

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En : Génie civil**

**Spécialité : Structures**

**Par : Belkhiri Ismail Abdelbasset & Lali Abdelkader**

**Sujet**

**Etude et calcul de la stabilité d'un bâtiment reposant sur une fondation en pieux**

**Soutenu 06/2025 , devant le jury composé de :**

HAMZAOUI F.	Maitre de Conférences	Université de Tlemcen	Président
BEDJAOUI M. C.	Maitre-Assistant	Université de Tlemcen	Examineur
EL HOUARI N.	Maitre de Conférences	Université de Tlemcen	Encadrante
REDOUANE M.	Ingénieur CTC	CTC Oran	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

# Dédicaces

Ce mémoire est dédié à nos chers parents, frères et amis, à qui nous exprimons notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs sacrifices. Vous avez été une véritable source d'inspiration. Merci du fond du cœur.

Nous adressons également nos meilleurs vœux de succès à nos familles, amis, ainsi qu'à toute la promotion Structures 2024/2025.

*Belkhiry Ismail Abdelbasset & Lali Abdelkader*

# Remerciements

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrante, M<sup>me</sup> Nesrine El Houari, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour ses précieux conseils, pour sa patience et sa disponibilité, et surtout pour tout le confort et l'aisance qu'elle nous a apportée durant tous ces mois de travail. Nos remerciements s'adressent également à Mr Mohammed Adel Redouane, ingénieur au CTC Oran, pour son accompagnement et ses conseils tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier vivement Mr Fethi Hamzaoui, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions respectueusement M<sup>me</sup> Mohamed Chakib Bedjaoui Maître Assistant à l'Université de Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire .

**Merci à tous**

# Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la stabilité d'un hôtel R+3 fondé sur pieux forés dans une zone de quai en remblai, à travers un cas d'étude représentatif du contexte algérien, situé à Mers El Kebir, à Oran, une région reconnue pour ses infrastructures portuaires. L'objectif principal est d'analyser le comportement du système sol-structure sous différentes configurations de fondation, à l'aide de modélisations numériques avancées basées sur la méthode des éléments finis (MEF) avec le logiciel Plaxis 2D, reconnu pour sa robustesse et sa précision. Cinq scénarios ont été explorés : radier avec chargement, pieux seuls, pieux avec chargement, pieux avec radier, et système complet pieux + radier + structure. Les simulations ont révélé que le radier, en tant que fondation superficielle, a permis à lui seul d'assurer la stabilité et de limiter les tassements différentiels, sans nécessiter de fondations profondes. D'un point de vue purement technique et économique, la stabilité assurée avec un radier remet en question le recours systématique aux pieux, surtout dans des contextes portuaires consolidés. Toutefois, des considérations réglementaires, opérationnelles ou de sécurité à long terme peuvent justifier ce choix. Cela plaide pour une analyse au cas par cas, appuyée sur des données géotechniques fiables et une modélisation robuste. Au-delà de la simple vérification de stabilité, ce mémoire propose une réflexion critique sur la pertinence des fondations profondes dans les projets portuaires. Il valorise également l'usage des outils numériques MEF, particulièrement Plaxis, pour une conception plus rationnelle, techniquement fiable et économiquement optimisée, notamment dans des contextes portuaires consolidés comme celui de Mers El Kebir.

**Mots Clés :** Optimisation des fondations, Fondations profondes, Radier, Modélisation numérique, MEF, Zone de quai.

## **ABSTRACT**

This dissertation focuses on the stability study of a 3-story hotel founded on bored piles in a quay backfill area, through a case study representative of the Algerian context, located at Mers El Kebir, Oran, a region known for its port infrastructures. The main objective is to analyze the behavior of the soil-structure system under different foundation configurations, using advanced numerical modeling based on the finite element method (FEM) with the Plaxis 2D software, recognized for its robustness and accuracy. Five scenarios were explored: raft foundation with loading, piles group alone, piles group with loading, piles group with raft, and the complete system combining piles group+ raft + structure. The simulations revealed that the raft foundation alone ensured stability and limited differential settlements, without the need for deep foundations. From a purely technical and economic perspective, the stability provided by the raft questions the systematic use of piles, especially in consolidated port environments. However, regulatory, operational, or long-term safety considerations may justify this choice. This calls for case-by-case analysis, supported by reliable geotechnical data and robust modeling. Beyond mere stability verification, this thesis offers a critical reflection on the relevance of deep foundations in port projects. It also highlights the use of FEM numerical tools, particularly Plaxis, for a more rational, technically reliable, and economically optimized design, notably in consolidated port contexts like Mers El Kebir.

Keywords: Foundation optimization, Deep foundations, Raft foundation, Numerical modeling, FEM, Quay area.

## الملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة استقرار فندق مكون من طابقين (R+3) مؤسس على أعمدة خرسانية مثقوبة في منطقة رصيف مملوء بالتربة، من خلال دراسة حالة تمثل السياق الجزائري، وتحديدًا في مرسى الكبير بمدينة وهران، وهي منطقة معروفة ببنيتها التحتية البحرية. الهدف الرئيسي هو تحليل سلوك نظام التربة-المنشأة تحت مختلف تكوينات الأساسات، باستخدام نمذجة رقمية متقدمة تعتمد على طريقة العناصر المحددة (FEM) بواسطة برنامج Plaxis 2D، المعروف بدقته وقوته. تم استكشاف خمسة سيناريوهات: أساسات بلاطة (رافت) مع تحميل، أعمدة وحدها، أعمدة مع تحميل، أعمدة مع بلاطة، والنظام الكامل الذي يجمع الأعمدة والبلاطة والمنشأة. أظهرت المحاكاة أن البلاطة كنوع من الأساسات السطحية تكفي وحدها لضمان الاستقرار والحد من الهبوطات التفاضلية، دون الحاجة للأساسات العميقة. من الناحية التقنية والاقتصادية فقط، يشكك الاستقرار الذي توفره البلاطة في اللجوء النظامي للأعمدة، خاصة في المناطق البحرية المستقرة. مع ذلك، قد تبرر اعتبارات تنظيمية وتشغيلية أو متطلبات السلامة على المدى الطويل هذا الاختيار. هذا يدعو إلى إجراء تحليل لكل حالة على حدة، مدعوم ببيانات جيولوجية موثوقة ونمذجة قوية. علاوة على التحقق البسيط من الاستقرار، تقدم هذه الرسالة تأملًا نقديًا حول مدى جدوى الأساسات العميقة في المشاريع البحرية. كما تبرز أهمية استخدام أدوات النمذجة الرقمية FEM، وخاصة Plaxis، من أجل تصميم أكثر عقلانية، موثوقًا به تقنيًا ومُحسنًا اقتصاديًا، لا سيما في السياقات البحرية المستقرة مثل مرسى الكبير.

**الكلمات المفتاحية:** تحسين الأساسات، الأساسات العميقة، البلاطة، النمذجة الرقمية، طريقة العناصر المحددة، منطقة الرصيف.

# Listes des figures et tableaux

## Chapitre 1

**Figure 1.1** Exemple de différents types de bâtiments dans l'architecture urbaine moderne.

**Figure 1.2** Historique d'habitations humaines.

**Figure 1.3** Les éléments des gros ouvrages.

**Figure 1.4** Les types des bâtiments

**Figure 1.5** Les matériaux de structure d'un bâtiment

**Figure 1.6** Construction d'un bâtiment en matériau mixte

**Figure 1.7** Classification des bâtiments selon la hauteur

**Figure 1.8** Classification des types de quais selon leur mode constructif

**Figure 1.9** Le tassement différentiel

**Figure 1.10** Exemple de bâtiments fondés sur quai

**Figure 1.11** Rénovation de quais et acquisition d'équipements au port d'Annaba (Algérie)

**Figure 1.12** Drainage dans un bâtiment sans gravier

## Chapitre 2

**Figure 2.1** Fondation en pieux

**Figure 2.2** Mode de fonctionnement d'un pieu isolé

**Figure 2.3** Les contraintes pour un pieu isolé et un groupe de pieux (TSTP, 2008) .

**Figure 2.4** Travail de groupe de pieux (Agence qualité, Fondation et infrastructure, 2019)

**Figure 2.5** Les différents types des pieux .

**Figure 2.6** Les charges appliqués sur un pieu .

**Figure 2.7** Frottement négatif sur un pieu .

### **Chapitre 3**

**Figure 3.1** Localisation du site étudié (LTPO, Oran)

**Figure 3.2** La carte géologique d'Oran en 1952

**Figure 3.3** Pieux projeté dans le projet (LTPO)

**Figure 3.4** Modèle utilisé dans Plaxis 2D

**Figure 3.5** 1<sup>er</sup> cas d'étude : Radier + chargement ( $U_y = 20\text{mm}$ )

**Figure 3.6** Tassement en surface- 1<sup>er</sup> cas d'étude

**Figure 3.7** 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.8** Déplacement vertical- 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.9** Déplacement vertical du pieu central - 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.10** Déplacement Horizontal - 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.11** Effort axial et Moment fléchissant dans le pieu central- 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.12** 3<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.13** Effort axial et Moment fléchissant dans le pieu central- 3<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.14** Moment fléchissante dans le pieu central (pieu+chargement

**Figure 3.15** Effort axial et Moment fléchissant dans le pieu central 3<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.16** 4<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.17** Déplacement vertical- 4<sup>ème</sup> cas d'étude

**Figure 3.18** Déplacement horizontal 4ème cas d'étude

**Figure 3.19** Efforts axial de pieu central 4ème cas d'étude

**Figure 3.20** - 5ème cas d'étude

**Figure 3.21** Tassement - 5ème cas d'étude

**Figure 3.22** Déplacement horizontal - 5ème cas d'étude

**Figure 3.23** Effort axial et Moment fléchissant du pieu centrale- 5ème cas d'étude

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

**Tableau 1.1** La différence entre un fondation superficielle et profonde

**Tableau 1.2** Synthèse comparative des techniques d'amélioration des sols (Das, 2010)

## Chapitre 2

**Tableau 2.1** classification de types des pieux selon L'eurocode 7

## Chapitre 3

**Tableau 3.1** Caractéristiques des sols d'assise (LTPO Oran)

**Tableau 3.2** Efforts et déplacements maximum dans les pieux- 2<sup>ème</sup> cas d'étude

**Tableau 3.3** Déplacements et efforts maximum des pieux - 3<sup>ème</sup> cas d'étude

**Tableau 3.4** Déplacement et effort maximum de pieux 4<sup>ème</sup> cas d'étude

**Tableau 3.5** Efforts et déplacement maximum des pieux - 5<sup>ème</sup> cas d'étude

**Tableau 3.6** Comparaison entre le radier seul et le système pieux + radier sous chargement

**Tableau 3.7** Comparaison entre les logiciels (SAP2000 et Plaxis 2D)

# Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Liste des figures et tableaux	VI
Table des matières	IX

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

## **Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur les bâtiments en quai**

1.1 INTRODUCTION	3
1.2 HISTORIQUE DES BATIMENTS	5
1.3 ROLE DES BATIMENTS	6
1.3.1 Le gros œuvre	6
1.3.2 Le second œuvre	8
1.4 Les intervenants clés dans le processus de réalisation d'un ouvrage	8
1.4.1 Maitre d'ouvrage (le client)	9
1.4.2 Le maitre d'œuvre	9
1.4.3 L'entreprise de réalisation	9
1.5 Classification des bâtiments	10

1.6 Comportement structurel des bâtiments	12
1.7 Bâtiments construits sur quai	13
1.7.1 Caractéristiques des quais et contraintes du site	13
1.7.2 Systèmes de fondation utilisés sur les quais	13
1.7.3 Rendement et fiabilité des bâtiments fondés sur pieux en zone portuaire	14
1.7.4 Risques et conséquences en cas de mauvais choix de fondation	15
1.7.5 Solutions structurelles adaptées	15
1.7.6 Cas d'application : bâtiments sur quai fondés sur pieux	16
1.8 Normes et règlements algériens applicables aux bâtiments fondés sur pieux	17
1.9 Les méthodes de reconnaissance géotechnique en Algérie	18
1.10 Comparaison entre fondations superficielles et profondes dans le contexte algérien	19
1.11 Interaction sol-structure pour les bâtiments fondés sur pieux en milieu portuaire (nouveau titre proposé)	19
1.12 Choix des matériaux de construction adaptés à l'environnement marin	20
1.13 Techniques de mise en œuvre des fondations profondes en zone côtière	21
1.14 Maintenance et durabilité des bâtiments fondés sur pieux en bord de mer	22
1.15 Effets des charges dynamiques sur les bâtiments portuaires	22
1.16 Rôle du drainage dans la stabilisation des sols portuaires	23
1.17 Techniques de contrôle et d'essai des pieux après exécution	23
1.18 Stratégies d'optimisation des fondations en milieu portuaire	24

1.19 Conclusion	24
-----------------	----

## **Chapitre 02 : Synthèse bibliographique sur les fondations**

2.1 INTRODUCTION	28
2.2 DEFINITION DES FONDATIONS PROFONDES	29
2.3 Principe de fonctionnement	30
2.3.1 Cas d'un pieu isolé	30
2.3.2 Cas d'un groupe des pieux	31
2.3.3 Influence d'un groupe de pieux	32
2.4 Typologie des pieux	33
2.4.1 Pieux battus	33
2.4.2 Pieux fores	33
2.4.3 Tassement de groupe de pieux	36
2.5 Détermination de la charge limite d'un pieu	36
2.6 Frottement négatif sur les pieux	38
2.6.1 Description de phénomène	38
2.6.2 Méthode de calcul	39
2.6.3 Valeur maximale de frottement négatif	40

2.7 CONCLUSION	41
<b>Chapitre 03 : Étude numérique de la stabilité d'un bâtiment sur pieux en zone de quai</b>	
3.1 INTRODUCTION	43
3.2 PRÉSENTATION DU CAS D'ETUDE	44
3.2.1 Description générale du projet	44
3.2.2 Reconnaissance des sols pour le projet	46
3.2.3 Raisons du choix d'une fondation profonde	48
3.3 Hypothèses et modélisation géotechnique	49
3.3.1 Hypothèses générales	49
3.3.2 Stratigraphie du site	49
3.3.3 Propriétés géomécaniques des sols	50
3.3.4 Conditions aux limites et maillage	50
3.3.5 Hypothèse de chargement	51
3.4 Représentation du modèle géotechnique	51
3.5 Résultats de la simulation numérique	51
3.5.1 Analyse du 1er cas d'étude : Radier + chargement	52
3.5.2 Analyse du 2ème cas d'étude - Pieux seuls	54

3.5.2.1	Mouvement de terrain causé par la réalisation de pieux	54
3.5.2.2	Reaction de pieux	56
3.5.3	Analyse du 3ème cas d'étude- Pieux avec chargement	58
3.5.3.1	Mouvement de terrain causé par la réalisation de pieux	59
3.5.3.2	Reaction de pieux	60
3.5.4	Analyse du 4ème cas d'étude - Pieux avec radier	62
3.5.4.1	Mouvement de terrain causé par la réalisation de pieux	62
3.5.5	Analyse du 5ème cas d'étude – Pieux+ radier+ chargement	65
3.5.5.1	Mouvement du terrain causé par la réalisation des pieux	65
3.5.5.2	Réaction des pieux	67
3.6	Comparaison entre le radier seul et le système pieux + radier sous chargement	68
3.7	Comparaison des résultats obtenus avec Plaxis 2D et SAP2000	69
3.8	Recommandations pour le dimensionnement réel	70
3.9	Conclusion	72
	<b>Conclusion générale</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>76</b>

## Introduction générale

L'Algérie, dotée d'une vaste façade maritime sur la mer Méditerranée, occupe une position géostratégique importante entre l'Europe et l'Afrique. Ses principaux ports, tels qu'Alger, Oran, Béjaïa ou Skikda, jouent un rôle majeur dans le commerce international, la logistique et les activités maritimes.

Dans ce contexte, les infrastructures portuaires, et notamment les bâtiments implantés en zones de quai, doivent répondre à des exigences strictes en matière de stabilité, de sécurité et de durabilité.

Ces exigences sont d'autant plus complexes que les sols des zones de remblai présentent souvent une nature hétérogène, saturée et sensible aux sollicitations sismiques. Il est donc essentiel de maîtriser le comportement du système sol-structure pour garantir la pérennité des ouvrages construits dans ces environnements.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en s'appuyant sur un cas d'étude représentatif du contexte algérien : un hôtel R+3 implanté en zone de quai remblayée à Mers El Kebir, près d'Oran. L'objectif est d'évaluer la stabilité globale du bâtiment fondé sur pieux, ainsi que d'autres configurations de fondations, à travers une modélisation numérique avancée réalisée avec le logiciel Plaxis 2D, reconnu pour sa robustesse et sa précision.

Cinq scénarios ont été examinés : radier avec chargement, pieux seuls, pieux avec chargement, pieux avec radier, et système complet pieux + radier + structure. Les résultats obtenus montrent que le radier, en tant que fondation superficielle, assure à lui seul la stabilité de la structure et limite les tassements différentiels, sans nécessiter systématiquement de fondations profondes.

Cette observation ouvre une réflexion sur la tendance des bureaux d'études à privilégier systématiquement les fondations profondes dans les projets portuaires, même lorsque les conditions locales pourraient permettre des solutions plus simples et économiques. Si la sismicité régionale reste un facteur de vigilance, elle ne doit pas écarter d'emblée

l'exploration d'alternatives fondées sur des données fiables et des analyses numériques poussées.

Au-delà de l'évaluation technique, ce travail propose une réflexion critique sur l'optimisation des fondations en milieu portuaire, en valorisant l'usage des outils numériques MEF pour une conception à la fois fiable, rationnelle et économiquement optimisée.

La structure du mémoire se divise en deux parties principales : une revue bibliographique qui pose les bases théoriques nécessaires, suivie d'une analyse numérique détaillée des différents scénarios étudiés.

Cette organisation vise à fournir une compréhension complète des enjeux techniques et économiques liés aux fondations en zones portuaires, avec un focus particulier sur le contexte algérien.

En définitive, ce mémoire contribue à alimenter la réflexion et les bonnes pratiques en ingénierie portuaire, tout en ouvrant des perspectives de recherche futures axées sur l'interaction sol-structure et l'optimisation des solutions de fondation.

## Chapitre 1

# Synthèse bibliographique sur les bâtiments sur quai

---

### 1.1 Introduction

Les bâtiments sont des ouvrages de génie civil destinés à accueillir les activités humaines, qu'elles soient résidentielles, professionnelles, éducatives, commerciales ou industrielles. Ils constituent l'élément central de l'environnement bâti et traduisent le niveau de développement économique, technologique et culturel d'une société.

La conception d'un bâtiment repose sur une approche pluridisciplinaire qui mobilise l'architecture, la mécanique des structures, les sciences des matériaux et la géotechnique. Chaque projet est unique par sa forme, sa fonction, son environnement et les caractéristiques du sol qui l'accueille.

Parmi les étapes clés de cette conception figure le choix du système de fondation. Celui-ci assure la transmission des charges de la superstructure vers le sol, garantissant ainsi la stabilité, la durabilité et la sécurité de l'ouvrage. En fonction de la nature du terrain, du type de structure et des charges à supporter, différentes solutions sont envisageables : fondations superficielles, profondes ou mixtes.

Ce chapitre propose une revue bibliographique des types de bâtiments en zone portuaire, ainsi qu'une présentation des enjeux liés aux fondations dans ces environnements spécifiques. Il pose ainsi les bases théoriques indispensables à la compréhension des mécanismes sol-structure, et prépare le terrain pour l'étude numérique avancée menée dans les chapitres suivants.

