

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

**Etude d'un mur de quai en rideau
de palplanches. Poste 24 du port de Béjaia**

Présenté par :

M^r IMRAZENE Juba

Devant le jury composé de :

Mr KAHIL Amar

Professeur à l'UMMTO

Président.

Mme DEGHOUL Lylia

Maitre de conférences à l'UMMTO

Examinatrice.

Mr GABI Smail

Professeur à l'UMMTO

Encadrant.

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remercie DIEU, Le Tout-Puissant, de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail et grâce à Qui toutes bonnes choses arrivent.

Il est bien agréable d'adresser mes sincères remerciements à mon promoteur **Mr. GABI Smail** Professeur à l'UMMTO pour ses encouragements, orientations, sa patience et aussi essentiellement pour son travail qui est très bien fini, qui m'a permis de réaliser aujourd'hui ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Mr. KAHIL Amar** Professeur à l'UMMTO pour son sens d'engagement et sa disponibilité au sein de l'université durant toute l'année et pour avoir accepté de présider ce jury.

Mes sincères remerciements vont vers le membre du jury **Mme. DEGHOUL Lyliya** maître de conférences catégorie B à l'UMMTO, pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Je remercie les membres du laboratoire d'études maritimes (L.EM) à Alger pour leur accueil au sein de leur laboratoire et pour avoir mis à ma disposition les documents nécessaires à la réalisation de ce travail. Je remercie, en particulier, **Mr. OUFAI Brahim**.

Je remercie aussi toute ma famille et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACES

Dieu Merci

Je dédie ce travail

*A la personne la plus chère dans ma vie, son soutien et sa
patience face aux moments difficiles traversés au cours de ma
vie : Mon Père, que Dieu le protège*

A la mémoire de ma mère et ma tante Djedjiga

*A mes Frères :-Abdelrazzek et sa femme et ses enfants
-Faycel*

A mes Sœurs : Dyhia et Ouahiba

A mon oncle Ahmed et sa femme et ses filles

*Et à la promotion Géotechnique
Et à toute la famille et mes proches*

Résumé

En travaux maritimes, l'utilisation des palplanches est très vaste, qu'elle soit provisoire ou définitive, au vu des différents avantages qu'elles présentent, quant à la facilité de transport, de mise en œuvre, ou d'arrachage.

Le sujet proposé par le Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) est le projet du poste 24 du nouveau quai situé à l'arrière port de Béjaia. Le sol au niveau de ce poste est constitué essentiellement de sables de caractéristiques moyennes, ce qui a conditionné le choix d'un quai en palplanches.

Cette étude consiste à modéliser avec le code Plaxis 2D le quai du poste 24 constitué de deux rideaux de palplanches, un pour la magistrale du quai surmonté d'une poutre de couronnement en béton armé, l'autre pour le système d'ancrage. Entre les deux rideaux de palplanches, deux rangées de pieux en béton armé ont été enfoncés et supporteront chacun une poutre sous-rails pour le portique de manutention.

En termes de résultats, on a déterminé pour les éléments structurels du quai, les déplacements, les efforts et les moments et on a fait une comparaison entre ces résultats lors de l'accostage des navires et lors de leur amarrage. En conclusion, on a déduit que le cas de l'amarrage est plus défavorable que celui de l'accostage.

Mots clés : Rideau de palplanche, Pieux, Quai, Modélisation, Plaxis 2D.

Abstract

In maritime works, sheet piling is widely used, whether temporary or permanent, given the various advantages they offer, such as ease of transport, installation, and removal.

The subject proposed by the Maritime Studies Laboratory (LEM) is the project of berth 24 of the new quay located in the rear port of Béjaia. The soil at this berth consists mainly of sand of poor characteristics, which determined the choice of a sheet pile quay.

This study consists of modeling, using the Plaxis 2D code, the berth 24 consisting of two sheet pile walls, one for the quay's main structure topped with a reinforced concrete crown beam, the other for the anchoring system. Between the two sheet pile walls, two rows of reinforced concrete piles were driven, each supporting a sub-rail beam for the handling gantry. In terms of results, the displacements, forces and moments for the structural elements of the quay were determined and a comparison was made between these results during the docking of the ships and during their mooring. In conclusion, it was deduced that the case of mooring is more unfavorable than that of berthing.

Keywords: Sheet pile wall, Piles, Quay, Modeling, Plaxis 2D.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| Remerciements | i |
| Dédicace | ii |
| Résumé | iii |
| Abstract..... | iii |
| Sommaire..... | iv |
| Liste des figures..... | vii |
| Liste des tableaux | x |
| Liste des symboles..... | xi |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| PREMIERE PARTIE : BIBLIOGRAPHIE | |
| Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes | |
| I.1.Introduction | 3 |
| I.2.Définition des ports | 3 |
| I.3. Historique des ports..... | 3 |
| I.4. Rôle des ports maritimes | 4 |
| I.5. Type de ports..... | 4 |
| I.5.1.Ports maritimes | 5 |
| I.5.2.Ports fluviaux | 6 |
| I.5.3.Ports lacustres..... | 7 |
| I.5.4.Ports à sec..... | 7 |
| I.5.5.Ports de commerce | 8 |
| I.5.6.Ports de pêche | 8 |
| I.5.7.Ports de plaisance | 9 |
| I.5.8.Ports militaires ou base navale | 10 |
| I.6. Ports en Algérie | 10 |
| I.6.1.Exemples des ports Algériens. | 10 |
| I.7. Réalisation des types d’ouvrages maritimes | 14 |
| I.8. Digue | 14 |

| | |
|---|----|
| I.9. Définition d'un quai | 16 |
| I.9.1.Types de quai | 16 |
| I.9.2.Efforts agissants sur les quais | 19 |
| I.9.2.1.Efforts horizontaux..... | 19 |
| I.9.2.2.Efforts verticaux | 21 |
| I.9.2.3.Efforts hydrodynamique..... | 22 |
| I.10.Conclusion | 23 |

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanche

| | |
|---|----|
| II.1.Introduction | 24 |
| II.2.Définition des palplanches | 24 |
| II.3.Type des palplanches | 25 |
| II.4. Appuis | 29 |
| II.5. Eléments de rigidification | 29 |
| II.6.Définition de la poussée et la butée | 30 |
| II.7.Principes de calcul de rideau de palplanche dans le sol | 31 |
| II.8.Méthode classique..... | 31 |
| II.8.1.Rideaux sans ancrage | 31 |
| II.9. Ecrans ancrés | 33 |
| II.9.1 Ecrans simplement butés en pied (la méthode de la butée simple)..... | 33 |
| II.9.2. Rideaux ancrés encastrés en pied..... | 35 |
| II.10. Méthode de Blum (poutre équivalente) | 35 |
| II.11. Méthode de Tschebotarioff | 38 |
| II.12. Application au projet..... | 42 |
| II.13.Conclusion | 45 |

DEUXIEME PARTIE : ETUDE DU PROJET

Chapitre III. Présentation du projet

| | |
|---|----|
| III.1.Introduction | 46 |
| III.2. Situation géographique du port | 46 |
| III.3. Géologie du site | 47 |
| III.4.Reconnaissance des lieux | 47 |
| III.5.Reconnaissance géotechnique | 48 |
| III.5.1.Résultats de la campagne réalisée dans le cadre du projet du nouveau quai | 48 |
| III.5.2.Résultats de la campagne réalisée dans le cadre de cette étude | 48 |
| III.6. Données sur le quai..... | 48 |

| | |
|---|----|
| III.6.1.Description du nouveau quai | 48 |
| III.6.2.Caractéristiques du Navire de projet et effort induits | 49 |
| III.7.Caractéristiques principales des quais métalliques | 49 |
| III.8.Pieux | 53 |
| III.8.1. Principaux types de pieux | 53 |
| III.9. Protection cathodique | 56 |
| III.9.1.Protection cathodique par courant impose | 57 |
| III.9.2.Protection cathodique par anodes sacrificielles | 57 |
| III.10.Choix de la protection cathodique | 57 |
| III.11.Calcul du système de protection cathodique (mode sacrificiel) | 58 |
| III.11.1.Caractéristiques du milieu | 58 |
| III.11.2.Dimensionnement du système de protection cathodique | 58 |
| III.12. Conclusion | 60 |
| Chapitre IV. Modélisation numérique avec Plaxis | |
| IV.1.Introduction | 61 |
| IV.2.Dimensionnement d'un rideau de palplanches..... | 61 |
| IV.3.Présentation du logiciel « PLAXIS 2D, version 8 » | 61 |
| IV.4.Description de la géométrie du modèle..... | 62 |
| IV.5. Caractéristiques des matériaux | 63 |
| IV.5.1.Propriétés des couches de sol et des interfaces | 63 |
| IV.5.2.Propriétés des éléments structuraux | 63 |
| IV.5.3.Propriétés des tirants d'ancrage | 64 |
| IV.5.4.Interfaces | 64 |
| IV.6.Chargements et conditions aux limites..... | 64 |
| IV.6.1.Conditions aux limites..... | 64 |
| IV.6.2.Chargements..... | 64 |
| IV.7 .Génération du maillage | 65 |
| IV.8.Conditions initiales..... | 65 |
| IV.9.Procédure de calculs | 68 |
| IV.9.1.Phases de réalisation par étapes du projet. | 68 |
| IV.9.2.Quai en service | 69 |
| IV.10.Résultats des calculs de force dans le cas d'amarrage | 71 |
| IV.11.Résultats des calculs de force dans le cas d'accostage..... | 73 |
| IV.12.Comparaison et interprétation | 76 |
| IV.13.Conclusion..... | 76 |
| CONCLUSION GENERALE | 77 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 79 |
| Annexe n°1.Disposition des points de sondage carottés et coupes lithologiques | 81 |
| Annexe n°2.Plan de masse et implantation | 82 |

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Schéma de principe d'un port maritime | 5 |
| Figure I.2. Un port fluvial | 6 |
| Figure I.3. Le plus grand port lacustre d'Europe (Port de Chevroux en Suisse) | 7 |
| Figure I.4. Le plus grand port à sec en Europe (Port NavyService en France)..... | 7 |
| Figure I.5. Un port de commerce | 8 |
| Figure I.6. Port de pêche de Dellys (Boumerdes) | 9 |
| Figure I.7. Port de plaisance..... | 9 |
| Figure I.8. Port de Bejaïa | 11 |
| Figure I.9. Port de Gouraya (Tipaza) | 11 |
| Figure I.10. Port de Djen Djen (Jijel)..... | 12 |
| Figure I.11. Port de Zemmouri | 12 |
| Figure I.12. Port d'Alger | 13 |
| Figure I.13. Port de Sidi Fredj..... | 13 |
| Figure I.14. Schéma d'une digue à talus | 14 |
| Figure I.15. Schéma d'une digue verticale..... | 15 |
| Figure I.16. Schéma d'une digue mixte | 15 |
| Figure I.17. Différents types de quais-poids | 17 |
| Figure I.18. Quais sur pieux | 17 |
| Figure I.19. Quai Danois | 18 |
| Figure I.20. Quai en rideau de palplanches | 19 |
| Figure I.21. Les forces agissantes sur le quai..... | 22 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II.1. Rideau de palplanches..... | 24 |
| Figure II.2. Palplanche double en Z (Palplanche AZ 800) (ARCELORMITTAL, 2022) | 26 |
| Figure II.3. Palplanche en U (Palplanche AU 20) (ARCELORMITTAL, 2022) | 27 |
| Figure II.4. Rideau mixte HZ/AZ (ARCELORMITTAL, 2022) | 28 |
| Figure II.5. Serrure à la jonction de deux palplanches..... | 28 |
| Figure II.6. Forces de poussée et de butée sur un écran de palplanche | 30 |
| Figure II.7. Distribution des contraintes sur un mur de soutènement | 32 |
| Figure II.8. Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans l'argile..... | 33 |
| Figure II.9. Rideau simplement butée en pied | 34 |

| | |
|---|----|
| Figure II.10. Schéma statique d'un écran ancré encastré en pied | 35 |
| Figure II.11. Détermination du point de moment nul | 36 |
| Figure II.12. Méthode de Blum..... | 36 |
| Figure II.13. Distribution des pressions mesurées à l'issue des différentes procédures de construction | 38 |
| Figure II.14. Méthode de calcul de Tschebotarioff | 39 |
| Figure II.15. Schéma de calcul d'un rideau ancré et encastré dans le sable (BRAJA.D, 2019).. | 40 |
| Figure II.16. Schéma des caractéristiques des sols | 43 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure III.1. Localisation géographique de la zone du projet | 47 |
| Figure III.2. Coupe vertical du quai poste 24 | 50 |
| Figure III.3. Palplanches en Z..... | 51 |
| Figure III.4. Palplanches en HZ..... | 52 |
| Figure III.5. Classification suivant la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu | 54 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure IV.1. Modèle géométrique du projet | 62 |
| Figure IV.2. Le maillage du modèle | 65 |
| Figure IV.3. Les conditions hydrauliques initiales | 66 |
| Figure IV.4. Génération des contraintes effectives initiales | 67 |
| Figure IV.5. Génération des contraintes effectives initiales dans le cas d'amarrage | 67 |
| Figure IV.6. Génération des contraintes effectives initiales dans le cas d'accostage..... | 68 |
| Figure IV.7. Fenêtre de calcul de différentes phases | 69 |
| Figure IV.8. Déformation de la phase 1..... | 70 |
| Figure IV.9. Déformation de la phase 2..... | 70 |
| Figure IV.10. Déformation de la phase 3..... | 70 |
| Figure IV.11. Déformation finale de quai..... | 71 |
| Figure IV.12. Les forces agissantes sur palplanche HZ | 71 |
| Figure IV.13. Les forces agissantes sur palplanche AZ | 72 |
| Figure IV.14. Les forces agissantes sur le pieu situé à gauche..... | 72 |
| Figure IV.15. Les forces agissantes sur le pieu situé à droite..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.16. Les forces agissantes sur palplanche HZ | 73 |
| Figure IV.17. Les forces agissantes sur palplanche AZ..... | 74 |
| Figure IV.18. Les forces agissantes sur le pieu situé à gauche..... | 74 |
| Figure IV.19. Les forces agissantes sur le pieu situé à droite..... | 75 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Tableau III.1. Les principales caractéristiques de l'extension du quai poste 24..... | 49 |
| Tableau III.2. La position des profils dans le quai..... | 49 |
| Tableau III.3. Caractéristiques de profile en Z (AZ 40-700 S 460AP) (ARCELORMITTAL, 2022)..... | 51 |
| Tableau III.4. Caractéristiques de profil mixte HZ 1180 MA/AZ 18-700..... | 52 |
| Tableau III.5. Classification des pieux (Adapté de MCIF, 2006). | 55 |
| Tableau III.6. Choix du type de pieux selon la nature du sol | 55 |
| Tableau III.7. Caractéristiques des palplanches (LEM, 2011)..... | 60 |
| Tableau III.8. Les différentes surfaces et les quantités de courant nécessaires à différentes zones..... | 60 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Tableau IV.1. Propriétés des couches de sol et des interfaces | 63 |
| Tableau IV.2. Les éléments structuraux | 63 |
| Tableau IV.3. Les propriétés de tirant d'ancrage..... | 64 |
| Tableau IV.4. Les résultats des calculs de force dans le cas d'amarrage. | 75 |
| Tableau IV.5. Les résultats des calculs de force dans le cas d'accostage..... | 75 |

A : la surface

c : la cohésion

D : la fiche du rideau

$D_{\text{théorique}}$: la fiche théorique

d_{eq} : l'épaisseur équivalente de la plaque.

E : le module de Young

EA : la raideur axiale

EI : la rigidité de flexion

F : tension dans le tirant/unité de longueur du mur

f : la fiche

F_s : Coefficient de sécurité

H : hauteur du remblai agissant sur le mur

K_a : le coefficient de poussée de Rankine

K_p : le coefficient de butée de Rankine

k_x : la perméabilité horizontale

k_y : la perméabilité verticale

L_s : espacements

M_{max} : Moment fléchissant maximal

P : la pression hydrostatique

P_a : la force de poussée

P_{active} : pression interstitielle

P_{steady} : les pressions interstitielles permanentes

P_{excess} : les surpressions interstitielles

R_{inter} : facteur de rigidité de l'interface

S : module de résistance de la palplanche par unité de longueur

u : déplacement

W : module de résistance de la palplanche par mètre linéaire.

w : poids

Z : la profondeur

Δl : l'allongement

γ : poids volumique du remblai

γ_{sat} : Le poids volumique saturé.

γ_{unsat} : Le poids volumique non saturé.

γ' : poids volumique déjaugé

σ' : Contrainte effectif

σ'_a : la contrainte admissible de l'acier.

σ_{ad} : contrainte de flexion admissible de la palplanche .

σ_e : limite élastique de l'acier de la palplanche.

ν : le coefficient de Poisson

φ : angle de frottement

ψ : l'angle de dilatance

Abréviation

LEM : Laboratoire d'Etudes Maritimes

M -C : Mohr-Coulomb

INTRODUCTION GENERALE

Les ports, ouverture vers le monde ou porte d'entrée, sont des éléments structurants d'une ville, d'un territoire ou d'un pays. Qu'ils soient fluviaux ou maritimes, les ports sont des lieux à part, souvent des centres économiques et industriels tournés vers l'extérieur. Ils jouent un rôle important dans le développement d'un pays. Ça, beaucoup de nations l'ont compris, comme la Chine qui compte désormais, sept parmi les dix plus grands ports du monde.

Le transport maritime de marchandises est aujourd'hui le principal mode de transport utilisé pour le transit intercontinental des marchandises. 90 % des marchandises transportées dans le monde le sont en effet par voie maritime. Le transport maritime est aussi le transport le moins consommateur d'énergie (deux fois moins que le transport ferroviaire et jusqu'à dix fois moins que le transport routier).

Sous l'effet d'une mondialisation de plus en plus poussée des échanges, les trafics de marchandises n'ont cessé de progresser. À titre d'exemple, le taux de progression du trafic de marchandises intercontinental a été de l'ordre de 4 % par an sur les dix dernières années. Le développement des gains de capacité unitaire par navire, a favorisé cette progression constante du tonnage des marchandises transportées. Les produits liés à l'industrie (hydrocarbures, minerais, produits chimiques divers, matériaux radioactifs...), à l'agriculture (fruits et légumes, engrais, nourritures animales...), ainsi que les produits manufacturés (véhicules, matériels électroniques, textiles...) constituent les principales catégories de marchandises transportées par bateaux.

En Algérie, et à l'instar de beaucoup de pays à travers le monde, la quasi-totalité du commerce international est réalisée par voie maritime. Les onze ports de commerce algériens assurent actuellement un trafic portuaire de plus en plus important. Les principaux ports d'Algérie (Alger, Annaba, Djen Djen et Béjaïa) ambitionnent de renforcer les liens commerciaux avec l'Afrique, l'Europe et l'Asie.

Avec d'ambitieux projets d'infrastructure en cours, notamment des réseaux ferroviaires et des travaux d'agrandissement pour accueillir des navires plus grands, ces ports visent à transformer l'Algérie en une plaque tournante majeure pour le commerce maritime international.

Le port de Béjaïa est consacré au commerce international et aux hydrocarbures. Il est classé deuxième port d'Algérie en termes d'activité commerciale.

