionnel pour le choix de la méthode de calcul la plus appropriée selon les phases du projet et le niveau de précision requis.

Au terme de cette analyse comparative, il ressort que la méthode des courbes P-Y (GROUP/LPILE) constitue l'approche la plus équilibrée pour les projets de dimensionnement de quais sur pieux. Cette recommandation se justifie par plusieurs considérations : la précision technique offerte par cette méthode grâce à sa base empirique solide, son efficacité opérationnelle qui présente un excellent rapport entre la qualité des résultats obtenus et les ressources nécessaires

Conclusion Générale

à sa mise en œuvre, et sa fiabilité découlant des corrélations empiriques qui bénéficient d'une validation extensive par l'expérience internationale.

Pour optimiser la fiabilité des études, une approche méthodologique graduée est préconisée selon les phases du projet : utilisation de GROUP/LPILE pour le dimensionnement de base en phase préliminaire, recours à PLAXIS pour les configurations complexes ou les ouvrages critiques en phase de vérification, et contrôle par SAP 2000 pour adopter une approche conservatrice en phase de validation. Cette stratégie multicritère garantit à la fois la fiabilité technique et l'efficacité économique des études de dimensionnement.

L'étude présente certaines limites, notamment son appui sur un cas unique qui mériterait d'être étendu à d'autres contextes géotechniques, et l'absence de données de monitoring in-situ limitant la validation expérimentale des résultats numériques. Les perspectives de recherche s'orientent vers le développement de corrélations locales par l'établissement de courbes P-Y spécifiques aux conditions géotechniques algériennes, la validation expérimentale par monitoring d'ouvrages instrumentés, l'optimisation multicritère intégrant des considérations économiques et environnementales, et l'exploration du potentiel de l'intelligence artificielle pour l'optimisation des paramètres de modélisation.

En définitive, cette étude apporte une contribution significative à la compréhension de l'interaction sol-pieu dans le contexte des ouvrages portuaires. Les résultats démontrent que le choix de la méthode de calcul constitue un facteur déterminant dans la qualité du dimensionnement et soulignent l'importance d'une approche méthodologique rigoureuse. La méthode des courbes P-Y s'impose comme la solution optimale offrant le meilleur compromis entre précision, efficacité et fiabilité, constituant un guide précieux pour les praticiens et contribuant à l'amélioration des pratiques de dimensionnement des ouvrages portuaires en Algérie tout en ouvrant des perspectives prometteuses pour le développement d'une expertise géotechnique nationale.

Annexes

Annexe 1 : Les Résultats de logiciel APILE

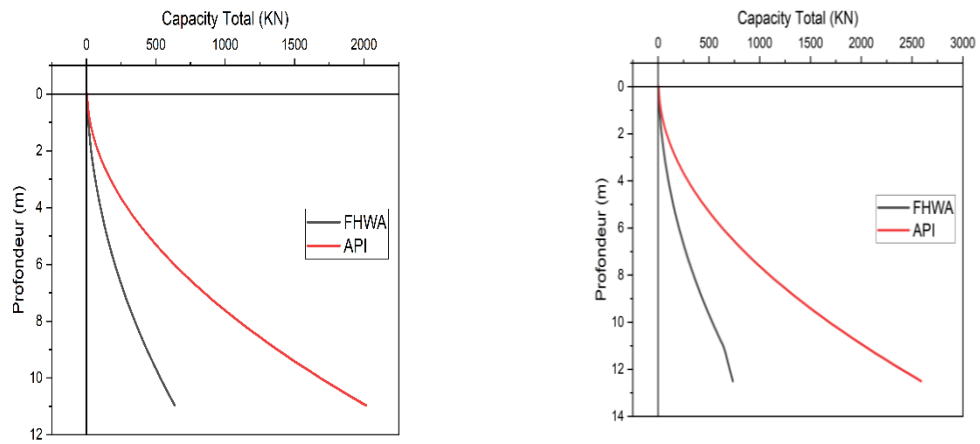


Figure 59: Résultat de la Capacité totale (KN) du a-pieu arrière, b-pieu avant

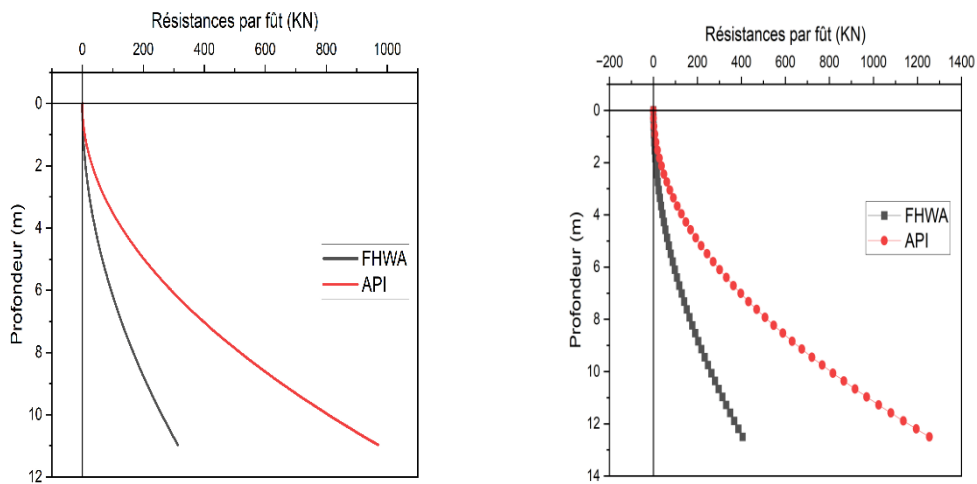


Figure 58: Résultat de la Résistance par fût (KN) du a-pieu arrière, b-pieu avant

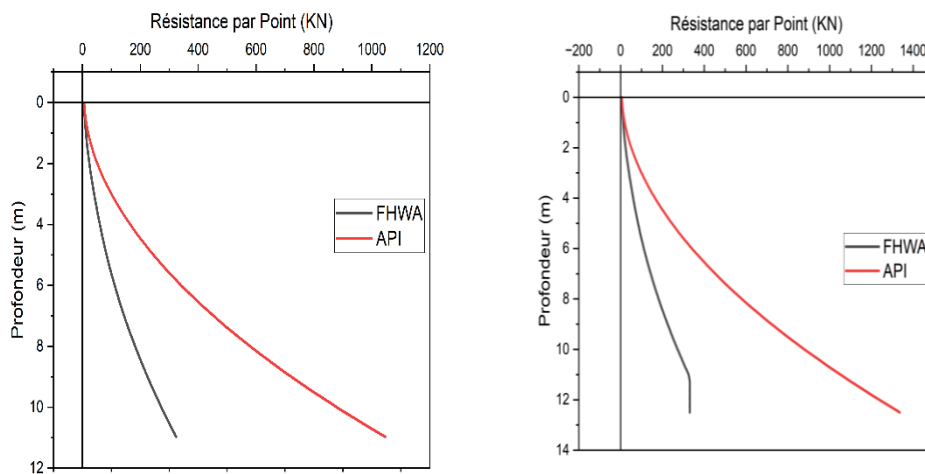


Figure 60: Résultat de la Résistance par pointe (KN) du a-pieu arrière, b-pieu avant

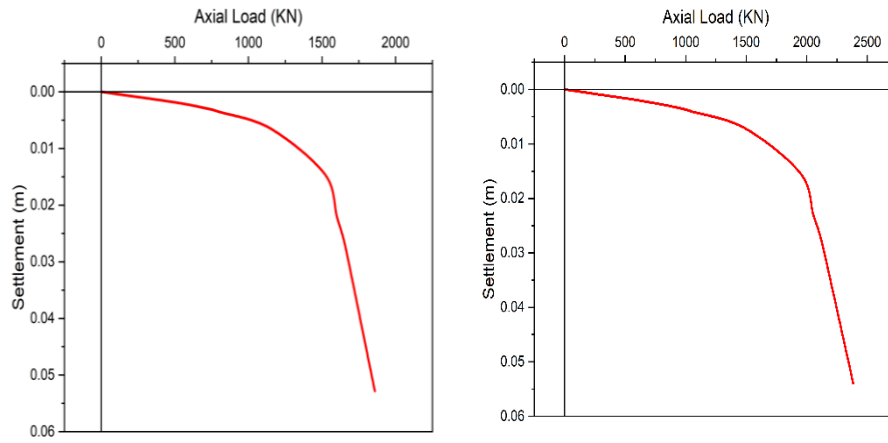


Figure 61: Résultat de Tassement (m) du a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 2 : Les Résultats de logiciel LPILE

- Les résultats de la méthode REESE

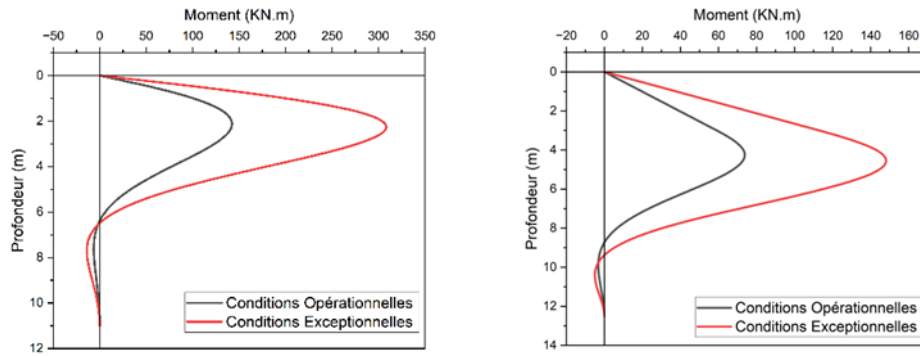


Figure 62: Résultats de moment (KN.m) avec la méthode de REESE dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

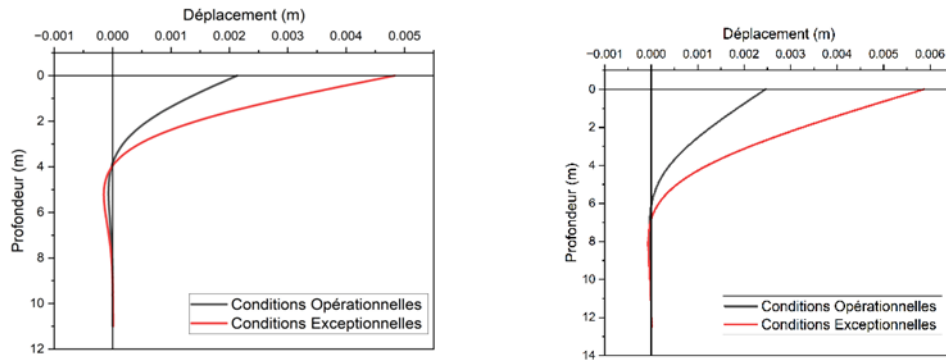


Figure 63: Résultats de déplacement (m) avec la méthode de REESE dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

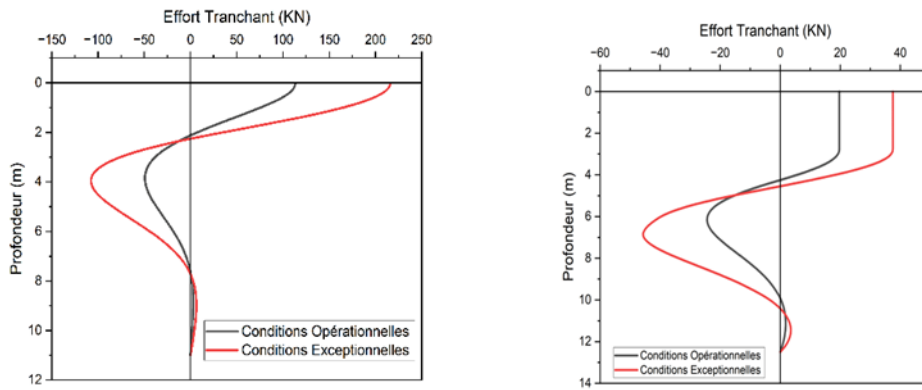


Figure 64: Résultats d'Effort Tranchant (kN) avec la méthode de REESE dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