L'objectif est d'établir un lien clair entre les contraintes locales, les solutions techniques envisageables, et l'évaluation rigoureuse des performances des fondations profondes, en particulier dans le contexte algérien étudié.



**Figure 1.1** Exemples de différents types de bâtiments dans l'architecture urbaine moderne

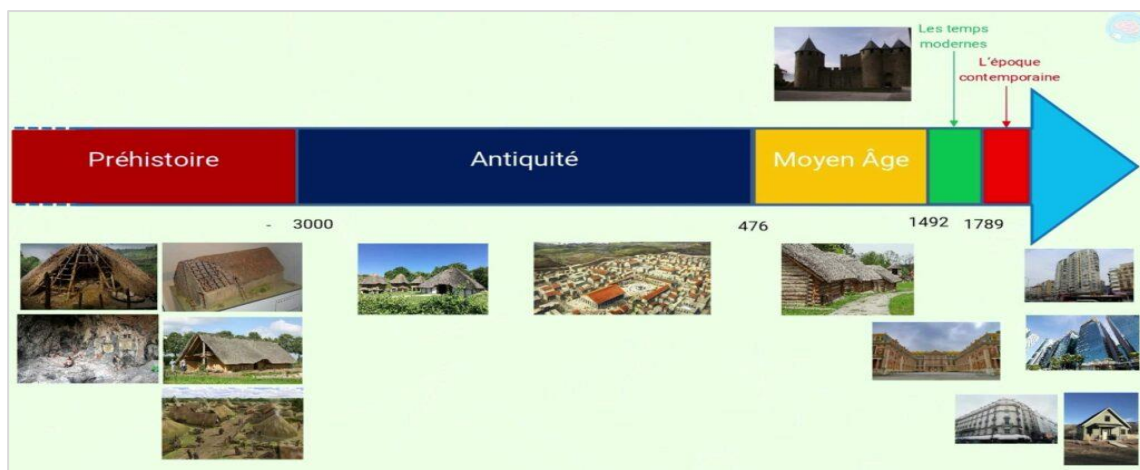
## 1.2 Historique des batiments

L'évolution des bâtiments au cours de l'histoire est étroitement liée au développement des civilisations et aux progrès technologiques. Dès la Préhistoire, l'homme a érigé des structures rudimentaires en bois, en pierre ou en terre pour se protéger des intempéries. Les premières grandes civilisations (Mésopotamie, Égypte, Grèce, Rome) ont introduit des

techniques constructives plus avancées, utilisant la pierre de taille, la brique et des éléments porteurs comme les colonnes et les arcs.

Au Moyen Âge, l'architecture religieuse et défensive prédominait, avec la construction de cathédrales, de châteaux et de remparts en pierre massive. La Renaissance a marqué un retour aux formes classiques et une rationalisation de l'espace architectural.

Avec la Révolution industrielle, les matériaux comme la fonte, l'acier et le béton armé ont transformé la construction. L'urbanisation massive du XIXe et du XXe siècle a donné naissance à de nouveaux types de bâtiments adaptés à la vie moderne (immeubles d'habitation, bâtiments publics, gratte-ciel).



**Figure 1.2** Historique d'habitations humaines

Aujourd'hui, les bâtiments sont conçus à l'aide d'outils numériques, avec des matériaux performants et des approches durables. Leur conception s'appuie sur des normes précises, tenant compte de la sécurité, du confort et de l'efficacité énergétique.

### 1.3 Role des Bâtiments

Un bâtiment est conçu avant tout pour offrir un espace protégé et adapté à une fonction précise, en assurant confort, sécurité et utilité à ses occupants.

Selon sa vocation, il peut servir à diverses activités telles que :

- Le logement, qu'il s'agisse de maisons individuelles, d'immeubles collectifs ou de gratte-ciel ;
- L'activité industrielle, comme dans le cas des usines, ateliers ou hangars de stockage ;
- Les échanges commerciaux, avec des structures dédiées comme les centres commerciaux ou les boutiques ;
- Les services publics, à travers des bâtiments destinés aux soins de santé, à l'administration ou à l'éducation (hôpitaux, écoles, mairies, etc.) ;
- Ou notamment les salles de spectacle, de cinéma, les complexes sportifs, etc.

Sur le plan constructif, un bâtiment se compose généralement de deux grandes entités structurelles : la partie inférieure, qui assure la liaison avec le sol, et la partie supérieure, qui constitue l'ouvrage visible et fonctionnel.

### **1.3.1 Les gros œuvre**

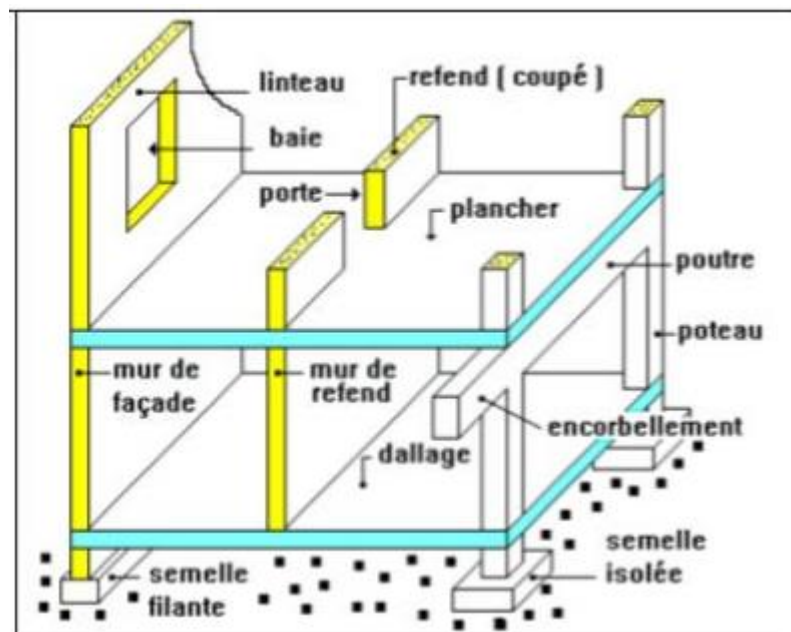
Les gros œuvres regroupent l'ensemble des interventions essentielles à la résistance mécanique et à la stabilité d'un bâtiment. Ces travaux constituent l'ossature principale de la construction, permettant à celle-ci de supporter durablement les charges permanentes (provenant de son propre poids et de ses équipements) ainsi que les charges variables ou exceptionnelles, telles que les effets climatiques (vent, pluie), les mouvements sismiques ou d'autres sollicitations extérieures.

Les opérations de gros œuvre incluent notamment :

- Les travaux de terrassement, qui préparent le sol à recevoir l'ouvrage ;
- La réalisation de l'infrastructure, partie située en dessous du niveau du sol ;
- La mise en place de la superstructure, correspondant à la partie visible du bâtiment au-dessus du sol.

Dans une structure porteuse assurant la stabilité globale de l'édifice, plusieurs éléments jouent un rôle fondamental. On retrouve ainsi les fondations, les dalles pleines, les

planchers, les murs porteurs ou voiles, les refends, ainsi que les éléments linéaires comme les poteaux et les poutres, en particulier dans les constructions en béton armé.



**Figure 1.3** Les éléments des gros oeuvres

### 1.3.2 Le second oeuvre

Le second œuvre regroupe l'ensemble des travaux qui interviennent après la réalisation du gros œuvre, et qui ont pour objectif de rendre le bâtiment habitable, confortable et fonctionnel. Ces travaux ne participent pas directement à la stabilité de la structure, mais sont indispensables à son usage au quotidien. Ils permettent d'aménager, d'équiper et de finaliser les espaces intérieurs.

On distingue plusieurs corps d'état dans le second œuvre, parmi lesquels on peut citer :

- Les travaux de menuiserie (portes, fenêtres, placards, etc.) ;
- L'installation des réseaux électriques ;
- La mise en place des équipements sanitaires ;
- Les systèmes de chauffage et de ventilation ;

- La construction de cloisons intérieures pour la séparation des espaces ;
- Les travaux de finition comme la peinture et les revêtements muraux ;
- Ainsi que certains travaux publics connexes, notamment liés à l'aménagement extérieur immédiat.

#### **1.4 Les intervenants clés dans le processus de réalisation d'un ouvrage**

La réalisation d'un bâtiment constitue une opération technique et organisationnelle complexe, qui implique la participation coordonnée de plusieurs acteurs aux rôles bien définis, tels que le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et les entreprises exécutantes. Ce processus repose sur une documentation complète, composée à la fois de pièces écrites (cahiers des charges, devis, contrats...) et de pièces graphiques (plans, coupes, schémas), indispensables à la bonne compréhension et à la conduite du projet.

##### **1.4.1 Maître d'ouvrage (le client)**

Il s'agit de l'entité qui assure le financement du projet de construction. Le maître d'ouvrage peut appartenir à différentes catégories, selon la nature et la destination du bâtiment à réaliser :

- Il peut s'agir d'un particulier, notamment dans le cadre de la construction d'une habitation individuelle, ce qui représente le cas le plus courant dans le secteur résidentiel.
- Dans le cadre de projets de plus grande envergure, le maître d'ouvrage peut être une entreprise, un organisme public ou une société privée, notamment lorsqu'il s'agit de la réalisation de bâtiments à usage industriel, commercial ou institutionnel.
- Enfin, les administrations publiques ou les collectivités territoriales peuvent également jouer ce rôle, notamment pour la construction de bâtiments publics tels que les mairies, les écoles, les ministères ou autres équipements municipaux.

### **1.4.2 Le maître d'œuvre**

Le maître d'œuvre est responsable de l'élaboration du dossier d'appel d'offres, destiné aux entreprises susceptibles d'intervenir sur le chantier. Ce dossier comprend l'ensemble des documents techniques nécessaires à la compréhension et à la réalisation du projet, tels que le cahier des charges, les plans détaillés ainsi que le devis descriptif des travaux.

Selon l'ampleur de sa mission, le maître d'œuvre peut intervenir à différents niveaux du projet. Il peut se limiter à la phase de conception ou, au contraire, accompagner l'opération jusqu'à sa réalisation complète, en assurant le suivi et la coordination des travaux sur le chantier.

### **1.4.3 L'entreprise de réalisation**

L'entreprise retenue pour exécuter les travaux est celle sélectionnée à l'issue de la procédure d'appel d'offres, en concertation entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre. Elle est chargée de réaliser les travaux conformément aux prescriptions techniques, aux plans et aux exigences définies dans le dossier du projet. Son intervention doit respecter les délais, les coûts et la qualité fixés dans les documents contractuels.

## **1.5 Classification des batiment**

Les bâtiments peuvent être classés selon différents critères :

### **1.5.1 Selon l'usage**

Nous avons :

- Bâtiments résidentiels : maisons individuelles, immeubles d'habitation.
- Bâtiments industriels : usines, hangars, entrepôts.
- Bâtiments tertiaires : bureaux, écoles, hôpitaux, hôtels, centres commerciaux.



**Figure 1.4** Les types et des batiments

### 1.5.2 Selon matériau de structure

Nous citons :

- Structures en béton armé : largement utilisées pour leur durabilité et résistance.
- Structures métalliques : légères et modulables, idéales pour les grandes portées.
- Structures en bois : écologiques et renouvelables, utilisées dans la construction légère.



**Figure 1.5** Les matériau de structure d'un batiment



Figure 1.6 Construction d'un bâtiment en matériau mixtes

### 1.5.3 Selon la hauteur

- Bâtiments bas: 1 à 2 niveaux.
- Bâtiments moyens: 3 à 6 niveaux.
- Bâtiments de grande hauteur (IGH) : au-delà de 28 mètres selon la réglementation.

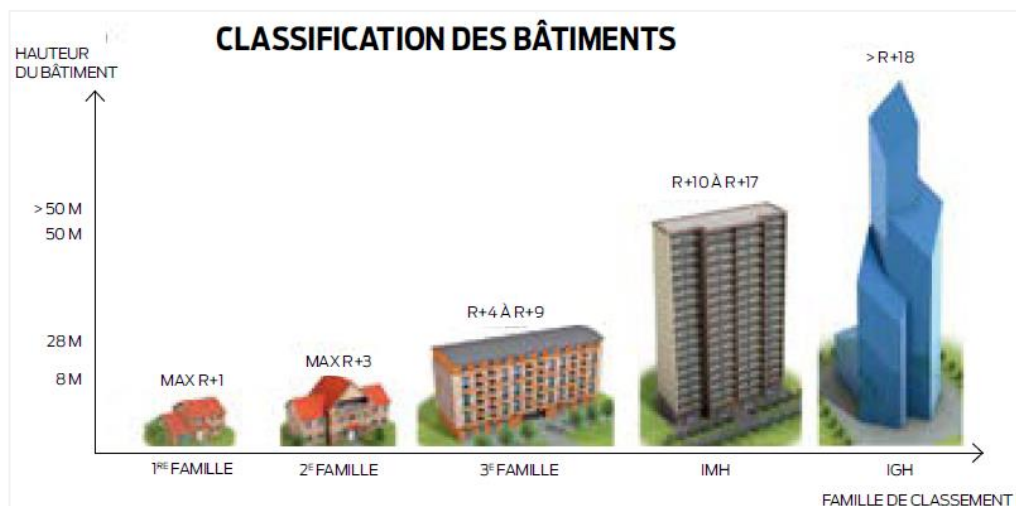


Figure 1.7 Classification des bâtiments selon la hauteur

## **1.6 Comportement structurel des bâtiments**

Tout bâtiment est soumis à un ensemble de forces extérieures qu'il doit supporter sans subir de déformation excessive ou de rupture. Ces actions sont classées en différentes catégories. Les actions permanentes, aussi appelées charges mortes, incluent le poids propre des éléments constructifs : dalles, poutres, murs, cloisons, revêtements, etc. Ces charges sont constantes dans le temps et doivent être précisément estimées dès la phase de conception.

Les actions variables, ou charges d'exploitation, concernent l'utilisation normale du bâtiment : personnes, mobilier, équipements, véhicules dans les parkings, etc. Leur valeur dépend de la destination du bâtiment (habitation, bureau, hôpital, entrepôt). À cela s'ajoutent les actions climatiques, telles que le vent, la neige ou la pluie, qui varient selon la localisation géographique et l'altitude.

Les actions accidentelles incluent les séismes, les explosions ou les chocs, et sont prises en compte à travers des combinaisons particulières de charges définies dans les normes. En Algérie, le RPA 99 version 2003 impose des règles strictes de dimensionnement aux effets sismiques, notamment à travers la définition de coefficients d'accélération sismique, de catégories de sol, et de périodes fondamentales de vibration. Le dimensionnement parasismique repose souvent sur des méthodes simplifiées (force équivalente) ou plus avancées (analyse modale, spectre de réponse).

## **1.7 Bâtiment construits sur quais**

### **1.7.1 Définition et caractéristiques des quais**

Les quais sont des plateformes artificielles aménagées en bordure de mer, de fleuve ou de canal. Ils constituent des interfaces stratégiques pour les opérations portuaires, industrielles ou logistiques, notamment pour le chargement et le déchargement de marchandises, le stationnement de navires, ainsi que pour le soutien des superstructures (grues, entrepôts, bâtiments techniques, etc.).

La conception des quais dépend d'un ensemble complexe de facteurs, incluant :

- Les caractéristiques géotechniques du sol (présence de remblais, faible portance, compressibilité).
- La nappe phréatique généralement très proche de la surface.
- Les contraintes hydrauliques (effets de marée, houle, pression interstitielle, érosion).
- La présence de charges mobiles importantes (engins, conteneurs, matériel lourd).
- Les conditions environnementales agressives, notamment la corrosion liée au milieu marin (salinité, humidité permanente).

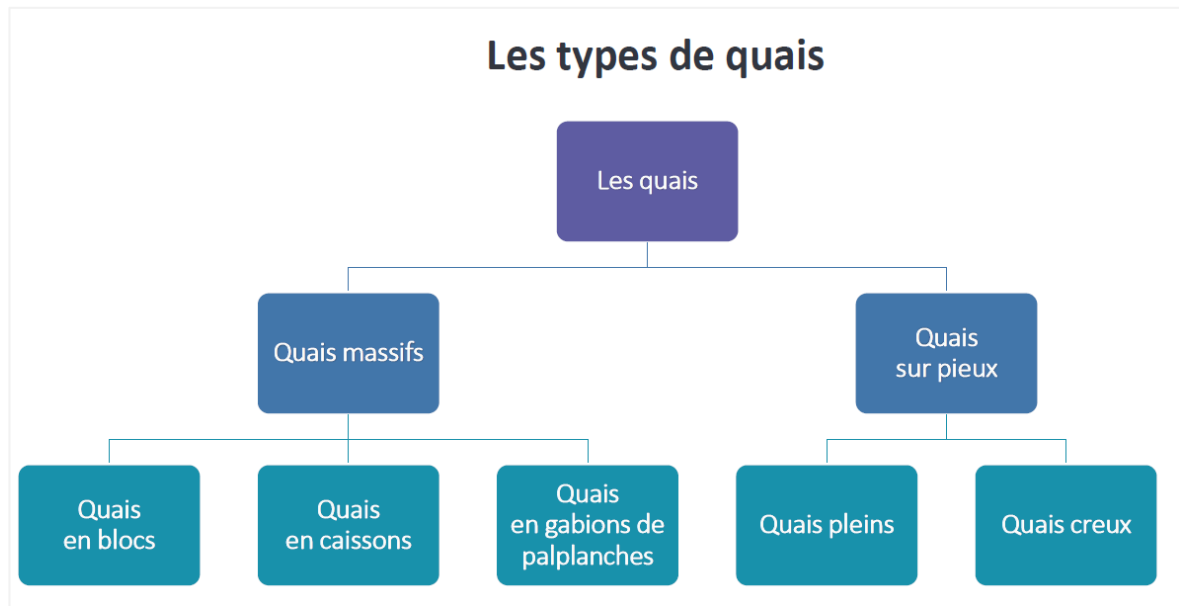
Ces contraintes font des quais un environnement géotechnique et structurel particulier, nécessitant une étude approfondie avant toute implantation de bâtiment.

### **1.7.2 Typologie des quais**

D'un point de vue constructif, les quais se répartissent en deux grandes familles principales :

- 1** Les quais massifs, dont la stabilité est assurée par leur propre poids. Ils sont généralement construits en blocs, en caissons, ou à l'aide de gabions renforcés de palplanches.
- 2** Les quais sur pieux, qui transmettent les charges à des couches de sol plus profondes et plus portantes. On distingue parmi eux les quais à tablier plein et les quais creux, plus légers. La figure 1.8 illustre cette classification.

Les quais massifs s'opposent aux quais sur pieux par leur principe de stabilité : masse propre contre transfert de charges profond. Cette distinction conditionne le type de fondations et les techniques constructives associées aux bâtiments portuaires.



**Figure 1.8** Classification des types de quais selon leur mode

## 1. Quais massifs

### a. Quais en blocs

Ces quais sont construits à partir de blocs de béton ou de roches empilés, généralement posés sur une fondation de sable ou de gravier. Ils sont adaptés aux zones où le fond marin est stable et peu profond.

### b. Quais en caissons

Ils sont constitués de caissons préfabriqués en béton armé, souvent creux, qui sont immergés puis remplis de matériaux lourds (sable, gravats). Ce type permet une préfabrication en chantier naval.

### c. Quais en gabions de palplanches

Ce type combine des palplanches verticales et des gabions remplis de pierres. Ils sont souvent utilisés comme solutions économiques et flexibles dans les petits ports ou zones de soutènement.