Le trafic transitant par le port de Béjaïa est de plus en plus important. La croissance enregistrée depuis les années 2000 se maintient également aujourd'hui. La tendance pour l'avenir se concrétise par la mise en œuvre de plusieurs projets de développement, il s'agit notamment de la réalisation de nouveaux quais et d'une nouvelle gare maritime, entre autres.

C'est dans ce cadre, que rentre le projet d'aménagement du poste 24 du nouveau quai du port de Béjaïa, situé dans l'arrière port. Pour ce quai, plusieurs solutions ont été proposées, pour retenir celle qui envisage de construire un quai avec un rideau de palplanches. Tout d'abord, parce que c'est une solution économique et aussi parce que le sol en place est de qualité moyenne ne pouvant supporter un ouvrage gravitaire.

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons scindé en deux parties :

➤ **La première partie** : est la partie bibliographique, comportant deux chapitres :

Le chapitre I : est consacré aux généralités sur les ouvrages portuaires dans le monde et en Algérie en montrant l'importance de tels ouvrages dans le transport des personnes et des marchandises, et donc dans l'économie d'un pays.

Le chapitre II : présente les différents types de palplanches et les méthodes de calcul des rideaux de palplanches. Deux types de rideaux y ont été étudiés : les rideaux sans ancrage et ceux avec ancrage, et pour chaque cas, on a traité l'encastrement du rideau dans un sol granulaire et dans un sol cohérent.

➤ **La deuxième partie** est la partie d'étude du projet subdivisée aussi en deux chapitres :

Le chapitre III : Dans ce chapitre, on présente le port de Béjaïa et le projet d'aménagement du poste 24 du nouveau quai de ce port.

Le chapitre IV : constitue une modélisation numérique avec le code de calcul Plaxis 2D du comportement du sol et des éléments de structure qui composent le poste 24. Deux cas ont été traités dans cette modélisation : cas de l'amarrage des navires et cas de leur accostage.



Chapitre I :
Généralités sur les ports
maritimes

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

I.1. Introduction

L'évolution des ouvrages portuaires a marqué sa place à l'échelle mondiale, vu le rôle important que joue un port dans l'économie d'un pays. Cette évolution englobe tous les types d'ouvrages maritimes ainsi que les différents éléments que les constituent.

Parmi les différents types d'aménagements portuaires, le quai assure des rôles très importants en tant qu'ouvrages d'accostage et d'amarrage des navires. Il offre aux navires une opportunité de se stationner et de procéder au transbordement des marchandises ou des voyageurs, d'avitaillements, d'armements...

I.2. Définition des ports

Un port est une infrastructure située sur le littoral maritime, sur les berges d'un lac ou sur un cours d'eau et destinée à accueillir des bateaux et navires. Un port peut remplir plusieurs fonctions, mais doit avant tout permettre d'abriter les navires en particulier pendant les opérations de chargement et de déchargement. Il facilite aussi les opérations de ravitaillement et de réparations.

Espace voué au transit de marchandises et de passagers, le port est :

- Une zone géographique
- Une communauté de professionnel
- Une zone industrielle et logistique
- Un lieu d'échanges et d'informations

I.3. Historique des ports

Les ports sont des lieux stratégiques, économiques et militaires. Ils ont pour cette raison et depuis des siècles faits l'objet de nombreuse attaque venant de la terre, de la mer ou des airs.

Les premiers ports construits semblent toutes fois remonter aux Phéniciens avec les ports de Sidon et Tyr au XIIIe siècle avant Jésus Christ.

Malgré les destructions suivant la fin de l'Empire Romain, les ports se développent sur le pourtour de la Méditerranée et progressivement sur la façade Atlantique au fur et à mesure de l'expansion du commerce.

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

I.4. Rôle des ports maritimes

Ils existent deux aspects du rôle des ports maritimes (CHAPON J, 1975)

- **Rôle industriel** : le port peut comporter des installations destinées à traiter ou transformer les matières premières importées ou exportées ;
- **Rôle de marché** : transbordement d'un moyen de transport terrestre à un transport maritime (et inversement) peut s'accompagner d'opérations commerciales faisant du port un lieu de marché. Cette fonction nécessite de grands moyens de stockage et de conditionnement des marchandises.

Sur le plan physique, le port permet aux navires de stationner à l'abri de la houle et du vent, pour :

- effectuer leurs opérations de transit (chargement et déchargement des marchandises, embarquement ou débarquement des voyageurs) ;
- effectuer leurs avitaillements (combustible ou carburant, eau, produits nécessaires à la vie de l'équipage et des passagers) ;
- assurer leurs entretiens et leurs réparations ;
- être construits ou démolis.

I.5. Type de ports

Des ports de toutes tailles existent, abritant de quelque barque, à des milliers de bateaux et installations utilitaires ou industrielle de production.

Les ports peuvent être classés selon leur localisation, et leur(s) activité(s).

a) Selon leur localisation, on distingue les :

- Ports maritime
- Ports fluviaux
- Ports lacustres
- Ports à sec

b) Selon leur activité et les types de bateaux accueillis, on distingue les :

- Ports de commerce
- Ports de pêche
- Ports militaires ou base navale

I.5.1. Ports maritimes

Ils sont situés sur la côte d'une mer ou d'un océan ; ce sont souvent les ports principaux pour un pays ayant une façade maritime, accueillant les plus grands tonnages. Ces ports ont besoin d'avantage de protection contre les vagues et le vent en raison de leur exposition.

Dans les ports maritimes européens, passent chaque année environ 3,5 milliards de tonnes de fret (marchandise), et environ 350 million de passagers (chiffres 2007). Les ports maritimes manient presque tout le fret impliqué dans le commerce extérieur et la moitié de celui impliqué dans le commerce intérieur.

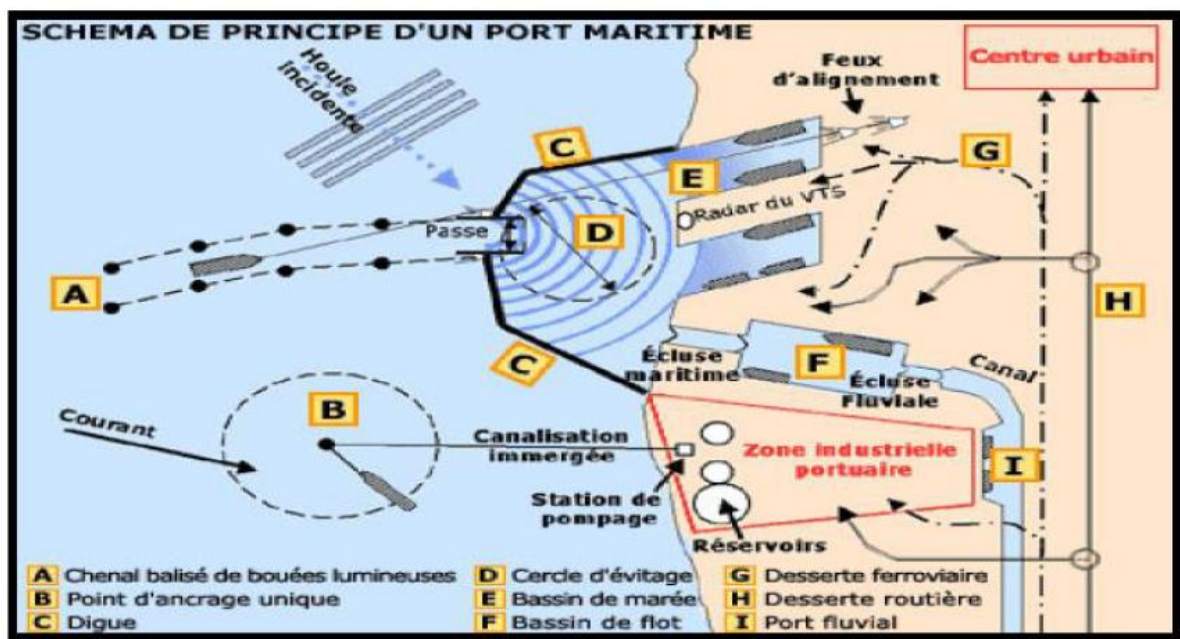


Figure I.1. Schéma de principe d'un port maritime

Pour entrer dans le port, ou en sortir suivant la (Figure I.1), le navire emprunte un **chenal balisé (A)**, aidé dans sa circulation par le radar du VTS (Visual Traffic System) et par les feux d'alignement.

* **L'avant-port (D)** est protégé de la houle par des **digue (C)**. Le navire peut y effectuer des manœuvres "d'évitage" (c'est à-dire tourné sur lui-même de 180°), de façon à pouvoir être amarré à son poste d'opérations cap vers la sortie (ce qui facilite grandement l'abandon du poste en cas de nécessité) ;

Les postes d'accostage (conçus sous forme de quais, d'appontements ou de ducs d'Albe) sont établis en bordure :

* **de bassins de marée (E)** en liaison directe avec l'avant-port ;

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

* **ou de bassins à flot (F)** reliés à l'avant-port par une écluse maritime Les postes sont desservis par des voies de transport intérieures (routes, rails, voies navigables (G, H, I) et équipés de terre-pleins permettant le stockage des cargaisons.

Lorsque l'agitation due à la houle n'est pas trop forte, les navires transportant des cargaisons liquides ou en vrac peuvent être reçus à des **postes non protégés (B)**. Ils chargent ou déchargent leur cargaison par des tuyaux flexibles reliés à un **point d'ancrage (B)** constitué d'une bouée ancrée sur le fond par des chaînes. La liaison entre ce point et les installations de stockage établis à terre s'effectue par des canalisations fixes posées sur le fond marin.

I.5.2. Ports fluviaux

Les ports fluviaux, ou ports intérieurs (Figure I.2), sont situés sur le bord d'un fleuve, d'une rivière ou d'un canal. Ils sont souvent aménagés sur un bras mort, une dérivation ou un élargissement naturel du cours d'eau afin d'éviter que le courant ne gêne les activités portuaire ; certains ports fluviaux sont créés artificiellement en creusant la terre pour créer des bassins accessibles depuis le fleuve. Les grands ports fluviaux sont souvent près des embouchures (entrée d'un fleuve dans la mer) de grands fleuves, accessibles à des navires venant de la mer ; on peut donc les considérer comme des ports maritimes au vu de leur trafic. La distinction peut devenir difficile à proximité de l'embouchure.



Figure I.2. Un port fluvial

I.5.3. Ports lacustres

Ils sont situés en bordure d'un lac. S'ils ne sont pas soumis aux aléas des marées, les vagues peuvent poser problème sur les grandes étendues d'eau. Les ports lacustres comprennent les petites marinas au bord des lacs de montagne mais également les grands ports de commerce sur les Grands Lacs. (Figure I.3)



Figure I.3. Le plus grand port lacustre d'Europe (Port de Chevroux en suisse)

I.5.4. Ports à sec

Relativement récents (apparus dans les années 1960 aux États-Unis), les ports à sec permettent le stockage à terre de petites unités telles que les voiliers de plaisance et les yachts. Ces « ports » sont situés à proximité d'un port de plaisance ou au moins d'une cale de mise à l'eau.



Figure I.4. Le plus grand port à sec en Europe (Port Navy Service en France)

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

I.5.5. Ports de commerce

Les ports de commerce servent à accueillir les navires de commerce : ceci inclut le trafic de passagers sur les ferries et les paquebots et le transport de marchandises pour les navires cargo (Figure I.5). Les marchandises peuvent être liquides (pétroliers, chimiquiers) et nécessiter des réservoirs et tuyauteries dédiées ; ou solides, en vrac (vraquiers, nécessitant des silos ou des espaces de stockage) ou emballées : cargos mixtes ayant besoin d'entrepôts et de grues, ou les porte-conteneurs avec les grands espaces de stockage associés. Les cargaisons roulantes (pour les rouliers) ont besoin de zones d'attente, éventuellement de parkings. Outre les espaces de stockage et les moyens de manutention nécessaires, un port de commerce inclut aussi des liaisons routières et ferroviaires, voire fluviales, avec la terre ; des bassins destinés à la réparation, un dispositif de séparation du trafic...



Figure I.5. Un port de commerce

I.5.6. Ports de pêche

Les ports de pêche sont les plus nombreux dans le monde, et ont souvent les dimensions les plus réduites. Celles-ci varient selon les bateaux accueillis : les chalutiers de haute mer partant pour plusieurs semaines auront besoin de plus d'espace de quai en revenant décharger leur cargaison, tandis que les petits bateaux de pêche partant à la journée auront besoin de pouvoir décharger rapidement pour la criée.

L'infrastructure est plus simple que pour un port de commerce (voir Figure I.6): quelques quais ou pontons, une station de ravitaillement, et un moyen de vendre le produit de la pêche

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

(marché à proximité), et éventuellement de le traiter avant la vente si cela n'a pas été fait sur le bateau.



Figure I.6. Port de pêche de Dellys (Boumerdes)

I.5.7. Ports de plaisance

Les ports de plaisance (Figure I.7) accueillent les bateaux de plaisance, de loisir et de compétition, à voile et à moteur. La plupart des bateaux sont de petite taille (inférieur à 20 m), et les places de port sont standardisées grâce à des pontons ; différentes techniques d'amarrage sont utilisées selon les endroits. On y trouve une capitainerie, différents services d'avitaillement, de mise au sec et de réparation, une pompe à carburant, et divers services pour les équipages. Ces ports sont souvent situés près du centre des villes pour des raisons touristiques et pratiques (facilité d'accès et d'avitaillement).



Figure I.7. Port de plaisance

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

I.5.8. Ports militaires ou base navale

Accueillent les navires de guerre. Certains ports sont ouverts , mais d'autres, notamment les bases de sous-marins, sont fermés et interdits au public pour des raisons de sécurité. Un port militaire peut inclure un arsenal, une école navale, un chantier de réparations, des moyens de ravitaillement, de logement et d'entraînement pour les équipages. Certains navires militaires, comme les patrouilleurs, peuvent être basés dans d'autres types de ports.

I.6. Ports en Algérie

L'Algérie dispose d'un littoral long de plus de 1280 Km, et d'une infrastructure portuaire comprenant quarante deux (41) ports en service, dont :

- **11 ports de commerce** : Annaba, Skikda Ouest, Djen Djen, Béjaïa, Dellys, Alger, Ténès, Mostaganem, Oran, Arzew ancien et Ghazaouet.
- **02 ports spécialisés en hydrocarbures** : Skikda Est et Béthioua.
- **27 ports et abri de pêche** : Ancien port d'El Kala, Chetaïbi, El Marsa (Skikda), Stora, Collo, Ziamma mansouriah, Azeffoun, Zemmouri El Bahri, El Marsa (Alger), El Djamila, Bouharoun, Tipaza, Cherchell, Gouraya, Béni Saf, Bouzedjar, Honaine, Boudis Khemisti, Béni Haoua, Sidi Lakhdar, Tigzirt et six ports à l'intérieur des ports de commerce.
- Un **(01)** port de plaisance à Sidi Fredj.
- cent quatre vingt **(180)** feux de signalisation maritimes dont vingt cinq **(25)** phares en service ainsi que des ouvrages de défense côtiers.

I.6.1. Exemples des ports Algériens

- **Port de Béjaïa**

Position géographique du Port de Béjaïa

Latitude Nord : 36° 45' 24"

Longitude Est : 05° 05' 50"

Situation géographique

Le port de Béjaïa (Figure I.8) est un port mixte (port pétrolier, commercial et un quai pêcheur) situé à environ 1,5 Km au sud du Cap Carbon. Il a été construit en deux étapes:

- entre 1898 et 1922 pour le port commercial et;
- entre 1958 et 1960 pour le port pétrolier.

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

La situation géographique du Port de Béjaïa offre des commodités exceptionnelles:

Il se trouve à quelques minutes seulement d'un Aéroport international (5 Km). La gare ferroviaire est localisée dans le même site que le Port, ce qui offre, entre autres, des facilités en matière de transfert de marchandises de toute nature vers d'autres destinations. Des infrastructures routières relient la ville de Béjaïa à l'arrière pays.

Le port de Béjaïa présente 2.8 Km de quai avec une capacité de production de 2.800 T/an en matière de pêche et 10.985.920 T/an pour le commerce.



Figure I.8. Port de Bejaïa

➤ Port de Gouraya (Tipaza)

Le port de Gouraya a été réalisé en 1999, c'est un port de pêche, de production annuelle de 130 T. Il présente 150 ml de quai. (Figure I.9)



Figure I.9. Port de Gouraya (Tipaza)

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

➤ Port de Djen Djen (Jijel)

Le port de Djen Djen est situé sur la côte méditerranéenne à 285Km à l'Est d'Alger et à 10 Km à l'Est de Jijel, à l'embouchure de l'Oued Djen Djen dont il porte le nom (Figure I.10). C'est une infrastructure portuaire moderne (1985-1991) avec 2 Km de quai extensibles à 4 ou 5 Km et des profondeurs variant de 10.5 à 20 m.



Figure I.10. Port de Djen Djen (Jijel)

➤ Port de Zemmouri (Boumerdes)

Le port de Zemmouri El Bahri est un port de pêche qui a été construit en 1987, il a 365 ml de quai et une capacité de production de 12 904,07 T/an. (Figure I.11)



Figure I.11. Port de Zemmouri

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

➤ Port d'Alger

C'est le plus important port de marchandises générales avec près de 10 Km de quai à des profondeurs variant de 7 à 11 m. (Figure I.12)



Figure I.12. Port d'Alger

➤ Port de Sidi Fredj (Alger).

Le port de Sidi Fredj est le seul port de plaisance en Algérie (Figure I.13), il a été construit en 1974. Il est composé de :

- Une jetée principale de 230 ml ;
- Une jetée secondaire de 215 ml ;
- Un quai et un appontement de 777 ml ;
- Une capacité de 400 plaisanciers.



Figure I.13. Port de Sidi Fredj

I.7. Réalisation des types d'ouvrages maritimes

Les principaux types d'ouvrages maritimes sont les ouvrages poids, dont la stabilité est assurée par leur poids propre grâce au frottement qu'ils mobilisent au niveau de l'interface avec le sol de fondation. Nous distinguons principalement les digues et les quais.

I.8. Digues

Elles protègent l'avant-port contre l'agitation due à la houle et sont conçues pour résister à l'assaut des vagues.

Trois types d'ouvrages sont utilisés :

➤ La digue à talus

Constituée par un noyau de petits enrochements, recouvert par des couches de blocs de plus grande taille, et du côté mer par une carapace en gros blocs naturels ou artificiels (en béton), capable de résister aux efforts imposés par le déferlement des houles sur le talus. (Figure I.14) L'ouvrage est couronné par une structure massive en béton, arasée à un niveau assez élevé au-dessus de celui de la mer pour éviter son franchissement par les houles déferlantes.