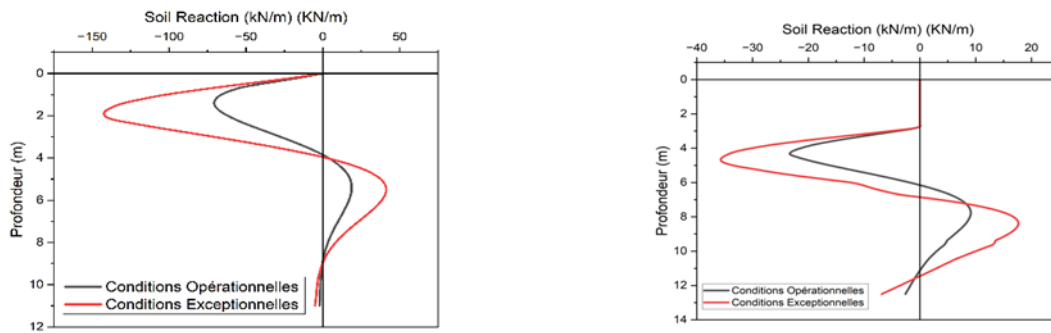


Figure 65: Résultats de soil reaction (KN/m) avec la méthode de REESE dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

- Les résultats de la méthode O'NEILL

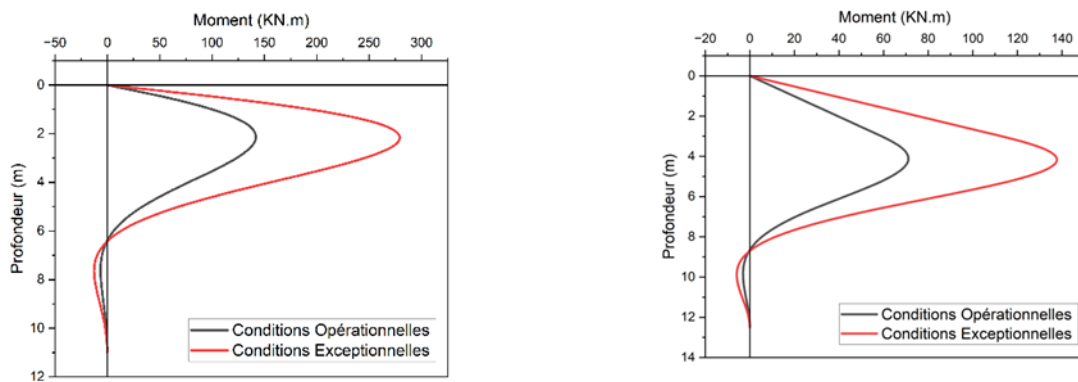


Figure 66: Résultats de moment (KN.m) avec la méthode de O'NEILL dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

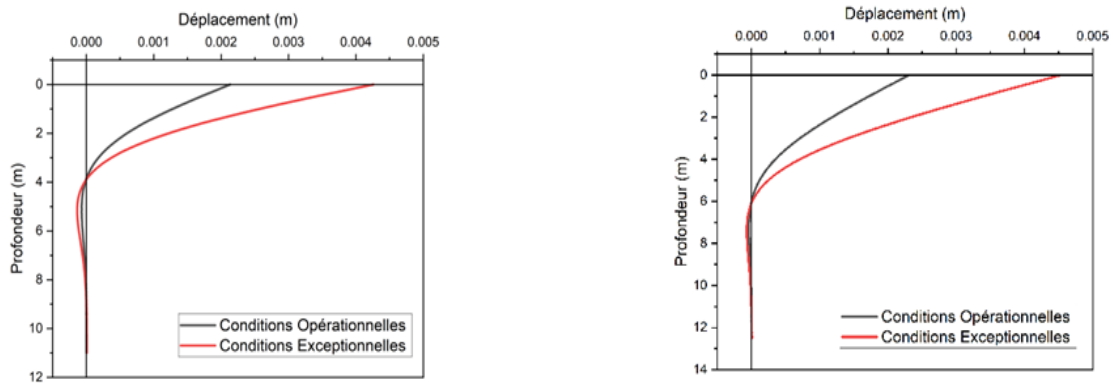


Figure 67: Résultats de déplacement (m) avec la méthode de O'NEILL dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

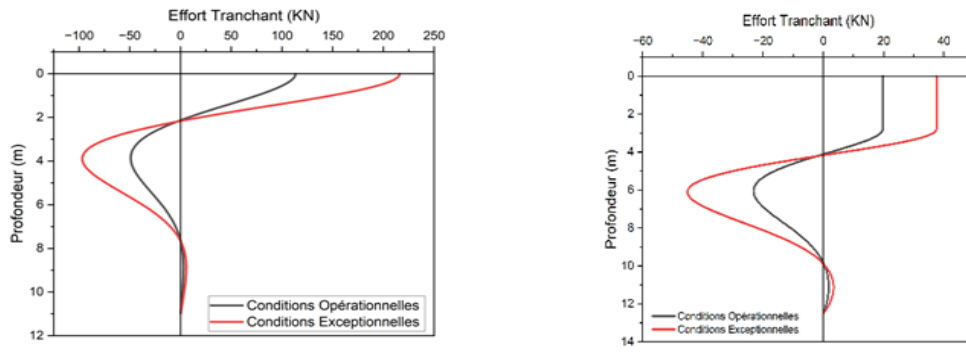


Figure 68: Résultats d'Effort Tranchant (kN) avec la méthode de O'NEILL dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

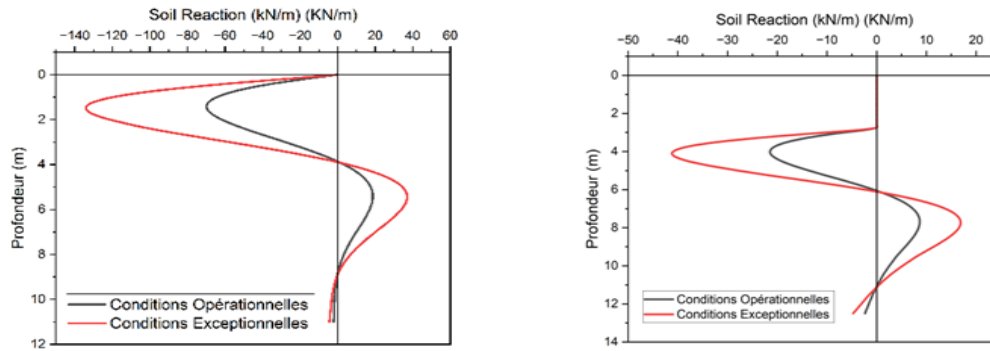


Figure 69: Résultats de soil reaction (kN/m) avec la méthode de O'NEILL dans les condition Opérationnelles et Exceptionnelles de a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 3 : Les Résultats de logiciel PLAXIS 2D

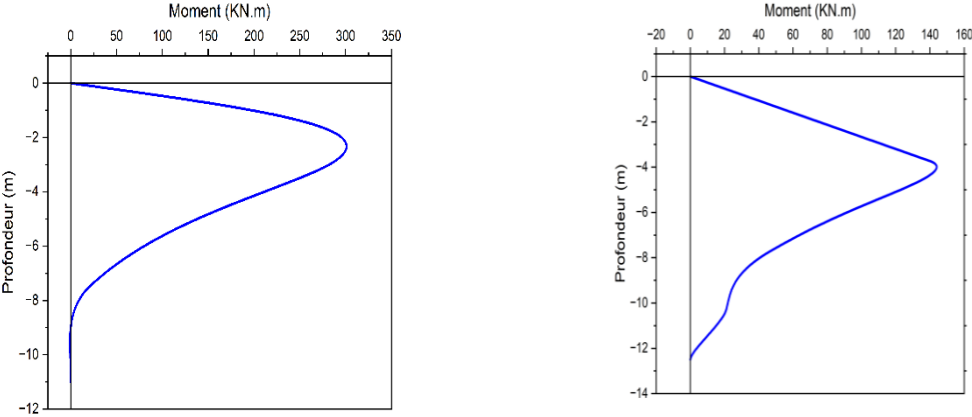


Figure 70: Résultats de moment (KN.m) de a-pieu arrière, b-pieu avant

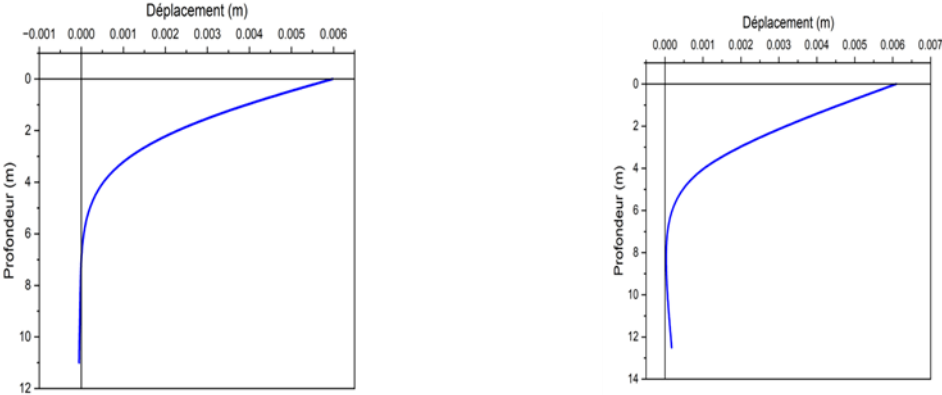


Figure 71: Résultats de déplacement (m) de a-pieu arrière, b-pieu avant

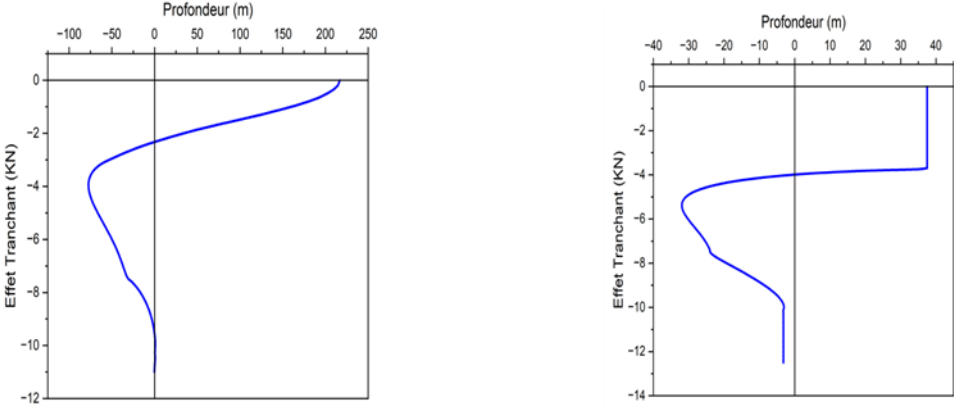


Figure 72: Résultats d'Effort Tranchant (KN) de a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 4 : Les Résultats de logiciel GROUP 2D

- Les résultats de la méthode REESE

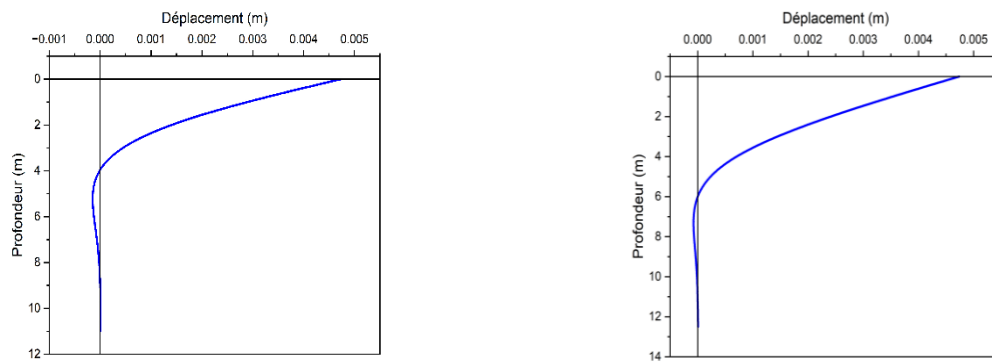


Figure 73: Résultats de déplacement (m) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