## 2. Quais sur pieux

### a. Quais pleins

Ce type repose sur un ensemble de pieux verticaux (en acier, béton ou bois) sur lesquels est coulée une dalle pleine, formant un tablier rigide. Ils sont adaptés aux terrains meubles et aux zones à fortes charges.

### b. Quais creux

Structure plus légère, le tablier est partiellement évidé, souvent constitué de poutres préfabriquées. Il s'agit d'une solution plus économique pour des charges modérées.

### 1.7.3 Rendement et fiabilité des bâtiments fondés sur pieux en zone portuaire

L'utilisation des pieux sur quai présente plusieurs avantages en termes de rendement structurel :

- Transmission efficace des charges vers les couches profondes.
- Réduction des tassements différentiels.
- Bonne performance en zones à fort risque sismique ou hydraulique.
- Adaptabilité aux variations de charges et à l'agressivité du sol.

Sur le plan de la fiabilité, les fondations profondes permettent :

- Une meilleure longévité de la structure.
- Une résistance accrue aux mouvements du sol, au fluage, et à l'érosion.
- Une limitation des désordres liés à la saturation des sols ou à la poussée hydrostatique.

### 1.7.4 Risques et conséquences en cas de mauvais choix de fondation

Un mauvais dimensionnement ou un choix inadapté du système de fondation peut entraîner en général :

- Des tassements excessifs ou différentiels, provoquant des fissures et des déséquilibres.
- Une instabilité de la structure sous effets dynamiques (houle, séisme, surcharge).
- Une corrosion prématurée des éléments en contact avec l'eau (pieux métalliques).
- Une défaillance structurelle en cas d'érosion sous-marine ou de surpression interstitielle non maîtrisée.



**Figure 1.9** Tassements différentiel

### 1.7.5 Solutions structurelles adaptées

Pour pallier ces contraintes, les bâtiments sur quai sont généralement fondés sur des pieux. Ces pieux traversent les couches de sol meuble pour s'ancrer dans un horizon résistant. Ils peuvent également être associés à :

- Des longrines ou radier sur pieux.
- Des tirants d'ancrage pour lutter contre les poussées horizontales.
- Des dispositifs de drainage pour stabiliser les sols saturés.

Ce type de configuration exige une étude géotechnique approfondie, ainsi qu'une vérification poussée des efforts transmis par la superstructure. Notre projet de fin d'études entre dans ce cadre spécifique, car il porte sur l'étude de stabilité de l'ensemble bâtiment fondé sur pieux, implanté sur un quai portuaire.

### 1.7.6 Cas d'application : bâtiments sur quai fondés sur pieux

Dans le cadre de notre projet, l'ouvrage étudié est un bâtiment implanté sur un quai, où les pieux ont été choisis comme système de fondation. Ce choix s'explique par :

- La mauvaise qualité géotechnique des couches superficielles (sol remblayé, compressible).
- La proximité immédiate de la nappe phréatique.
- La nécessité de garantir une stabilité à long terme face à des charges variables et cycliques.
- L'importance de limiter les mouvements différentiels dans un environnement humide et agressif.

Cette situation justifie pleinement l'étude détaillée que nous mènerons dans le dernier chapitre, notamment sur le dimensionnement et la vérification de la stabilité de l'ensemble bâtiment- pieux- quai.



**Figure 1.10** Exemple de bâtiments fondés sur quai

## **1.8 Normes et règlements algériens applicables aux bâtiments fondés sur pieux**

Dans le contexte algérien, la conception et la réalisation des bâtiments doivent respecter des réglementations strictes, notamment en ce qui concerne la sécurité structurelle, le comportement sismique et la stabilité des fondations.

Les ouvrages sur pieux, en particulier dans les zones portuaires, sont soumis à des exigences particulières en raison des conditions de sol défavorables et des risques liés à l'eau.

### **1.8.1 Principales normes applicables**

La conception de bâtiments sur pieux en zone de quai en Algérie est régie par plusieurs normes et règlements techniques nationaux. Ces textes couvrent à la fois les aspects géotechniques, parasismiques et structurels, garantissant la sécurité et la durabilité des ouvrages en milieu portuaire.

#### **1.8.1.1 RPA 99 version 2003 modifiée et RPA 2024**

Le Règlement Parasismique Algérien (RPA) constitue la référence principale pour la prise en compte de l'aléa sismique dans la conception des bâtiments.

La version de 2003 (modifiée) reste largement utilisée à ce jour, mais elle est progressivement remplacée par le RPA 2024 (D.T.R. – B.C. 2.48), récemment publié.

Le RPA 2024 introduit des évolutions majeures : nouvelle cartographie sismique (7 zones au lieu de 3), méthodes avancées d'analyse (statique équivalente, modale spectrale, dynamique), et prescriptions spécifiques pour les fondations profondes.

Il intègre également des concepts modernes comme l'isolation sismique à la base et l'interaction sol-structure.

Toutefois, le RPA 2024 demeure difficile à appréhender pour les praticiens, en raison de sa complexité rédactionnelle, de l'introduction de nombreux nouveaux concepts techniques, et de l'absence actuelle de guides d'application détaillés.

Sa mise en œuvre demande une maîtrise approfondie de la dynamique des structures et une lecture attentive du texte intégral.

#### **1.8.1.2 BAEL 91 modifié / CBA 93**

Ces règlements encadrent le dimensionnement en béton armé des pieux : capacité portante, flambement, armatures minimales, conditions de durabilité en milieu agressif (eau salée, corrosion). Ils restent la base du calcul structural en fondation profonde.

#### **1.8.1.3 Prescriptions du CTGC**

Le Centre Technique des Grands Constructions (CTGC) propose des guides techniques orientés vers les ouvrages portuaires. Ils incluent :

- Des recommandations sur la profondeur minimale d'ancrage des pieux.
- Des critères de portance admissible en sol remblayé ou saturé.
- Des dispositions pour la sécurité hydraulique (pression interstitielle, érosion, marée).

#### **1.8.1.4 Normes algériennes NA 16203**

Ces normes précisent les méthodes d'investigation géotechnique, nécessaires à la reconnaissance du site :

- Essais SPT et pressiométriques pour la résistance et la déformabilité des sols.
- Essais de laboratoire pour la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques (teneur en eau, granulométrie, limites d'Atterberg, etc.).

### **1.8.2 Application au projet**

Dans notre cas, le bâtiment est implanté en zone sismique IIa, sur un sol de type S3 (remblai compressible + nappe phréatique élevée), ce qui impose des pieux suffisamment profonds et armés, dimensionnés selon les dispositions du RPA 99.

## 1.9 Les constructions sur remblai en zone portuaire

Dans les zones portuaires, de nombreuses infrastructures, notamment les quais, les entrepôts, les hangars ou les bâtiments administratifs, sont implantées sur des remblais artificiels constitués au fil des aménagements successifs.

Ces remblais sont souvent hétérogènes, composés de matériaux de nature variable (sols d'excavation, déchets de construction, déblais maritimes) et présentant une faible compacité initiale. Leur comportement mécanique est généralement peu fiable, avec une cohésion faible, une compressibilité élevée, et parfois une perméabilité irrégulière.

La présence d'une nappe phréatique proche de la surface ou fluctuante accentue ces difficultés, réduisant la portance du sol et augmentant les risques de tassements ou de déformations différentielles.

Dans le cas spécifique des quais, le remblai est souvent situé au-dessus d'une couche de sol naturel faible (comme des marnes ou des limons saturés), ce qui constitue un double défi : d'une part, le remblai peut se tasser sous son propre poids, et d'autre part, il agit comme couche intermédiaire entre la structure du quai et les fondations profondes (souvent sur pieux).

La stabilité globale de l'ouvrage dépend alors fortement de la qualité de ce remblai, de son degré de compactage, et des éventuelles techniques de renforcement mises en œuvre (stabilisation à la chaux, au ciment, ou géosynthétiques). Une caractérisation rigoureuse du remblai est donc indispensable à toute étude de conception ou de réhabilitation en zone de quai.

La figure 1.11 illustre la situation critique du quai n°3 du port commercial d'Annaba, dont la dégradation, annoncée depuis près de 18 mois, est enfin prise en charge. L'Entreprise portuaire d'Annaba (EPAN) a confié au Groupe Cosider la rénovation complète de cette infrastructure stratégique.

Les travaux, lancés à la mi-octobre, devraient durer environ 36 mois, d'après les prévisions de l'étude. Cette intervention vise à répondre à une situation préoccupante : construit à l'époque coloniale, le port d'Annaba (premier du pays en exportations hors hydrocarbures et cinquième pour le trafic de conteneurs) voit ses capacités se réduire fortement. Deux quais sur cinq sont hors service depuis plus d'un an, avec des risques d'effondrement à plusieurs endroits



**Figure 1.11** Rénovation de quais et acquisition d'équipements au port d'Annaba (Algérie)

### **1.10 Comparaison entre fondations superficielles et profondes dans le contexte Algérien**

Dans les zones portuaires algériennes, les fondations superficielles sont généralement inadaptées en raison des caractéristiques particulières du sol et de la présence d'eau. En effet, les sols meubles et saturés en eau qui caractérisent des ports tels qu'Alger, Béjaïa et Skikda ne permettent pas d'assurer la stabilité et la capacité portante requises pour les ouvrages portuaires. Par conséquent, les pieux forés ou battus sont largement utilisés,

permettant de transférer les charges jusqu'aux couches résistantes situées à des profondeurs importantes, typiquement entre 28 et 32 mètres.

Le tableau 1.1 présente une comparaison synthétique entre les fondations superficielles et profondes dans ce contexte, en mettant en avant les principales caractéristiques, avantages et limitations propres à chaque type de fondation.

**Tableau 1.1** La différence entre fondations superficielle et profonde

Critères	Fondations superficielles	Fondations profondes
<b>Profondeur</b>	Peu profond (quelques mètres)	Profonde (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres)
<b>Type de sol adapté</b>	Sols rigides, peu compressibles	Sols meubles, compressibles, présence d'eau
<b>Transfert de charge</b>	Par frottement et portance sur couche superficielle	Par pointe et frottement latéral sur couches profondes
<b>Coût</b>	Moins élevé	Plus élevé
<b>Difficulté d'exécution</b>	Faible à modérée	Plus complexe (forage, battage)
<b>Sensibilité à la présence d'eau</b>	Sensible, nécessite souvent assèchement ou stabilisation	Adapté aux sols saturés
<b>Utilisation typique</b>	Bâtiments légers, terrains stables	Structures lourdes, sols instables, zones portuaires

### 1.11 Choix des matériaux de construction adaptés à l'environnement marin

L'environnement marin constitue un milieu particulièrement agressif pour les matériaux de construction. La présence constante de l'humidité, la salinité de l'air et de l'eau, ainsi que les variations de température et de pression génèrent des phénomènes de corrosion, d'oxydation et de dégradation accélérée.

Dans ce contexte, le choix des matériaux utilisés pour la réalisation des bâtiments en zone portuaire doit répondre à des critères stricts de durabilité et de résistance chimique.

Le béton utilisé dans les fondations et les éléments porteurs est généralement formulé avec des ciments résistants aux sulfates (type CEM III ou CEM V) et des adjuvants hydrofuges afin de limiter la pénétration de l'eau et des chlorures.

Un enrobage suffisant des armatures est également requis pour protéger les aciers contre la corrosion, conformément aux pratiques recommandées par le CTGC.

Les aciers eux-mêmes peuvent être galvanisés, peints avec des produits anticorrosion ou remplacés, dans certains cas spécifiques, par des matériaux composites.

### **1.12 Techniques de mise en œuvre des fondations profondes en zone côtière**

La réalisation de fondations profondes dans un environnement portuaire nécessite des techniques de mise en œuvre adaptées aux contraintes spécifiques du sol et de l'eau.

Les sols rencontrés dans ces zones sont souvent constitués de remblais, de limons ou d'argiles saturées, avec une nappe phréatique très proche de la surface, ce qui complique considérablement les opérations de forage ou de battage.

Les pieux forés, qui sont parmi les plus utilisés dans ce type de contexte, doivent être exécutés avec soin afin d'éviter les instabilités de parois ou les effondrements pendant le creusement.

Pour cela, on utilise généralement un fluide de forage (bentonite ou polymère) qui permet de stabiliser les parois du forage jusqu'à la mise en place du béton. L'introduction de l'armature et le bétonnage par tube plongeur se font ensuite en continu, en respectant des conditions strictes pour éviter les défauts de remplissage ou de ségrégation.

Lorsque les conditions géotechniques le permettent, les pieux battus peuvent également être mis en œuvre. Ils sont enfoncés par impact ou vibration jusqu'à atteindre une couche résistante.

Cette méthode est rapide mais nécessite une vigilance particulière quant aux vibrations transmises à l'environnement proche, notamment lorsqu'il existe des ouvrages existants à proximité.

Enfin, l'ensemble du processus de mise en œuvre est encadré par un contrôle qualité rigoureux : vérification de la verticalité, du diamètre, du taux de bétonnage, et des essais de réception (essais de chargement statique ou dynamique) pour valider la portance réelle des pieux.

Ces précautions sont indispensables pour garantir la fiabilité des fondations dans un milieu aussi contraignant que le littoral.

### **1.13 Maintenance et durabilité des bâtiments fondés sur pieux en bord de mer**

Une fois le bâtiment construit, sa durabilité dépend fortement de l'entretien régulier des éléments structurels exposés. En zone portuaire, les agents corrosifs tels que le sel, l'humidité constante et les embruns marins accélèrent l'altération des matériaux.

Il est donc essentiel de prévoir des opérations périodiques de contrôle, d'inspection et de réparation.

Les pieux, bien que situés sous terre ou sous l'eau, doivent faire l'objet de vérifications via des essais de contrôle (ultrasons, essais de traction ou de chargement) pour évaluer leur intégrité structurelle.

De même, les éléments en béton armé ou en acier doivent être protégés par des revêtements spéciaux, et inspectés pour éviter l'apparition de fissures ou d'oxydation. Une bonne stratégie de maintenance assure la longévité de l'ouvrage et limite les coûts de réparation à long terme.

### **1.14 Techniques de renforcement et d'amélioration des sols**

L'amélioration ou le renforcement des sols repose sur un ensemble de techniques visant à modifier les propriétés mécaniques et hydrauliques du sol afin de le rendre plus apte à supporter des charges, limiter les tassements ou garantir la stabilité des ouvrages.

Parmi les méthodes les plus répandues, le compactage (dynamique ou vibrocompactage) est principalement utilisé dans les sols granulaires tels que les sables ou graviers, dans le

but d'augmenter la densité et la rigidité du matériau par réduction des vides. Cette amélioration est généralement permanente. Pour les sols fins (argiles et limons), la stabilisation par l'ajout de chaux ou de ciment constitue une solution efficace : elle permet d'augmenter la cohésion, de réduire la plasticité et d'accroître la portance, avec un effet durable. De leur côté, les techniques d'injection de coulis (grouting) sont utilisées pour renforcer localement ou imperméabiliser le sol, selon le type de coulis employé. Elles sont adaptées à divers types de sols, et leurs effets sont également permanents.

D'autres techniques, comme les colonnes ballastées ou rigides (béton, jet grouting), visent à améliorer la portance et le drainage, en particulier dans les sols compressibles comme les argiles molles. Le mélange profond (Deep Soil Mixing) consiste à injecter mécaniquement des liants dans le sol pour former un matériau plus cohésif et rigide, ce qui améliore sensiblement la résistance au cisaillement. Les géosynthétiques (géogrilles, géotextiles) permettent quant à eux un renforcement par confinement latéral, particulièrement utile dans les couches superficielles de sols meubles.

Le rabattement de nappe phréatique, bien qu'il ne soit pas une technique de renforcement mécanique à proprement parler, est souvent utilisé pour améliorer temporairement les conditions géotechniques d'un sol.

En abaissant le niveau de la nappe à l'aide de pompages ou de drains, on réduit la pression interstitielle, ce qui augmente les contraintes effectives et, par conséquent, la résistance au cisaillement. Cette technique est particulièrement pertinente dans les sols perméables, comme les sables ou les limons, et permet également de réduire les risques de liquéfaction en contexte sismique. Toutefois, ses effets sont temporaires et peuvent entraîner des tassements secondaires dans les zones adjacentes.

Enfin, la technique de préchargement combinée à des drains verticaux est couramment employée pour accélérer la consolidation des sols fins saturés (notamment les argiles

molles), en réduisant les tassements à long terme et en améliorant la capacité portante globale du sol.

Le tableau suivant présente une synthèse comparative des principales techniques d'amélioration des sols, en précisant leurs objectifs, leurs effets géotechniques, leur durée d'efficacité, ainsi que les types de sols concernés.

**Tableau 1.2** Synthèse comparative des techniques d'amélioration des sols (Das, 2010)

Technique	Objectif principal	Effets géotechniques	Durée d'efficacité	Types de sols ciblés
<b>Compactage (dynamique, vibro)</b>	Augmenter la densité et la rigidité	Réduction des vides, augmentation de la rigidité et portance	Permanente	Sols granulaires (sables, graviers)
<b>Stabilisation à la chaux/ciment</b>	Améliorer la cohésion et réduire la plasticité	Augmentation de la cohésion, rigidité, portance	Permanente	Sols fins (argiles, limons)
<b>Injection de coulis (grouting)</b>	Renforcer ou imperméabiliser localement	Augmentation de la résistance, réduction de la perméabilité	Permanente	Tous types (selon le coulis utilisé)
<b>Colonnes ballastées / rigides</b>	Améliorer portance et drainage	Transfert de charge, amélioration de la rigidité globale	Permanente	Sols compressibles (limons, argiles)
<b>Deep Soil Mixing (DSM)</b>	Augmenter cohésion et rigidité par mélange in situ	Mélange ciment/sol : gain de cohésion, rigidité, résistance au cisaillement	Permanente	Sols fins à moyens
<b>Géosynthétiques (géogrilles, etc.)</b>	Renforcement par confinement latéral	Contrôle de la déformation, renforcement superficiel	Permanente	Sols meubles ou instables
<b>Rabattement de nappe phréatique</b>	Réduire la pression interstitielle et assécher le sol	Augmentation temporaire de la résistance, réduction du risque de liquéfaction	<b>Temporaire</b>	Sols perméables (sables, limons)
<b>Préchargement + drains verticaux</b>	Accélérer la consolidation des sols fins	Réduction des tassements à long terme, amélioration de la portance	Moyen-long terme	Argiles molles

### **1.15 Conclusion**

Les bâtiments, dans leur diversité d'usage, de forme et de structure, constituent des éléments essentiels de notre environnement bâti. Leur conception repose sur une analyse rigoureuse des sollicitations et des conditions du site, en particulier géotechniques.

Les bâtiments réalisés sur quai représentent une catégorie spécifique soumise à des contraintes importantes, notamment en termes de stabilité et de portance. Ces contraintes imposent souvent le recours à des solutions de fondation plus complexes, telles que les pieux.

Ce premier chapitre a permis de poser le cadre général des ouvrages étudiés dans ce mémoire. Il constitue une base nécessaire pour comprendre l'importance du choix des fondations dans la conception des structures, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 2

# Synthèse bibliographique sur les fondations

---

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'attention se porte sur les fondations profondes, et plus particulièrement sur les pieux.

L'objectif est de présenter une synthèse des connaissances fondamentales relatives aux pieux, en mettant en évidence leur rôle dans le transfert des charges, leur comportement mécanique sous différentes sollicitations, ainsi que les déformations qu'ils peuvent subir. Une attention particulière sera accordée au comportement collectif des pieux lorsqu'ils sont regroupés (groupes de pieux), en comparaison avec le comportement isolé d'un pieu unique.