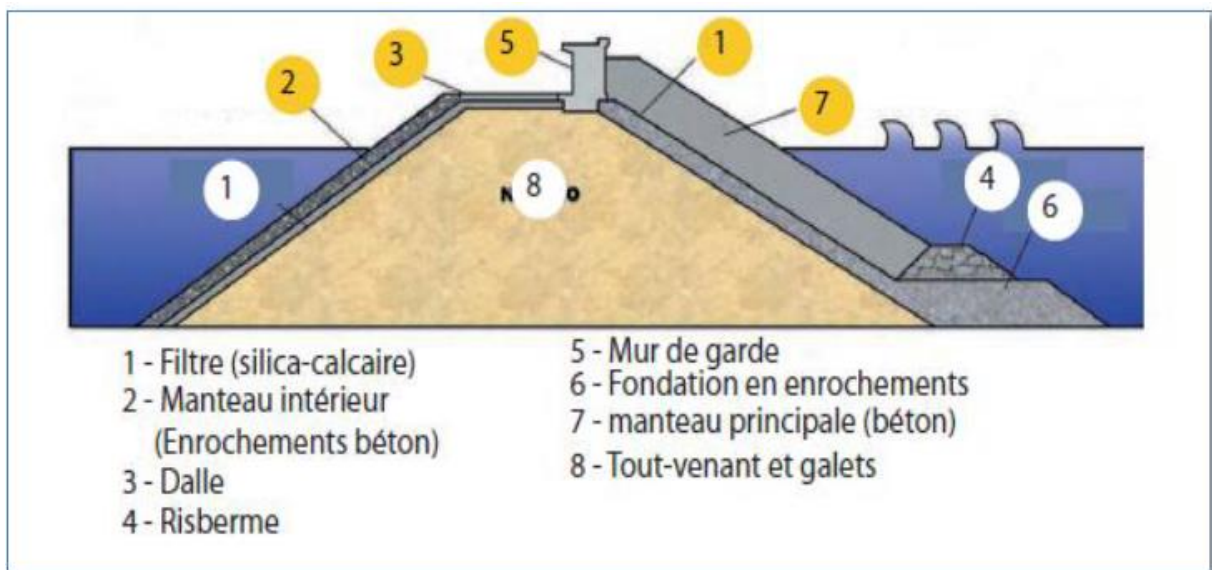


Figure I.14. Schéma d'une digue à talus

➤ Digues verticales

Sont constituées par une muraille de grande hauteur, faite de gros blocs de béton (supérieurs à 100 tonnes) empilés et liaisonnés par des puits verticaux remplis de béton légèrement armé, ou par des caissons de béton armé remplis de béton maigre ou d'enrochements.

Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

Cette muraille est fondée sur un massif d'encrochements. Ses dimensions doivent en assurer la stabilité et éviter qu'elle soit franchie par la houle qui, en se réfléchissant sur la paroi, forme un clapotis d'amplitude double.

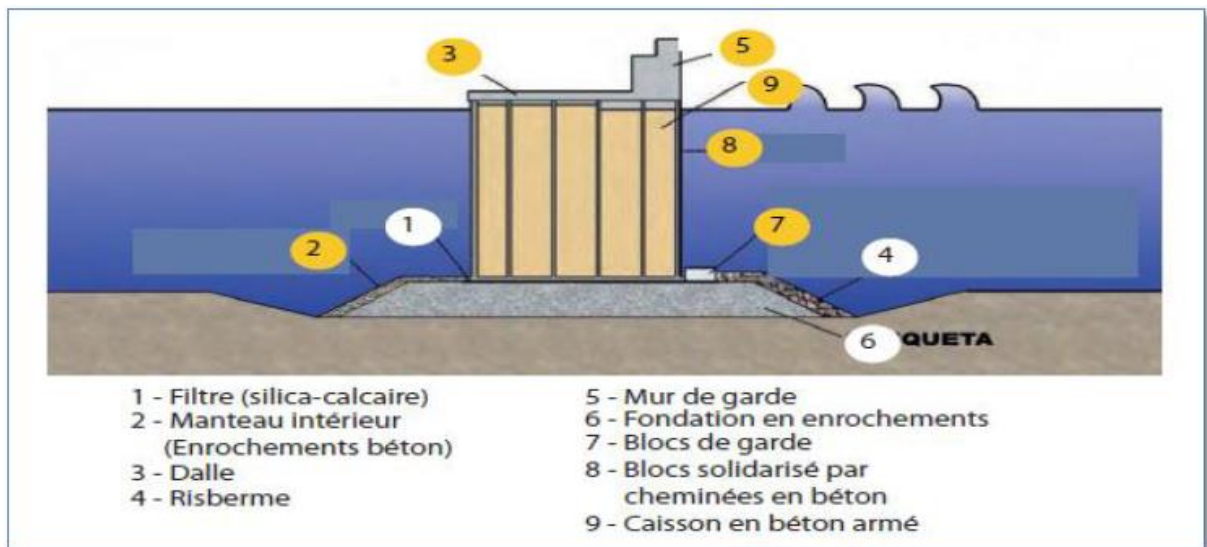


Figure I.15. Schéma d'une digue verticale

➤ Digues mixtes

Procèdent de l'un et l'autre des types précédents, la muraille et le talus du soubassement devant être déterminés pour résister aux efforts des houles déferlantes. Dès que l'amplitude des houles auxquelles elles sont exposées est forte (plus de 4 m) et que la profondeur est importante (supérieure à 20 m), les digues sont des ouvrages très onéreux : leur coût varie sensiblement comme le carré de leur hauteur.

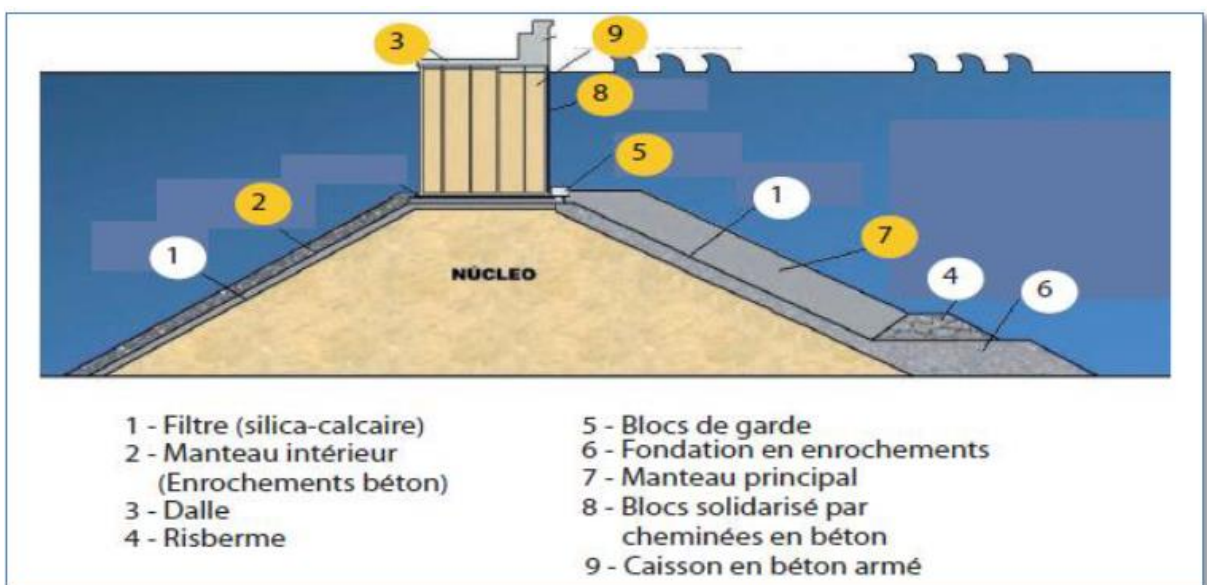


Figure I.16. Schéma d'une digue mixte

I.9. Définition d'un quai

Par définition un quai est un ouvrage intérieur du port qui assure les fonctions essentielles que sont :

- Se munir d'un dispositif d'appui pour permettre l'accostage et l'amarrage des navires
- Assurer une liaison entre la terre et le navire qui est assurée par un terre-plein des quais.

Le dispositif de liaison supporte donc une partie ou tout le matériel de manutention servant à la réception et au transport des marchandises ou les voyageurs.

- Soutenir les terres à la limite de l'eau : ce soutien des terres peut faire intervenir l'ouvrage lui-même ou un ouvrage accessoire, par exemple un talus d'enrochement. La liaison n'est pas seulement assurée par l'ouvrage d'accostage mais aussi par les Terre-pleins situés en arrière de l'ouvrage.

I.9.1. Type de quai

Ils existent plusieurs types de quai suivant leurs conditions de mise en œuvre et la possibilité d'exécution. Certains sont fondés en surface, en fonction des conditions géotechniques du site, et d'autres en profondeur.

Les différents types de quai peuvent être résumés comme suit :

- Quai poids
- Quai sur pieux
- Quai rideau mixte (quai danois)
- Quai en rideau de palplanche (quai léger)

a) Quais poids

Ces types de quais sont réalisés sur un sol de bonne portance (sols rocheux, galets, sable compact...) ; la résistance aux poussées est obtenue grâce au seul poids de l'ouvrage. Ce sont des ouvrages massifs, dont la géométrie s'inscrit le plus souvent dans un trapèze dont la base mesure entre 60 et 70% de la hauteur.

Les quais poids, suivant leur mode de mise en place et les matériaux constituant l'ouvrage présentent plusieurs variantes : (voir Figure I.17)

- Quais en maçonneries de pierre ou en béton coulé sur place (A)
- Quais en blocs de béton préfabriqués (B)
- Quais en caisson (C)
- Quais en voiles de béton armé, raidis, sur semelle
- Quais en gabions de palplanches plates (mur en L) (D)

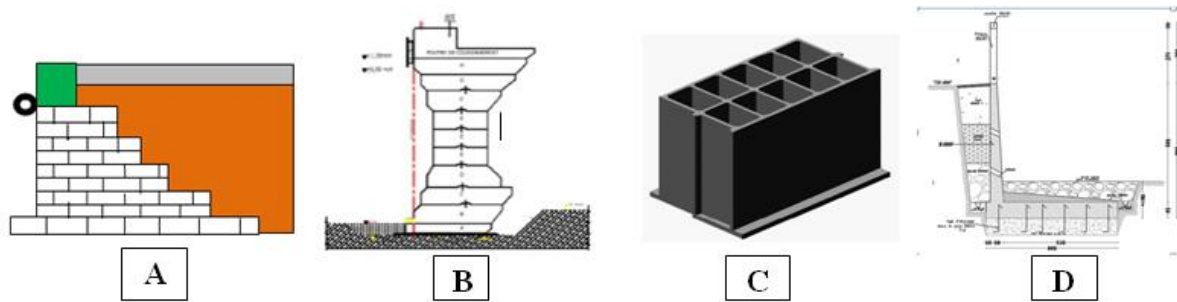


Figure I.17. Différents types de quais-poids

b) Quais sur pieux

Les quais constitués par une plate-forme en béton armé supportée par des pieux (ou piles) en béton ou en acier, sont utilisées quand le terrain naturel est constitué d'une couche de mauvaise qualité sous laquelle existe une couche de terrain de portance suffisante à une profondeur pas trop importante.

Des pieux inclinés et la butée offerte par la partie supérieure du remblai permettent de mobiliser une force horizontale suffisante pour équilibrer l'effort engendré par l'accostage et l'amarrage des navires. (Figure I.18)

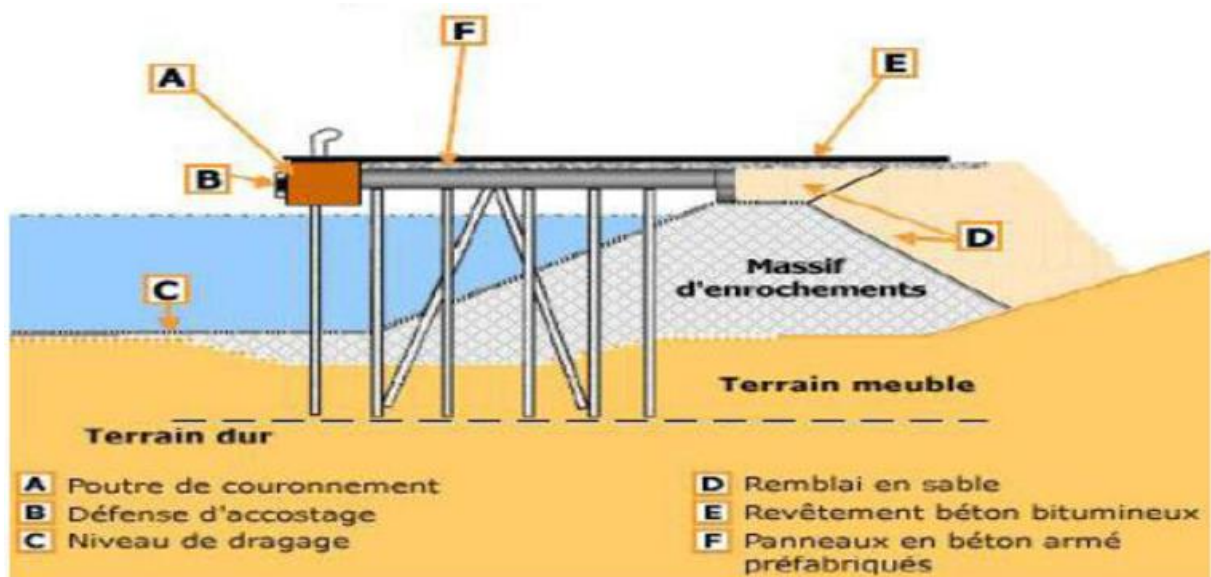


Figure I.18. Quai sur pieux

c) Quais à rideau mixte ou quais Danois

Le quai danois (Figure I.19) est constitué d'un rideau de palplanches et d'une plate-forme en béton armé fondée sur des pieux en béton ou en acier.

La résistance aux efforts d'accostage est assurée par la poussée du remblai contre le rideau et, éventuellement, par la réaction horizontale des pieux inclinés. Les efforts verticaux sont équilibrés par les réactions verticales des pieux qui supportent la plate-forme et, éventuellement, des tubes métalliques insérés dans le rideau de palplanches.

Ces quais sont indiqués quand le sol de fondation est de qualité moyenne et qu'il existe une couche de terrain de bonne résistance à une profondeur raisonnable.

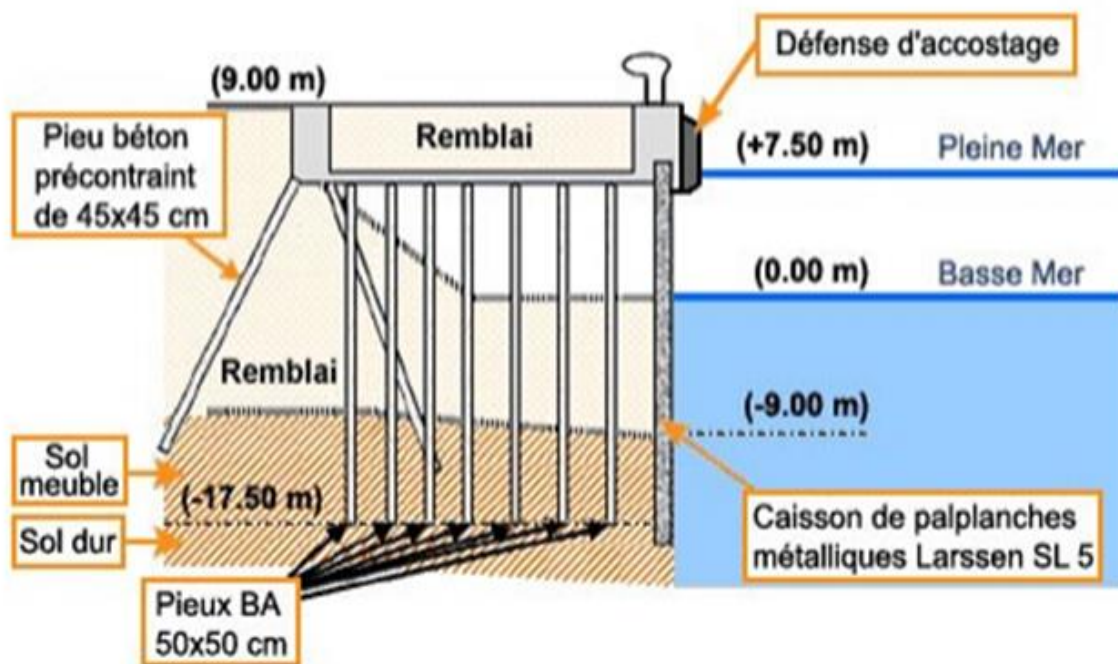


Figure I.19. Quai Danois

d) Quai en rideau palplanches

Les quais constitués par un rideau de palplanches métalliques ancré sur un rideau arrière, sont utilisés lorsque le terrain naturel offre une portance insuffisante pour supporter un ouvrage massif, mais possède des caractéristiques géotechniques permettant d'offrir une butée au pied du rideau (côté bassin) capable d'équilibrer la poussée du remblai (Figure I.20). C'est le cas des sols sableux, de marnes ou d'argiles suffisamment compactes.

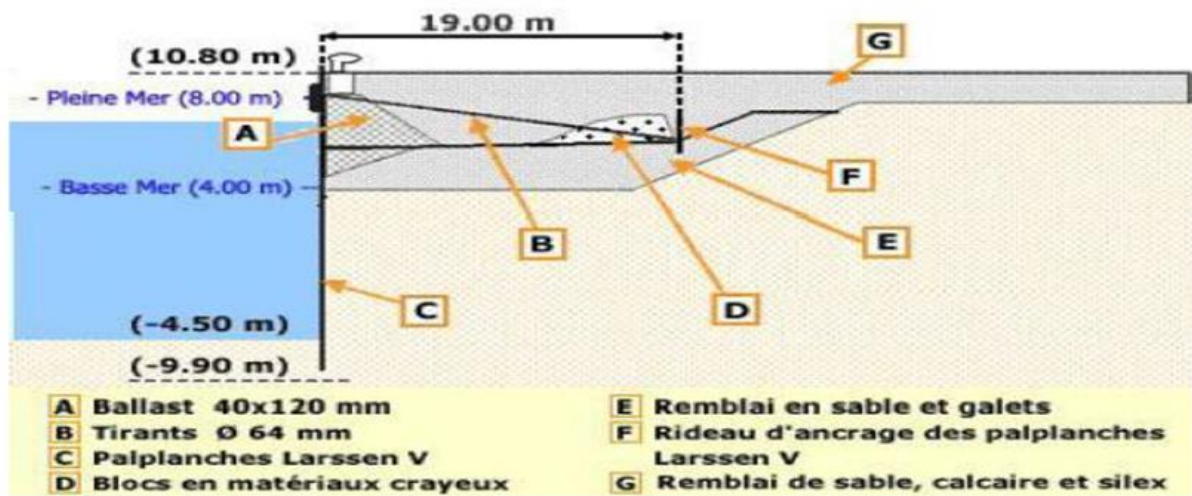


Figure I.20. Quai en rideau de palplanches

I.9.2. Efforts agissants sur les quais

Le calcul de stabilité des ouvrages d'amarrage doit tenir compte d'une multitude d'efforts horizontaux et verticaux auxquels peut être sujet n'importe quel type de mur de quai. Ces efforts sont pourtant variables, d'une heure à l'autre, d'une journée à la suivante et d'une saison à l'autre.

C'est pourquoi un calcul fiable et précis doit prendre en considération les situations les plus critiques auxquels sont exposés les murs de quai. Des situations où le plus grand nombre d'efforts s'applique en même temps sur l'ouvrage, risquent son instabilité ou peut être sa rupture.