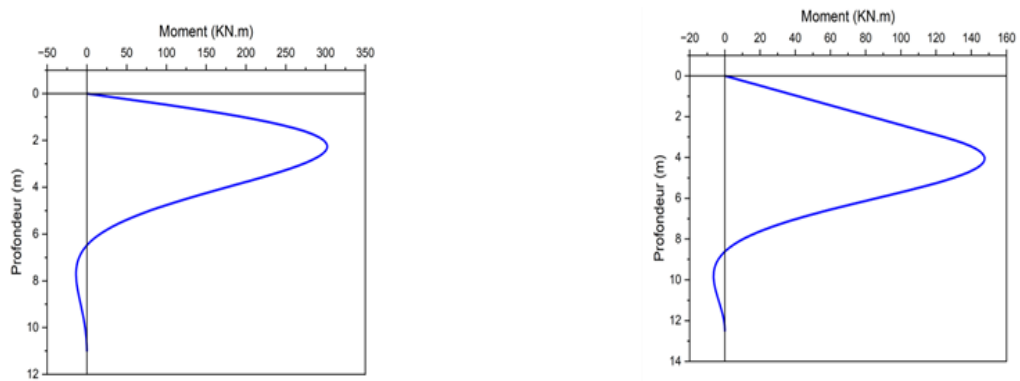


Figure 74: Résultats de moment (KN.m) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

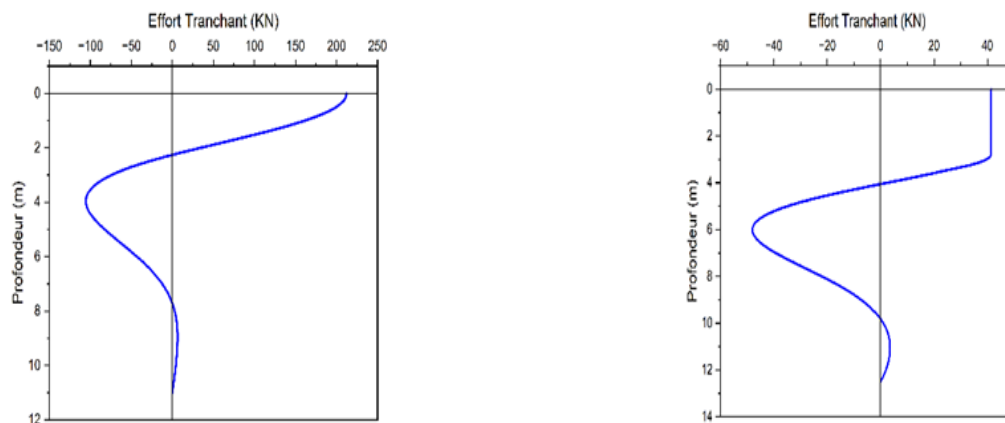


Figure 75: Résultats d'Effort Tranchant (KN) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

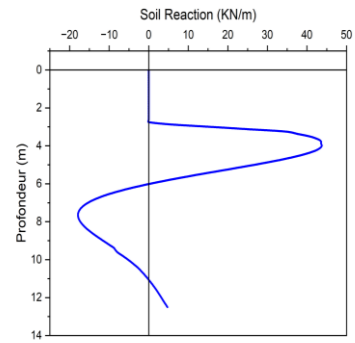
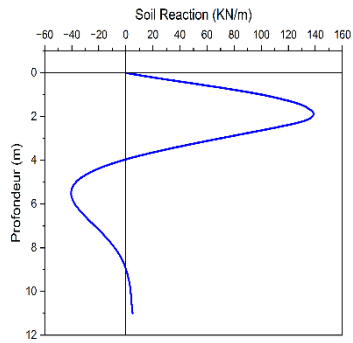


Figure 76: Résultats de soil reaction (KN/m) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

- Les résultats de la méthode O'NEILL

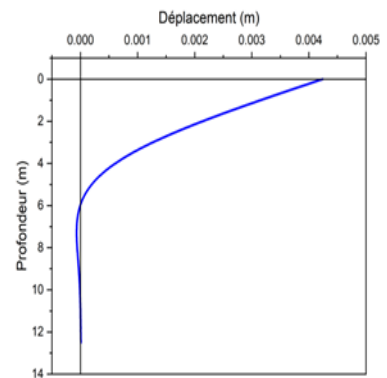
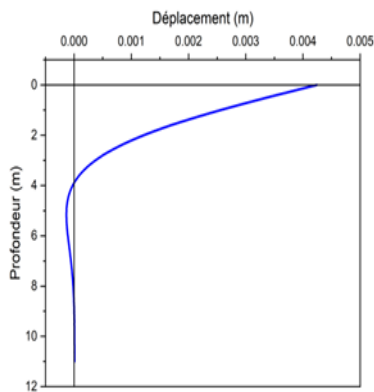


Figure 77: Résultats de déplacement (m) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

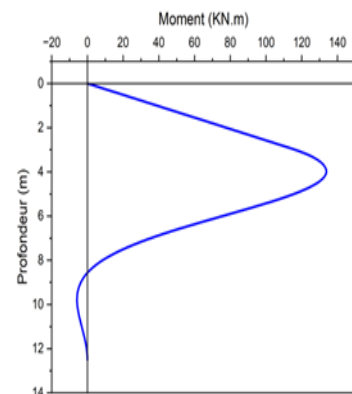
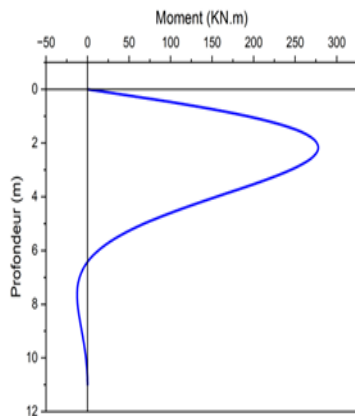


Figure 78: Résultats de moment (KN.m) avec la méthode O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

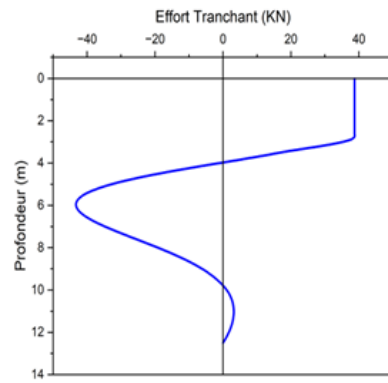
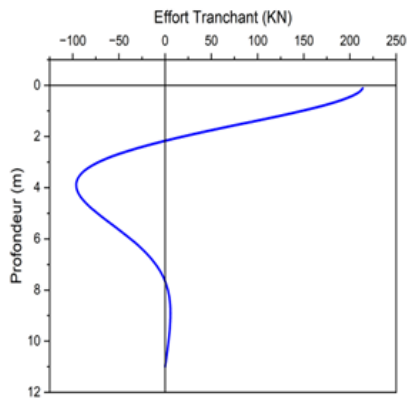


Figure 79: Résultats d'Effort Tranchant (KN) avec la méthode O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

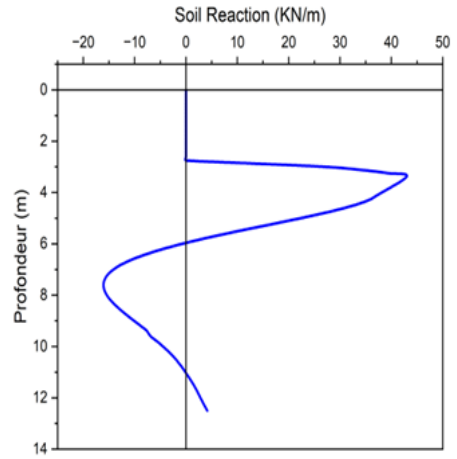
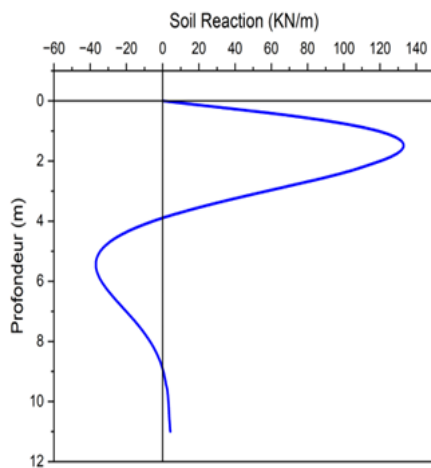


Figure 80: Résultats de soil reaction (KN/m) avec la méthode O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 5 : Les Résultats de logiciel PLAXIS 3D

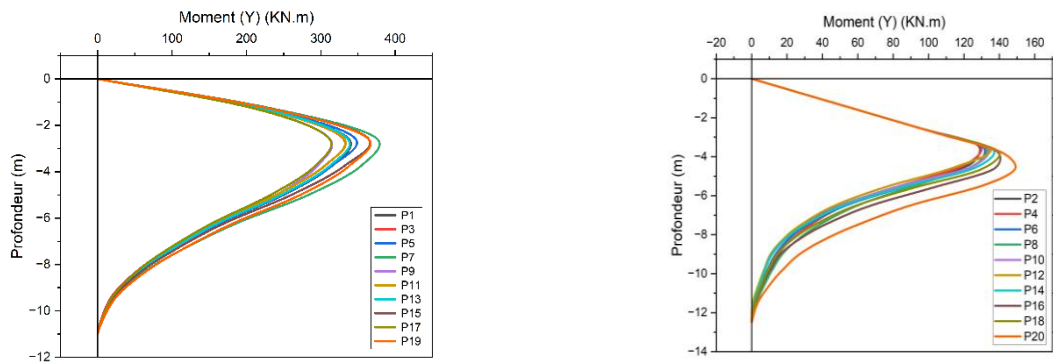


Figure 81: Résultats de moment (KN.m) direction (Y) de a-pieu arrière, b-pieu avant

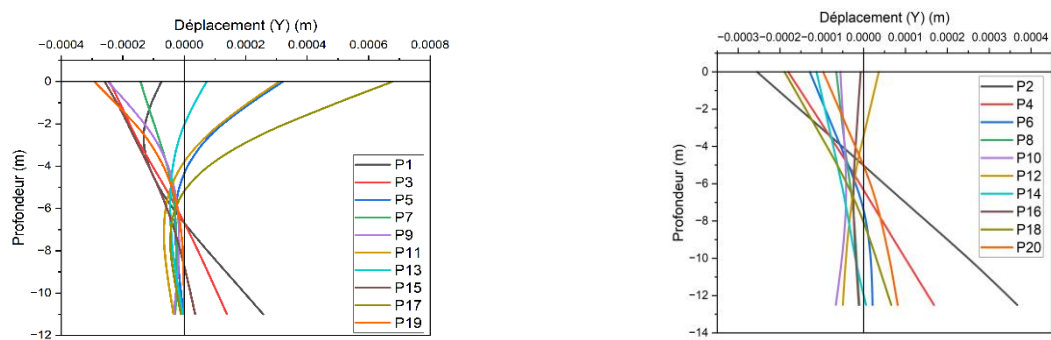


Figure 82: Résultats de déplacement (m) direction (Y) de a-pieu arrière, b-pieu avant

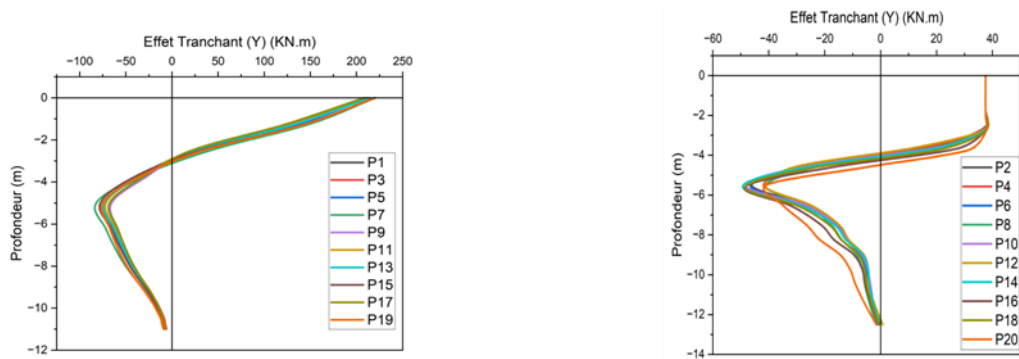


Figure 83: Résultats d'Effort Tranchant (kN/m) direction (Y) de a-pieu arrière, b-pieu avant