Ce chapitre abordera également les différents types de pieux utilisés en ingénierie géotechnique, les principales méthodes de dimensionnement, ainsi que les phénomènes géotechniques ou environnementaux susceptibles d'affecter leur stabilité ou leur efficacité (tels que le fluage, le soulèvement, ou le phénomène de liquéfaction). Cette synthèse bibliographique constitue une base essentielle pour comprendre les problématiques de stabilité des ouvrages reposant sur des fondations en pieux, comme celui étudié dans le cadre de ce mémoire.

## 2.2 Définition des fondations profondes

Lorsque le sol superficiel supportant une fondation n'est plus capable de résister aux charges qui lui sont appliquées, on utilise une fondation profonde pour atteindre des couches plus résistantes, comme le substratum. Cette solution est particulièrement nécessaire lorsque les couches superficielles sont peu portantes, molles et compressibles, comme les argiles, les vases ou les tourbes, et lorsqu'il est impossible d'améliorer leur capacité portante.

Si la fondation était réalisée directement sur ces sols compressibles, des tassements excessifs se produiraient, compromettant la stabilité de l'ouvrage (Roger, 2003).

Les pieux sont des éléments élancés, avec un rapport longueur/largeur généralement supérieur à 5 ou 6. Leur fonctionnement repose sur trois mécanismes principaux :

- Résistance en pointe (portance à la base)
- Frottement latéral (adhérence sur les parois)
- Combinaison des deux (cas le plus courant)



**Figure 2.1** Fondations en pieux

## 2.3 Principe de fonctionnement

### 2.3.1 Cas d'un pieu isolé

Un pieu transmet les charges qu'il supporte au sol de deux manières principales. D'une part, l'effort de pointe ( $Q_p$ ), qui dépend de la section de la base du pieu et de la résistance du substratum, résulte de l'appui direct sur une couche solide du sol.

D'autre part, l'effort de frottement latéral ( $Q_s$ ) est généré par l'interaction entre la surface du pieu et le sol environnant. Ce frottement dépend de la rugosité du pieu, de la pression latérale et du coefficient de frottement interne du sol. Cependant, il ne se mobilise que s'il y a un déplacement relatif entre le pieu et le sol.

Le frottement latéral peut être positif ou négatif selon le comportement du sol. Si le pieu s'enfonce dans un sol stable, le frottement crée un effort vertical ascendant (frottement positif). En revanche, si le sol se tasse autour d'un pieu immobile, le frottement devient négatif et surcharge le pieu. Pour limiter cet effet, notamment dans les sols compressibles ou sous des remblais récents, on utilise un tubage autour du pieu afin de réduire le frottement négatif.

Lorsqu'un pieu travaille en traction (à l'arrachement), l'effort de pointe  $Q_p$  devient nul, car la base du pieu ne participe pas à la résistance. Dans ce cas, la capacité portante repose uniquement sur le frottement latéral  $Q_s$ . Il est généralement admis que la valeur du frottement mobilisable reste la même, que le pieu soit soumis à une compression ou à une traction. Ainsi, le frottement latéral joue un rôle essentiel dans la résistance à l'arrachement, avec une magnitude équivalente à celle mobilisée en compression.

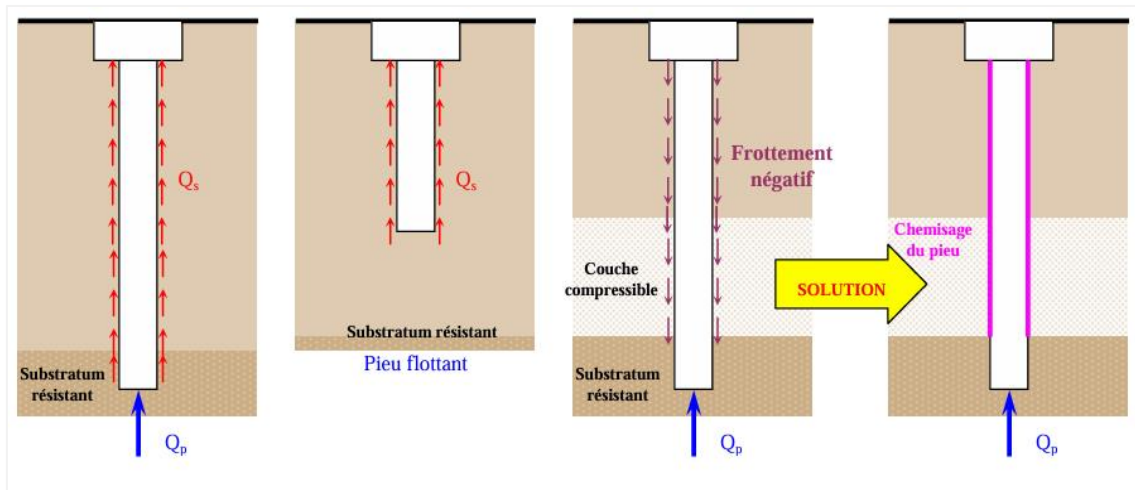


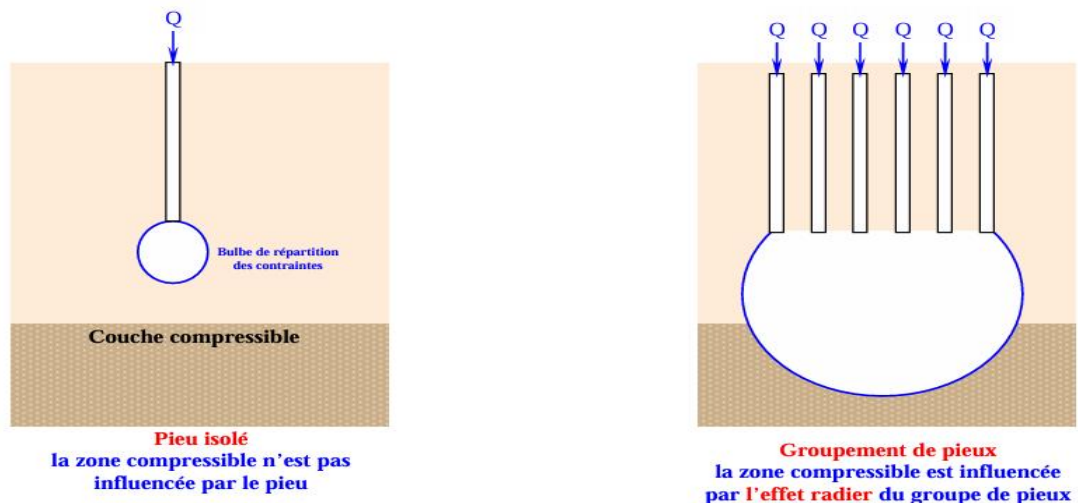
Figure 2.2 Mode de fonctionnement d'un pieu isolé

### 2.3.2 Cas d'un groupe des pieux

Lorsque les pieux sont disposés de manière rapprochée, il ne suffit pas de vérifier uniquement la résistance d'un pieu isolé. En effet, les interactions entre les pieux au sein d'un groupe peuvent entraîner une diminution de la capacité portante globale. Ainsi, la charge limite du groupe de pieux ( $Q_{gu}$ ) peut être inférieure à la somme des charges limites individuelles de chaque pieu pris isolément ( $Q_{ui}$ ). Ce phénomène nécessite donc une analyse spécifique du comportement du groupe pour garantir la stabilité de l'ensemble.

Le coefficient d'efficacité du groupe de pieu se définit comme suit :

$$C_e = \frac{Q_{gu}}{\sum Q_{ui}}$$

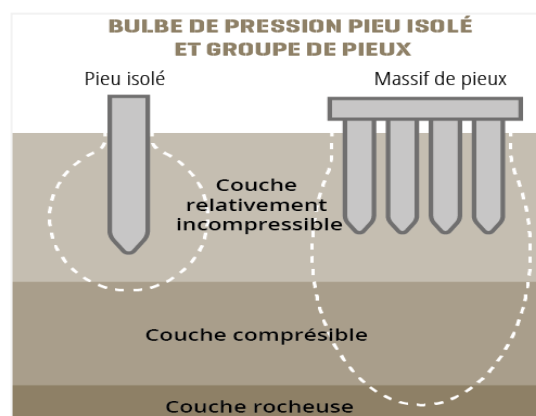


**Figure 2.3** Contraintes pour un pieu isolé et un groupe de pieux (TSTP, 2008)

### 2.3.3 Influence d'un groupe de pieux

Les pieux génèrent un bulbe de contraintes dans le sol sous leur base (figure 2.4). Il est donc crucial de vérifier la capacité portante des couches profondes à supporter ces pressions.

Lorsque les pieux sont disposés en groupe, le bulbe de contraintes s'étend sur une profondeur bien plus importante que pour un pieu isolé. Pour cette raison, un espacement minimal de 2 à 2,5 fois le diamètre des pieux doit être respecté afin d'assurer une bonne répartition des charges dans le sol.



**Figure 2.4** Travail de groupe de pieux (Agence Qualité, 2019)

L'effet de groupe présente des bénéfices significatifs, particulièrement pour les pieux flottants installés dans des sols granulaires compressibles lors de la mise en œuvre.

L'interaction entre pieux devient négligeable lorsque l'espacement entre axes atteint  $6B$  (où  $B$  représente le diamètre du pieu). Cet effet de groupe se révèle plus marqué dans les sols sableux que dans les argileux. Dans les sables, son importance croît proportionnellement avec la densité relative du sol (Frank, 2019).

## 2.4 Typologie des pieux

### 2.4.1 Pieux battus

Les pieux se divisent en deux catégories principales : les pieux préfabriqués et les pieux battus moulés exécutés en place. Les pieux préfabriqués comprennent essentiellement des pieux métalliques (sous forme de tubes ouverts ou fermés à leur base, ou en profilé H) et des pieux en béton armé fabriqués à proximité du chantier. Ces deux types de pieux sont mis en œuvre par battage ou par vibration.

Les pieux battus moulés suivent un processus spécifique : un tube équipé d'une plaque métallique à sa base est d'abord battu dans le sol. Après la mise en place éventuelle d'une cage d'armatures, le tube est progressivement rempli de béton lors de son extraction. Cette technique permet de créer des pieux en béton directement dans le sol.

### 2.4.2 Pieux fores

L'exécution de ce type de pieux débute par un forage réalisé avec des outils adaptés, pouvant être protégé par un tubage ou par de la boue de stabilisation pour maintenir l'intégrité des parois. Après la mise en place éventuelle des armatures, le bétonnage s'effectue au moyen d'une colonne de bétonnage utilisant la technique du tube plongeur, qui garantit un remplissage depuis la base du pieu vers le haut.

***Pieux à la tarière creuse : une technique innovante*** : Ces pieux, très répandus depuis une décennie dans les fondations de bâtiments, fonctionnent selon un principe ingénieux : une tarière creuse est vissée dans le sol sur toute la longueur du futur pieu, puis retirée

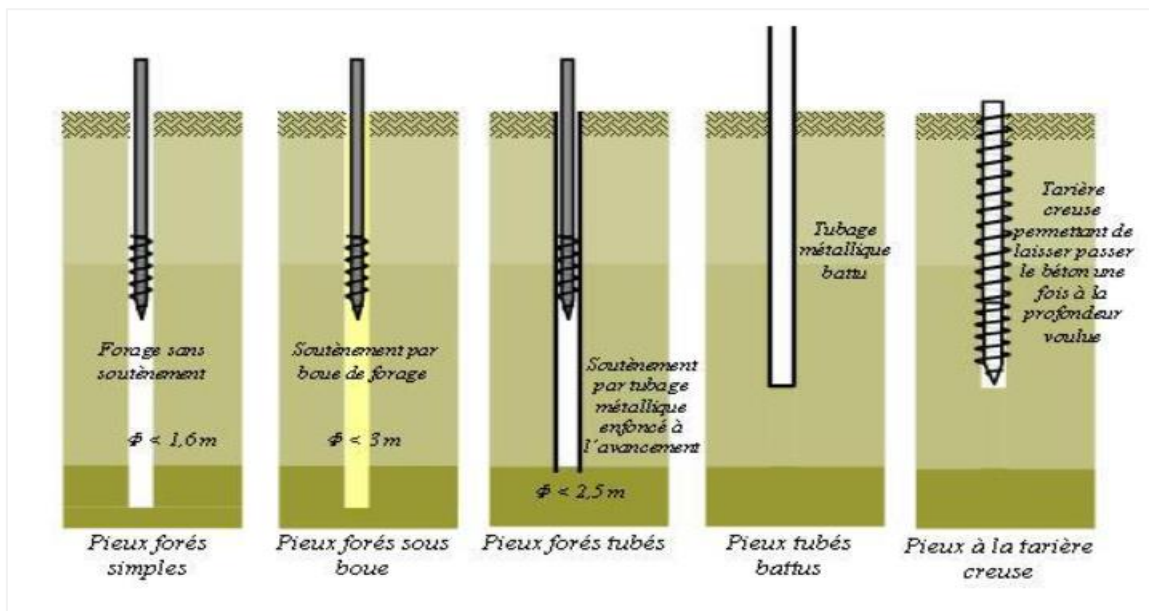
sans rotation tandis que le béton est injecté par son axe creux. On distingue trois variantes :

Type 1 : sans enregistrement des paramètres de forage et de bétonnage

Type 2 : avec enregistrement de la profondeur, pression et quantité de béton

Type 3 : équipés d'un tube télescopique guidant le bétonnage

L'armature ne peut être placée qu'après bétonnage, devenant complexe au-delà de 12 à 15m. Pour ces cas, des solutions alternatives comme le béton fibré ont été développées. Les progrès techniques permettent désormais de réaliser des pieux de 600 à 1200mm de diamètre sur des profondeurs atteignant 35m. Économiques et performants, ces pieux représentent aujourd'hui une solution très compétitive sur le marché (figure 2.5).



**Figure 2.5** Les différents types de pieux

Entre ces deux types extrêmes de pieux, il existe toute une gamme de pieux intermédiaires tenant à la fois du pieu moulé et du pieu battu. Le tableau 2.1 présente la classification des types de pieu selon l'Eurocode 7.

**Tableau 2 .1** Classification de types des pieux selon l'eurocode 7

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

En conditions de chargement standard, les pieux isolés présentent généralement des déformations négligeables, n'influençant pas significativement le dimensionnement des structures courantes.

Toutefois, certaines configurations particulières, notamment dans le cas d'ouvrages souterrains, nécessitent une évaluation précise de ces déformations.

Les études expérimentales révèlent qu'un pieu soumis à une charge de référence de  $0,7Q_p$  (70% de sa capacité portante ultime) subit typiquement un tassement d'environ 1cm en tête. Cette observation reste valable quelle que soit la géométrie du pieu, pour des longueurs variant de 6 à 45 m et des diamètres (B) compris entre 0,30 et 1,5 m.

La norme définit un tassement de référence  $S_{ref}$  sous charge nominale (Montgho, 2005) :

- **Pieux forés** :  $S_{ref} = 0,006B$  (fourchette : 0,003B à 0,010B)
- **Pieux battus** :  $S_{ref} = 0,009B$  (fourchette : 0,003B à 0,010B)

### 2.4.3 Tassement de groupe de pieux

Les groupes de pieux présentent des déformations ( $S_c$ ) plus importantes qu'un pieu isolé soumis à la même charge unitaire. Cette amplification des tassements résulte de l'interaction des zones d'influence des différents pieux, dont la superposition modifie le comportement mécanique global.

L'ampleur des déformations dépend directement des dimensions caractéristiques du groupe. Les contraintes transmises en profondeur par l'ensemble des pieux génèrent des déplacements notables au niveau des couches d'appui, soulignant l'importance des interactions géotechniques dans le dimensionnement des groupes de fondations. (Chekroune, 2013).

## 2.5 Détermination de la charge limite d'un pieu

Dans le cadre de l'étude du comportement d'un pieu isolé soumis à un chargement vertical, celui-ci traverse plusieurs couches de sol présentant des propriétés géotechniques variables.

La portance du pieu est principalement assurée par son ancrage dans une couche de sol présentant des caractéristiques mécaniques optimales, désignée sous les termes de couche d'ancrage ou substratum résistant. Cette couche constitue un horizon géotechnique favorable au transfert des charges appliquées.

La charge limite du pieu  $Q_u$  est obtenue en additionnant la charge limite de pointe  $Q_{pu}$  qui correspond au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite  $Q_{su}$  mobilisable par le frottement latéral entre le sol et le pieu.

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$$

La charge limite de pointe est donnée par :

$$Q_{pu} = \rho_p \cdot A \cdot q_{pu}$$

La charge limite de frottement est donnée par :

$$Q_{su} = \rho_s \cdot P \cdot \sum q_{si} \cdot e_i$$

Avec :

- $\rho_p$  : coefficient réducteur de section de l'effort de pointe
- $\rho_s$  : coefficient réducteur de section de l'effort de frottement latéral
- $A$  : aire de la section droite
- $P$  : périmètre de la section du pieu
- $q_{pu}$  : résistance limite de pointe
- $q_{si}$  : frottement latéral unitaire limite dans couche  $i$
- $e_i$  : épaisseur de la couche  $i$  -  $h$  : hauteur d'ancrage

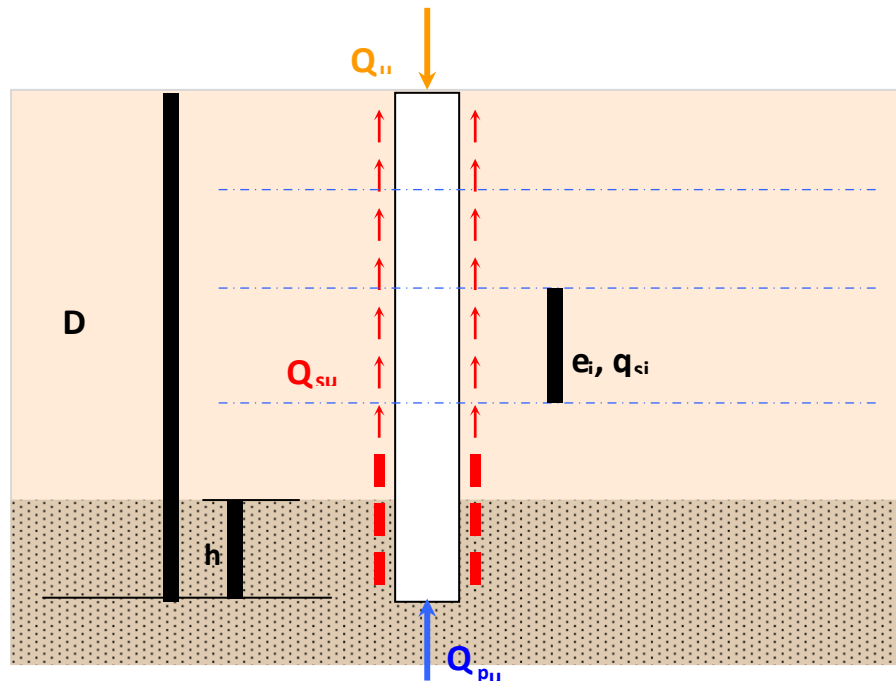


Figure 2.6 Les charges appliqués sur un pieu

## 2.6 Frottement négatif sur les pieux

### 2.6.1 Description de phénomène

Le frottement négatif se produit lorsque le sol entourant le pieu subit un tassement ou qu'une couche de terrain s'appuie sur celui-ci, générant une charge supplémentaire. Ce phénomène apparaît principalement dans trois situations : un rabattement de nappe phréatique, une surcharge appliquée sur des couches compressibles (remblais), ou lors de la consolidation du sol.