Les ouvrages d'accostage sont sollicités par divers efforts, évalués dans l'ouvrage (CHAPON J, 1978) comme suit ;

I.9.2.1. Efforts horizontaux

a) Accostage

Un navire approche du quai à une certaine vitesse qui lui confère une énergie cinétique. L'accostage s'effectue donc avec un choc qui impose de violents efforts aux ouvrages. Les calculs tiennent compte de la dérive du navire, de sa taille, de l'utilisation des machines et de remorqueurs, la difficulté de calculs a conduit les autorités portuaires à réaliser des études statistiques basée sur des observations en vraie grandeur grâce à un système pour mesurer la vitesse de dérive du navire (radars à effet doppler).

b) Amarrage

Les amarres fixées sur le quai, imposent des efforts qui dépendent :

- Du vent sur le navire, effet de voile,
- De l'action du courant sur les œuvres mortes,
- De l'agitation du plan d'eau (passage de navire,...)

Ces efforts sont répartis sur l'ouvrage par une poutre longitudinale sur laquelle sont fixés les organes d'amarrage. Ces efforts ont pour direction à celle des amarres et dépendent donc des conditions locales, des caractéristiques du navire et de son amarrage. Ils doivent être calculés dans chaque cas en tenant compte du plan d'amarrage étudié.

c) Le vent

Le vent provoque des efforts sur les engins et les superstructures. Il est aussi l'origine de la houle, et les autres phénomènes.

d) La poussé des terres

Les terres (ou remblai) retenues par les ouvrages d'accostage sont caractérisé par les grandeurs suivantes :

- Angle de frottement interne,
- Cohésion du sol
- Poids volumique du sol à différent niveau

Les calculs de poussé sont complexes et des essais en laboratoire sont nécessaires. Nous allons proposer de calculer cette poussée avec la méthode de Rankine. La formule générale donnée par Rankine est la suivante :

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \times K_a \quad \text{I.1}$$

Avec :

H : La hauteur du remblai considéré agissant sur le mur

γ : masse volumique du remblai considéré

K_a : le coefficient de poussé de Rankine et est définie ainsi :

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad \text{I.2}$$

φ : angle de frottement du matériau de remblai utilisé

e) La surpression hydrostatique

Cette force est occasionnée par la présence de la nappe. Si la mer a un niveau, à quelque distance de l'ouvrage, qui est au moins celui du niveau moyen, il en résulte lorsque le niveau du plan d'eau est inférieur à celui de la nappe, des efforts agissants sur l'ouvrage d'accostage dans le même sens que la poussée des terres.

Le cas le plus critique alors, se présente quand le niveau de l'eau cote remblai coïncide avec la marée haute ($h=10,5\text{ m}$) alors qu'à l'autre cote du mur, coté de la mer, le niveau de l'eau est à son minimum correspondant à la marée basse ($h=9,5\text{ m}$). La pression hydrostatique se calcul par la formule générale de l'hydrostatique suivant : $P = \gamma_{\text{eau salée}} \times h$

γ étant le poids volumique de l'eau salée et h la hauteur d'eau

f) Les efforts sismiques

Les ouvrages construits dans des zones soumises à des séismes fréquents doivent être conçus pour résister aux effets des tremblements de terre. Pratiquement le calcul consiste à vérifier la stabilité de l'ensemble soumis à une accélération horizontal et vertical tenant compte de paramètre propre à la zone et de l'accélération de la pesanteur (oscillation pour les appontements, effet de cisaillement pour le quai).

I.9.2.2. Efforts verticaux

a) Poids de l'ouvrage

Le poids propre des ouvrages doit être réduit de la poussée d'Archimède, c'est la pleine mer qui donne les conditions de stabilité les plus sévères pour les ouvrages massifs ; la réduction du poids diminue le moment stabilisateur et augmente le risque de glissement horizontal.

b) Surcharge d'exploitation

Elles sont prises en compte dans la mesure où elles aggravent les conditions de calcul ; d'où la nécessité de tenir compte des poussées horizontales qu'elles induisent, même si ces surcharges ne sont appliquées que sur le terre-plein sans être pour autant appliquées sur l'ouvrage lui-même, cette distribution apparait souvent comme défavorable à la stabilité.

Voici quelques valeurs couramment admises pour les surcharges uniformément réparties sur la surface des ouvrages:

- 4 à 6 t/m² pour un trafic de marchandises diverses ;
- 6 à 20 t/m² pour les trafics pondéreux selon les conditions d'exploitation des installations.

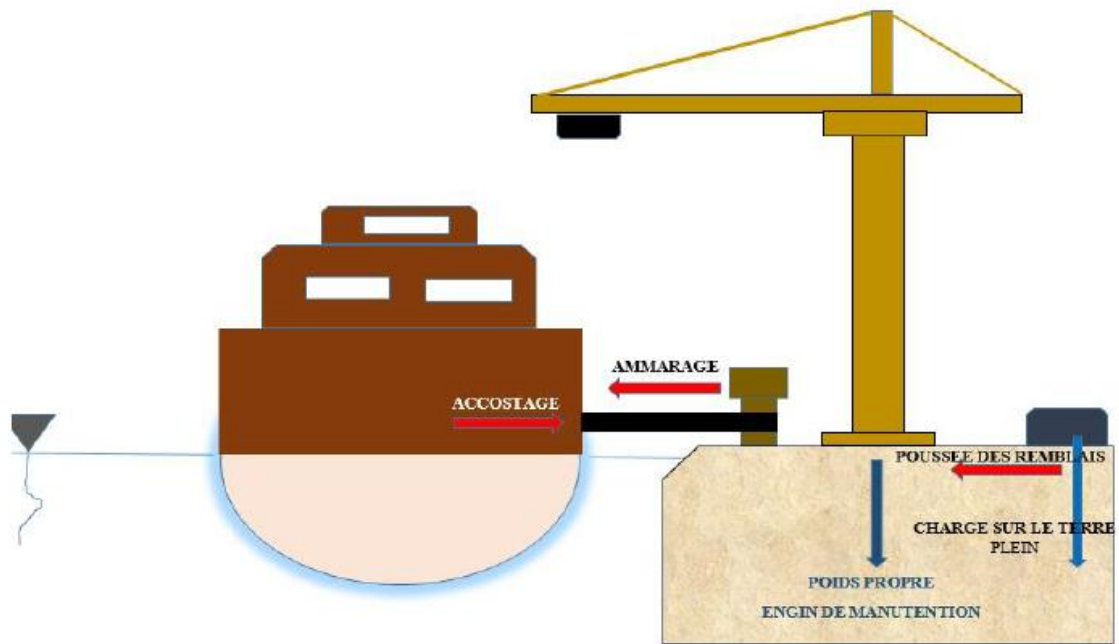


Figure I.21. Les forces agissantes sur le quai

I.9.2.3. Effort hydrodynamique

Une étude détaillée des vagues doit être établie afin de pouvoir estimer ses différentes caractéristiques, qui permettront de calculer les pressions et les efforts engendrés sur les murs de quai.

a) La Houle

La houle est produite par l'action du vent à la surface de l'eau : lors d'un coup de vent, la surface de la mer se couvre des rides, puis l'intensité du vent augmente, la déformation de la surface s'accroît, en formant des ondulations d'aspect désordonnée, sans qu'il soit possible de distinguer une propagation dans une direction déterminée (agitation à trois dimensions) ; si le vent persiste, les vagues se forment et progressent dans la direction où souffle le vent ; l'agitation tend à devenir un phénomène à deux dimensions en donnant une houle cylindrique.

b) Les courants généraux

Les courants généraux sont formés par :

- Des forces extérieures au milieu marin, par exemple les vents et les tempêtes de mer.
- Des forces intérieures au milieu marin (différence de salinité ou de température à l'intérieure de la mer).

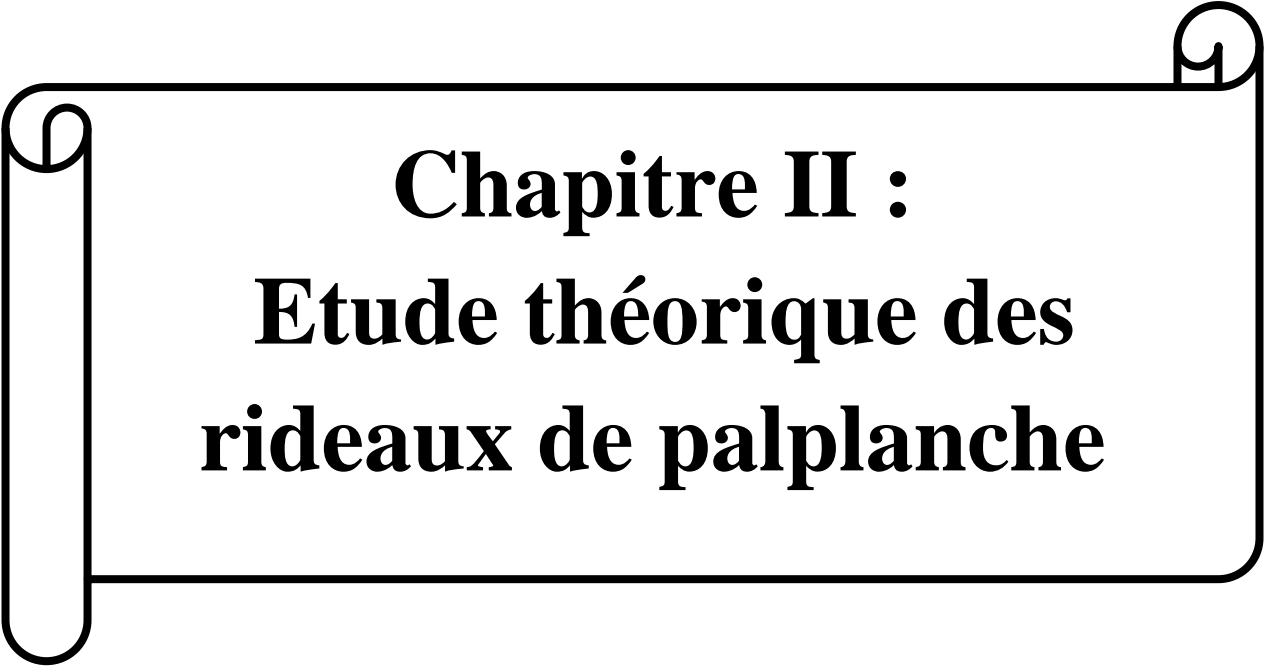
Chapitre I. Généralités sur les ports maritimes

Les courants dus aux vents des tempêtes peuvent se superposer au mouvement de la marée, et produire d'importance surélévation du niveau de la mer. En raison de leurs faibles vitesses, les courants généraux ont le plus souvent une faible influence sur le régime des côtes, mais ils conditionnent les climats des régions côtières.

Il est donc vraiment important de faire une étude hydrodynamique pour la conception d'un mur de quai. L'augmentation ou diminution de niveau de la mer (marée) peut entraîner l'instabilité du mur, en provoquant son effondrement.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, consacré aux généralités sur les ouvrages portuaires, on a montré les différents types d'ouvrages portuaires et les éléments qui les constituent, on a fait aussi la description des rôles que joue le port dans l'économie d'un pays. Pour le cas des ouvrages portuaires algériens, dont on a présenté quelques exemples, il est à signaler que l'infrastructure portuaire algérienne reste très en deçà des normes mondiales. Ainsi on a fini par présenter les fonctions d'un quai et décrire les forces qui lui sont appliquées.



Chapitre II :
Etude théorique des
rideaux de palplanche

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

II.1 Introduction

On réalise des murs de quai légers au moyen de palplanches : en bois, en béton armé ou mieux encore en acier. Ce sont des ouvrages courants. Ils ont maintenus en tête par un ou plusieurs lits de tirants fixés à un contre-rideau ou ancrés dans la partie résistante des sols. On peut rencontrer aussi dans d'autres cas des rideaux sans tirants d'ancrages. (Figure II.1)

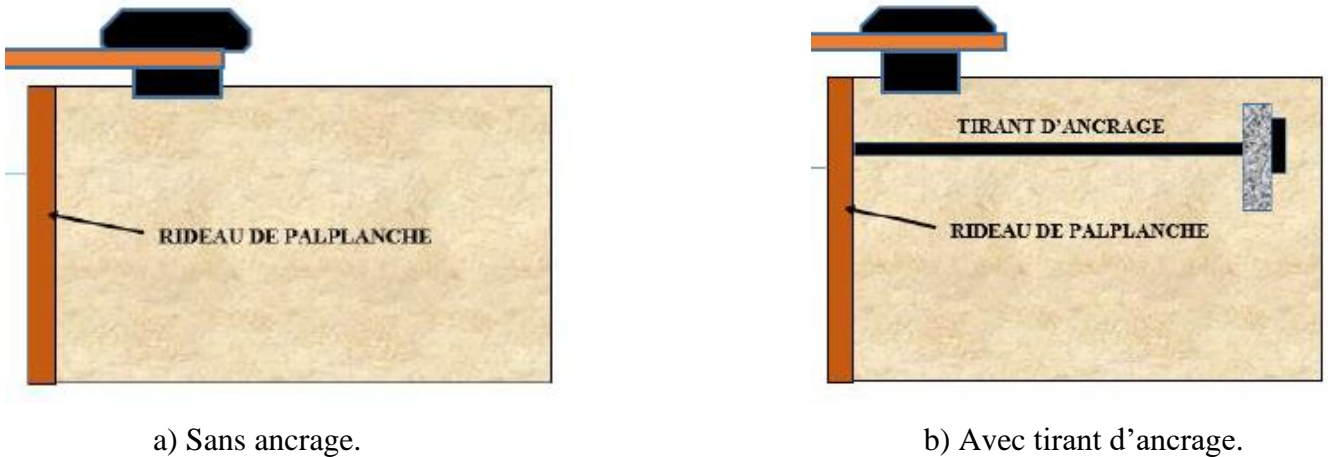


Figure II.1. Rideau de palplanches

Les murs en palplanche sont utilisés lorsque le terrain offre une portance insuffisante pour supporter un ouvrage massif, mais possède des caractéristiques géotechniques permettant d'offrir une butée au pied du rideau (cote bassin) capable d'équilibrer la poussée du remblai c'est le cas des sols sableux, de marnes ou d'argiles suffisamment compactes.

II.2. Définition des palplanches

Une palplanche (composé de pal et planche) est un pieu conçu pour être battu en terre en s'enclenchant aux pieux voisins par l'intermédiaire de nervures latérales appelées serrures. Les murs en palplanches font partie des plus anciens systèmes de retenue de terre utilisée en génie civil. Les palplanches permettent de constituer un mur de soutènement, un batardeau, une palée ou un écran imperméable. Les rideaux qu'elles constituent sont assimilables à des murs ou des parois supportant la poussée des terres en place, ou des remblais et des dénivelés d'eau.

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

On distingue :

- Les palplanches à module ou à inertie.
- Les palplanches plates

Les premières se comportent comme des poutres verticales, mobilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les poussées dues aux dénivellations de terrain et d'eau (palplanche larsen).

Les secondes permettant de réaliser des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les poussées engendrent des tractions importantes dans les joints, ces derniers sont, de ce fait, conçus pour résister à ces efforts.

II.3. Types des palplanches

Les palplanches peuvent être construites en plusieurs types de matériaux (acier, aluminium, bois, béton armé, PVC etc.).

a) Palplanches en bois

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois, il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait en terre pour former un encaissement dans l'eau (palplanches). La technique des écrans de soutènement consistant à opposer à la poussée des terres des éléments de structure fichés dans le sol et résistants à la flexion a fait, dans un premier temps, appel à des pieux en bois juxtaposés les uns aux autres de façon à constituer un écran continu.

b) Palplanches en béton armé

Au début du XXe siècle, les palplanches en béton armé ou en acier se sont inspirées des palplanches en bois. L'emploi des palplanches en béton armé ne connaîtra pas de réel développement, du fait du poids de ces structures, de leur fragilité, des difficultés de battages qu'elles présentaient ainsi que des difficultés d'étanchement des joints entre palplanches.

c) Les palplanches métalliques

Une palplanche métallique est une barre d'acier généralement en "U" ou en "Z" plantée dans le sol et qui s'emboîte avec les barres voisines grâce à des nervures latérales. Leur caractéristique essentielle est que le soutènement ainsi formé est souple et étanche.

Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, S, caisson et de palplanches plates avec agrafes incorporées ou indépendantes. À quelques nuances de dimensionnement près, tous ces types de palplanches sont produits par les fabricants

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

mondiaux, mais la forme et les performances des joints restent une de leurs principales particularités.

Les palplanches métalliques, généralement profilés à froid, sont des éléments incontournables dans les domaines de la construction fluviale ou terrestre. Utilisées généralement pour le renforcement des berges ou protection anti batillage. Leurs caractéristiques et leurs propriétés se prêtent également à d'autres types d'applications telles que le blindage de fouille, les parois principales les contres rideaux de murs de soutènement. La mise en œuvre des palplanches profilées à froid est rapide et s'effectue avec une équipe restreinte par les techniques de fonçage habituelles.

Ces palplanches se présentent sous les formes suivantes :

Profilés en Z

Profil économique, rapide à installer, offrant un excellent équilibre entre résistance et faible poids, ainsi qu'un moment d'inertie élevé, ce qui minimise les déformations (Figure II.2). Les profilés sont fréquemment employés pour la fabrication de palplanches ondulées et de palplanches soudées combinées, ainsi que pour le renforcement des berges et pour servir de culées de pont en porte-à-faux. Pour les excavations elles sont considérées comme un type parfait en termes d'étanchéité. Ils s'utilisent principalement pour reprendre les efforts de flexion du fait de la continuité de l'âme dans le rideau et de la position spécifique des serrures qui sont symétriques par rapport à l'axe neutre. De nos jours elles sont considérées comme l'un des palplanches les plus efficaces et les plus opérationnels disponibles (ESKANDARI & KALANTARI, 2011).

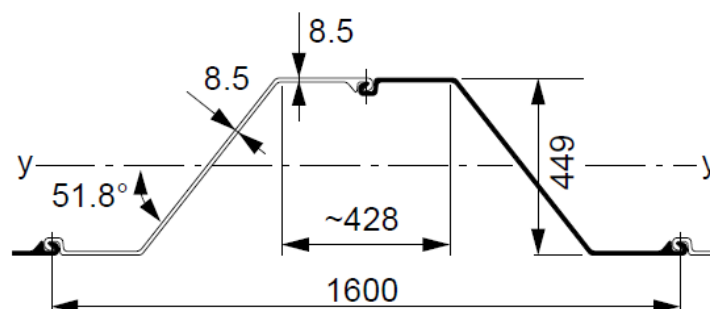


Figure II.2. Palplanche double en Z (Palplanche AZ 800, ARCELORMITTAL, 2022)

Avantages des profilés en Z :

- moment d'inertie élevé limitant les déformations ;
- grande largeur, autorisant des cadences de fonçage remarquables ;

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

-bonne résistance à la corrosion, l'épaisseur d'acier est maximale aux points les plus critiques.

Profilés en U

Ils sont utilisés, beaucoup plus, grâce à leur diversité et de leurs systèmes d'attaches hautement étanches, offrant une bonne résistance à la corrosion favorisée par l'épaisseur d'acier aux points critiques. (Figure II.3)

Ces profilés sont souvent utilisés pour un battage dans un espace réduit et peuvent être réutilisés facilement grâce à leur forme symétrique pour reprendre les efforts de flexion. (ARCELORMITTAL, 2022)

Avantages des profilés en U :

- gamme étendue de profils de caractéristiques géométriques différentes ;
- possibilité de les solidariser par paires en usine, ce qui permet d'améliorer le rendement et la qualité de mise en œuvre ;
- fixation aisée des tirants et des systèmes d'attaches articulés.