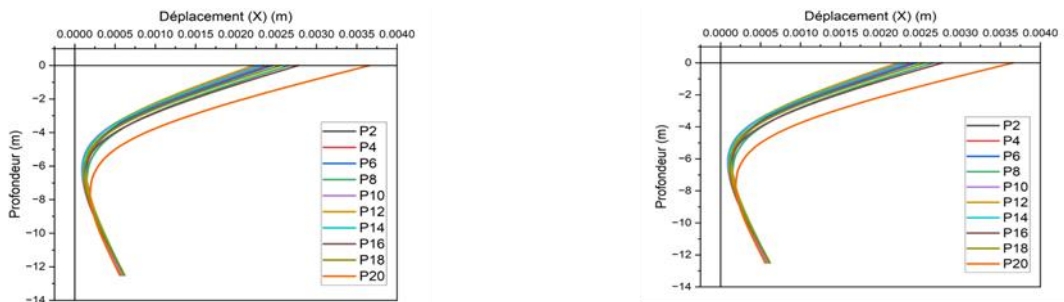


Figure 84: Résultats de déplacement (m) direction (Z) de a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 6 : Les Résultats de logiciel GROUP 3D

- Les résultats de la méthode REESE

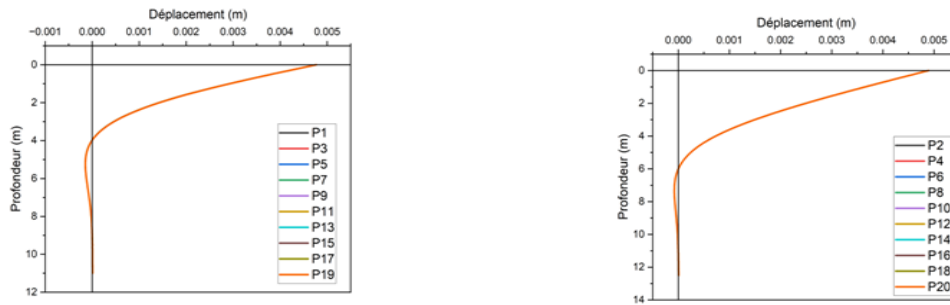


Figure 85: Résultats de déplacement (m) direction (Y) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant



Figure 86: Résultats de déplacement (m) direction (Z) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

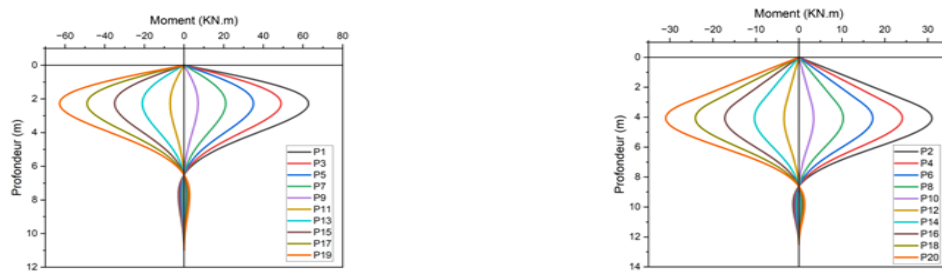


Figure 87: Résultats de moment (kN.m) direction (Y) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

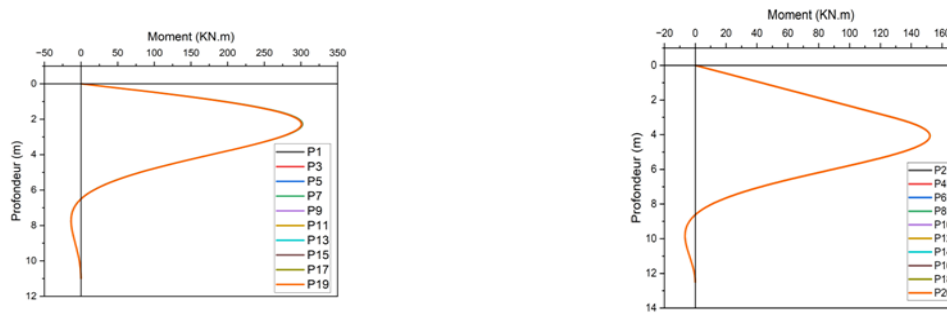


Figure 88: Résultats de moment (kN.m) direction (Z) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

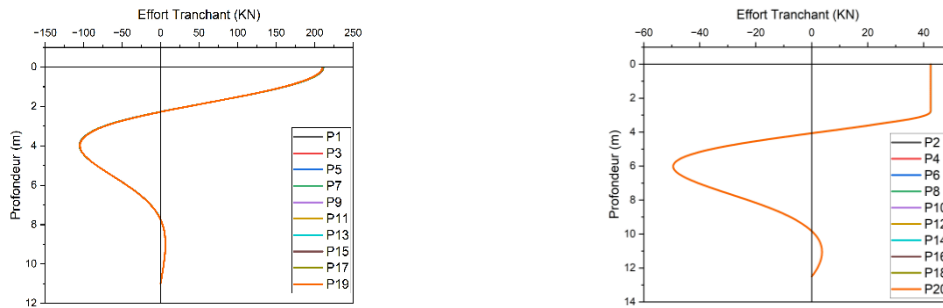


Figure 89: Résultats d'Effort tranchant (kN) direction (Y) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

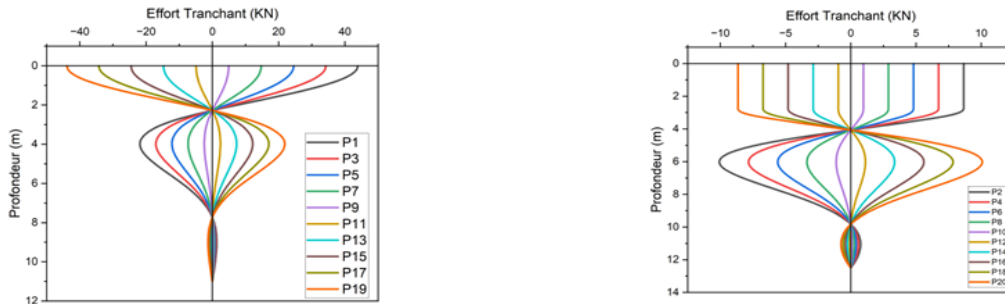


Figure 90: Résultats d'Effort tranchant (kN) direction (Z) avec la méthode de REESE de a-pieu arrière, b-pieu avant

- Les résultats de la méthode O'NEILL

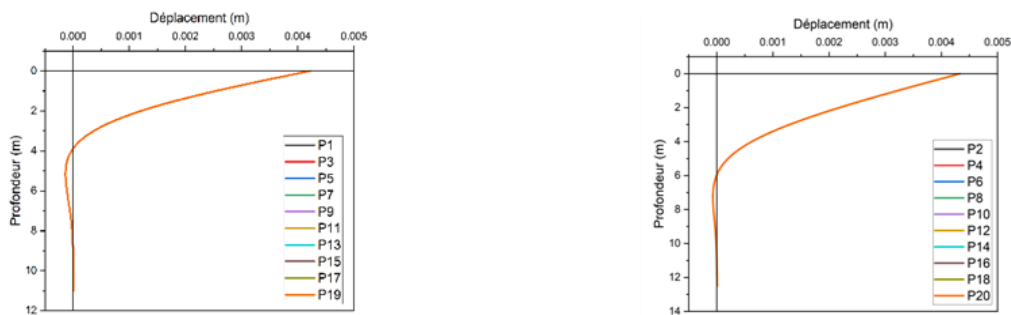


Figure 91: Résultats de déplacement (m) direction (Y) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

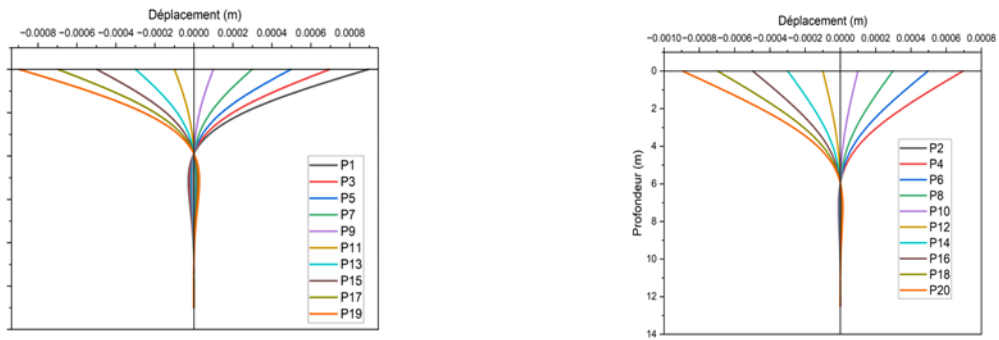


Figure 92: Résultats de déplacement (m) direction (Z) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

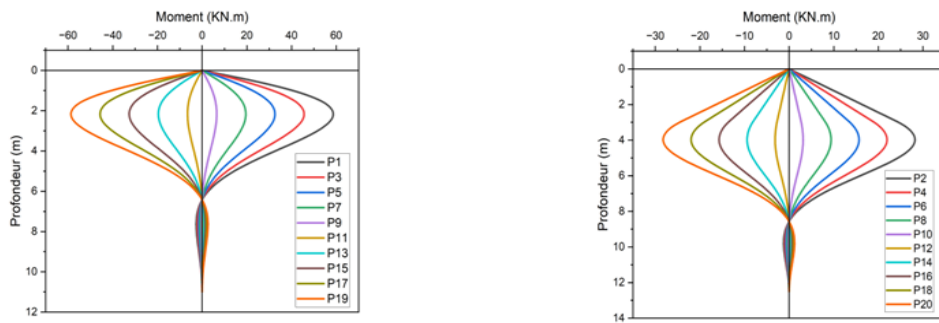


Figure 93: Résultats de moment (kN.m) direction (Y) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

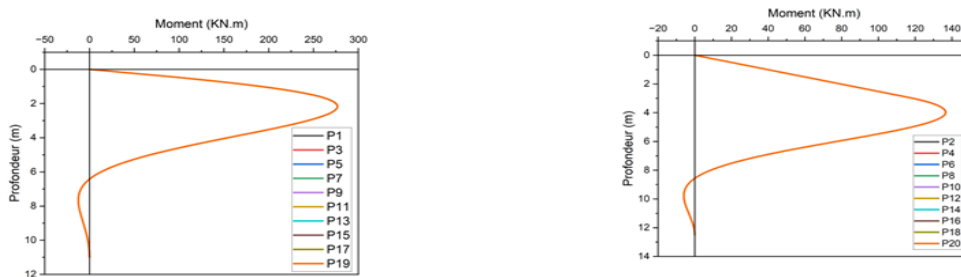


Figure 94: Résultats de moment (kN.m) direction (Z) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

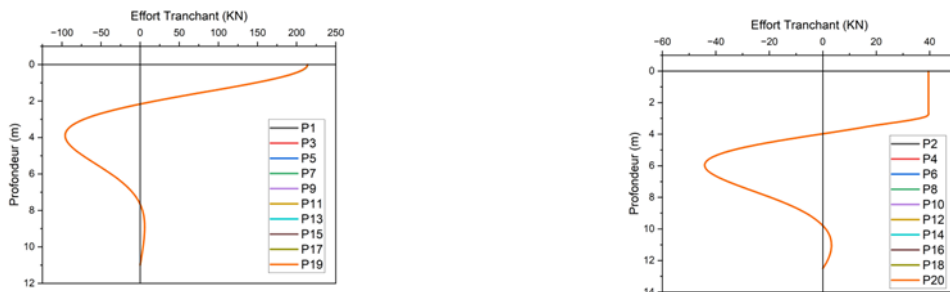


Figure 95: Résultats d'Effort tranchant (KN) direction (Y) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

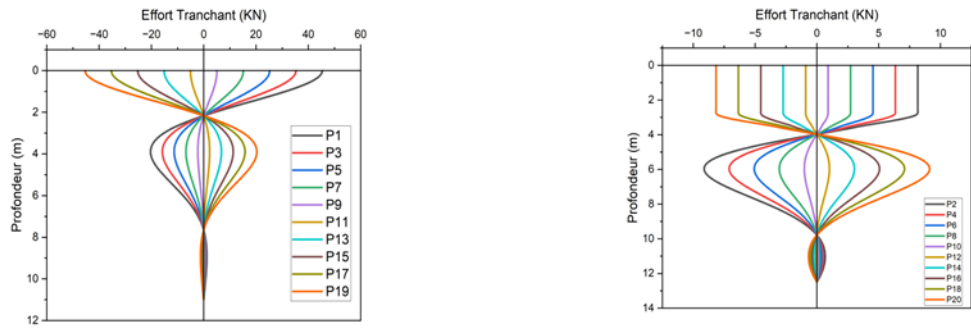


Figure 96: Résultats d'Effort tranchant (KN) direction (Z) avec la méthode de O'NEILL de a-pieu arrière, b-pieu avant