Contrairement aux conditions usuelles où le pieu s'enfonce dans le sol, ici, le sol se déplace vers le bas par rapport au pieu, créant un frottement sol-pieu dirigé vers la base (figure 2.7). Ce frottement latéral induit un effort de compression additionnel dans le pieu, pouvant atteindre une amplitude significative.

Les tassements du sol sont plus importants en surface et diminuent avec la profondeur. En effet, le déplacement  $AA'$  résulte du tassement de toute la couche d'épaisseur  $H$ , tandis que le déplacement  $CC'$  ne concerne qu'une épaisseur réduite  $(H-z)$ . Au-delà d'une certaine profondeur  $H'$ , le tassement du sol devient inférieur ou égal à l'enfoncement du pieu sous sa charge appliquée.

Cette profondeur critique, où les mouvements relatifs sol-pieu s'inversent, définit le point neutre, marquant la transition entre les zones de frottement négatif (au-dessus) et positif (en dessous).

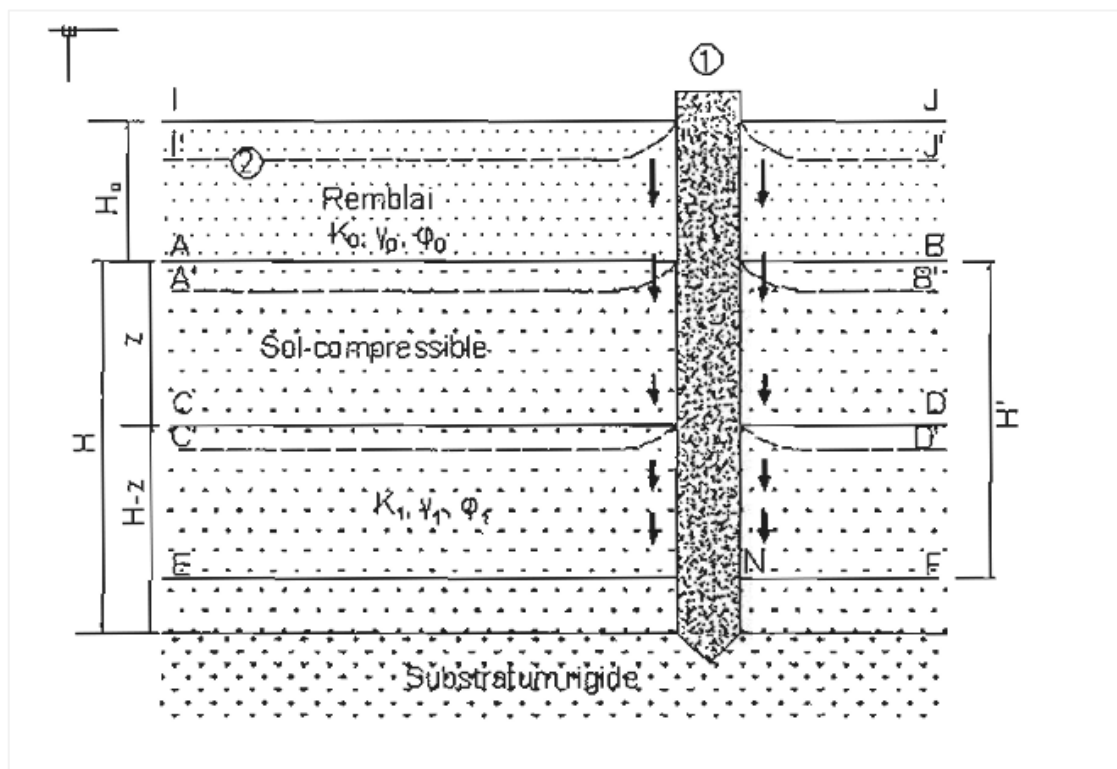


Figure 2.7 Frottement négatif sur un pieu

### 2.6.2 Méthode de calcul

L'évaluation précise du frottement négatif reste complexe, y compris pour un pieu isolé. Son analyse repose sur trois principes fondamentaux :

1. Phénomène progressif : Sauf cas exceptionnels (comme la liquéfaction), le frottement négatif se développe progressivement au rythme de la consolidation des couches compressibles. Les paramètres mécaniques déterminants sont donc les caractéristiques effectives (angle de frottement  $\phi'$  et cohésion  $c'$ ).
2. Rôle du point neutre : Le frottement négatif cesse d'exister au-delà du point neutre N, où les déplacements relatifs sol-pieu s'inversent.
3. Zones d'influence : Lorsqu'un pieu traverse un remblai surchargé, le frottement négatif agit sur :
  - Toute l'épaisseur du remblai
  - La couche compressible sous-jacente, jusqu'au point neutre N .

Le frottement négatif unitaire ( $C_n$ ) se calcule par la relation :

$$C_n(z) = K \times \sigma'_v(z) \times \tan \delta$$

Où :

- $\sigma'_v(z)$  : Contrainte effective verticale à la profondeur z (au contact du pieu)
- $K$  : Coefficient de pression des terres (sol/pieu)
- $\delta$  : Angle de frottement sol/pieu, dépendant

### 2.6.3 Valeur maximale de frottement négatif

Selon l'approche la plus simple, on considère que la contrainte verticale effective  $\sigma'_v(z)$  correspond à :

- La pression due au poids des terres
- Toute surcharge éventuelle appliquée en surface

Le frottement négatif total  $F_n$  sur le pieu s'obtient par intégration de la formule unitaire :

$$F_n = \int [K \times \sigma'_v(z) \times \tan\delta] dz$$

Avec les bornes d'intégration allant du sommet du pieu jusqu'au point neutre N

## 2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse approfondie des fondations profondes, en mettant l'accent sur les pieux, leurs mécanismes de fonctionnement, leurs typologies, et leurs méthodes de dimensionnement.

Les analyses ont révélé que le comportement d'un groupe de pieux diffère significativement de celui d'un pieu isolé, en raison des interactions géotechniques induites par leur mise en place et des charges appliquées.

Ces interactions, telles que le remaniement du sol et la superposition des bulbes de contraintes, influencent directement la capacité portante globale et les déformations de l'ensemble.

L'étude bibliographique a également souligné l'importance des critères de choix des pieux (battus, forés, etc.), des méthodes de calcul (pressiométrique, pénétrométrique), et des phénomènes critiques comme le frottement négatif ou l'effet d'accrochage. Ces éléments sont essentiels pour garantir la stabilité et la durabilité des ouvrages, notamment dans des sols compressibles ou sous sollicitations complexes.

En conclusion, cette synthèse offre un cadre théorique et pratique pour la conception et l'optimisation des fondations profondes, tout en mettant en évidence les défis spécifiques liés aux groupes de pieux. Ces connaissances constituent une base indispensable pour les ingénieurs et les acteurs du génie civil, afin d'adapter les solutions aux contraintes géotechniques et structurelles des projets.

Le chapitre suivant portera sur la modélisation numérique du comportement d'un bâtiment reposant sur pieux en zone de quai, en tenant compte des spécificités géotechniques du site et des contraintes structurelles de l'ouvrage.

## Chapitre 3

# Étude numérique de la stabilité d'un bâtiment sur pieux en zone de quai

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse numérique de la stabilité d'un bâtiment fondé sur pieux, implanté en zone portuaire à Mers El Kébir, dans la wilaya d'Oran. L'ouvrage étudié est un hôtel de trois niveaux (R+3), constitué de trois blocs et localisé à proximité immédiate d'un quai, dans un environnement géotechnique contraignant.

Le contexte portuaire soulève plusieurs défis techniques : présence de remblais hétérogènes, sols compressibles, niveau piézométrique élevé et contraintes mécaniques liées aux charges d'exploitation. Ces particularités exigent une évaluation rigoureuse de l'interaction sol-structure et une réflexion approfondie sur les choix de fondation.

L'approche adoptée repose sur une modélisation numérique avancée, réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, reconnu pour sa précision dans l'analyse des systèmes géotechniques complexes.

L'objectif est d'examiner le comportement du système sol-fondation-structure à travers différentes configurations, en mettant l'accent sur :

1. Les efforts internes développés dans les pieux (efforts axiaux, moments fléchissants, efforts tranchants),

2. Les tassements verticaux et les déplacements horizontaux induits dans le sol et les éléments de fondation.

Au-delà de la simple modélisation, cette étude vise à formuler des recommandations pertinentes pour la conception de fondations adaptées aux zones portuaires algériennes. Elle s'inscrit dans une démarche d'optimisation technique et économique, fondée sur une meilleure compréhension des réalités géotechniques locales et sur les principes de durabilité des ouvrages.

### 3.2 Présentation du cas d'étude

#### 3.2.1 Description générale du projet

Le site étudié se situe à l'intérieur de la base navale de Mers El Kebir, à proximité immédiate du port militaire, sur la façade littorale ouest de la ville d'Oran, en Algérie. Ce site est localisé précisément dans la zone d'entrée de la rade, en bordure directe de la mer Méditerranée.

L'emplacement peut être repéré sur la carte topographique de la région d'Oran (feuille n°153, échelle 1/50 000e), par les coordonnées UTM approximatives suivantes : X= 708402.00; y= 3955197.00 (Figure 3.1).

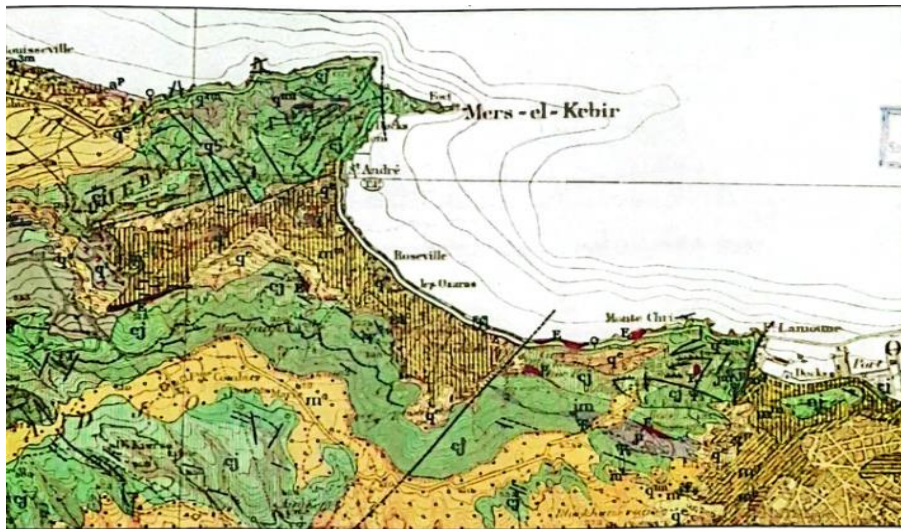


**Figure 3.1** Localisation du site étudié (LTPO, Oran)

L'extrémité orientale du Djebel Murdjadjo et coincée entre deux massifs montagneux : le « Djebel Santon » au Nord-Ouest, surplombant Mars El Kebir, et le « Djebel Aïdour » au sud-est, dominant la ville d'Oran.

D'après la carte géologique d'Oran (feuille n°153, échelle 1/50 000, publiée en 1952 par le Service de la Carte Géologique de l'Algérie), ainsi que les coupes de sondages et les observations de terrain, les caractéristiques géologiques suivantes ont été identifiées :

- La dépression de Mars El Kébir est constituée de terrains sédimentaires du Miocène inférieur, principalement des marnes grises à bleues (symbolisées \*Mm\* sur la carte), localement recouvertes par des éboulis de pente (\*qe\*). Ces marnes s'étendent en direction de la mer et s'appuient contre les reliefs montagneux bordant la dépression (Djebel Murdjadjo, Djebel Santon, Djebel Aïdour).
- Les massifs environnants sont formés de terrains sédimentaires du Secondaire (Jurassique supérieur à Crétacé inférieur, notés \*cj\*), comprenant :
  - des schistes plus ou moins calcaires,
  - des calcschistes,
  - des lentilles calcaires dolomitisées ou recristallisées.
- Au sud du site n°1, ces formations secondaires affleurent en surface, se présentant sous forme de calcaires massifs (\*cj\*, en vert clair sur la carte), découpés en gradins. Ces calcaires ont d'ailleurs été exploités comme enrochements pour la construction des quais.



**Figure 3.2** La carte géologique d'Oran en 1952

### 3.2.2 Reconnaissance des sols pour le projet

L'investigation menée par le L.T.P.O a comporté les opérations suivantes:

- Deux (02) sondages carottés notés SC.1 et SC.2, de 25.00 m de profondeur chacun avec prélèvement d'échantillons intacts et remaniés pour effectuer des essais au laboratoire.
- Un (01) sondage préssiométrique destructif nommé SP1, de 25.00 de profondeur, avec exécution des essais préssiométriques chaque 2.00 m en dépassant le remblai.
- Installation d'un piézomètre aux droits du sondage carotté SC2, afin de mesurer la variation de niveau de la nappe d'eau et prélever des échantillons pour analyse physico-chimique.

Pour l'étude numérique, le sondage SC1 a été retenu comme référence en raison de la qualité de ses carottes, de la continuité de ses descriptions lithologiques, et de la représentativité des résultats obtenus vis-à-vis des conditions rencontrées sur le site.

Ce sondage a permis d'identifier deux horizons géotechniques distincts : un remblai hétérogène sur environ 6,5 m, suivi d'une couche de marne sableuse compacte jusqu'à 25.00 m.

Cette stratification a servi de base à la modélisation numérique, en intégrant les propriétés mécaniques déterminées en laboratoire pour chaque couche, ainsi que les données pressiométriques nécessaires à l'estimation des modules de déformation du sol.

Les sondages ont permis les descriptions lithologiques suivantes :

- De 00.00 m à 6.50 m : Remblai (constitué de fragments de calcschistes, enrochement, calcaire et de déchets de construction).
- De 6.50 m à 25.00 m : Marne verdâtre à jaunâtre finement sableuse par endroits, légèrement plastique et compacte à certains niveaux.

Le niveau de la nappe phréatique a été identifié grâce à l'installation d'un piézomètre au droit du sondage carotté SC2. L'eau a été détectée à une profondeur de 2.00 m par rapport au terrain naturel. Un échantillon a été prélevé en vue d'analyses physico-chimiques réalisées en laboratoire, afin d'évaluer les caractéristiques de l'eau souterraine

Par ailleurs, le laboratoire a constaté que l'ensemble du site est recouvert d'un remblai épais, hétérogène et de qualité médiocre, particulièrement en surface, ce qui le rend inapte à servir d'assise pour des fondations superficielles. Résultat a contrasté lors de nos investigations numériques.

Dans ce contexte, la solution de fondations profondes s'impose : des pieux forés en béton armé, ancrés suffisamment en profondeur dans la formation marneuse, constituent le mode de fondation le plus adapté pour garantir la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Il est important de souligner une divergence notable entre les observations issues de la reconnaissance géotechnique et les résultats obtenus par nos différentes simulations numériques (résultats qu'on verra plus loin).

En effet, les investigations de laboratoire ont mis en évidence la présence d'un remblai épais, hétérogène et de qualité médiocre en surface, jugé inapte à recevoir des fondations superficielles.

Pourtant, les analyses numériques menées avec Plaxis 2D, intégrant les caractéristiques géotechniques mesurées, ont montré que, dans certaines conditions de charge, un radier seul permettait d'assurer la stabilité de la structure, avec des tassements maîtrisés et une distribution acceptable des contraintes.

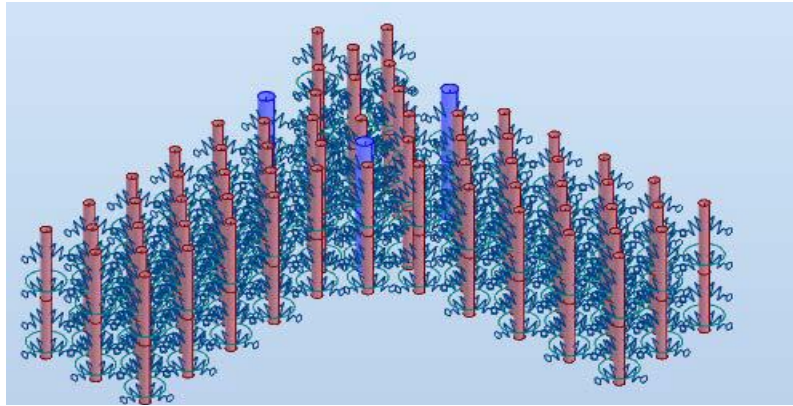
Cette contradiction apparente met en lumière la complémentarité entre approche expérimentale et modélisation numérique. Si les essais géotechniques fournissent un diagnostic indispensable sur la qualité des sols, les simulations permettent, quant à elles, de tester des scénarios alternatifs et de révéler des marges de sécurité insoupçonnées, notamment dans des remblais partiellement consolidés.

Cette confrontation constructive des résultats invite à une relecture critique des choix de fondation, fondée non sur le seul conservatisme, mais sur une évaluation rigoureuse et contextualisée du comportement réel sol-structure. C'est dans cette perspective que s'inscrit pleinement notre mémoire.

### **3.2.3 Raisons du choix d'une fondation profonde**

Pour ce projet, le laboratoire et le bureau d'étude ont proposé la solution de fondations profondes: des pieux forés en béton armé, ancrés de 12m en profondeur dans la formation marneuse, résultat à discuter...

66 pieux forés en béton armé ont été proposés, avec un diamètre de 80 cm pour chaque pieu et une longueur de 12 m, répartis selon un plan précis (Voir figure 3.3).



**Figure 3.3** Pieux projeté dans le projet (LTPO)

### **3.3 Hypothèses et modélisation géotechnique**

Afin de simuler le comportement du sol et des fondations profondes dans le contexte portuaire de Mers El Kébir, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, basé sur la méthode des éléments finis.

Cette approche permet d'évaluer avec précision l'interaction sol-structure, les déplacements, ainsi que les efforts internes dans les pieux, sous différentes configurations de fondation dans ce cas d'étude.

#### **3.3.1 Hypothèses générales**

La modélisation repose sur plusieurs hypothèses représentatives du comportement du système :

1. Comportement en déformation plane (2D), adapté à une coupe transversale de la structure.
2. Sol considéré comme saturé au-delà de 2.0 m, en lien avec la présence de la nappe phréatique.
3. Sols modélisés selon le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb, avec paramètres constants par couche.
4. Comportement du béton des pieux : linéaire élastique.

#### **3.3.2 Stratigraphie du site**

La stratigraphie du site, issue des sondages géotechniques réalisés, est constituée de deux couches principales. La première, de 0.00 à 6.5 m de profondeur, correspond à un

remblai hétérogène composé de fragments de calcschistes, d'enrochements, de calcaire et de déchets de construction.

La seconde couche, s'étendant de 6,5 m jusqu'à 25 m de profondeur, est constituée de marne verdâtre à jaunâtre, localement sableuse, légèrement plastique et compacte à certains niveaux.

Concernant les fondations, le remblai et les pieux sont modélisés à l'aide de l'élément « Plate » dans Plaxis 2D, ce qui permet de simuler à la fois leur comportement structural et leur interaction avec les deux couches de sol décrites précédemment.

Les pieux ont un diamètre de 80 cm et une longueur de 12 m, leur assurant un ancrage complet dans la couche de marne. Ils sont espacés de 4.5 m.

Le radier est d'épaisseur de 80cm. Les deux réalisés en béton armé, dont le module d'Young est estimé à 32 GPa, traduisant une rigidité suffisante pour garantir une bonne performance structurelle et limiter les déformations sous charges verticales et horizontales.