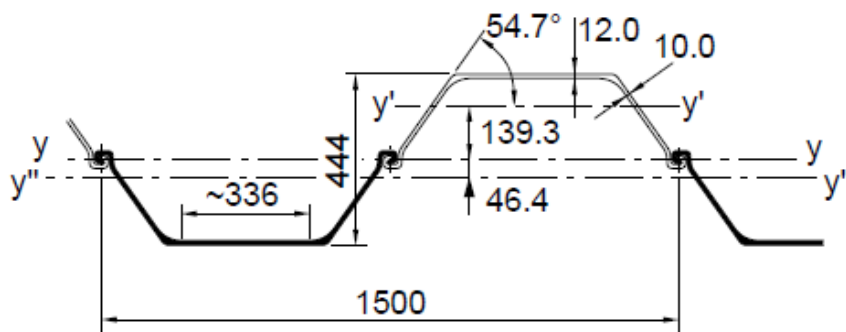


Figure II.3. Palplanche en U (Palplanche AU 20, ARCELORMITTAL, 2022)

Rideaux mixtes (HZ/AZ)

Le rideau HZ/AZ est un rideau mixte constitué :

- d'éléments principaux profilés HZ utilisés comme éléments porteurs,
- de palplanches doubles AZ utilisées comme éléments intercalaires.

Les éléments porteurs sont constitués d'un (Figure II.4(a)) ou deux profilés HZ (Figure II.4(b)), alternant avec des palplanches doubles AZ intercalaires.

L'assemblage systématique de ces éléments de base permet une multitude de combinaisons. (Figure II.4(c)).

Du point de vue de la stabilité, les éléments principaux remplissent deux fonctions :

- celle d'éléments de soutènement, reprenant à la fois les efforts horizontaux exercés par le sol et par la pression hydrostatique.

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

- celle de pieux reprenant les efforts verticaux de la superstructure.

Les palplanches intermédiaires remplissent quand à elles uniquement une fonction de soutènement et de redistribution des efforts. Elles peuvent être plus courtes que les éléments principaux des rideaux. Selon la combinaison et la nuance d'acier retenues, le rideau HZ peut reprendre en toute sécurité des moments fléchissants supérieurs à 21000 kNm/ml. (ARCELORMITTAL, 2022)

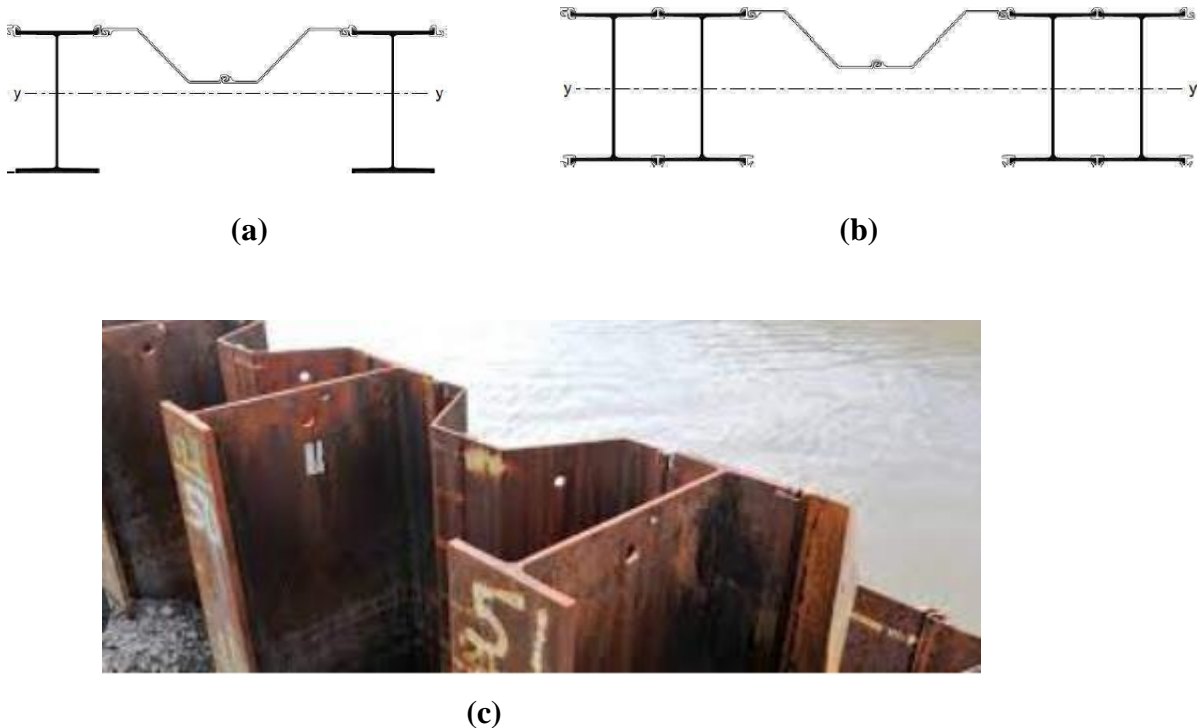


Figure II.4. Rideau mixte HZ/AZ (ARCELORMITTAL, 2022)

Les serrures

Les serrures ont initialement été réalisées en rapportant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage. Dans un deuxième temps la mise au point des procédés de fabrication permet d'usiner la serrure directement à partir du profilé principal. (Figure II.5)



Figure II.5. Serrure à la jonction de deux palplanches

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

II.4.Appuis

Les appuis de l'écran sont constitués par le sol en fiche et par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

a) La fiche

L'appui de la fiche provient de la capacité du sol à se mobiliser contre les déplacements de l'écran : mobilisation d'une butée dans le cas du mouvement de translation de l'écran, mobilisation d'une butée et contre-butée, et donc d'un encastrement dans le cas d'une rotation en fiche de l'écran. Les caractéristiques des sols de fondation, ainsi que la rigidité de l'écran et la dimension de sa fiche, déterminent le fonctionnement de cet appui en fiche.

La rigidité du sol de fondation et de l'écran, ainsi que la hauteur de la fiche déterminent d'une part la raideur de l'appui en fiche et, d'autre part, le type de l'appui mobilisé, appui simple ou encastrement. La résistance au cisaillement du sol de fondation ainsi que la hauteur de la fiche déterminent pour leur part la valeur de l'appui mobilisable.

b) Les tirants remblayés

L'ancrage des rideaux en palplanches est assuré à l'aide d'un ou plusieurs tirants, au niveau de sa partie libre dans le terrain situé en arrière du sol soutenu. Les tirants sont, soit des câbles métalliques, soit des tiges de fer de haute adhérence fixées à une extrémité au rideau de palplanches, à l'autre extrémité à un dispositif d'ancrage. Ils peuvent être inclinés ou bien horizontalement. La tête d'ancrage permet la transmission au rideau de l'effort d'ancrage dans le sol via l'armature du tirant. Divers types de dispositifs d'ancrage peuvent être employés, le plus souvent se sont, soit un deuxième rideau de palplanches (ou contre rideau), soit des plaques en béton disposées horizontalement, ou verticalement (plaque d'ancrage).

c) Les Butons

Les butons sont constituées de poutre en béton armé ou de profilés métalliques prenant appui sur des structures en vis-à-vis, comme cela peut être le cas pour les soutènements de tranchées ouvertes ou couvertes.

II.5.Eléments de rigidification

a) Liernes

La rigidité longitudinale d'un écran de palplanches est assuré par des liernes, profilés métalliques en I ou en U, disposés horizontalement, le long du rideau de palplanches, Ces liernes sont disposées régulièrement sur la hauteur de l'écran, auquel elles sont souvent fixées

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

par boulonnage. Elles sont en principe disposées au droit des ancrages et servent d'appui aux têtes d'ancrage.

b) Poutre de couronnement

Cette poutre assure plusieurs fonctions :

- Rigidification longitudinale de l'ouvrage ou chaînage.
- Transmission des efforts au rideau de palplanches.
- Protection de la partie apparente des palplanches, très concernée par la corrosion.

II.6. Définition de la poussée et de la butée

On considère un ouvrage de soutènement simple, par exemple un rideau de palplanches métalliques retenant un massif de sol (Figure II.6), et si on examine sommairement les types de sollicitations qui s'exercent sur ce mur. En dehors des forces de pesanteur, représentées par le poids W du mur, s'exercent sur les faces du mur, en contact avec le sol, deux forces dont la connaissance est du ressort de la mécanique des sols :

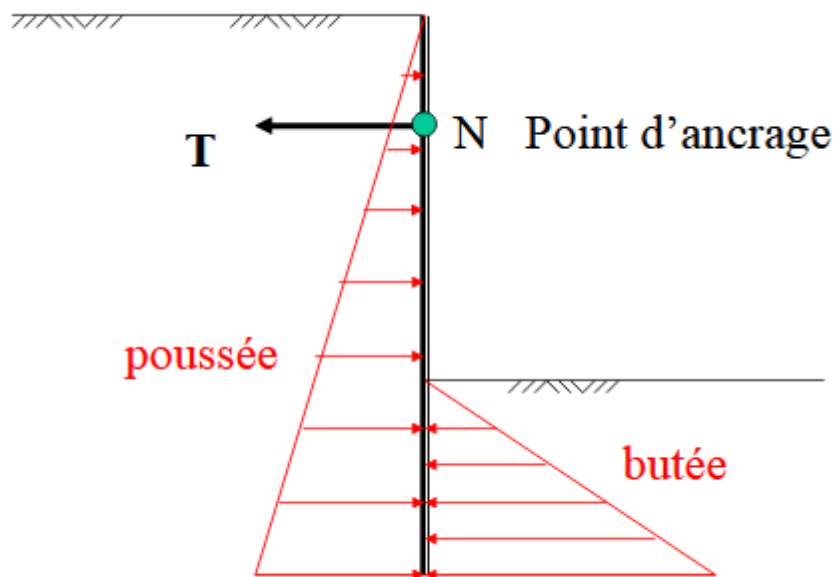


Figure II .6. Forces de poussée et de butée sur un écran de palplanches

- sur la face amont du mur, généralement verticale, le massif de sol retenu exerce des efforts ayant tendance soit à renverser le mur, soit à le déplacer horizontalement. La résultante générale de ces efforts est une force dont la composante principale est horizontale. On l'appelle force de poussée (ou encore poussée) et on la note F_a , l'indice a précisant qu'il s'agit d'une force active ;

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

- sur la face aval du mur, dont la partie enterrée est souvent faible, le sol exerce des efforts qui ont tendance à retenir le mur. Leur résultante générale est une force dont la composante principale est horizontale et opposée à la composante horizontale de F_a . On appelle cette résultante force de butée (ou encore butée) et on la note F_p , l'indice p précisant qu'il s'agit d'une force passive.

II.7. Principe de calcul de rideau de palplanche dans le sol

Les rideaux plans ont des rôles pour supporter les efforts tels que :

- la poussée hydrostatique.
- la poussée des terres avec charges fixes ou mobiles sur le terre-plein.
- les charges verticales directes.

Le rideau de palplanche est considéré comme une poutre verticale. L'objectif du calcul est de déterminer la longueur des palplanches, ainsi que de vérifier les déformations et les valeurs maximales des réactions d'attache ou d'appui.

Les forces appliquées au rideau comportent en particulier des poussées et des butées dues au terrain. Ces efforts ne sont connus que pour des équilibres limites de rupture du sol dans certaines conditions.

II.8. Méthode classique

On présentera les travaux réalisés suivant la première méthode décrite précédemment. Cette méthode utilise le critère de rupture et ne tient pas compte de la rigidité propre des rideaux. Cette méthode a l'avantage de simplicité. L'évaluation des efforts dans les murs de soutènement et en particulier les moments fléchissant maximaux est grossière. Ces efforts serviront au choix du type de mur. La méthode classique ne peut être utilisée qu'en avant projet ou en petits ouvrages. (JOSSEAUME.H, 1974)

II.8.1. Rideaux sans ancrage

La stabilité du mur est assurée uniquement par les réactions du sol sur la partie enterrée que l'on appelle la fiche, c'est le cas de la plupart des batardeaux.

La théorie classique considère que le rideau pivote autour d'un axe situé au dessus de son extrémité inférieure (voir Figure II.7.a et b).

- à partir du sommet du rideau et jusqu' au voisinage de l'axe de rotation, la distribution des contraintes est de Boussinesq.
- à partir de l'axe de rotation, la contrainte à droite augmente brusquement du fait de la contre-butée, mais à gauche au contraire elle tend assez vite vers zéro.

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

- Pour les besoins de calcul, on simplifie le schéma comme montré sur la Figure.II.7.c

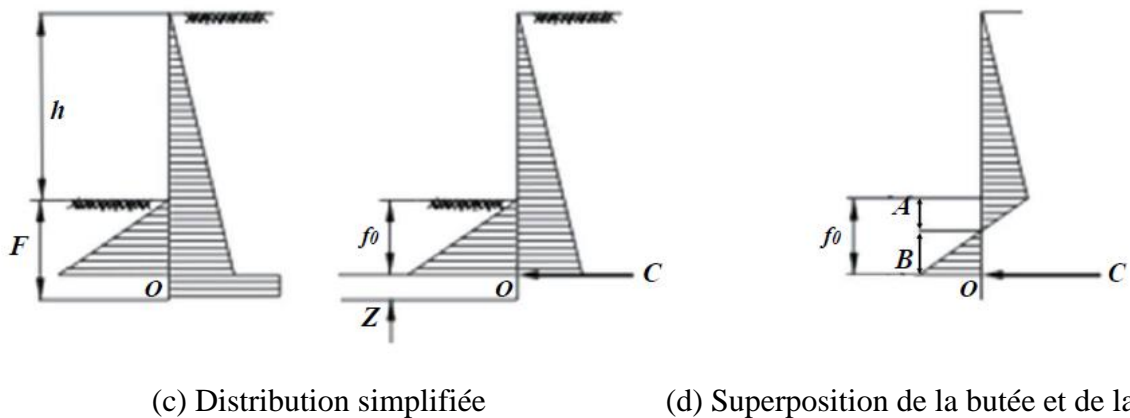
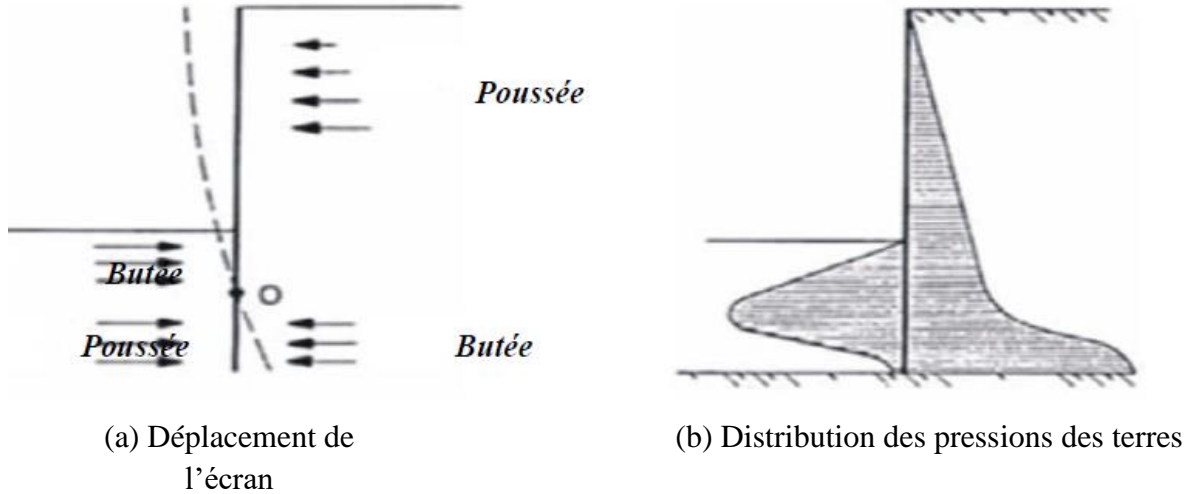


Figure II.7. Distribution des contraintes sur un mur de soutènement

On a un système est isostatique comportant deux inconnues f_0 et C

- La valeur de f_0 est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O , ce qui donne une équation du troisième degré en f_0 .
- La fiche totale est égale: $f = f_0 + z = f_0 + 0.2f_0$ (la contre butée est mobilisée sur une hauteur égale à 20% de la hauteur f_0 sur laquelle est mobilisée la butée) donc $f = 1.2f_0$.
- la contrebutée C s'obtient par la différence des forces de butée et de poussée.
- Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on considère que la butée n'est pas totalement mobilisée. Ce qui, dans les calculs, conduit à remplacer K_p par K_p/F_s tel que : ($F_s = 1.5$ à 2).

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

- Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant M_{max} dans l'écran à partir du diagramme des pressions de terres, ainsi le module de résistance W est calculé à partir de l'expression suivante, qui permet de choisir le type de palplanche.

$$W = \frac{M_{max}}{\sigma'_a}$$

σ'_a : la contrainte admissible de l'acier.

• Cas des rideaux fichés dans l'argile

Les rideaux fichés dans l'argile et supportant un remblai de sol pulvérulent, ou les rideaux foncés entièrement dans de l'argile avec dragage ultérieur, se calculent par des méthodes tout à fait analogues. Il faut cependant noter que pour l'argile, le calcul doit être fait à la fois à court terme ($C_u, \phi_u=0$) et à long terme (C', ϕ').

Ainsi l'étude d'un rideau battu dans une argile est plus complexe que celui d'un rideau battu dans un sable, puisqu'il faut tenir compte de l'évolution dans le temps du comportement de l'argile. À court terme, les efforts de poussée et de butée sont évalués à partir de la cohésion non drainée C_u du matériau. (Figure II.8.)

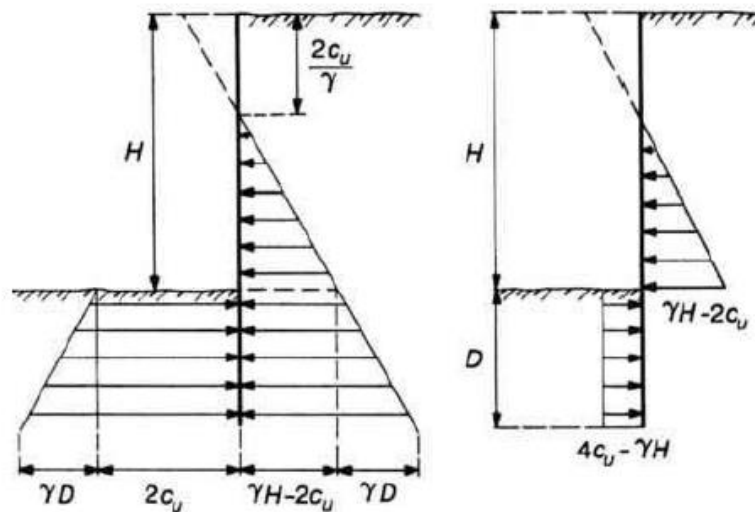


Figure II.8. Pression des terres à court terme sur un rideau battu dans l'argile.