Annexe 7 : Les Résultats de comparaison entre les méthodes

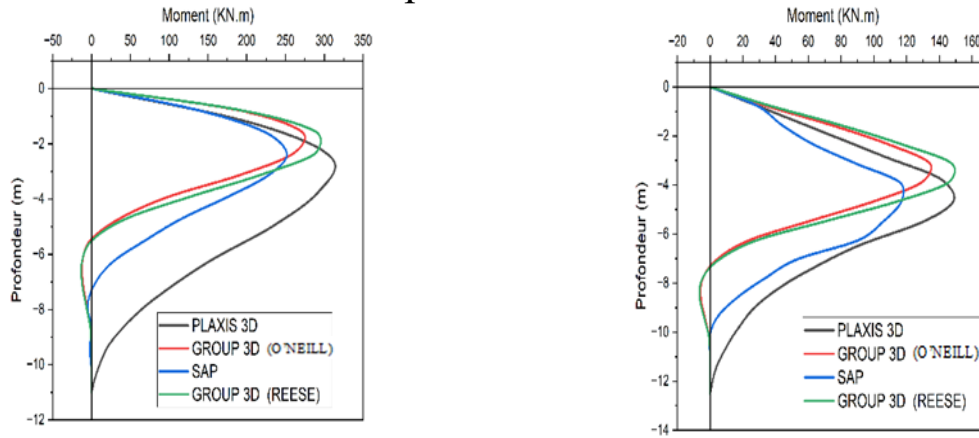


Figure 97: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 1 et b-pieu 2 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

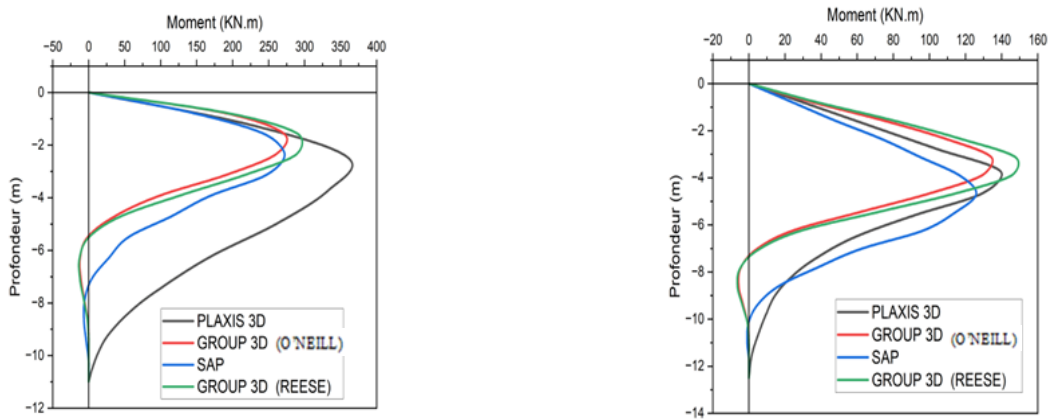


Figure 98: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 3 et b-pieu 4 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

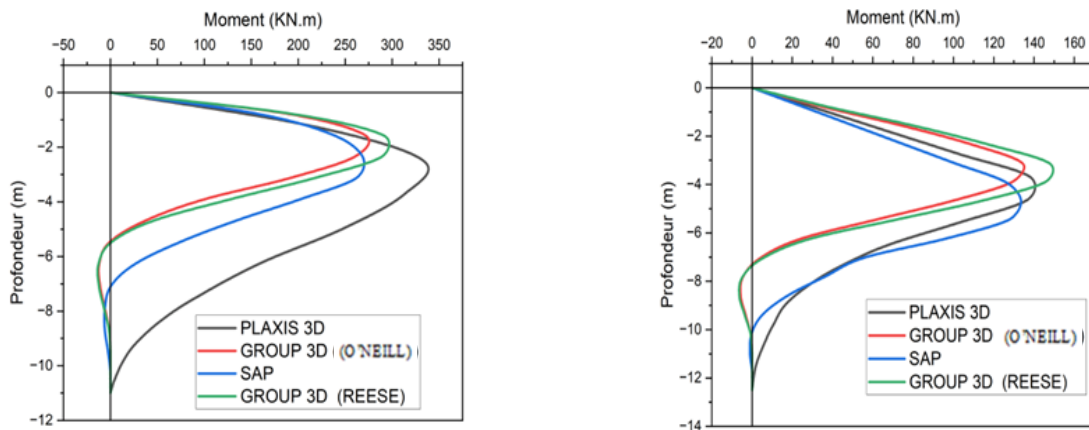


Figure 99: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 5 et b-pieu 6 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

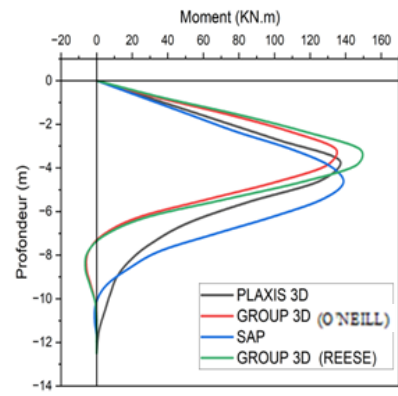
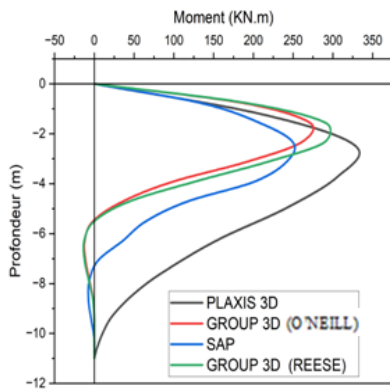


Figure 100: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 7 et b-pieu 8 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

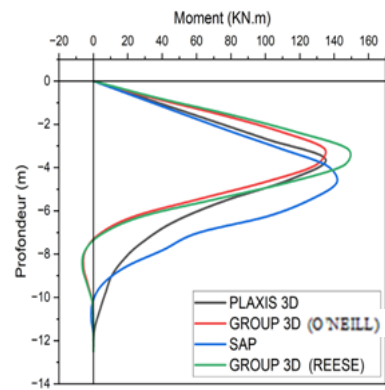
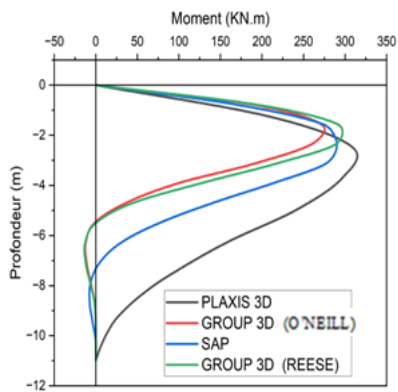


Figure 101: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 9 et b-pieu 10 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

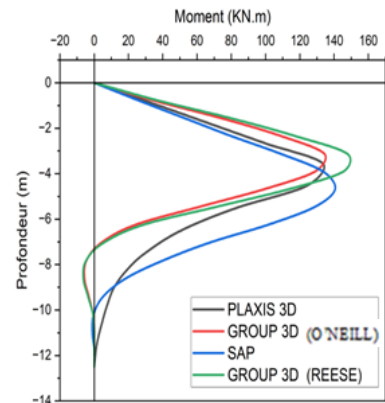
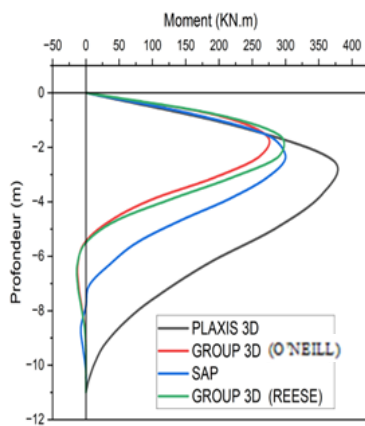


Figure 102: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 11 et b-pieu 12 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

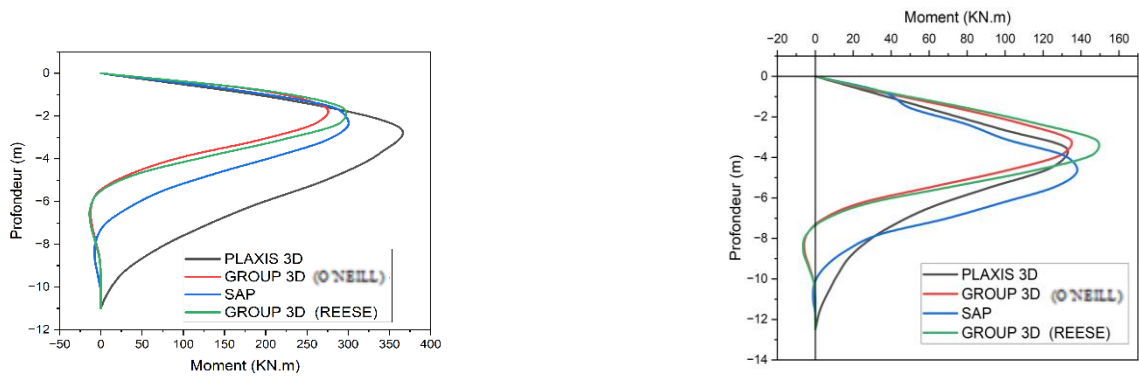


Figure 103: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 13 et b-pieu 14 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

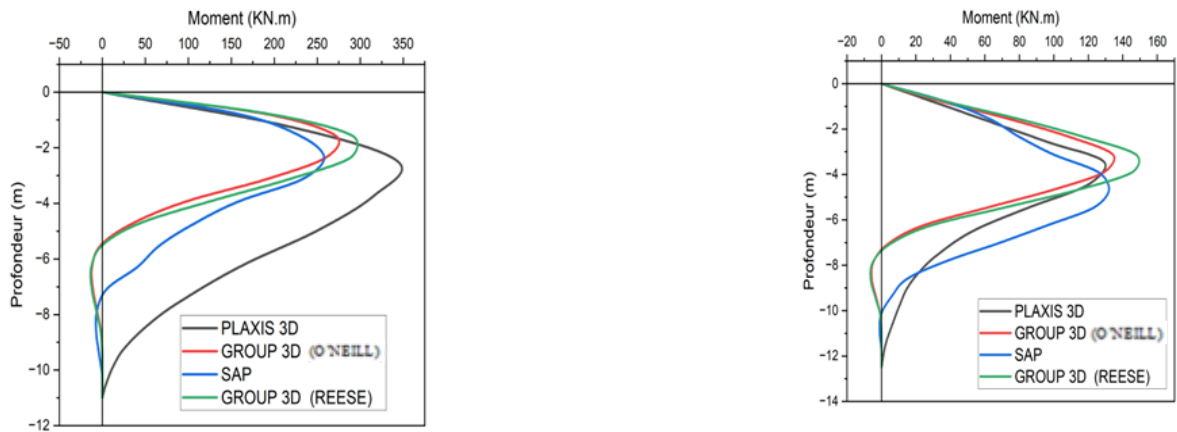


Figure 104: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 15 et b-pieu 16 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)



Figure 105: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 17 et b-pieu 18 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

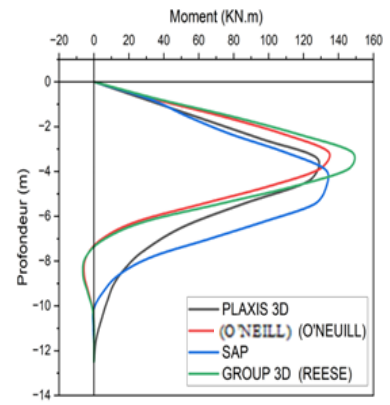
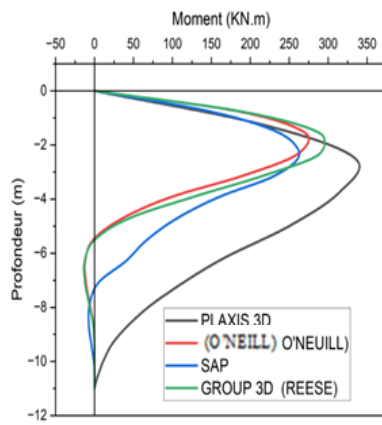


Figure 106: Graphe de comparaison des résultats du moment de a-pieu 19 et b-pieu 20 des logiciels (SAP, PLAXIS 3D et GROUP 3D avec la méthode de REESE et O'NEILL)

Business Modèle Canva

Projet : Production d'énergie électrique par pieux piézoélectriques

Conforme à l'Arrêté Ministériel 1275 - Diplôme/Startup

Carte d'information

Équipe de projet

- **Étudiant 01** : LAGHOUATI Mohammed
 - Faculté : Ecole Nationale supérieure de Sciences de la Mer et l'Aménagement de Littoral
 - Spécialité : Gestion et Protection de Littoral
- **Étudiant 02** : KHARROUBI Chourouck Chaima
 - Faculté : Ecole Nationale supérieure de Sciences de la Mer et l'Aménagement de Littoral
 - Spécialité : Gestion et Protection de Littoral

Équipe d'encadrement

- **Encadrant principal** : Dr. LAOUDJ ABDESLEM
 - Spécialité : GÉOTECHNIQUE MARIN

Premier axe : présentation du projet

1. L'idée de projet (solution proposée)

Domaine d'activité : Énergies renouvelables et technologies vertes innovantes



Développement de l'idée : L'idée a germé suite à l'observation du fort potentiel énergétique inexploité des vibrations urbaines et des mouvements de structures. En Algérie, avec le développement urbain croissant et les besoins énergétiques en augmentation, nous avons identifié une opportunité unique : transformer les pieux de fondation en générateurs d'énergie électrique grâce à la technologie piézoélectrique.