### 3.3.3 Propriétés géomécaniques des sols

Les caractéristiques géomécaniques des sols d'assise étudiés ont été déterminées à partir des investigations du LTPO à Oran, et sont synthétisées dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1** Caractéristiques des sols d'assise (LTPO Oran)

Paramètres	Remblai	Marne verdâtre
Poids Volumique $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	21
Angle de frottement $\varphi$ (°)	35	22,4
Cohésion $c$ (kPa)	10	217
Module de young $E$ (kPa)	25000	40950
Coefficient de poisson $\nu$	0,3	0,33

### 3.3.4 Conditions aux limites et maillage

- Conditions aux limites : latéralement  $U_x=0$  bloqué, à la base :  $U_x=U_y=0$ .
- Domaine élargi pour éviter l'influence des frontières artificielles.
- 1013 éléments et 8267 nœuds.

### 3.3.5 Hypothèse de chargement

La charge verticale transmise par la superstructure est estimée à 50 tonnes. Cette valeur, correspondant aux charges permanentes et variables générées par l'hôtel (R+3), nous l'avons calculé à l'aide du logiciel SAP 2000, conformément aux normes en vigueur.

### 3.4 Représentation du modèle géotechnique

La figure 3.4 illustre le modèle géotechnique adopté, composé de deux couches superposées représentant la stratigraphie du site.

La couche supérieure correspond au remblai sur 6,5 m, et la couche inférieure à la marne sableuse sur environ 18,5 m.

Les pieux de 12 m traversent totalement le remblai et s'ancrent dans la marne. Le radier en surface simulé à l'aide de l'élément plate dans Plaxis 2D (voir figure 3.4).

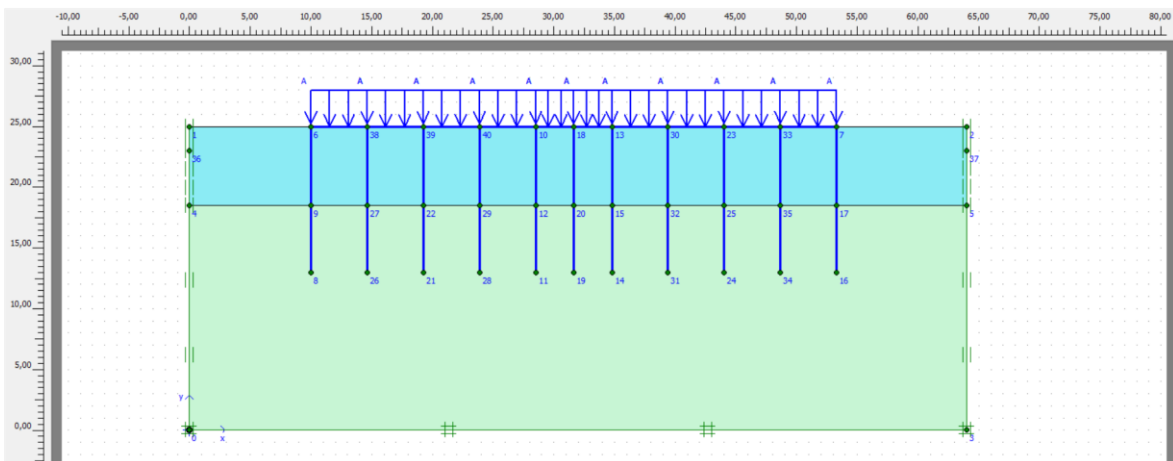


Figure 3.4 Modèle utilisé dans Plaxis 2D

### 3.5 Résultats de la simulation numérique

L'objectif de cette simulation est d'analyser le comportement d'un groupe de pieux sous chargement vertical (hotel R+3), en termes de tassement et mouvement horizontal du sol causés par la construction de la structure, d'efforts internes (axiaux, tranchants) et de moments fléchissants, afin d'évaluer la stabilité de l'ensemble terrain-pieux.

Pour cela, les cas suivants ont été adoptés :

- 1<sup>er</sup> cas d'analyse : Analyse du radier avec chargement
- 2<sup>ème</sup> cas d'analyse Analyse des pieux seuls
- 3<sup>ème</sup> cas d'analyse Analyse des pieux avec le chagement
- 4<sup>ème</sup> cas d'analyse Analyse des pieux avec radier
- 5<sup>ème</sup> cas d'analyse Analyse de l'ensemble pieux, radier, chargement.

### 3.5.1 Analyse du 1<sup>er</sup> cas d'étude : Radier + chargement

Dans cette première configuration, le modèle de radier simple reposant directement sur le remblai et soumis à un chargement uniforme de 50 kN/m<sup>2</sup> représentant les sollicitations verticales dues à la superstructure (hôtel R+3) est présenté.

L'objectif est d'évaluer les mouvements du terrain remblayé et d'observer le comportement de l'ensemble radier-sol en l'absence de fondations profondes.

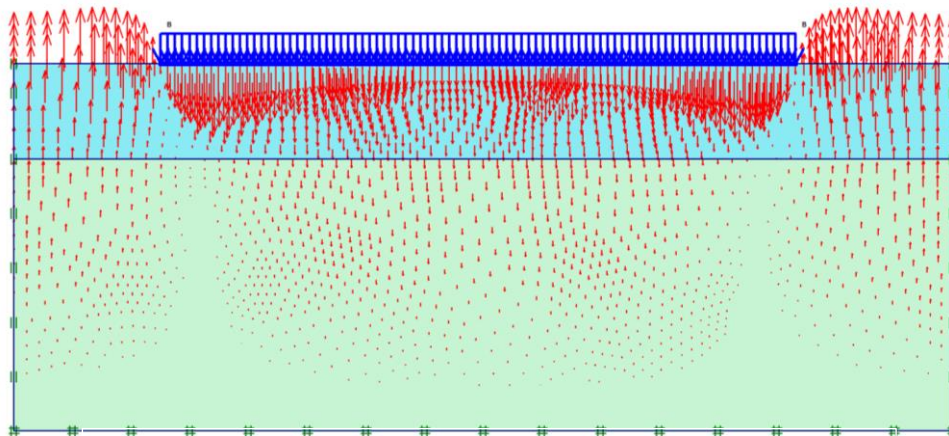


Figure 3.5 1<sup>er</sup> cas d'étude : Radier + chargement ( $U_y=20\text{mm}$ )

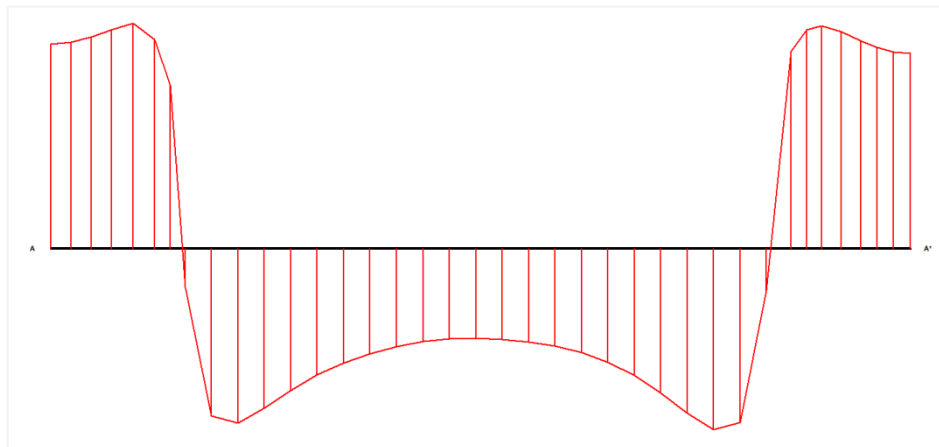
Malgré la nature hétérogène et peu favorable du remblai en surface, la simulation montre que le radier seul permet de supporter efficacement les charges verticales ( $U_y=20\text{mm}$ ), avec des tassements raisonnables et sans signes de défaillance structurelle.

Ce résultat est particulièrement marquant dans un contexte portuaire, où l'on privilégie souvent des fondations profondes par sécurité. Le comportement du remblai semble

suffisamment stable pour éviter le recours systématique aux pieux, du moins sous des charges modérées.

Néanmoins, cette solution doit être évaluée avec prudence, en tenant compte :

1. Des variations locales de compacité du remblai à long terme
2. De la proximité de la nappe et des risques de liquéfaction en cas de séisme,
3. Des exigences réglementaires spécifiques aux zones portuaires.
4. De l'importance du chargement appliqué.
5. Et de la durabilité à long terme du radier en environnement humide et agressif et en présence de remblai hétérogène caractérisé par une variabilité importante des propriétés mécaniques.



**Figure 3.6** Tassement en surface- 1<sup>er</sup> cas d'étude

Toutefois, malgré cette première conclusion en faveur du radier, nous avons choisi d'étudier numériquement la solution proposée par le laboratoire (à savoir l'emploi de pieux forés) afin de la confronter aux performances observées et d'en évaluer la pertinence technique, économique et fonctionnelle.

Cette démarche vise à approfondir la réflexion et à appuyer, par la simulation, le choix de la solution de fondation la plus adaptée au contexte spécifique du site.

### 3.5.2 Analyse du 2<sup>ème</sup> cas d'étude - Pieux seuls

Dans ce deuxième cas d'étude, l'analyse a été menée sur le même modèle numérique mais représentant uniquement les pieux ancrés dans le sol, sans la présence du radier ni l'application de charges (figure 3.7).

Cette phase permet d'observer le comportement initial du sol sous l'effet de l'installation des pieux sur le comportement de l'ensemble.

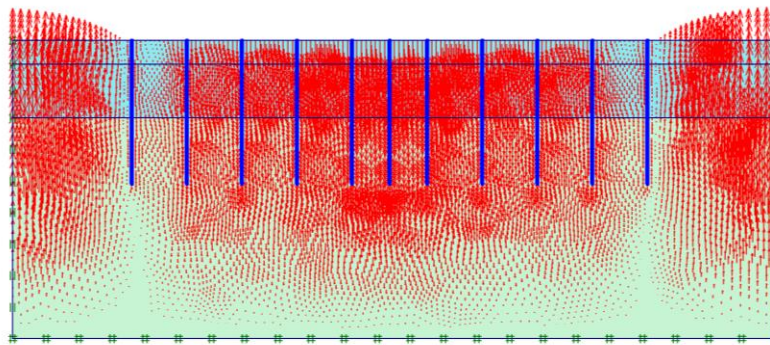


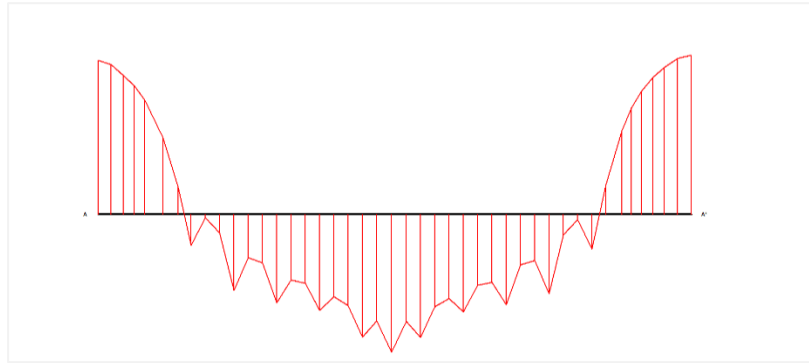
Figure 3.7 2<sup>ème</sup> cas d'étude

#### 3.5.2.1 Mouvement du terrain causé par la réalisation des pieux

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus en termes de déplacements horizontaux ( $U_x$ ) et verticaux ( $U_y$ ) du terrain, suite à la mise en place des pieux.

La Figure (3.8) illustre la répartition des déplacements verticaux (tassements) dans le massif de sol environnant.

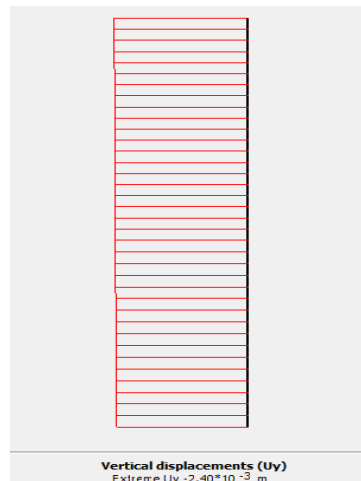
Le déplacement vertical maximal observé en tête de pieu est de 3 mm. Cette valeur relativement faible témoigne d'un bon comportement porteur des pieux, et d'une capacité de transfert efficace des charges verticales vers les couches profondes du sol.



**Figure 3.8** Déplacement vertical- 2<sup>ème</sup> cas d'étude

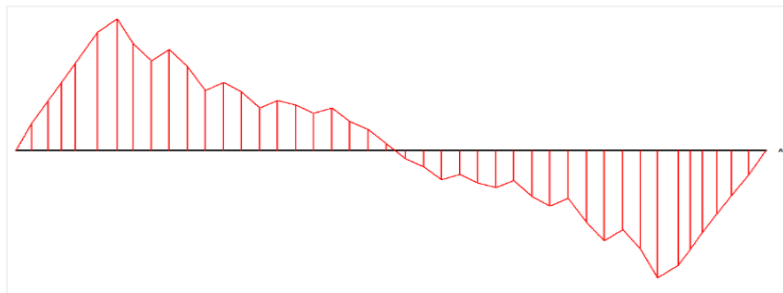
La Figure 3.9 met en évidence un tassement maximal de 2,5 mm au niveau du pieu central, ce qui corrobore les observations issues de la première phase d'analyse. Ce résultat confirme que, même sans application de charge supplémentaire, le comportement du sol reste globalement stable.

Certes, les déplacements verticaux sont en diminution par rapport au premier cas étudié (radier seul), mais ils demeurent dans des limites parfaitement tolérables du point de vue géotechnique.



**Figure 3.9** Déplacement vertical du pieu central - 2<sup>ème</sup> cas d'étude

La figure 3.10 montre la variation du déplacement horizontal à la surface du sol. Ce type de représentation permet d'évaluer l'effet du système de fondation sur le comportement latéral du sol.



**Figure 3.10** Déplacement Horizontal - 2<sup>ème</sup> cas d'étude

On observe ici une distribution asymétrique des déplacements horizontaux, avec des valeurs positives d'un côté et négatives de l'autre, traduisant un mouvement latéral différentiel du sol. La présence d'un point d'inflexion au centre de la section suggère que les mouvements latéraux sont opposés de part et d'autre de l'axe central.

Ce comportement peut s'expliquer par :

- Une réaction du sol au chargement vertical appliqué, générant une poussée latérale autour des pieux.
- Une répartition inégale de la rigidité ou des caractéristiques mécaniques du sol en profondeur.
- Une interaction sol-structure avec les autres pieux

Les valeurs extrêmes de déplacement horizontal restent acceptable (faibles), ce qui reste acceptable dans le cadre d'un projet de bâtiment standard. Cependant, ces mouvements doivent être surveillés car ils peuvent induire des efforts latéraux supplémentaires sur les pieux, notamment en cas de charges excentrées ou sismiques.

### **3.5.2.2 Réaction des pieux**

Dans cette section, nous analysons la réaction mécanique des pieux en termes d'efforts internes (efforts normaux et moments fléchissants) ainsi que de déplacements (horizontaux et verticaux) (Tableau 3.2).

**Tableau 3.2** Efforts et déplacements maximum dans les pieux- 2<sup>ème</sup> cas d'étude

Phase 1	N [kN]	V [kN/m]	M [kN.m]	Uy [mm]	Ux [mm]
PIEUX 1	-106,11	-8,67	-20,01	0,05339	-1,44
PIEUX 2	-112,44	-11,35	-1,94	-1,33	-1,23
PIEUX 3	-116,73	3,16	-5,96	-1,54	-0,09631
PIEUX 4	-121,21	-12,72	-2,76	-1,67	-0,07069
PIEUX 5	-122,91	-3,99	-11,80	-2,14	-0,03749
PIEUX 6	-123,90	2,58	217,23*10 <sup>-3</sup>	-2,40	-0,00634
PIEUX 7	-122,77	5,76	11,60	-2,15	0,04423
PIEUX 8	-121,22	-1,39	959,38*10 <sup>-3</sup>	-1,70	0,07670
PIEUX 9	-116,85	-2,93	-6,23	-1,58	1,04
PIEUX 10	-112,31	-2,32	-2,60	-1,39	1,31
PIEUX 11	-109,52	-8,07	19,76	-0,06020	1,55

Avec :

**N [kN]** : Effort axial (compression si négatif, traction si positif)

**V [kN/m]** : Effort tranchant

**M [kN.m]** : Moment fléchissant.

**Ux [mm] et Uy [mm]** : Déplacements horizontaux et verticaux

Les résultats du tableau 3.2 montrent que tous les pieux subissent des efforts axiaux de compression, avec des valeurs comprises entre -106,11 kN et -123,90 kN, traduisant l'effet des contraintes du sol environnant.

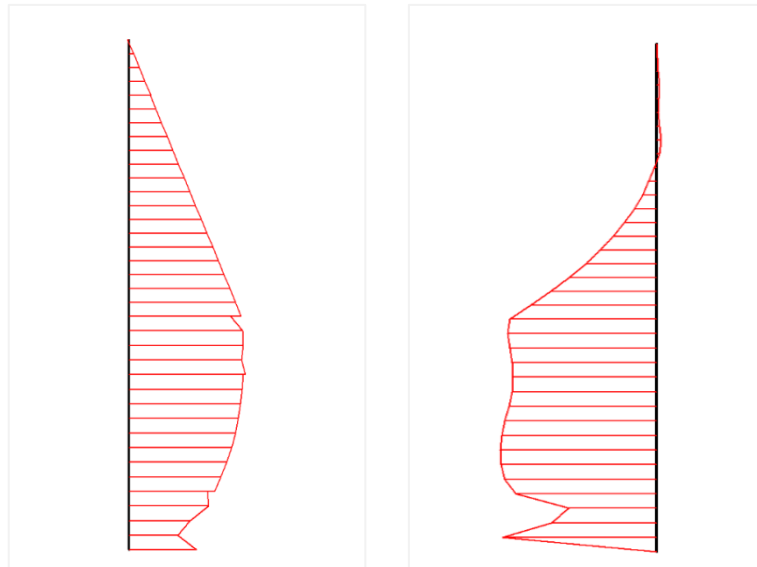
Le pieu central (Pieu 6) apparaît comme le plus sollicité, avec un effort axial maximal de -123,90 kN et un tassement vertical de 2,40 mm, ce qui s'explique par sa position centrale au sein du groupe, zone de concentration des charges verticales.

Par ailleurs, on observe une distribution relativement symétrique des efforts autour de ce pieu central, ce qui reflète un comportement structurel équilibré du système.

Les efforts tranchants et moments fléchissants varient en fonction de la position des pieux, avec des valeurs plus élevées sur les pieux en périphérie (ex. : moment de -20,01 kN·m pour le pieu 1), traduisant des effets de bord ou de flexion plus marqués.

En ce qui concerne les déplacements horizontaux ( $U_x$ ), ils restent globalement faibles (inférieurs à 2 mm), ce qui indique une bonne stabilité latérale dans cette configuration sans chargement extérieur.

Le tassement vertical maximal ne dépasse pas 2,4 mm, ce qui reste compatible avec les critères de service pour une structure non chargée à ce stade.



**Figure 3.11** Effort axial et Moment fléchissant dans le pieu central  
2<sup>ème</sup> cas d'étude

### 3.5.3 Analyse du 3<sup>ème</sup> cas d'étude- Pieux avec chargement

Dans ce 3<sup>ème</sup> cas, le modèle numérique intègre la superstructure reposant sur les pieux, permettant ainsi d'évaluer leur comportement sous chargement réel.