II.9. Ecrans ancrés

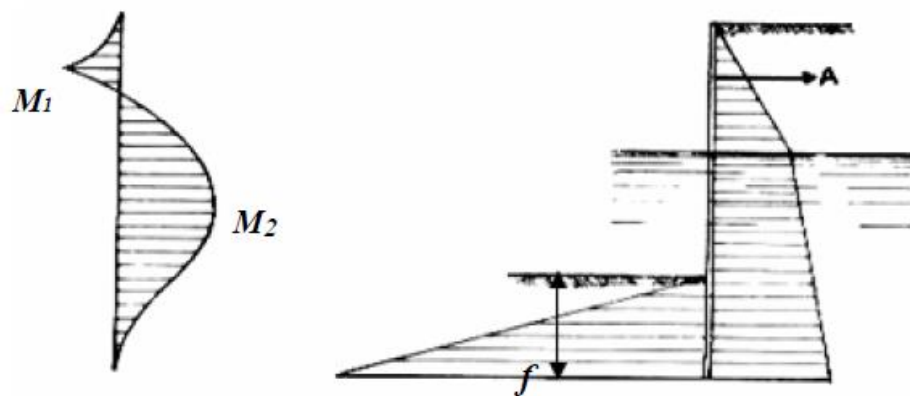
II.9.1. Ecrans simplement butés en pied (La méthode de la butée simple)

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le sol dans la partie inférieure de l'écran est incapable de produire des pressions passives nécessaires pour induire les moments négatives (contre butée), (voir Figure II.9b.).

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

On suppose que le mur est rigide et aucun point ne pivote au dessous du fond de fouille, c'est à dire, aucune résistance passive ne se développe derrière le mur. Les pressions des terres peuvent être calculées d'après la théorie de Coulomb ou d'autres méthodes (Rankine, Caquot/Kerisel). A l'aide de ces hypothèses, le calcul devient un problème isostatique comportant 2 inconnues la fiche f et l'effort d'ancrage A .

En écrivant que le moment résultant par rapport au point d'ancrage de l'ensemble des forces appliquées est nul, on élimine A et l'on obtient une équation du troisième degré en f .



(a) Moments fléchissant

(b) Contraintes

Figure II. 9. Rideau simplement buté en pied

La Figure.II.9a montre que le moment fléchissant maximal se produit le plus souvent vers le bas de la partie libre de la palplanche (moment M_2).

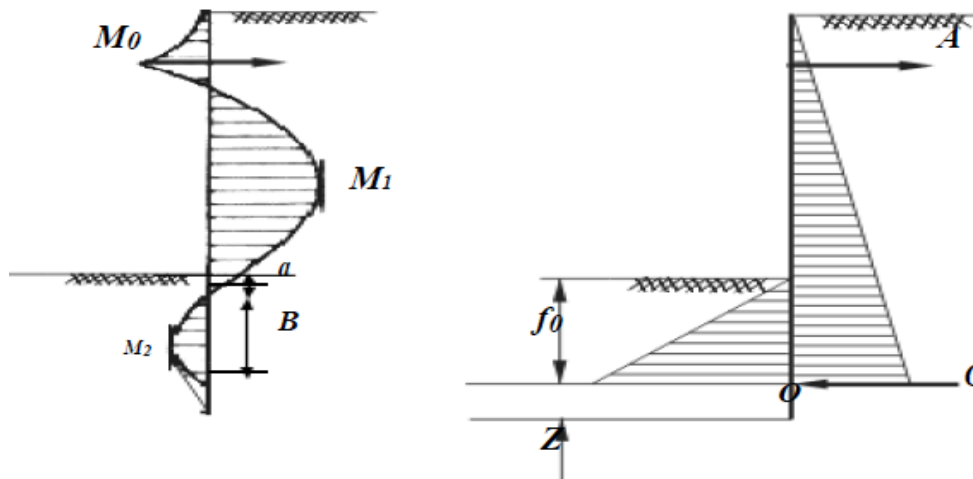
En ce qui concerne la méthode de la butée simple, deux variantes ont été utilisées :

- La première consiste à effacer la butée limite qui s'exerce sur la face externe de l'écran, d'un coefficient de sécurité $F_s=2$ et à retenir pour le dimensionnement les valeurs de la fiche f , du moment fléchissant maximal M_{max} et de la réaction d'appui A ainsi obtenues. Cette variante n'est applicable en toute rigueur que dans le cas des écrans parfaitement rigides et conduit à une surestimation de M_{max} et de A pour les écrans présentant une certaine souplesse.
- La seconde consiste à effectuer un calcul à l'état limite sans minoration de la butée limite ($F_s=1$) et à retenir pour le dimensionnement les valeurs du moment fléchissant maximal M_{max} et la réaction d'appui A ainsi obtenues ; la sécurité sur la fiche est obtenue en la majorant. Dans le cas des sols purement frottant, la fiche correspondant à l'équilibre limite est multipliée par $\sqrt{2}$.

II.9.2. Rideaux ancrés encastrés en pied

Le calcul des murs encastrés en pied a quelque analogie avec celui des murs sans ancrages (un mur sans ancrage est forcément encastré en pied). On utilise pour le calcul des rideaux ancrés la même distribution des contraintes que pour les murs sans ancrage avec les mêmes simplifications.

- On a un problème hyperstatique, puisqu'il y a trois inconnues : la fiche f , l'effort d'ancrage A et la contre butée C (voir Figure II.10).



a) diagramme de moment

b) Contraintes

Figure II.10. Schéma statique d'un écran ancré encastré en pied

II.10. Méthode de Blum (poutre équivalente)

La Figure II.10.a représente la distribution des moments fléchissant dans un écran encastré en pied, telle qu'on peut la calculer par la méthode de la ligne élastique. On constate qu'au point O situé légèrement en dessous du fond de fouille, le moment fléchissant est nul.

L'idée de Blum consiste à rendre le problème isostatique en fixant *a priori* la position de ce point O de moment nul.

En appliquant la méthode de la ligne élastique à de nombreux cas particuliers, Blum a établi une relation empirique entre la position du point de moment nul (déterminée par la longueur a de la Figure II.10.a et l'angle de frottement interne du terrain (voir Figure II.11).

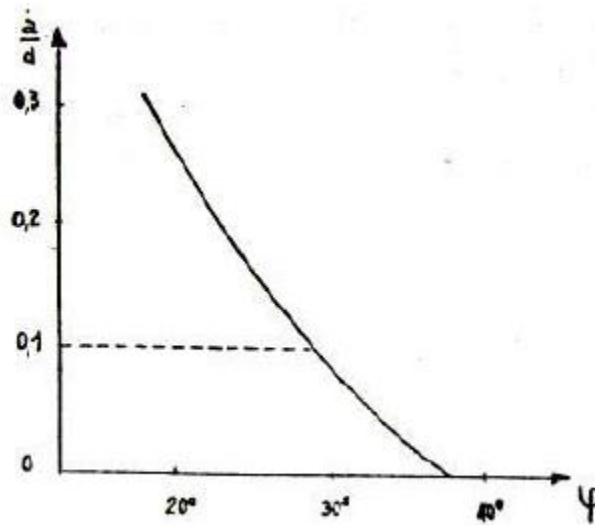


Figure II.11. Détermination du point de moment nul.

En pratique, lorsque φ est compris entre 25° et 30° , on peut admettre $a = 0.1d$, on rend ainsi le problème isostatique. Le calcul ne représente alors aucune difficulté.

Blum a observé que pour les écrans encastrés, le point de moment nul est relativement proche du point de pression résultante nulle. Il a proposé que le moment fléchissant soit nul au point de pression nulle.

Il faut remarquer que le moment fléchissant maximal est généralement celui qui se produit vers le milieu de la palplanche, là où la poussée est égale à l'effort d'ancrage (moment M_1 de la Figure II.6. a). Il est bien rare que le moment maximal dans la partie inférieure de la fiche (moment M_2) lui soit supérieur.

Il faut s'assurer que le moment au point d'ancrage (moment M_0) n'a pas une valeur plus forte, ce qui peut arriver lorsque l'ancrage est placé assez bas.

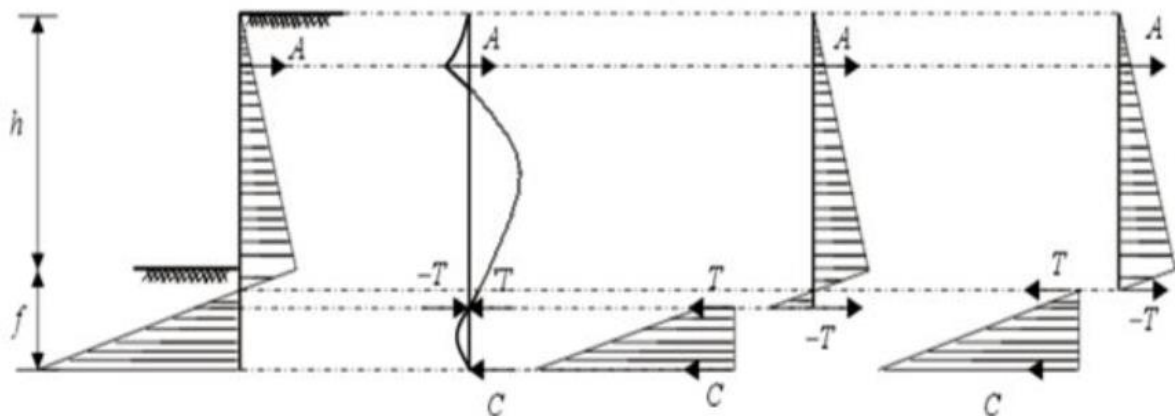


Figure II.12. Méthode de Blum

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

L'écran sera décomposé en deux parties:

1- La partie au-dessus de point de moment nul peut être traitée comme une poutre droite soutenue sur deux appuis, au point d'ancrage A et au point de moment nul. Suivant les indications de la Figure. II.12, les réactions A et T ; et les moments de flexion peuvent alors être déterminés à partir de la théorie statique de la poutre simple.

2- La partie inférieure, au-dessous du point de moment nul, peut également être analysée comme une poutre droite de portée inconnue reposant sur deux appuis, au point de moment nul et au point d'action de la contre butée C . La portée est inconnue, mais par contre on connaît la réaction d'appui R , les deux inconnues dans le calcul de cette deuxième poutre sont donc la portée $b=f_0-a$ et l'autre réaction d'appui, c'est à dire la contre butée. Enfin, comme pour les murs non ancrés, on adoptera $f=1.2 f_0$.

a) Choix d'une palplanche et vérification

Le choix de la palplanche sera déterminé par la valeur du moment maximal M_{max} que doit reprendre cette palplanche tel que :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} \leq \sigma_{ad}$$

Avec :

W : module de résistance de la palplanche par mètre linéaire.

σ_{ad} : contrainte de flexion admissible de l'acier, où :

$$\sigma_{ad} = \frac{2}{3} \sigma_e$$

σ_e : limite élastique de l'acier de la palplanche.

b) Critique des méthodes classiques

Dans le traité classique de la mécanique des sols, le calcul d'un rideau simplement buté en pied s'accompagne toujours de l'utilisation d'un coefficient de sécurité, ce qui conduit à adopter pour la fiche une valeur bien supérieure à celle qui correspond effectivement à la rupture du rideau par défaut de butée. On peut se demander quelle est la signification du moment maximal calculé, puisque ce moment se rapporte à une palplanche travaillant vraisemblablement dans des conditions toutes différentes des conditions réelles, donc le comportement réel du rideau n'a rien à voir avec le comportement théorique, dit aussi classique.

II.11. Méthode de Tschebotarioff

Les travaux menés par Tschebotarioff entre 1941 et 1949 ont essentiellement consisté en des essais menés sur des modèles réduits d'écrans de soutènement (TSCHEBOTARIOFF, 1948). Ces essais portaient sur des écrans souples fichés sur 30 % de leur hauteur totale dans des sables moyennement denses à denses et maintenus en tête par un dispositif d'appui.

Les principaux résultats obtenus concernent d'une part, la distribution des pressions appliquées à l'écran par les terres soutenues et, d'autre part, la distribution des pressions en fiche de l'écran, et ceci pour différentes phases de remblaiement ou d'excavation du soutènement (voir Figures II.13. et II.14.).

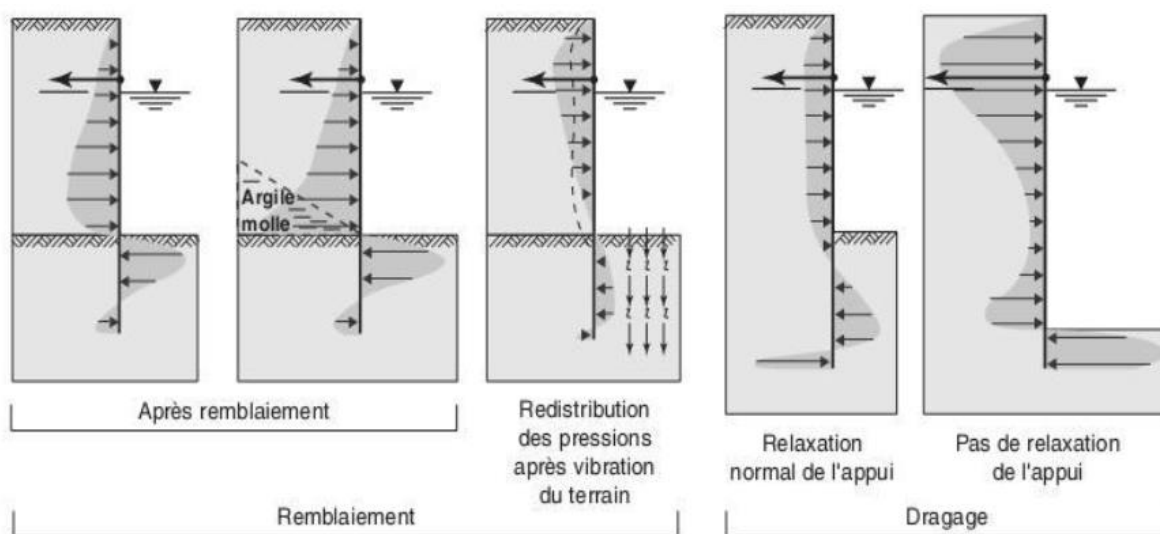


Figure II.13. Distribution des pressions mesurées à l'issue des différentes procédures de construction

Qualitativement, pour les longueurs de fiche expérimentées, les résultats obtenus par Tschebotarioff confirment les hypothèses faites par Blum. On observe bien un encastrement de l'écran dans le sol, résultant d'une forte mobilisation de la butée dans la partie supérieure de la fiche et d'une contre butée en partie inférieure. Cette dernière reste toute fois beaucoup plus modérée que ne le suggérait Blum dans ses schémas, puisque les valeurs atteintes sont proches de la pression des terres au repos.

Cet encastrement se traduit par un point de moment fléchissant nul qui coïncide davantage avec le niveau du fond de fouille, qu'avec le niveau du point de pression de la résultante nulle (hypothèse de Blum). Ce dernier résultat conduit Tschebotarioff à proposer une nouvelle méthode de dimensionnement des écrans souples ancrés en tête et encastres dans du sable, fondée sur le principe:

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

- d'une fiche égale à 30 % de la hauteur totale.
- et d'une articulation de l'écran au niveau du fond de la fouille

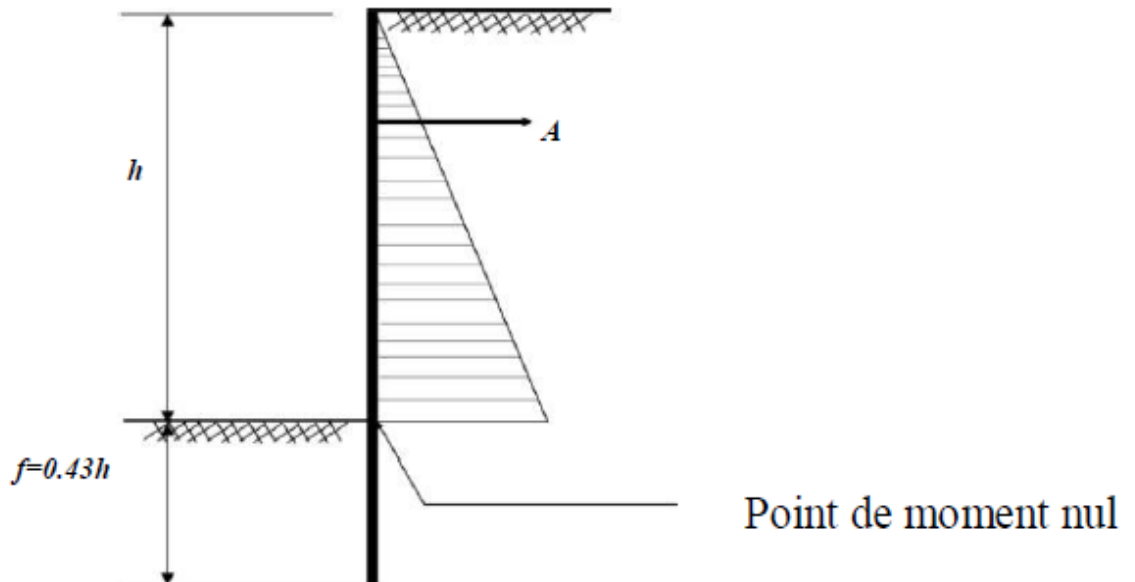


Figure II.14. Méthode de calcul de Tschebotarioff

Plus récemment, Braja Das propose une méthode pratique pour le calcul des rideaux de palplanches, et il considère deux types de murs distincts : mur en porte-à-faux (sans ancrage), lorsque la profondeur de dragage ne dépasse pas 6 m, et mur ancré en tête si cette hauteur est supérieure à 6 m. Chacun de ces deux cas se divise en deux : (BRAJA.D. 2019)

- mur en porte-à-faux fiché dans du sable et mur fiché dans l'argile ;
- mur ancré et encastré dans du sable et mur encastré dans l'argile.

Pour notre cas d'étude, il s'agit d'un rideau de palplanches ancré en tête et encastré dans du sable. Cette méthode est décrite dans ce qui suit :

La Figure II.15 montre un mur de palplanches enfoncé dans un sol granulaire. Le tirant reliant la palplanche à l'ancrage est situé à une profondeur l_1 à partir du sommet A de la palplanche et le niveau de l'eau se trouve à une profondeur L_1 .