Ce que nous allons faire : Développer un système innovant de pieux intelligents intégrant des capteurs piézoélectriques qui convertissent les vibrations mécaniques (principalement l'énergie et la masse de la houle et vague) en énergie électrique utilisable.

Comment cela fonctionnera : Les pieux sont équipés de modules piézoélectriques stratégiquement placés qui captent les micro-vibrations et les convertissent en courant électrique. Un système de conditionnement et de stockage optimise l'énergie produite pour alimenter (l'éclairage public, Les machine ,..) les systèmes de surveillance ou être injectée dans le réseau local.

Qui l'accomplira : Notre équipe pluridisciplinaire combinant expertise en génie électrique, génie civil et gestion d'entreprise, avec le soutien de nos encadrants universitaires.

Où sera-t-il déployé : Zones urbaines denses d'Alger, axes routiers à fort trafic, places publiques, et infrastructures nouvelles ou en rénovation.

2. Les valeurs proposées

Pour notre projet énergétique, nous proposons :

- **Modernité :** Premier système piézoélectrique intégré aux pieux en Algérie, répondant aux défis énergétiques modernes
- **Performance :** Rendement énergétique de 15-20% supérieur aux systèmes piézoélectriques conventionnels grâce à notre design optimisé
- **Flexibilité :** Adaptation à différents types de structures (ponts, bâtiments, infrastructures routières et marin)
- **Accomplissement de tâches :** Production d'énergie continue 24h/24, indépendante des conditions météorologiques

- **Conception** : Design discret s'intégrant parfaitement aux infrastructures existantes sans impact visuel
- **Réduction des coûts** : Amortissement sur 8-10 ans avec des coûts de maintenance réduits de 40% par rapport aux systèmes solaires
- **Réduction des risques** : Énergie stable et prévisible, résistance aux conditions climatiques extrêmes
- **Accessibilité** : Production énergétique décentralisée, réduisant la dépendance au réseau national
- **Facilité d'utilisation** : Installation simple sur pieux existants, maintenance minimale requise

Nos valeurs concrètes :

- Système de production d'énergie électrique utilisant la piézoélectricité avancée avec rendement optimisé
- Réduction de 60% des émissions CO2 par rapport aux sources énergétiques conventionnelles
- Valorisation intelligente des infrastructures urbaines existantes
- Coûts de production réduits de 35% grâce à l'utilisation des vibrations ambiantes gratuites

3. Équipe de travail

Composition détaillée de l'équipe :

- **LAGHOUATI Mohammed** :
 - Age : 22 ans
 - Fonction dans le projet : Manager général & ingénieur responsable du développement technique
 - Formation : Ingénieur diplômé en gestion et protection du littoral – Ecole national supérieur de science de la mer et aménagement du littoral
 - Compétences : Calcul de stabilité de structures marines & Logiciels (PLAXIS 2D/3D ; AutoCAD ; ArcGIS ; MIKE 21 ; Surfer ; Erdas).

- **KHARROUBI Chourouck :**

- Age : 22 ans
- Fonction dans le projet : Manager général & ingénieur responsable du développement technique
- Formation : Ingénieur diplômée en gestion et protection du littoral – Ecole nationale supérieure de science de la mer et aménagement du littoral
- Compétence : conception et dimensionnement de structures techniques & Logiciels (GROUP ; LPILE ; APILE ; ArcGIS ; MIKE 21 ; Surfer ; Erdas).

- **LAOUDJ Abdeslem :**

- Fonction dans le projet : Superviseur & ingénieur responsable du développement technique

Organisation du travail :

- Réunions d'équipe bi-hebdomadaires (lundi et jeudi 14h-16h)
- Utilisation de Trello pour la gestion des tâches et Microsoft Teams pour la communication
- Coordination centralisée par le chef de projet avec reporting hebdomadaire aux encadrants
- Sessions de brainstorming mensuelles pour l'innovation continue

4. Objectifs du projet

Objectifs commerciaux détaillés :

Court terme (Années 1-2) :

- Finaliser le prototype et valider la technologie (rendement cible : 8-12 kWh/mois par pieu)-
valeur estimer-
- Déposer 2 brevets d'invention auprès de l'INAPI
- Réaliser 3 installations pilotes à Alger
- Obtenir les certifications techniques nécessaires
- Lever 5 millions DA de financement initial a partir de la **PNR**

Moyen terme (Années 3-5) :

- Commercialiser le système et réaliser 50 installations
- Capturer 8% du marché algérien des énergies renouvelables décentralisées
- Générer un chiffre d'affaires de 15 millions DA annuels

- Étendre l'activité vers Oran et Constantine
- Développer une gamme de produits adaptés (pieux routiers, urbains, industriels, château , les eaux usées)

Long terme (Années 5-10) :

- Devenir leader maghrébin avec 25% de part de marché régionale
- Exporter la technologie vers la Tunisie et le Maroc
- Développer des partenariats avec les grands constructeurs
- Atteindre 100 millions DA de chiffre d'affaires annuel

Estimation de marché :

- Marché potentiel algérien : 50 000 pieux adaptables dans les 10 prochaines années (**Agence Nationale des Statistiques (ONS Algérie)**)
- Objectif réaliste : 4 000 pieux équipés (8% du marché potentiel)
- Valeur du marché ciblé : 800 millions DA sur 10 ans

5. Calendrier de réalisation du projet

Mois	Tâches principales	Livrables
1-2	Études de faisabilité technique, sélection des sites pilotes, analyse réglementaire	Rapport faisabilité, 3 sites identifiés
3-4	Conception détaillée du système piézoélectrique, calculs énergétiques, modélisation 3D	Plans techniques, simulations validées
5-6	Acquisition composants (capteurs piézoélectriques, circuits), négociation fournisseurs	Composants livrés, contrats signés
7-8	Fabrication et assemblage du premier prototype, tests en laboratoire	Prototype fonctionnel, tests réussis
9-10	Installation pilote sur site, tests de performance, ajustements	Installation opérationnelle, mesures
11-12	Optimisation du système, préparation commercialisation, dépôt de brevet	Version finale, dossier brevet

Jalons critiques :

- Mois 4 : Validation conception technique
- Mois 8 : Prototype fonctionnel
- Mois 12 : Première installation réussie
- Mois 12 : Commercialisation lancée

Deuxième axe : aspects innovants

1. Nature des innovations

Innovations multiples de notre projet :

- **Innovation technologique majeure** : Première application en Algérie de la piézoélectricité à grande échelle dans les infrastructures civiles
- **Innovation de procédé** : Méthode inédite d'intégration des capteurs dans les pieux sans compromettre leur fonction structurelle
- **Innovation de produit** : Système hybride unique combinant fonction de fondation et production énergétique
- **Innovation organisationnelle** : Nouveau modèle économique de "Infrastructure as Energy Service"
- **Innovation environnementale** : Exploitation d'une source d'énergie totalement propre et inépuisable

2. Domaines d'innovation

Nos innovations couvrent :

- **Nouveaux processus** : Optimisation du rendement piézoélectrique par algorithmes intelligents, augmentant l'efficacité de 35% par rapport aux systèmes standard
- **Nouvelles fonctionnalités** : Système intelligent avec monitoring en temps réel, prédiction de maintenance, optimisation automatique
- **Nouveaux clients** : Ouverture vers les collectivités locales, promoteurs immobiliers, gestionnaires d'infrastructures routières
- **Nouvelles offres** : Packages complets incluant installation, maintenance et monitoring énergétique

- **Nouveaux modèles économiques** : Modèle de location-financement permettant aux clients d'adopter la technologie sans investissement initial

Aspects innovants concrets :

- **Technologie brevetable** : Système d'ancrage piézoélectrique multi-couches augmentant le rendement de 40%
- **Valorisation urbaine** : Transformation des "nuisances" urbaines (hydrodynamisme) en ressource énergétique exemple les regard , château
- **Intégration intelligente** : Intégré une programme pour surveillance et optimisation continue
- **Durabilité exceptionnelle** : Système conçu pour 25 ans de fonctionnement avec maintenance minimale

Troisième axe : analyse stratégique du marché

1. Le segment du marché

Marché potentiel quantifié :

Clients primaires :

- **Collectivités locales** : 14 wilayas littorales, avec toute les commune qui existe des ouad a l'intérieur .
- **Entreprises de construction** : 2 500 entreprises actives en Algérie (**ONS Algérie**)
- **Gestionnaires d'infrastructures** : ANESRIF, DRAGAGES, grands groupes BTP
- **Entreprises industrielles** : 500 grandes entreprises cherchant l'autonomie énergétique

Clients secondaires :

- Universités et instituts de recherche
- Hôpitaux et établissements publics
- Centres commerciaux et complexes privés

Marché cible prioritaire :

- **Segment 1** : Collectivités locales d'Alger, Oran, Constantine (30% du marché)
- **Segment 2** : Entreprises de construction BTP impliquées dans les grands projets d'infrastructure, SONATRACH...
- **Segment 3** : Gestionnaires d'infrastructures routières et autoroutières

Justification du choix :

- Politiques gouvernementales favorables (transition énergétique)
- Budget alloué aux énergies renouvelables : 15 milliards DA d'ici 2030
- Réglementation incitative avec exonérations fiscales
- Besoins croissants en énergie décentralisée (+12% par an)

Contrats potentiels identifiés :

- Accord de principe avec la commune d'Alger-Centre pour 50 pieux (5 millions DA)
(Ministère des Travaux Publics (Algérie))
- Intérêt exprimé par COSIDER pour projets pilotes
- Partenariat en discussion avec l'Université USTHB

2. Mesure de l'intensité de la concurrence

Analyse concurrentielle détaillée :

Concurrents directs (technologies énergétiques décentralisées) :

1. **Solaire distribué** : 15 entreprises, part de marché 45%
 - Forces : Technologie mature, coûts décroissants
 - Faiblesses : Dépendance météorologique, occupation d'espace
2. **Éolien urbain** : 5 entreprises, part de marché 8%
 - Forces : Rendement élevé par unité
 - Faiblesses : Nuisances sonores, intermittence
3. **Géothermie** : 3 entreprises, part de marché 5%
 - Forces : Production continue
 - Faiblesses : Coûts d'installation élevés, sites limités

Concurrents indirects :

- Réseau électrique national (SONELGAZ)
- Groupes électrogènes
- Systèmes hybrides

Notre avantage concurrentiel :

- **Technologique** : Seule solution piézoélectrique sur le marché algérien

- **Économique** : ROI 8-10 ans vs 12-15 ans pour le solaire
- **Environnemental** : Zero impact visuel et sonore
- **Opérationnel** : Fonctionnement 24h/24, maintenance réduite

Notre système est impliqué sur des structure déjà exister ou bien on cours de la réalisation aucun besoin d'un espace terrestre comme les panneaux solaires et éolien

Barrières à l'entrée que nous créons :

- Brevets déposés sur notre technologie d'intégration
- Partenariats exclusifs avec fournisseurs de composants
- Expertise technique spécialisée difficile à reproduire