L'application des charges engendre une augmentation notable des efforts normaux et des déplacements, tout en modifiant la répartition des moments fléchissants le long des pieux.

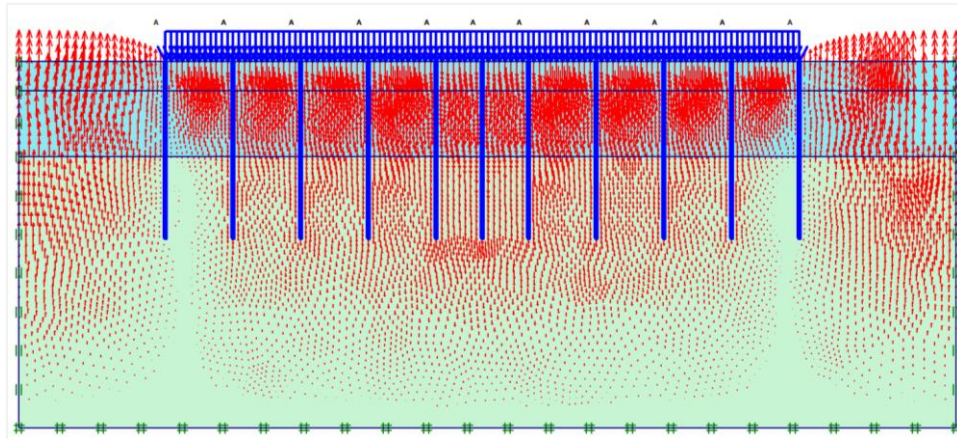


Figure 3.12 3<sup>ème</sup> cas d'étude

Les résultats montrent une augmentation du tassement vertical ( $U_y$ ), atteignant environ 7 mm en tête de pieu, tout en restant dans des limites admissibles. Les déplacements horizontaux ( $U_x$ ) demeurent modérés, traduisant une stabilité latérale satisfaisante.

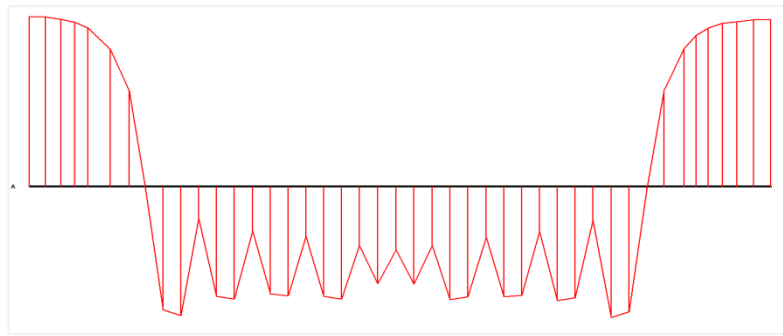
Les efforts internes indiquent une sollicitation plus importante des pieux, surtout dans leur partie supérieure.

Cette configuration met en évidence l'efficacité du système fondation-superstructure et souligne la bonne capacité portante des pieux dans des conditions de service.

#### **3.5.3.1 Mouvement du terrain causé par la réalisation des pieux**

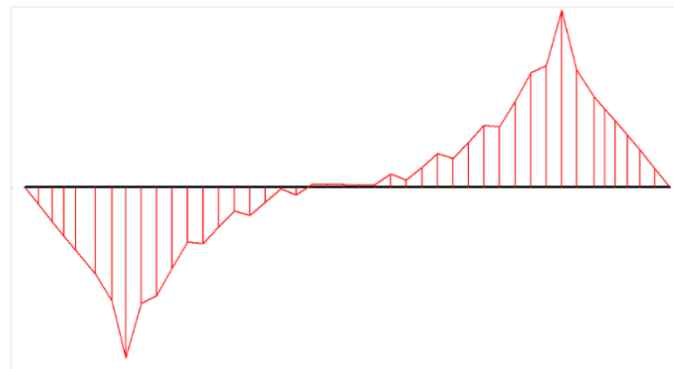
La figure 3.13 montre un tassement différentiel en forme de cuvette, avec un maximum d'environ 11 mm observé au centre, indiquant que les déformations sont concentrées au-dessus des pieux.

Ce comportement traduit une bonne répartition de la charge verticale, confirmant que le système pieux-radier agit efficacement pour limiter les tassements excessifs et assurer la stabilité globale de la structure.



**Figure 3.13** Tassement 3<sup>ème</sup> cas d'étude

La figure 3.14 montre les déplacements horizontaux présentant une courbe symétrique par rapport au centre, et indiquant une flexion avec double courbure.



**Figure 3.14** Déplacement horizontal- 3<sup>ème</sup> cas d'étude

Les pieux latéraux semblent se déplacer davantage, surtout vers l'extérieur, ce qui est cohérent avec la flexion induite par un moment global appliqué sur le massif.

### **3.5.3.2 Réaction des pieux**

Le tableau 3.3 et la figure 3.15 permettent d'analyser les sollicitations mécaniques et les déplacements au sein du groupe de pieux dans le troisième cas d'étude, en particulier dans le pieu central (pieu 6).

Le tableau 3.3 met en évidence un état de compression généralisé sur l'ensemble des pieux, avec des efforts axiaux compris entre  $-125,75$  kN (pieu 1) et  $-206,95$  kN (pieu 4). Les pieux centraux (notamment les pieux 4 à 8) supportent les charges les plus importantes, traduisant une concentration des efforts au cœur du massif.

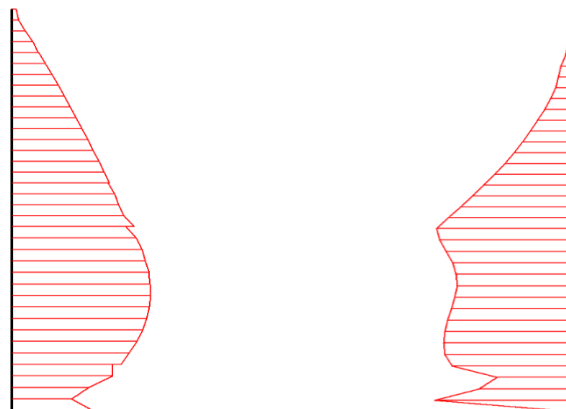
**Tableau 3.3** Déplacements et efforts maximum des pieux - 3<sup>ème</sup> cas d'étude

Phase 2	N[kN]	V[kN/m]	M[kN.m]	Uy[mm]	Ux[mm]
PIEUX 1	-125,75	103,79	-325,92	0,004164	-11,19
PIEUX 2	-194,81	29,63	-101,11	-2,03	-5,29
PIEUX 3	-200,54	9,64	-33,68	-2,80	-2,60
PIEUX 4	-206,95	-24,06	-15,01	-3,17	-1,51
PIEUX 5	-206,33	-6,49	-13,63	-3,75	-0,06760
PIEUX 6	-202,88	4,26	353,81*10-3	-4,03	-0,01552
PIEUX 7	-206,67	10	13,52	-3,76	0,08541
PIEUX 8	-206,94	-3,89	13,99	-3,22	1,68
PIEUX 9	-201,71	-9,67	-33,60	-2,86	2,93
PIEUX 10	-195,48	-29,53	100,55	-2,13	5,62
PIEUX 11	-132,06	-105,77	328,17	-0,01448	11,54

Les moments fléchissants atteignent leurs valeurs extrêmes en périphérie, en particulier sur les pieux 1 et 11 ( $-325,92$  et  $+328,17$  kN.m), ce qui indique des effets de bord significatifs.

Les déplacements horizontaux ( $U_x$ ) sont également plus marqués aux extrémités (jusqu'à  $\pm 11$  mm), suggérant une rotation ou un basculement du massif. À l'inverse, les pieux centraux présentent des déplacements horizontaux négligeables (proches de 0), témoignant d'une stabilité latérale satisfaisante.

La figure 3.15 montre que le pieu central (pieu 6) travaille principalement en compression axiale, avec un effort décroissant de la tête vers la base et un moment fléchissant très faible. Ce comportement, associé à des déplacements latéraux quasi nuls ( $U_x \approx 0$ ), confirme son rôle stabilisateur et porteur au centre du massif.



**Figure 3.15** Effort axial et Moment fléchissant dans le pieu central  
3<sup>ème</sup> cas d'étude

### 3.5.4 Analyse du 4<sup>ème</sup> cas d'étude - Pieux avec radier

Dans cette quatrième phase de simulation, le système constitué d'un radier reposant sur un groupe de 11 pieux a été modélisé.

Les pieux sont disposés de manière à supporter efficacement le radier, qui agit à la fois comme élément de liaison entre les pieux et distributeur des charges issues de la superstructure.

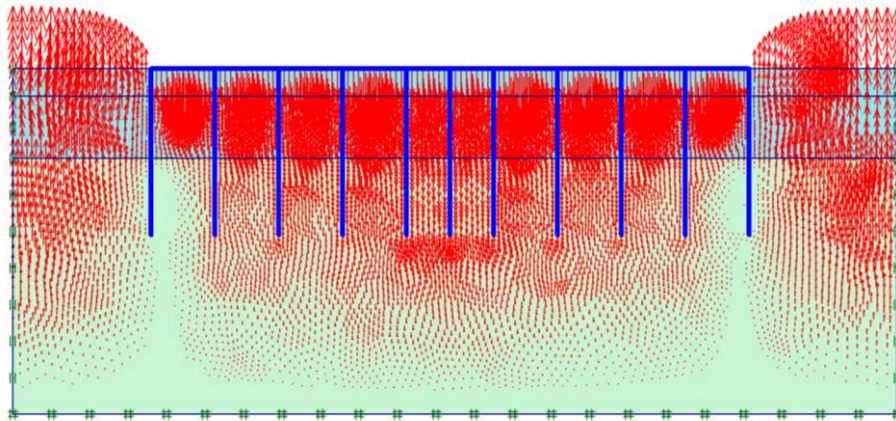


Figure 3.16 4<sup>ème</sup> cas d'étude

#### 3.5.4.1 Mouvement du terrain causé par la réalisation des pieux

La figure 3.17 montre les tassements du sol en surface pour ce cas. Elle présente les déplacements verticaux ( $U_y$ ).

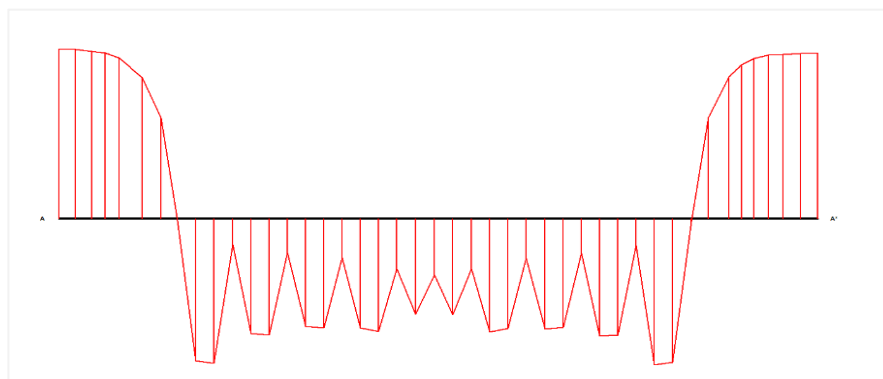


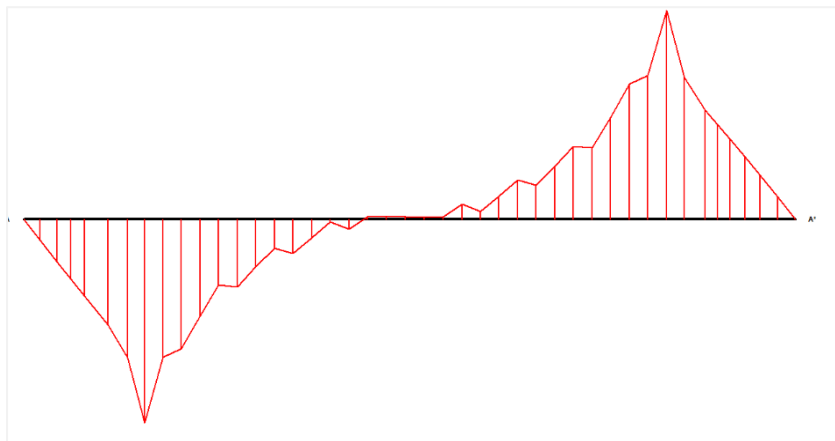
Figure 3.17 Déplacement vertical- 4<sup>ème</sup> cas d'étude

L'échelle indique un déplacement maximal de 9 mm. Le comportement global reste stable, mais la présence de soulèvements latéraux montre que les contraintes verticales se redistribuent dans le sol environnant.

Une asymétrie est visible (figure 3.18), avec un déplacement vers la droite en partie droite, et un déplacement vers la gauche dans la partie gauche.

Ces déplacements horizontaux peuvent être dus à une non-uniformité du sol ou à des conditions de chargement asymétriques.

Cela souligne la nécessité d'un bon ancrage latéral et d'un contrôle des déplacements horizontaux pour la stabilité de la structure.



**Figure 3.18** Déplacement horizontal 4<sup>ème</sup> cas d'étude

#### **3.5.4.2 Reaction de pieux**

Dans cet partie en analyse les efforts et le moment fléchissant dans les pieux (tableau 3.4).

Le moment fléchissant est élevé sur les pieux en extrémité (ex. Pieu 1 :  $-307,05 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ), indiquant un effet de flexion causé par des déséquilibres latéraux.

Le pieu central reprend principalement les efforts verticaux, tandis que ceux des extrémités sont soumis à des moments important.

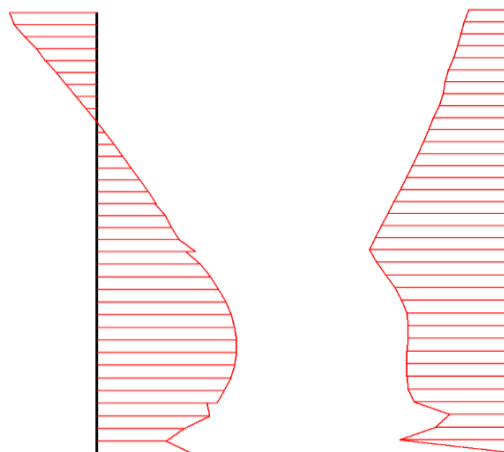
Les déplacements latéraux montrent une interaction importante entre sol et structure.

**Tableau 3.4** Déplacement et effort maximum de pieux 4<sup>ème</sup> cas d'étude

Phase 3	N[KN]	V[KN/M]	M[KN.M]	Uy[MM]	Ux[MM]
PIEUX 1	-73,65	87,45	-307,05	0,01049	-11,23
PIEUX 2	-101,71	24,11	-91,62	-1,37	-5,3
PIEUX 3	-113,61	9,72	-31,67	-1,81	-2,64
PIEUX 4	-120,12	-16,26	-14,89	-2,08	-1,13
PIEUX 5	-118,97	-5,17	13,77	-2,69	-0,05130
PIEUX 6	-129,86	3,22	342,38*10 <sup>-3</sup>	-2,99	-0,01239
PIEUX 7	-119	7,31	13,69	-2,69	0,06564
PIEUX 8	-119,82	-6,24	14,41	-2,12	1,27
PIEUX 9	-114,20	-9,80	-31,84	-1,85	2,90
PIEUX 10	-100,98	-24,16	91,42	-1,44	5,60
PIEUX 11	-74,14	-89,24	308,93	-0,01755	11,51

La courbe d'effort axial (figure 3.19) révèle une diminution progressive de la charge avec la profondeur, traduisant un transfert graduel des efforts vers le sol par frottement latéral. Un léger renflement observé au milieu du pieu pourrait refléter une zone d'interaction plus intense, possiblement liée à une variation du sol ou de sa rigidité.

Le diagramme de moment fléchissant (figure 3.19) montre des valeurs maximales près de la tête du pieu, en raison de la redistribution des efforts latéraux par le radier. La forme ondulée de la courbe traduit une flexion alternée, caractéristique des interactions complexes entre le radier, les pieux et le sol. Le moment diminue ensuite en profondeur, avec une inversion locale suggérant un changement de courbure.

**Figure 3.19** Efforts axial de pieu central 4<sup>ème</sup> cas d'étude

### 3.5.5 Analyse du 5ème cas d'étude – Pieux+radier+ chargement

Dans cette dernière phase, l'ensemble du système de fondation est activé, comprenant les 11 pieux, le radier, ainsi que l'application d'une charge uniformément répartie de 50 kN.

Cette configuration représente la situation réelle de service du bâtiment. L'objectif est d'évaluer le comportement global de la structure en interaction avec le sol, en tenant compte de tous les éléments porteurs.

Les résultats obtenus (figure 3.20) montrent une réduction significative du tassement vertical ( $U_y$ ) par rapport à la phase 2 (pieux seuls avec chargement), grâce à l'effet de répartition de la charge offert par le radier.

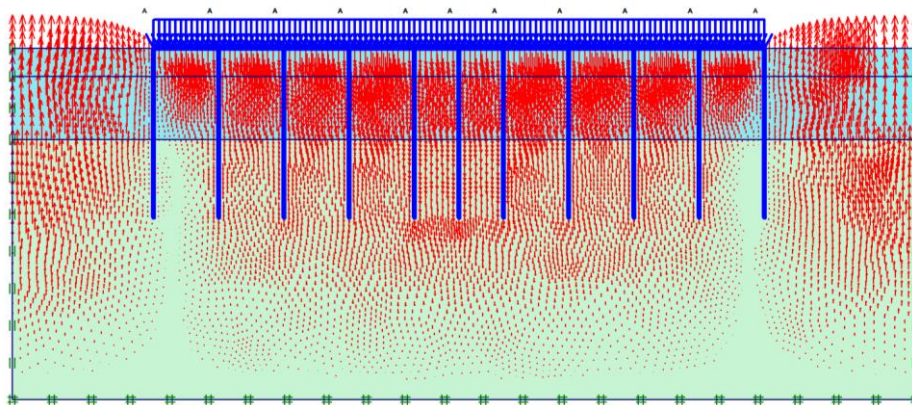


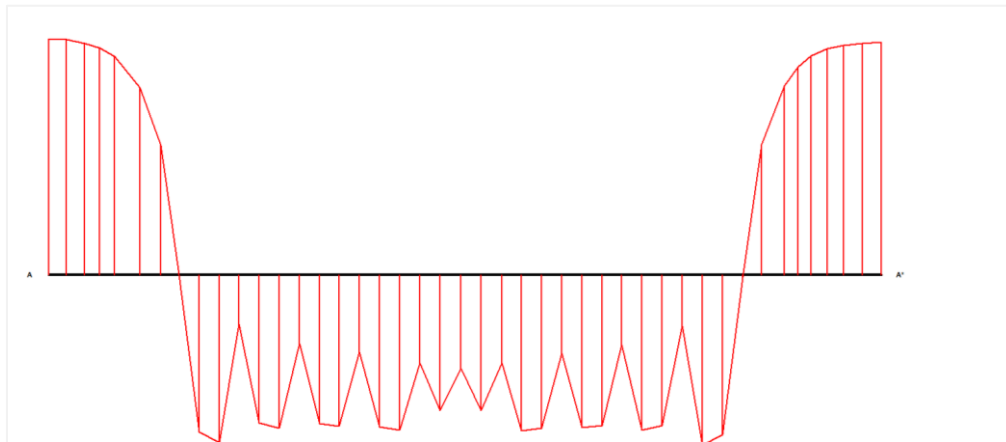
Figure 3.20 - 5<sup>ème</sup> cas d'étude

#### 3.5.5.1 Mouvement du terrain causé par la réalisation des pieux

La figure 3.21 illustre le profil de tassement dans la phase finale de la modélisation (pieux + radier + chargement).