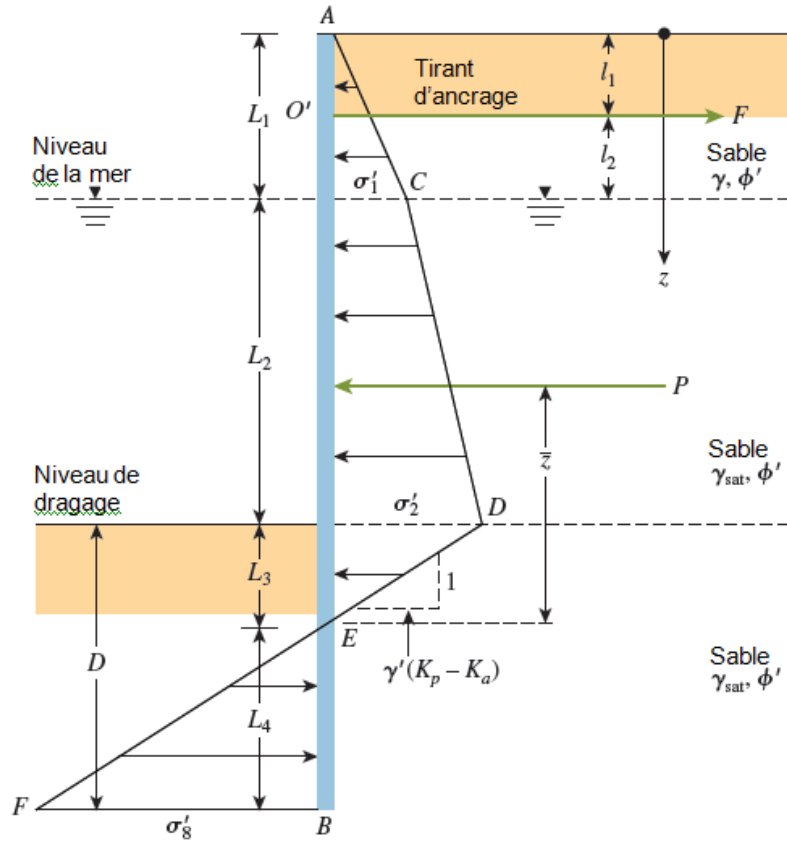


Figure II.15. Schéma de calcul d'un rideau ancré et encastré dans le sable (BRAJA.D. 2019)

L'angle de frottement effectif du sable est de φ' . L'intensité de la poussée à une profondeur $z = L_1$ est

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a \quad (\text{II.1})$$

K_a = coefficient de poussée de Rankine = $\tan^2(45 - \varphi'/2)$

γ = poids volumique du sol au-dessus de la nappe phréatique.

De même, la poussée à une profondeur $z = L_1 + L_2$ (c'est-à-dire au niveau de la ligne de dragage) est de

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (\text{II.2})$$

où $\gamma' =$ poids volumique déjaugé = $\gamma_{sat} - \gamma_w$

On notera qu'au niveau de la ligne de dragage, les pressions hydrostatiques exercées de part et d'autre du mur sont de même ampleur et s'annulent.

A la profondeur z , la force poussée vaut :

$$\sigma'_a = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma'(z - L_1 - L_2)] K_a \quad (\text{II.3})$$

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

A la profondeur, la force de butée est :

$$\sigma'_p = \gamma'(z - L_1 - L_2)K_p \quad (\text{II.4})$$

où $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2)$. (coefficient de butée de Rankine)

Les équations (II.3) et (II.4) donnent la contrainte latérale nette, qui est :

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma'_a - \sigma'_p = (\gamma L_1 + \gamma' L_2)K_a - \gamma'(z - L_1 - L_2)(K_p - K_a) \\ &= \sigma'_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

où $L = L_1 + L_2$

La pression nette, σ' est nulle à une profondeur L_3 sous la ligne de dragage, donc

$$\sigma'_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) = 0$$

ou

$$(z - L) = L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad (\text{II.6})$$

On voit sur l'équation (II.6), que la pente de la ligne de distribution des contraintes DEF est de $1 / (K_p - K_a)\gamma'$, d'où :

$$\overline{HB} = (K_p - K_a)\gamma' \quad (\text{II.7})$$

A la profondeur $z = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$, la contrainte latérale nette est :

$$\sigma'_8 = \gamma'(K_p - K_a)L_4 \quad (\text{II.8})$$

L'équilibre statique du rideau donne : Σ forces horizontales = 0, et Σ moment autour de $O' = 0$. (Le point O' étant situé au niveau du tirant).

La somme des forces dans la direction horizontale (par unité de longueur du mur) donne :

Surface du diagramme de pression ACDE - surface de EBF - $F = 0$

Où $F =$ tension dans le tirant/unité de longueur du mur, ou

$$P - \frac{1}{2}\sigma'_8 L_4 - F = 0$$

ou :

$$F = P - \frac{1}{2}[\gamma'(K_p - K_a)]L_4^2 \quad (\text{II.9})$$

où $P =$ surface du diagramme de pression ACDE. En prenant le moment par rapport au point O' , on obtient

$$-P[(L_1 + L_2 + L_3) - (\bar{z} + l_1)] + \frac{1}{2}[\gamma'(K_p - K_a)]L_4^2 \left(l_2 + L_2 + L_3 + \frac{2}{3}L_4 \right) = 0$$

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

Ou:

$$L_4^3 + 1.5L_4^2(l_2 + L_2 + L_3) - \frac{3P[(L_1+L_2+L_3)-(\bar{z}+l_1)]}{\gamma'(K_p-K_a)} = 0 \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.36) peut être résolue par tâtonnement pour déterminer L_4 , et ensuite la fiche $D_{\text{théorique}}$:

$$D_{\text{théorique}} = L_3 + L_4$$

La fiche théorique est majorée d'environ 30 à 40 % pour avoir la longueur de la fiche réelle

$$D_{\text{réelle}} = 1.3 \text{ to } 1.4 D_{\text{théorique}} \quad (\text{II.11})$$

Le moment théorique maximum auquel la palplanche sera soumise se produit à une profondeur comprise entre $z = L_1$ et $z = L_1 + L_2$. La profondeur z pour un effort tranchant nul et donc un moment maximal peut être évaluée à partir de

$$\frac{1}{2}\sigma'_1 L_1 - F + \sigma'_1(z - L_1) + \frac{1}{2}K_a \gamma'(z - L_1)^2 = 0 \quad (\text{II.12})$$

II.12. Application au projet

Si on examine le tableau Tableau IV.2 des propriétés des matériaux du sol ayant servi pour la modélisation du sol en place sous Plaxis, on s'aperçoit, que les poids volumiques non saturé et saturé et l'angle de frottement interne des différentes couches, qui sont essentiellement des sables, varient très peu.

Pour des raisons de simplification des calculs, on considérera, dans cette application, que le sol en place est constitué uniquement d'un sable dont les caractéristiques constituent une moyenne des caractéristiques des différentes couches qui constituent ce sol en place. (Figure II.16). On prendra, donc :

Données du projet :

$$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3 ; \quad \gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3 ; \quad \varphi' = 32^\circ ; \quad c = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$L_1 = 2 \text{ m} ; \quad L_2 = 12.5 \text{ m} ; \quad l_1 = 2 \text{ m}$$

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

La procédure de calcul, c'est celle d'un rideau de palplanches ancré en tête et encastré dans du sable.

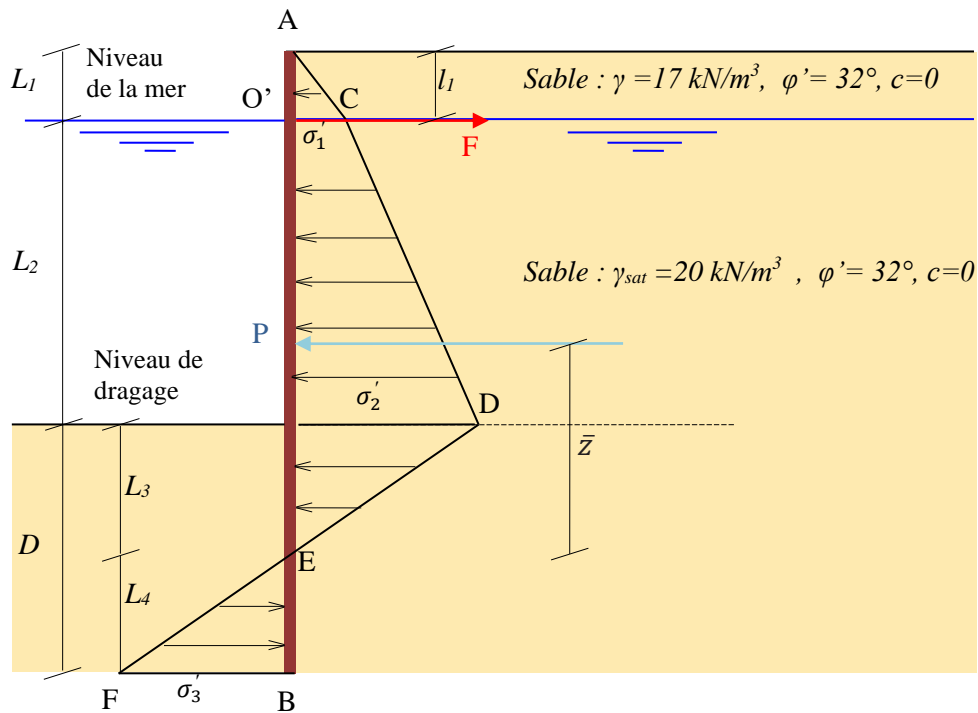


Figure II.16. Schéma des caractéristiques des sols

Etapes de calcul :

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$K_a = \tan^2(45 - \varphi'/2) = \tan^2(45 - 32/2) = 0,307$$

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi'/2) = \tan^2(45 + 32/2) = 3,255$$

$$K_p - K_a = 3,255 - 0,307 = 2,948$$

$$\sigma'_1 = \gamma L_1 K_a = 17 \times 2 \times 0,307 = 10,438 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a = (17 \times 2 + 10 \times 12,5) \times 0,307 = 48,813 \text{ kN/m}^2$$

$$L_3 = \frac{\sigma'_2}{\gamma'(K_p - K_a)} = \frac{48,813}{10 \times 2,948}$$

$$L_3 = 1,66 \text{ m}$$

$$P = \frac{1}{2} \sigma'_1 L_1 + \sigma'_2 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) L_2 + \frac{1}{2} \sigma'_2 L_3$$

Chapitre II. Etude théorique des rideaux de palplanches

$$P = \frac{1}{2} \times 10,438 \times 2 + 48,813 \times 12,5 + \frac{1}{2} (48,813 - 10,438) 12,5 + \frac{1}{2} 48,813 \times 1,66$$

$$P = 10,438 + 610,163 + 239,844 + 40,515$$

$$P = 901 \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{\sum M_{j/E}}{P} = \left[10,438 \left(1,66 + 12,5 + \frac{2}{3} \right) + 610,163 \left(1,66 + \frac{12,5}{2} \right) + 239,844 \left(1,66 + \frac{12,5}{3} \right) + 40,515 \left(\frac{2 \times 1,66}{3} \right) \right] \times \frac{1}{901}$$

$$\bar{z} = 7,13 \text{ m}$$

Calcul de L_4 , solution de l'équation :

$$L_4^3 + 1,5L_4^2(L_2 + L_3) - \frac{3P[L_1 + L_2 + L_3 - (\bar{z} + L_1)]}{\gamma'(K_p - K_a)} = 0$$

$$L_4^3 + 1,5L_4^2(12,5 + 1,66) - \frac{3 \times 901[2 + 12,5 + 1,66 - (7,13 + 2)]}{\gamma'(K_p - K_a)} = 0$$

$$L_4^3 + 21,24L_4^2 - 644,476 = 0$$

La solution par tâtonnement de cette équation est :

$$L_4 = 4,96 \text{ m}$$

Calcul de la fiche D du rideau de palplanches :

$$\text{La fiche théorique : } D_{\text{théorique}} = L_3 + L_4 = 1,66 + 4,96 = 6,62 \text{ m}$$

$$\text{La fiche adoptée : } D_{\text{adoptée}} = 1,30 * D_{\text{théorique}} = 1,30 * 6,62 = 8,61 \text{ m}$$

Calcul de l'effort d'ancrage :

$$F = P - \frac{1}{2} \gamma'(K_p - K_a) L_4^2$$

$$F = 901 - \frac{1}{2} * 10 * 2,948 * 4,96^2$$

$$F = 538,37 \text{ kN/m}$$

On a déterminé par cette application :

-la fiche $D=8.61 \text{ m}$

-la force de tirant d'ancrage $F=538.37 \text{ kN/m}$

-la force résultante $P=901 \text{ kN/m}$

II.13. Conclusion

On conclue qu'il existe deux modes de construction des rideaux de palplanches : rideaux avec ancrage et rideaux en porte-à-faux, dont les calculs sont différents.

Pour notre projet, le quai est constitué d'un rideau principal avec des palplanches mixtes HZ/AZ soutenu par un rideau d'ancrage en palplanches AZ.

Actuellement, les problèmes géotechniques sont presque exclusivement résolus par des modèles mathématiques utilisant des codes de calcul très performants et basés sur des méthodes de l'analyse numérique en différences ou éléments finis. Ca sera le cas pour le projet en cours qui sera traité avec le code Plaxis 2D.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the bottom, both ending in small circular curls at the corners.

Chapitre III : **Présentation du projet**

Chapitre III. Présentation du projet

III.1. Introduction

Dans l'objet, d'étudier et d'analyser, il est important de connaître en premier lieu les données géologiques, hydrologiques et géotechniques de la zone d'étude.

Dans ce chapitre on va présenter les caractéristiques de quai poste 24 à Béjaia.

III.2. Situation géographique du port

Le port de Bejaia est situé à environ 1.50 km au sud du Cap Carbon et du côté Ouest du golf de Bejaia. (Figure III.1)

Il est protégé par les jetées Est (650ml), Sud (450ml), du large (1500ml) et de fermeture (600ml). Ces ouvrages de protection encadrent trois bassins, l'avant port (75 ha), le vieux port (26 ha) et l'arrière port (55 ha) qui couvrent ensemble une superficie de plan d'eau de 156 ha. L'avant port à une profondeur variant de 10 à 13.5m et la passe d'entrée Sud-ouest a une largeur de 320 m.

Le vieux port à une profondeur variant de 6 à 9m et la passe Abdelkader a une largeur de 110m.

L'arrière port a une profondeur variant de 10 à 12m et la passe de la Casbah une largeur de 125m.

Les ouvrages de protection dont la profondeur varie de 0 à 16m ont une longueur totale de 3.4Km.

Les terre-pleins délimités par la ville couvrent une superficie d'environ 50ha. Le port totalise environ 2.8Km de quais et deux appontements pétroliers.

Le site du projet est situé dans le bassin de l'arrière port de Bejaia limité au sud par la jetée de fermeture. (Figure III.1)

Chapitre III. Présentation du projet

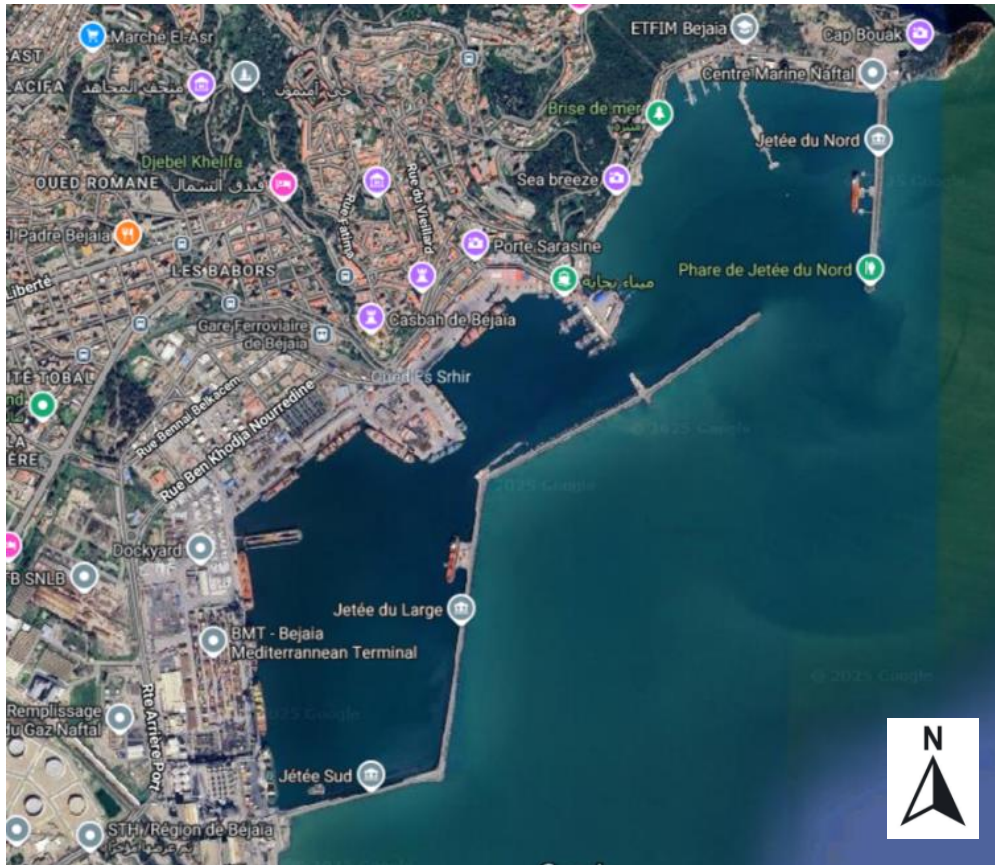


Figure III.1. Localisation géographique de la zone du projet

III.3. Géologie du site

La géologie de la région de Bejaia est représentée par des terrains alluvionnaires de la Soummam, secondaire et tertiaires des anticlinaux djebel Gouraya et Adrar Oufarnou. La coupe géologique établie à partir de la carte géologique de Bougie (échelle 1/50 000) de l'année 1956 montre les différentes formations à savoir :

- Des dépôts alluvionnaires anciens et récents ; basses terrasses, sables, argiles et argiles vaseuses,
- Des brèches de pentes recimentées d'âge mioplicène,
- Un faciès marno- schisteux avec a des lentilles de conglomérats,
- Des schistes rouges et verts, des calcaires lenticulaires et des alternances régulières de marno-calcaire de 200 à 300 m d'épaisseur. (LEM, 2011)

III.4. Reconnaissance des lieux

Les reconnaissances des lieux ont consisté en :

- Un levé topographique détaillé du terre-plein, de la jetée de fermeture et de la grande jetée du large. La surface totale levée est de 05 hectares.
- Un levé bathymétrique du plan d'eau réalisé suivant des profils parallèles, espacés de 10m.

Chapitre III. Présentation du projet

La surface totale bathymétrique levée est de 23 hectares.

Un premier rapport traitant la mission 01 (Reconnaitances des lieux) a été transmis le 29/septembre/ 2010. (LEM, 2011)

III.5. Reconnaissance géotechnique

III.5.1. Résultats de la campagne réalisée dans le cadre du projet du nouveau quai (LEM, 2011)

Les reconnaissances antérieures à l'étude ont été analysées et synthétisées dans le rapport d'analyse de mai 1980 (Mecasol).

Les reconnaissances ont comporté l'exécution de 14 pénétromètres statiques (dont 06 dans l'alignement du quai) et 03 sondages carottés S1, S2, S3 sur l'alignement du quai. 49 échantillons intacts ont été prélevés sur S1, S2, S3 et un programme d'essai complet réalisé au laboratoire Mecasol à Paris. **Annexe n°1**

Un essai de pré chargement a également été effectué sur une aire d'essai.

La stratigraphie moyenne retenue est :

- Horizon (a) : de l'ancien TN à -25NGA environ : alternances de sables fins silteux et d'argile molle.
- Horizon (b) : de -25NGA au substratum (-35/-38NGA): sables fins silteux avec quelques passées argileuses.
- Horizon (c) : altération du substratum et substratum.

III.5.2. Résultats de la campagne réalisée dans le cadre de cette étude

Cette campagne a consisté en :

- 03 sondages carottés de 0 à 45 m de profondeur,
- 02 essais au pressiomètre Menard, de 07 à 17 m de profondeur,
- 02 essais au pénétromètre statique,
- Des essais en laboratoire sur les échantillons prélevés des trois sondages carottés.