3. La stratégie marketing

Stratégie de commercialisation complète :

Positionnement : "L'énergie invisible qui transforme vos infrastructures en centrales électriques"

Mix marketing optimisé :

Prix :

- Stratégie de pénétration : Prix initial 15% sous la concurrence
- Modèle de location-financement : 8 000 DA/mois par pieu sur 10 ans
- Prix d'achat direct : 800 000 DA par pieu installé
- Maintenance incluse les 5 premières années

Produit :

- Gamme complète : Pieux urbains, routiers, industriels, marin
- Services associés : Monitoring, maintenance, optimisation
- Garantie 10 ans sur les composants électroniques

Distribution :

- Vente directe pour les gros clients (>20 pieux)
- Réseau de partenaires BTP pour les petits projets
- Plateforme e-commerce B2B ET B2G pour les commandes standards

Communication :

- Démonstrations techniques sur sites pilotes

- Participation aux salons BTP et énergies renouvelables
- Campagne digitale ciblée (LinkedIn, sites spécialisés)
- Relations publiques avec médias techniques
- Application mobile "**PiezoMonitor**" pour le suivi client

Actions marketing année 1 :

- 3 démonstrations publiques majeures
- 50 présentations techniques chez les clients potentiels
- Présence à 5 salons professionnels
- 1 000 prospects qualifiés identifiés
- 20% de taux de conversion cible

Quatrième axe : plan de production et organisation

1. Le processus de production

Processus détaillé en 8 phases :

Phase 1 : Étude et conception (2 -6 semaines)

- Visite technique du site client
- Analyse des vibrations et calculs énergétiques
- Dimensionnement du système piézoélectrique
- Conception 3D personnalisée
- Validation technique avec le client

Phase 2 : Approvisionnement (3 semaine -pour la livraison-)

- Commande des capteurs piézoélectriques (Taiwan/Corée)
- Acquisition des circuits électroniques (local/import)
- Préparation des matériaux d'intégration
- Contrôle qualité des composants

Phase 3 : Fabrication en atelier (14 semaine)

- Assemblage des modules piézoélectriques
- Intégration des circuits de conditionnement
- Tests de fonctionnement en laboratoire

- Préparation des systèmes de fixation

Phase 4 : Préparation du site (10 jours)

- Préparation de l'emplacement
- Vérification des conditions d'installation
- Coordination avec les autres corps de métier

Phase 5 : Installation (1-2 jours)

- Intégration du système au pieu
- Connexions électriques et mise en réseau
- Installation du système de monitoring
- Tests de mise en service

Phase 6 : Mise en service (10 jour)

- Calibrage et optimisation
- Formation du client à l'utilisation
- Paramétrage de l'application de monitoring

Phase 7 : Suivi et optimisation (1 mois)

- Monitoring des performances
- Ajustements et optimisations
- Support technique client
- Validation de la garantie

Phase 8 : Maintenance préventive (trimestrielle)

- Inspection des composants
- Nettoyage et vérifications
- Mise à jour logicielle
- Rapport de performance

2. L'approvisionnement

Stratégie d'approvisionnement optimisée :

Composants électroniques spécialisés (40% des coûts) :

- **Fournisseur principal :** PiezoPro Technologies (Corée du Sud)

- Capteurs piézoélectriques haute performance
- Délais : 3-4 semaines, paiement 50% avance, 50% livraison
- Volume : 500 unités/an, remise 15% sur commandes groupées
- **Fournisseur secondaire** : TDK Electronics (Japon)
 - Circuits de conditionnement et convertisseurs
 - Délais : 2 semaines, crédit 30 jours
 - Stock de sécurité : 2 mois de consommation

Matériaux structurels (25% des coûts) :

- **Acier spécialisé** : SIDER (Algérie)
 - Aciers inoxydables et composites
 - Avantage : proximité, délais courts (1 semaine)
 - Négociation contrat annuel avec prix fixes
- **Matériaux d'étanchéité** : Algérie Composite (local)
 - Résines et polymères techniques
 - Partenariat privilégié négocié

Équipements de mesure et contrôle (20% des coûts) :

- **Systèmes de monitoring** : Schneider Electric Algérie
- **Outils de test** : FLUKE (via distributeur local)

Politique d'approvisionnement :

- Diversification des fournisseurs pour réduire les risques
- Contrats annuels avec clauses de révision trimestrielle
- Stock de sécurité de 6 semaines pour les composants critiques
- Contrôle qualité systématique à réception

3. La main d'œuvre

Plan de recrutement détaillé :

Emplois directs créés : 18 postes

Équipe technique (12 personnes) :

- **3 Ingénieurs :**
 - 1 Ingénieur électronicien senior (120 000 DA/mois)
 - 1 Ingénieur génie civil (100 000 DA/mois)
 - 1 Ingénieur systèmes et automatisation (110 000 DA/mois)
- **6 Techniciens spécialisés :**
 - 2 Techniciens électroniciens (65 000 DA/mois)
 - 2 Techniciens installation (60 000 DA/mois)
 - 2 Techniciens maintenance (58 000 DA/mois)
- **3 Ouvriers qualifiés :**
 - Soudeurs et monteurs spécialisés (45 000 DA/mois)

Équipe commerciale et support (6 personnes) :

- **2 Commerciaux** techniques (80 000 DA/mois)
- **2 Administratifs** comptabilité/RH (50 000 DA/mois)
- **1 Responsable logistique** (70 000 DA/mois)
- **1 Responsable qualité** (75 000 DA/mois)

Emplois indirects estimés : 35 postes

- Chez les fournisseurs locaux : 15 emplois
- Services sous-traités (transport, nettoyage, sécurité) : 8 emplois
- Effet multiplicateur économique local : 12 emplois

Plan de formation :

- Formation technique spécialisée : 40h/personne/an
- Certifications professionnelles prises en charge
- Stages chez les fournisseurs internationaux
- Programme de développement des compétences internes

4. Les principaux partenaires

Écosystème partenarial stratégique :

Partenaires technologiques :

- **Université USTHB** : Collaboration R&D, étudiants stagiaires, laboratoires

- **Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER)** : Validation technique, certifications
- **Institut National de la Propriété Industrielle (INAPI)** : Brevets et protection IP

Partenaires fournisseurs stratégiques :

- **PiezoPro Technologies (Corée)** : Fournisseur exclusif capteurs
- **SIDER** : Partenariat privilégié matériaux métalliques
- **Schneider Electric Algérie** : Systèmes de contrôle et monitoring

Partenaires commerciaux :

- **COSIDER** : Accord de distribution pour grands projets
- **Groupement BTP Algérie** : Réseau de prescription
- **Chambre de Commerce Alger** : Promotion et networking

Partenaires financiers :

- **ANSEJ** : Financement startup et accompagnement
- **Banque Développement Local** : Crédit d'équipement
- **Incubateur Technologique ENSSMAL** : Hébergement et conseil











Partenaires institutionnels :

- **Ministère de l'Énergie** : Validation réglementaire
- **APRUE** : Certification efficacité énergétique
- **SONELGAZ** : Connexion réseau et rachat énergie

Accords formalisés :

- Protocole d'accord ENSSMAL signé (recherche collaborative)
- Lettre d'intention COSIDER (distribution)
- Convention ANSEJ (financement startup)
- Accord préliminaire commune Alger-Centre (projet pilote)

Vous trouver toute C'est information au tableau au dessus

Partenariats clés  <ul style="list-style-type: none"> • Universités et centres de recherche. • Entreprises de préfabrication ou d'acier (fournisseurs de pieux). • Organismes de normalisation et de certification. • Investisseurs dans les énergies propres 	Activités clés  <ul style="list-style-type: none"> • Essais et certification technique. • Développement industriel. • Relations institutionnelles et obtention d'autorisations . 	Propositions de valeur  <ul style="list-style-type: none"> • Génération d'électricité propre et intégrée sans emprise supplémentaire. • Réduction de la dépendance énergétique des infrastructures maritimes. • Innovation intégrée dans la structure portante. • Rentabilité sur le long terme via auto. • Production d'énergie . 	Relations clients  <ul style="list-style-type: none"> • Accompagnement technique et ingénierie personnalisée. • Contrats de maintenance à long terme. • Formations sur l'installation et l'exploitation. • Assistance à l'intégration réglementaire. 	Segments de clients  <ul style="list-style-type: none"> • Autorités portuaires et maritimes. • Entreprises de BTP maritime. • Promoteurs de projets offshor. • Collectivités locales (énergies renouvelable). • Organismes d'énergie et de Recherche et Développement.
Structure des coûts  <ul style="list-style-type: none"> • Recherche et Développement (conception du mécanisme et simulation). • Fabrication des prototypes- Essais (laboratoire et terrain). • Coûts d'industrialisation. • Coûts de communication et de commercialisation . 	Ressources clés  <ul style="list-style-type: none"> • Brevet ou propriété intellectuelle sur le mécanisme. • Équipe Recherche et développement en génie civil et énergétique. • Partenariats avec laboratoires universitaires. • Accès à des plateformes d'essai (bassins, ports) . 		Canaux  <ul style="list-style-type: none"> • Partenariats avec ingénieries maritimes. • Présentation dans salons de l'innovation & énergie. • Publications scientifiques et techniques. • Démonstrateurs pilotes sur chantiers réels. 	
Structure des coûts  <ul style="list-style-type: none"> • Recherche et Développement (conception du mécanisme et simulation). • Fabrication des prototypes- Essais (laboratoire et terrain). • Coûts d'industrialisation. • Coûts de communication et de commercialisation . 		Flux de revenus  <ul style="list-style-type: none"> • Vente du système intégré (pieu + mécanisme). • Revenus issus de la production d'énergie (revente au réseau). • Licences de technologie. • Contrats de maintenance et service après-vente . 		

Cinquième axe : plan financier

1. Les coûts et charges

Investissements initiaux détaillés : 8 500 000 DA

Recherche & Développement (2 500 000 DA) :

- Équipements de test et mesure : 1 200 000 DA
- Développement logiciel et applications : 600 000 DA
- Prototypage et tests : 500 000 DA
- Dépôt de brevets : 200 000 DA

Équipements et outillage (3 000 000 DA) :

- Machines d'assemblage électronique : 1 500 000 DA
- Outillage d'installation : 800 000 DA
- Véhicules d'intervention (2 véhicules) : 700 000 DA

Local et aménagements (1 500 000 DA) :

- Location atelier 400m² (3 ans) : 900 000 DA
- Aménagement et équipement : 600 000 DA

Stock initial et fonds de roulement (1 500 000 DA) :

- Stock de composants 3 mois : 1 000 000 DA
- Trésorerie de démarrage : 500 000 DA

Charges d'exploitation annuelles : 12 800 000 DA

Charges de personnel (7 800 000 DA/an) :

- Salaires bruts équipe : 6 000 000 DA
- Charges sociales (30%) : 1 800 000 DA

Achats et approvisionnements (3 500 000 DA/an) :

- Composants piézoélectriques : 2 000 000 DA
- Matériaux structurels : 800 000 DA
- Fournitures diverses : 700 000 DA

Charges de structure (1 500 000 DA/an) :

- Loyers et charges : 600 000 DA
- Assurances et certifications : 300 000 DA
- Marketing et communication : 400 000 DA
- Frais généraux : 200 000 DA

Sources de financement négociées :

- **Fonds propres des associés** : 2 500 000 DA (30%)
- **Prêt ANSEJ startup** : 3 000 000 DA (35%) - Taux 3%, 7 ans
- **Crédit bancaire équipement** : 2 000 000 DA (25%) - Taux 6%, 5 ans
- **Subvention innovation MESRS** : 1 000 000 DA (10%)

2. Le chiffre d'affaires

Prévisions de ventes sur 3 ans :

Année 1 : 8 500 000 DA

- 15 installations pilotes \times 400 000 DA = 6 000 000 DA
- Contrats de maintenance \times 50 000 DA = 750 000 DA
- Services d'études et conseil = 1 750 000 DA
- **Objectif : Établir la crédibilité technique**

Année 2 : 18 000 000 DA

- 35 installations standard \times 450 000 DA = 15 750 000 DA
- Maintenance parc installé = 1 500 000 DA
- Vente de composants = 750 000 DA
- **Objectif : Croissance commerciale**

Année 3 : 32 000 000 DA

- 60 installations \times 480 000 DA = 28 800 000 DA
- Contrats de maintenance = 2 400 000 DA
- Export vers Tunisie/Maroc = 800 000 DA
- **Objectif : Expansion régionale**