On observe un tassement maximal localisé au centre de la zone pieutée, formant une cuvette caractéristique d'un transfert de charge concentré dans cette région. Les extrémités, situées hors de la zone d'influence des pieux, présentent très peu de déplacement, ce qui confirme l'efficacité du système de fondation à limiter les

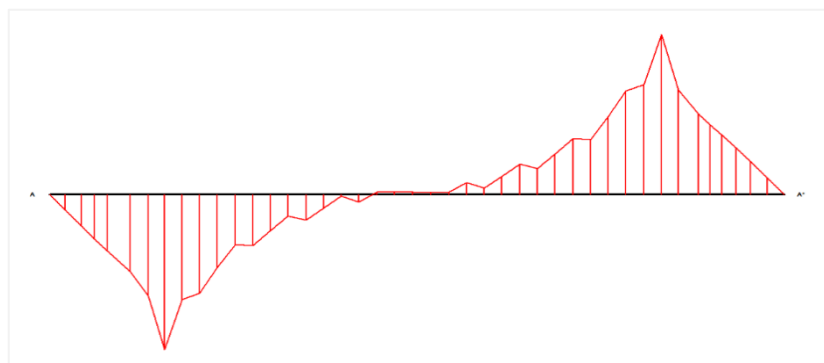
tassements en périphérie. L'ensemble du comportement reste stable, sans signes de rupture ou d'instabilité, ce qui témoigne d'une bonne interaction sol-structure.



**Figure 3.21** Tassement - 5<sup>ème</sup> cas d'étude

On observe un tassement différentiel prononcé au centre de la structure, où les pieux sont implantés, avec un affaissement vers le bas représenté par les flèches rouges.

Le déplacement horizontal ( $U_x$ ) reste modéré, indiquant une bonne stabilité latérale. L'effort axial ( $N$ ) est réparti de manière plus uniforme entre les pieux, tandis que les moments fléchissants ( $M$ ) sont également mieux contrôlés, ce qui souligne l'efficacité structurelle du système radier-pieux dans la reprise des charges verticales et dans le maintien de la stabilité globale de l'ouvrage.



**Figure 3.22** Déplacement horizontal - 5<sup>ème</sup> cas d'étude

### 3.5.5.2 Réaction des pieux

Le tableau 3.5 présente les résultats finaux obtenus à partir de la modélisation avec Plaxis pour chaque pieu pour ce dernier cas.

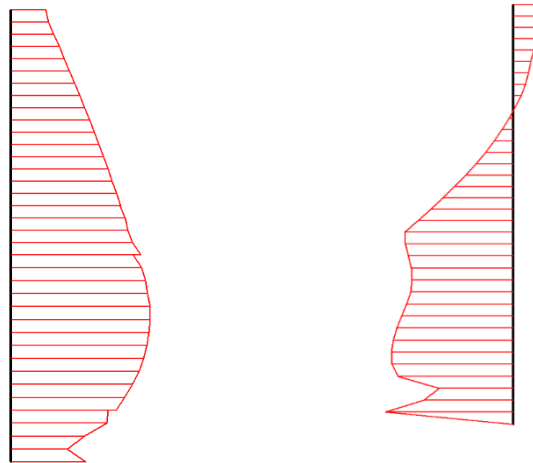
**Tableau 3.5** Efforts et déplacement maximum des pieux - 5<sup>ème</sup> cas d'étude

Phase Finale	N[kN]	V[kN/m]	M[kN.m]	Uy[mm]	Ux[mm]
PIEUX 1	-173,21	114,60	-338,48	0,04781	11,16
PIEUX 2	-265,54	-33,53	-107,42	-2,48	-5,27
PIEUX 3	-272,35	9,57	-35,01	-3,47	-2,58
PIEUX 4	-282,08	-29,25	-15,10	-3,90	-1,77
PIEUX 5	-269,86	-7,64	-17,56	-4,46	-0,07852
PIEUX 6	-254,43	-5,07	-429,01*10 <sup>-3</sup>	-4,72	-0,01763
PIEUX 7	-270,81	11,78	17,25	-4,47	0,09867
PIEUX 8	-281,91	3,83	13,70	-3,96	1,95
PIEUX 9	-273,74	-9,58	-34,74	-3,54	2,94
PIEUX 10	-265,71	-33,15	106,61	-2,59	5,64
PIEUX 11	-179,12	-116,67	341,00	-0,01282	11,55

Dans ce cas (pieux + radier + chargement), les efforts axiaux (N) sont globalement compressifs, avec des valeurs plus élevées au centre (pieux 4 à 9), traduisant une reprise principale des charges verticales. En périphérie, les pieux 1 et 11 présentent des efforts tranchants (V) et des moments fléchissants (M) plus marqués, révélant des effets de bord et une flexion accrue.

Le diagramme de moment (3.23) montre une valeur nulle en tête, puis une augmentation vers la zone médiane, avec une inversion de courbure en profondeur. Cela traduit un comportement de type poutre encastree, où la résistance latérale du sol induit une flexion non uniforme.

Côté déplacements, les tassements verticaux (Uy) sont maximaux au centre (-4,72 mm), tandis que les déplacements horizontaux (Ux) sont plus importants aux extrémités. L'ensemble indique une bonne répartition des charges et une interaction sol-structure stable, essentielle pour assurer la performance du système pieux-radier.



**Figure 3.23** Effort axial et Moment fléchissant du pieu centrale- 5<sup>ème</sup> cas d'étude

### 3.6 Comparaison entre le radier seul et le système pieux + radier sous chargement

Pour choisir la solution la plus adaptée entre le radier seul et le système pieux + radier sous chargement, les observations suivantes ont été faites :

**1. Radier seul sur remblai (cas 1) :** Le radier posé directement sur le remblai hétérogène, soumis à une charge uniforme de 50 kN/m<sup>2</sup>, supporte efficacement la charge avec un tassement vertical maximal d'environ 20 mm. Ce tassement, bien que raisonnable, reste important et témoigne de la déformabilité du remblai. Le système montre une stabilité globale satisfaisante sans signe de rupture, mais sa durabilité et sa sécurité en cas de variations locales du remblai ou d'aléas hydrogéologiques (nappe phréatique, risque sismique) nécessitent une vigilance particulière.

**2. Système pieux + radier (cas 2) :** L'ajout de 11 pieux sous le radier, dans la même configuration de chargement, améliore notablement le comportement structurel. Le tassement vertical est réduit d'environ 75 %, passant à 4,72 mm, et la répartition des efforts verticaux est concentrée sur les pieux centraux. Les efforts tranchants et moments

fléchissants sont mieux contrôlés, notamment en périphérie, tandis que les déplacements horizontaux restent modérés, garantissant une bonne stabilité latérale. L'interaction sol-structure est optimisée, assurant une meilleure performance globale.

**Tableau 3.6** Comparaison entre le radier seul et le système pieux + radier sous chargement

Critère	Radier seul	Pieux + radier
Tassement vertical ( $U_y$ )	$\approx 20$ mm	$\approx 4,72$ mm
Répartition des charges	Uniforme, dépend du sol	Concentrée sur pieux centraux
Moments fléchissants	Peu significatifs	Localisés en périphérie
Déplacements horizontaux ( $U_x$ )	Non analysés spécifiquement	Plus marqués en extrémité
Stabilité globale	Acceptable, sensible aux aléas	Très bonne, plus robuste
Durabilité	Limitée par variabilité du sol	Améliorée grâce aux pieux

En conclusion, nous pouvons dire que le radier seul peut suffire sous des charges modérées dans un remblai stable, mais le recours aux pieux offre une sécurité accrue, une réduction significative des tassements, et une meilleure répartition des efforts.

Cette solution mixte radier-pieux apparaît donc préférable dans le contexte portuaire étudié, où la variabilité du sol et les contraintes environnementales exigent un système fondamentalement robuste et durable.

### 3.7 Comparaison des résultats obtenus avec Plaxis 2D et SAP2000

Dans le cadre de cette étude, une double approche numérique a été adoptée afin d'évaluer le comportement de la fondation profonde du bâtiment étudié. La première approche a été conduite à l'aide de Plaxis 2D, logiciel de référence en mécanique des sols, tandis que la seconde a été menée avec SAP2000, outil structurel utilisé pour des modélisations classiques sans interaction sol-structure détaillée.

Dans SAP2000, les pieux ont été modélisés sous forme de ressorts verticaux linéaires, définis par des raideurs équivalentes estimées à partir de méthodes analytiques simplifiées. Le sol n'a pas été modélisé explicitement, et l'effet de la stratigraphie ou de la

nappe phréatique n'a pas été pris en compte. Les charges du bâtiment sont directement appliquées au radier.

À l'inverse, dans Plaxis 2D, les deux couches de sol ont été modélisées explicitement à l'aide du modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb. Les pieux sont introduits comme éléments structurels interagissant avec le sol via des lois de contact, et la nappe phréatique, localisée dans la couche de remblai, est prise en compte dans la simulation. Le radier et les pieux transmettent les charges du bâtiment au sol de manière plus réaliste.

Les résultats montrent que SAP2000 tend à simplifier excessivement la réponse du sol, en particulier dans des contextes où les couches compressibles, l'hétérogénéité des matériaux et la présence d'eau souterraine jouent un rôle clé. Plaxis 2D, en intégrant ces éléments, permet une analyse plus réaliste des tassements différentiels, de la répartition des efforts entre les pieux, et des zones sensibles à la rupture ou au fluage.

**Tableau 3.7** Comparaison entre les logiciels (SAP2000 et Plaxis 2D)

Critère	SAP2000	Plaxis 2D
<b>Tassement maximal sous radier</b>	Faible (sous-estimé)	Plus élevé, influencé par le remblai et la nappe
<b>Répartition des efforts dans les pieux</b>	Uniforme	Variable selon la position des pieux et la rigidité du sol
<b>Contraintes dans le sol</b>	Non représentées	Visualisation détaillée des zones plastiques et de concentration
<b>Influence de la nappe</b>	Ignorée	Prise en compte dans la portance et les tassements

### 3.8 Recommandations pour le dimensionnement réel

Afin d'assurer la stabilité et la durabilité de l'ouvrage dans un environnement portuaire soumis à des conditions géotechniques complexes (nappe phréatique élevée, remblai hétérogène, sollicitations mécaniques importantes), plusieurs recommandations peuvent être formulées à l'issue de cette étude.

Tout d'abord, les résultats de l'analyse numérique ont montré qu'un radier correctement dimensionné peut, dans certaines conditions, suffire à assurer la stabilité de la structure, même en présence d'un remblai peu favorable. Cette observation remet partiellement en question la proposition initiale du laboratoire, qui recommandait systématiquement le recours à des fondations profondes de type pieux pour des raisons de sécurité et de prudence.

Nos simulations ont mis en évidence que, malgré la nature hétérogène du remblai, le radier seul est capable de répartir efficacement les charges verticales, en limitant les tassements différentiels et sans générer de déformations critiques.

Toutefois, cette solution ne peut être retenue sans réserve, car elle reste conditionnée par :

- La compacité locale du remblai.
- La proximité de la nappe phréatique, avec les risques associés (perte de portance, soulèvement).
- Et les exigences réglementaires spécifiques aux zones portuaires.
- La sismicité probable.

Toutefois, Dans cette optique, et bien que nos résultats numériques suggèrent que le radier seul peut suffire sous charges modérées, il est recommandé de prévoir un système mixte radier + pieux dans les zones les plus sensibles, notamment si des charges ponctuelles plus élevées apparaissent, ou en cas de fortes incertitudes géotechniques.

Ce type de fondation combinée permet une meilleure répartition des charges, un contrôle accru des tassements différentiels, et une meilleure durabilité face aux effets hydrogéotechniques à long terme.

En conclusion, l'approche numérique développée dans ce mémoire permet non seulement de valider ou de nuancer les hypothèses des bureaux d'études, mais aussi

d'enrichir le processus de décision en proposant des solutions optimisées, techniquement fiables et économiquement viables.

### **3.9 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'évaluer, par modélisation numérique, la stabilité d'un bâtiment en zone portuaire selon deux solutions de fondation : radier seul et radier sur pieux. Les résultats montrent qu'un radier bien dimensionné peut suffire sous charges modérées et dans un remblai relativement stable.

Toutefois, la solution mixte radier-pieux offre des performances supérieures en termes de réduction des tassements, de meilleure répartition des efforts, et de sécurité accrue face aux incertitudes du sol.

Dans un contexte portuaire caractérisé par une hétérogénéité géotechnique et des contraintes environnementales spécifiques, le système pieux + radier s'impose comme l'option la plus robuste et durable.

Les simulations numériques se sont révélées essentielles pour anticiper les comportements mécaniques, quantifier les déplacements, et guider le choix de la solution la plus adaptée aux conditions du site.

## Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude et le calcul de la stabilité d'un bâtiment implanté en zone portuaire, plus précisément sur un quai à Mers El Kebir, reposant sur différentes solutions de fondation, notamment les pieux et les fondations mixtes. L'objectif principal était de proposer une solution adaptée aux conditions géotechniques locales, en combinant une approche théorique, une revue bibliographique approfondie et une modélisation numérique à l'aide du logiciel Plaxis 2D.

Le travail s'est articulé en deux volets complémentaires :

1. Une partie bibliographique, posant les fondements théoriques relatifs aux bâtiments, aux systèmes de fondation profonde (pieux) et aux fondations mixtes,
2. Une partie numérique, reposant sur des simulations visant à analyser le comportement du sol et de la structure sous différentes configurations.

Ce mémoire ne se limite pas à une simple vérification de la stabilité d'un bâtiment fondé sur pieux, mais propose une réflexion plus large sur l'optimisation des fondations en milieux remblayés, souvent rencontrés en zone portuaire.

À travers une démarche comparative rigoureuse (sol seul, pieux seuls, système pieux + radier avec chargement), il a été possible d'identifier des pistes de rationalisation tant technique qu'économique.

Les simulations réalisées avec Plaxis 2D ont montré une bonne stabilité globale du système sol-structure, même sans pieux, sous un chargement modéré de 50 kN/m<sup>2</sup>. Ce résultat est d'autant plus remarquable que le sol modélisé est un remblai, généralement considéré comme moins performant qu'un sol naturel.

La configuration sans pieux a démontré une résistance suffisante, sans déformations critiques ni apparition de rupture, suggérant une compacité satisfaisante et une capacité portante adéquate.

Ces constats soulèvent plusieurs points essentiels :

- Ils remettent en question l'usage systématique des fondations profondes, en incitant à une évaluation précise des caractéristiques réelles du site avant de choisir une solution.
- Ils ouvrent la voie à des optimisations économiques, notamment à travers l'utilisation de radiers bien dimensionnés dans des remblais consolidés.
- Ils soulignent la robustesse du modèle géotechnique utilisé et la pertinence d'une modélisation numérique fiable pour prédire le comportement des ouvrages.

L'analyse comparative des configurations a également mis en évidence l'intérêt de solutions mixtes. Si le radier peut suffire dans certains cas, l'ajout de pieux améliore significativement la stabilité globale, réduit les tassements, et assure une meilleure répartition des efforts verticaux.

Dans un contexte aussi variable et contraignant que celui d'un quai portuaire, la solution radier + pieux apparaît donc comme la plus sûre et la plus durable d'où le choix du bureau d'étude.

Les modélisations numériques se sont révélées particulièrement utiles pour anticiper le comportement mécanique de l'ensemble sol-structure, évaluer les déplacements induits et comparer objectivement les performances des différentes configurations envisagées.

Au-delà de la seule évaluation de la stabilité, ce travail met en lumière l'intérêt d'une approche critique, contextuelle et multidisciplinaire dans le choix des fondations.

Il valorise également le recours à des outils numériques puissants comme Plaxis pour guider les décisions de conception, conciliant ainsi exigences techniques et optimisation économique.

Dans des environnements spécifiques comme celui de Mers El Kebir, cette approche permet d'adapter les solutions aux réalités du terrain tout en garantissant sécurité, durabilité et efficacité.

Au regard des résultats obtenus et des limites rencontrées, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour prolonger ce travail, on cite :

- Extension aux analyses tridimensionnelles, afin de mieux représenter les effets spatiaux et les interactions latérales entre pieux et radier.
- Étude du comportement sismique de la structure fondée sur pieux, notamment dans le contexte portuaire exposé aux aléas sismiques.
- Analyse environnementale et durabilité : intégration des impacts environnementaux (empreinte carbone des matériaux, corrosion en milieu marin) et proposition de solutions plus durables.

---

## Bibliographie

1. Agence Qualité (2019). Désordres des fondations profondes par pieux. Paris.
2. Bakour, A. (2008). Comportement structurel et géotechnique des bâtiments. Université de Montréal.
3. Bakri, B. (2016). Interaction sol-structure sous effets de cisaillement. Thèse, Université de LORRA.
4. Benchida, A. & Bekhti, N. (2022). Modélisation des fondations profondes d'un ouvrage d'art. Université de Tlemcen.
5. Bourgeois, E. (2006). Calcul de charges limites par éléments finis, ULS 2006.
6. Bruno, Y. (2017). Les guides de la maçonnerie.
7. Brinkgreve, R.B.J. (2017). PLAXIS 2D Reference Manual. Plaxis B.V.
8. Chekroun, L.H. (2013). Contribution à l'étude de l'interaction sol-structure. Université de Tlemcen.
9. Combarieu, O. (1988). Calcul d'une fondation mixte semelle-pieux. LCPC, Paris.
10. Das, B. M. (2010). Principles of Foundation Engineering. Cengage Learning.
11. El Houari, N. et al. (2022). Analysis of pile-tunnel interaction. IJASCSE, Vol.11, Issue 11.
12. El Houari, N. (2022). Soil responses caused by tunneling near piles. Conf. Mardin, Turquie.
13. Eurocode 7 (EN 1997-1) – Conception géotechnique .
14. Filliat, G. (1981). La pratique des sols et fondations. Éditions du Moniteur.
15. Fondations profondes – Guide de conception et de dimensionnement (2001).
16. Frank, R. & Magnan, J.P. (1997). Fondations profondes : conception et dimensionnement. ENPC.
17. Forni, M. (1981). Fondations spéciales et reprises en sous-oeuvre. Imprimerie Louis-Jean, Paris.
18. Hamdidi, T. (2019). Comportement d'une fondation sur groupe de pieux. Université de Tizi Ouzou.

- 
19. LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (maintenant IFSTTAR)
  20. Manuel des travaux maritimes et fluviaux, Éditions Eyrolles, sous la direction de J.-P. Tournier (2008).
  21. Massarsch, K. R., & Fellenius, B. H. (2002). "Ground Improvement by Vibratory Methods." Proceedings
  22. Mechallet (2019). Choix du type de fondation. Publication en ligne, 21 février 2019.
  23. Ministère de l'Habitat (Algérie). (2003). Règlement Parasismique Algérien RPA 99 - Version modifiée.
  24. Montcho, G.C. (2005). Fondations profondes et dimensionnement. École polytechnique de Thiès.
  25. Planète TP. (2007). Les techniques de fondations profondes, 7 décembre 2007.
  26. Roger, F. et al. (2019). Fondations profondes. Techniques de l'ingénieur.
  27. Roger, F. (2003). Calcul des fondations superficielles et profondes. 5e éd., Presses de l'ENPC.
  28. Selka, K., Rahoui, F. (2022). Impact de la présence de cavités sur la capacité portante des pieux. Université de Tlemcen.
  29. Zaid Al Farhan et al. (2022). Sustainable Geotechnical Engineering. Iraq (Mosul).