Scénarios alternatifs :

Scénario optimiste (+30%) :

- Année 1 : 11 000 000 DA
- Année 2 : 23 500 000 DA
- Année 3 : 41 500 000 DA

Scénario pessimiste (-20%) :

- Année 1 : 6 800 000 DA
- Année 2 : 14 400 000 DA
- Année 3 : 25 600 000 DA

Hypothèses de pricing :

- Prix moyen par installation : 400 000 à 480 000 DA
- Évolution prix : +3% par an (inflation)
- Contrats de maintenance : 12% du prix d'installation/an

3. Les comptes de résultats escomptés

Prévisions sur 3 ans (en milliers DA) :

ÉLÉMENTS	Année 1	Année 2	Année 3
PRODUITS			
Chiffre d'affaires	8 500	18 000	32 000

ÉLÉMENTS	Année 1	Année 2	Année 3
Subventions	200	-	-
Total Produits	8 700	18 000	32 000
CHARGES			
Achats consommés	3 500	7 200	12 800
Charges de personnel	7 800	8 500	9 500
Charges externes	1 500	1 800	2 200
Amortissements	850	850	850
Charges financières	300	280	250
Total Charges	13 950	18 630	25 600
RÉSULTAT NET	-5 250	-630	6 400

Indicateurs clés :

- **Seuil de rentabilité** : Atteint en mois 28 (année 3)
- **Marge brute** : 59% en année 3
- **Retour sur investissement** : 75% en année 3

Calcul du Besoin en Fonds de Roulement (BFR) :

- Stock moyen : 45 jours de CA
- Créances clients : 60 jours de CA
- Dettes fournisseurs : 30 jours d'achats
- **BFR Année 3** : 5 200 000 DA

4. Le plan de trésorerie

Trésorerie mensuelle Année 1 (en milliers DA) :

Mois	Recettes	Dépenses	Solde mensuel	Solde cumulé
Jan	200	950	-750	250
Fév	300	1 100	-800	-550
Mar	600			

	Année 1	Année 2	Année 3
Produits d'exploitation	39 936.00	45 127.68	51 896.83
<i>Chiffre d'affaires HT</i>	-	-	-
<i>Chiffre d'affaires HT autres services</i>	39 936.00	45 127.68	51 896.83
Charges d'exploitation	-	-	-
<i>Achats consommés</i>	-	-	-
Marge brute	39 936.00	45 127.68	51 896.83
Charges externes	3 530.00	4 125.00	4 890.00
<i>Assurances</i>	750.00	800.00	850.00
<i>Téléphone, internet</i>	30.00	35.00	40.00
<i>Autres abonnements</i>	-	-	-
<i>Carburant, transports</i>	150.00	200.00	300.00
<i>Frais de déplacement et hébergement</i>	-	-	-
<i>Eau, électricité, gaz</i>	700.00	800.00	900.00
<i>Mutuelle</i>	-	-	-
<i>Fournitures diverses</i>	100.00	120.00	150.00
<i>Entretien matériel et vêtements</i>	100.00	120.00	150.00
<i>Nettoyage des locaux</i>	-	-	-
<i>Budget publicité et communication</i>	-	-	-
<i>Loyer et charges locatives</i>	1 500.00	1 800.00	2 200.00
<i>Expert comptable, avocats</i>	200.00	250.00	300.00
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
Valeur ajoutée	36 406.00	41 002.68	47 006.83
Impôts et taxes	-	-	-
Salaires employés	1 500.00	1 600.00	1 700.00
Charges sociales employés	1 080.00	1 152.00	1 224.00
Prélèvement dirigeant(s)	1 000.00	1 000.00	1 000.00
Charges sociales dirigeant(s)	1 103.00	1 103.00	1 103.00
Excédent brut d'exploitation	31 723.00	36 147.68	41 979.83
Frais bancaires, charges financières	-	-	-
Dotations aux amortissements	760.00	760.00	760.00
Résultat avant impôts	30 963.00	35 387.68	41 219.83
Impôt sur les sociétés	4 644.45	5 308.15	6 585.95
Résultat net comptable (résultat de l'exercice)	26 318.55	30 079.53	34 633.88

Bibliographie

Bibliographie

- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2020).** *PLAXIS 2D reference manual*. Plaxis bv.
- Matlock, H. (1970).** Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Proceedings of the 2nd Annual Offshore Technology Conference*, OTC 1204, pp, 577-594.
- Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1974).** Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference*, OTC 2080, pp, 473-483.
- Reese, L. C., & Wang, S. T. (2004).** *Technical manual for GROUP 7.0*. Ensoft, Inc.
- Winkler, E. (1867).** *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. H. Dominicus.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000).** *The finite element method: Volume 1, The basis* (5e éd.). Butterworth-Heinemann.
- Amar, S. (1999).** Fondations profondes dans les sols mous d'Alger : Retour d'expérience. *Revue Française de Géotechnique*, 87, pp, 23-34.
- Amar, S., & Jézéquel, J. F. (1988).** Essais en place dans les sols. Méthodes françaises. *Techniques de l'Ingénieur*, C220, p 52.
- API. (2014).** *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*, API RP 2A-WSD (22ème éd.).
- ASTM International. (2018).** *ASTM D1586-18: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. West Conshohocken, PA : ASTM International.
- Belkhatir, M., Arab, A., & Della, N. (2018).** Comportement cyclique des argiles marines d'Alger sous sollicitations sismiques. *Revue Européenne de Génie Civil*, 22(4), pp, 445-467.
- Belouahri, M., Bahar, R., & Kessal, M. (2020).** Caractérisation géotechnique des sols quaternaires de la baie d'Alger. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 289, pp, 67-82.
- Bouafia, A. (2010).** Méthodes de calcul de la capacité portante des pieux dans les sols cohérents algériens. *Revue Algérienne de Géotechnique*, 2, pp, 15-28.
- Bowles, J. E. (1997).** *Foundation Analysis and Design* (5ème éd.). USA :McGraw-Hill.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2019). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft University of Technology.

Broms, B. B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 90(SM2), pp, 27-63.

BTP Infraestructuras. (2018). *Marina d'Alger - Annexe 10 : Dimensionnement des quais* (Rapport technique 15C15PM, Révision 02). Espagne : BTP Infraestructuras.

Bustamante, M., & Gianceselli, L. (1982). Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. Dans *Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing* , pp. 493-500. Amsterdam.

Centre d'Études Techniques de l'Équipement. (2023). *Guide technique pour la conception des ouvrages maritimes en zone sismique*. Paris : Ministère de la Transition Écologique.

Comité Européen de Normalisation. (2004). *Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1: General Rules* (EN 1997-1:2004). Bruxelles : CEN.

Comité Européen de Normalisation. (2014). *EN 206 : Béton - Spécification, performance, production et conformité*. CEN, p, 92.

Comité Européen de Normalisation. (2021). *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings* (EN 1991-1-1:2002+A1:2021). Bruxelles : CEN.

CSI (Computer and Structures, Inc.). (2020). *GROUP 2020 User Manual*. Berkeley, CA : Computer and Structures, Inc.

Djedid, A., Mamoune, S. M. A., & Belachia, M. (2021). Développement de courbes P-Y pour les argiles sensibles de la région d'Alger. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 8(3), pp, 421-435.

DTR BC 2.33.2. (1992). *Méthodes de calcul des fondations profondes*. Centre National d'Études et de Recherches Appliquées en Génie Parasismique, p, 58.

DTR BC 2.33.2. (2007). *Méthode de calcul des fondations profondes*. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Algérie.

Ensoft, Inc. (2020). *APILE Offshore User Manual - Analysis of Piles Under Axial Loads*. Austin, TX : Ensoft, Inc.

Ensoft, Inc. (2020). *LPILE User Manual - A Program for the Analysis of Piles and Drilled Shafts Under Lateral Loads*. Austin, TX : Ensoft, Inc.

Fascicule 62 - Titre V. (1993). *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*. Ministère de l'Équipement, p, 182.

Frank, R. (1999). *Calcul des fondations superficielles et profondes*. Techniques de l'Ingénieur, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

International Organization for Standardization. (2012). *ISO 22476-1:2012: Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test*. Genève : ISO.

Kerzazi, M., Boucherit, H., & Laoufi, L. (2018). Étude géotechnique de la Marina Bay d'Alger : Conception des fondations profondes. Dans *Actes du 4ème Symposium National de Génie Civil* pp, 156-163. Alger.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics, SI Version*. New York : John Wiley & Sons.

Laoufi, L. (2016). *Consolidation des argiles molles du littoral algérois : Approche expérimentale et numérique* [Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique d'Alger]. p, 287.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Dans *Proceedings of 2nd Annual Offshore Technology Conference* (Paper OTC 1204). Houston.

Mebarki, M., Derras, B., & Bensaïbi, M. (2019). Optimisation du dimensionnement des pieux forés dans les sols stratifiés d'Alger. *Revue de Mécanique Appliquée et Théorique*, 6(2), pp,89-102.

Meyrhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 102(GT3), pp, 197-228.

Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville. (2003). *Règlement Parasismique Algérien RPA 99/Version 2003*. Alger : CGS.

Ministère des Travaux Publics et des Transports. (2018). *Stratégie nationale de développement des infrastructures portuaires 2018-2030*. Alger : Direction Générale des Transports.

NF EN 1997-1. (2005). *Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales.* AFNOR, 168p.

Poulos, H. G. (2017). Tall building foundation design. Dans *International Conference on Tall Buildings*. Melbourne.

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. New York : John Wiley & Sons.

Plaxis bv. (2020). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft, Pays-Bas : Plaxis bv.

Puertos del Estado. (2001). *ROM 0.0-01: General Procedure and Basis for the Design of Harbor and Coastal Structures*. Madrid : Ministerio de Fomento.

Puertos del Estado. (2005). *ROM 0.5-05: Recommendations for Maritime Works - Geotechnical Recommendations for the Design of Marine and Harbour Works*. Madrid : Ministerio de Fomento.

Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Dans *Proceedings of 6th Annual Offshore Technology Conference (Paper OTC 2080)*. Houston.

RPA 99/Version 2003. *Règles Parasismiques Algériennes*. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, p, 315.

Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5(4), pp, 297-326.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1955). *Soil Mechanics in Engineering Practice (2ème éd.)*. New York : John Wiley & Sons.

Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*. Dominicus, Prague.

Zhang, L., Silva, F., & Grismala, R. (2023). Seismic design considerations for pile-supported wharf structures in Mediterranean coastal areas. *Journal of Coastal Engineering*, 89(3), pp, 245-262.

Résumé :

Ce mémoire porte sur la modélisation et le dimensionnement d'un quai sur pieux dans le cadre du projet de Marina Baie d'Alger, en Algérie. L'objectif principal est d'étudier l'interaction entre le sol et les pieux, en particulier sous charges verticales et latérales, afin d'assurer la stabilité et la durabilité des infrastructures portuaires.

Le travail s'appuie sur une revue bibliographique qui présente les types d'ouvrages portuaires, les spécificités des quais sur pieux, ainsi que les méthodes d'analyse du comportement des pieux, notamment la modélisation par éléments finis et les méthodes semi-empiriques basées sur les courbes P-Y. Ces méthodes sont comparées afin d'évaluer leur pertinence dans le contexte local algérien, où les conditions géotechniques sont spécifiques.

Le mémoire inclut une étude géotechnique approfondie du site à Marina Baie d'Alger, avec reconnaissance des sols par sondages et essais in situ (SPT, CPT). Les caractéristiques géotechniques sont intégrées dans la modélisation numérique avec les logiciels PLAXIS et GROUP, permettant de simuler le comportement des pieux sous différentes combinaisons de charges permanentes et variables. Les résultats obtenus montrent des différences notables entre les méthodes, notamment en termes de déplacements, moments fléchissants, et efforts tranchants, soulignant l'importance de choisir une méthode adaptée au cas d'étude.

La conclusion générale insiste sur la nécessité d'une modélisation rigoureuse pour la conception des pieux, recommandant l'utilisation croisée des méthodes pour optimiser les vérifications de stabilité et sécurité, tout en prenant en compte les normes nationales et internationales applicables dans le domaine des ouvrages portuaires.

Ce mémoire constitue une contribution importante à l'ingénierie portuaire en Algérie, offrant une évaluation comparative des méthodes de calcul pour le dimensionnement des quais sur pieux dans des environnements marins complexes.