III.6. Données sur le quai

III.6.1. Description du nouveau quai

Le nouveau quai est situé dans l'arrière port de Bejaia, selon une direction sensiblement Nord-sud. Ce quai a été réalisé entre 1985 et 1986 par la société Hollandaise BOS KALIS. Il a une longueur de 750m et une profondeur en pied de quai de 12.50 m.

La structure du quai est constituée par des gabions en palplanches plates, fichées dans le sol, surmontée par une poutre de couronnement équipée de bollards et de défenses d'accostage.

Chapitre III. Présentation du projet

Ce quai reçoit actuellement des navires chargés de bois, de produits métallurgiques et de céréales.

Le quai en question sera destiné pour le traitement des conteneurs ainsi que la marchandise en général. (LEM, 2011) **Annexe n°2**

III.6.2. Caractéristiques du Navire de projet et effort induits

Les caractéristiques des navires devant fréquenter le poste 24 du nouveau quai:

Longueur = 200.00 m

Largeur = 35.00 m

Tirant d'eau = 12.00 m

A partir de ces caractéristiques dimensionnelles nous avons déterminé le DWT et le déplacement des navires en pleine charge:

DWT = 60 000T

D = 83 200 T

III.7. Caractéristiques principales des quais métalliques

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques de l'extension du quai poste 24 faisant l'objet de l'étude : (LEM, 2011)

Tableau III.1. Les principales caractéristiques de l'extension du quai poste 24

| Quai | Caractéristiques | Longueur |
|---|--|---|
| Nouveau quai Poste 24 <ul style="list-style-type: none">Rideau principal compose d'une combinaison de palplanches de type Z et de type I. Cote terre <ul style="list-style-type: none">Rideau De palplanches d'ancrage de profil AZ 40-700. | <ul style="list-style-type: none">Rideau principal : 105 palplanches de profil HZ 1180 MA/AZ 18-700. | <ul style="list-style-type: none">Rideau principal : 200 ml |

Tableau III.2. La position des profils dans le quai

| Profil | Nombre palplanches | Hauteur palplanche noyée béton | Hauteur palplanche immergée | Hauteur palplanche fichée |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| AZ 18-700 (rideau principale) | 104 | 1,5 | 12,5 | 17,5 |
| HZ 1180 MA | 105 | 1,5 | 12,5 | 17,5 |

Chapitre III. Présentation du projet

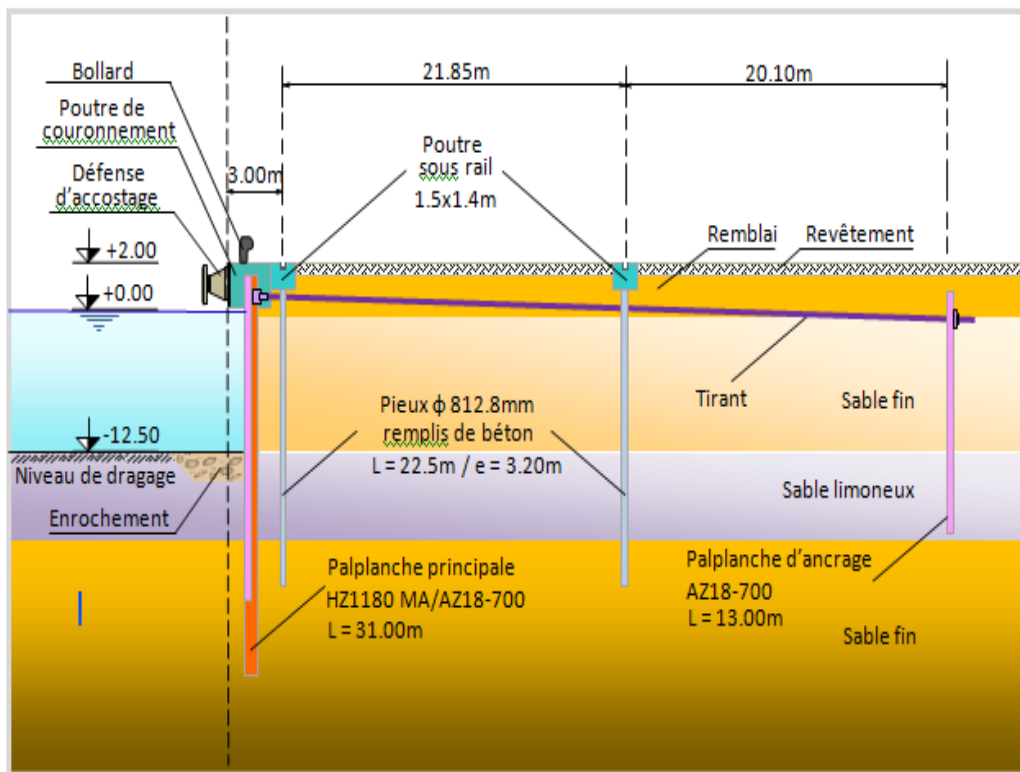
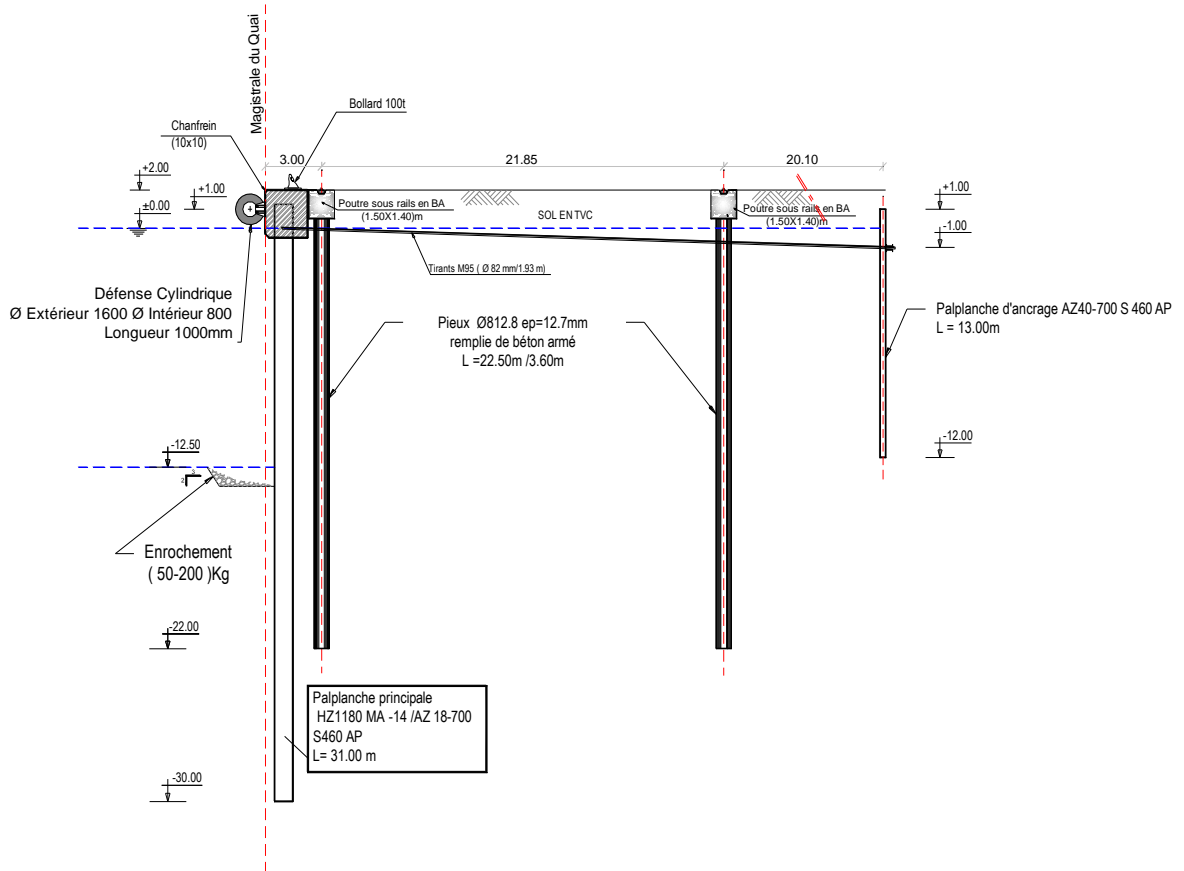


Figure III.2. Coupe verticale du quai poste 24

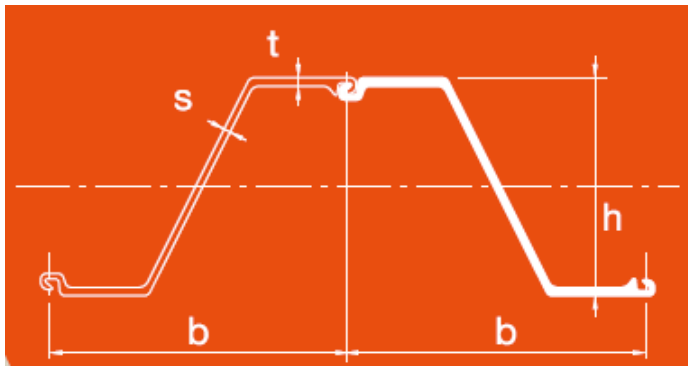
Chapitre III. Présentation du projet

Les palplanches Z se caractérisent essentiellement par la continuité de l'âme dans le rideau et la position spécifique des serrures, symétriques par rapport à l'axe neutre.

Ces deux particularités influencent favorablement le module de flexion.

La série AZ, issue de la combinaison d'un profil aux caractéristiques exceptionnelles et de la serrure Larssen, à la qualité éprouvée, offre les avantages suivants :

- Un rapport module de flexion/poids extrêmement compétitif
- Un moment d'inertie élevé, limitant les déformations
- Une grande largeur, autorisant des cadences de fonçage remarquables
- Une bonne résistance à la corrosion, l'épaisseur d'acier étant maximale aux points les plus critiques. (ARCELORMITTAL, 2022)



a. Coupe transversale



b. Palplanches en stockage

Figure III.3. Palplanches en Z

Tableau III.3. Caractéristiques de profil en Z (AZ 40-700 S 460AP)
(ARCELORMITTAL, 2022)

| Profil | Largeur b (mm) | Hauteur h (mm) | Epaisseur | | Section (cm ² /m) | Masse | | Moment d'inertie (cm ⁴ /m) | Module de flexion élastique cm ³ /m | Moment statique (cm ³ /m) | Module de flexion plastique cm ³ /m | Classe S460 AP |
|-----------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|--|--|--|----------------------|
| | | | t (mm) | S (mm) | | Palplanche simple Kg/m | Rideau Kg/m ² | | | | | |
| AZ40-700N | 700 | 501 | 17,0 | 13,2 | 244 | 134,2 | 192 | 100080 | 3995 | 2305 | 4605 | 2 |

Les profilés HZ-M présentent une rainure fraisée dans les ailes qui peut atteindre une épaisseur allant jusqu'à 40 mm.

Chapitre III. Présentation du projet

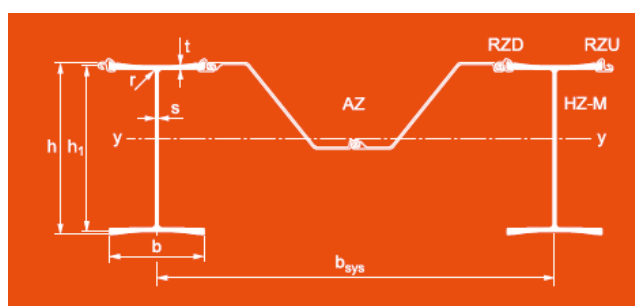
Ils remplissent deux fonctions structurelles distinctes :

-celle d'éléments de soutènement, reprenant à la fois la poussée des terres et la position hydrostatique.

-celle de pieux, reprenant les charges verticales.

Toutes les combinaisons sont basées sur le même principe : des éléments porteurs, constitués d'un ou deux profilés HZ-M, alternant avec des palplanches doubles AZ intercalaires. Les palplanches intercalaires remplissent une fonction de soutènement et de redistribution des efforts, elles sont généralement plus courtes que les profilés porteurs HZ-M.

Selon la combinaison et la nuance d'acier retenues, les rideaux mixtes peuvent reprendre en toute sécurité des moments fléchissant supérieurs à 21000 KNm/m (W_x jusqu'à 46500 cm^3/m). (ARCELORMITTAL, 2022)



a. Coupe transversale



b. Rideau de palplanches HZ

Figure III.4. Palplanches en HZ

Tableau III.4. Caractéristiques de profil mixte HZ 1180 MA/AZ 18-700

a. HZ 1180 MA

| Profil | Dimensions (mm) | | | | | | Inertie de torsion cm^4 | Inertie de gauchissement $t \cdot 10^3 \text{cm}^6$ | Section (cm^2) | Masse Kg/m | Moment d'inertie $e \cdot y-y$ (cm^4) | Module de flexion élastique $e \cdot y-y$ (cm^3) | Surface à traiter m^2/m | raccords |
|------------|-----------------|------|------------------|----|----|----|----------------------------------|---|---------------------------|---------------------|--|---|---|----------|
| | h | B | t_{max} | t | s | r | | | | | | | | |
| HZ 1180 MA | 1075,5 | 45,8 | 34,7 | 31 | 20 | 30 | 1352,9 | 124600 | 494,9 | 388,5 | 967270 | 17865 | 3,884 | A |

b. Profil AZ 18-700 S 460 AP

| Profil | Largeur b (mm) | Hauteur h (mm) | Epaisseur | | Section (cm^2/m) | Masse | | Moment d'inertie (cm^4/m) | Module de flexion élastique cm^3/m | Moment statique (cm^3/m) | Module de flexion plastique cm^3/m | Classe S460 AP |
|-----------|----------------|----------------|-----------|--------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|--|--|--|----------------|
| | | | t (mm) | S (mm) | | Palplanche simple Kg/m | Rideau Kg/m^2 | | | | | |
| AZ40-700N | 700 | 420 | 9,0 | 9,0 | 139 | 76.5 | 109 | 37800 | 1800 | 1060 | 2116 | 3 |

III.8.Pieux

Un pieu est une fondation élancée qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. Le mot pieu désigne aussi bien les pieux, les puits et les barrettes. (PLUMELLE.C, 2004-2005).

On désigne par pieu, une fondation profonde réalisée mécaniquement et par puits une fondation profonde creusée à la main sous la protection d'un blindage. Une barrette est un pieu foré de section allongée ou composite (en T ou en croix par exemple)

Les 3 parties principales d'un pieu sont la **tête**, la **pointe**, et le **fût** compris entre la tête et la pointe. La longueur d'ancrage h est la longueur de pénétration du pieu dans les couches de terrain résistantes.

III.8.1.Principaux types de pieux

A/ Classification suivant la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu
(PLUMELLE.C, 2003)

On distinguera essentiellement :

- Les pieux colonnes : ils sont fichés dans une couche résistante et travaillant en pointe.
- Les pieux flottants : ils sont placés dans les sols homogènes et des caractéristiques mécaniques constantes. Ces pieux transmettent essentiellement leur charge par frottement latéral.
- Les pieux flottants à la base : sont des pieux travaillant à la fois en pointe et au frottement latéral dans une ou plusieurs couches et caractéristiques géotechniques convenables.

Remarque

Pour notre projet, les deux rangées de pieux qui supportent des poutres sous-rails du portique de manutention sont constituées de pieux flottants qui travaillent latéralement.

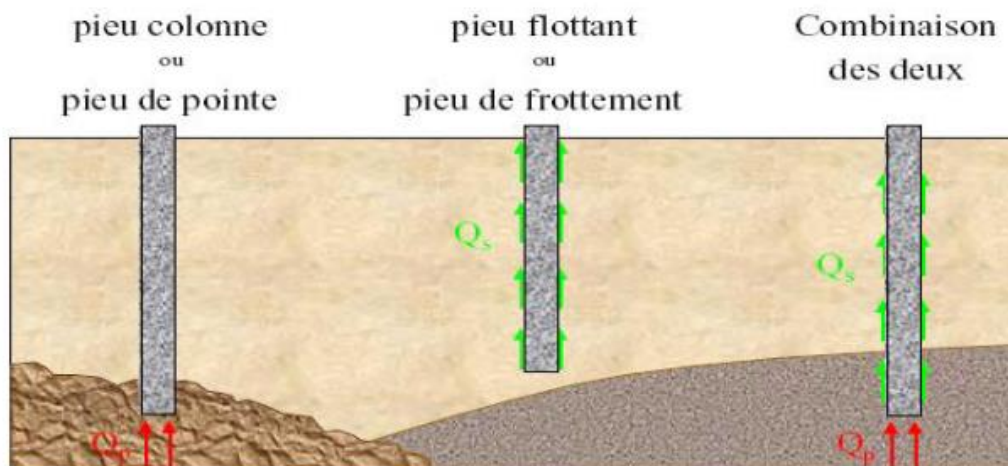


Figure III.5. Classification suivant la transmission des charges au sol et le mode de travail du pieu

B/ Classification avec ou sans refoulement du sol

On distingue deux grands groupes de pieux : les pieux mis en œuvre avec refoulement du sol et les pieux réalisés par excavation du sol. Dans le premier groupe, on peut citer les pieux battus et dans le second les pieux forés.

1. Pieux refoulant le sol à la mise en place

Les principaux types de pieux actuels entrant dans ce groupe sont les suivants :

- Pieux battus en acier.
- Pieux battus en béton.
- Pieux battus en fonte ductile.
- Pieux en bois.
- Pieux en métal battu.

2. Les pieux réalisés par excavation du sol

- Pieux forés simples.
- Pieux forés tubés.
- Pieux vibro-forés.
- Pieux forés à la tarière creuse.
- Barrettes.

Chapitre III. Présentation du projet

Les pieux peuvent être classés de différentes façons selon les paramètres d'intérêt. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau III.5, adapté du *MCIF, 2006*

Tableau III.5. Classification des pieux (Adapté de MCIF, 2006)

| Classification selon | Type de pieu |
|------------------------|--|
| Mode d'installation | battu, foré, tube, vissé, moulé |
| Nature de matériau | acier, béton, bois, béton précontraint |
| Géométrie et forme | vertical (section variable ou uniforme, base élargie), incliné |
| Rigidité | long (flexible), court (rigide) |
| Type de structures | tour, machinerie, bâtiment |
| Déplacement du sol | subissant un grand déplacement, un faible déplacement, ne subissant pas de déplacement |
| Mode de fonctionnement | friction, pointe |

Les dimensions et le type de pieu sont déterminés selon la nature du sol (Tableau III.6). Pour les pieux construits sur place ou préfabriqués, ils sont généralement déterminés à partir de considérations économiques et pratiques. Le choix du type de pieu est également dicté par l'importance de la structure à supporter.

Tableau III.6. Choix du type de pieux selon la nature du sol

| Nature du sol | Type de pieux | Références |
|---------------------------------------|--|---------------------|
| Sol pulvérulent lâche | Pieu conique pour augmenter Le frottement latéral | HANNIGAN.J, 1998 |
| Dépôt d'argile molle profonde | Pieu en béton à surface rugueuse pour augmenter l'adhésion et la vitesse de dissipation de pression interstitielle | HANNIGANLJ., 1998 |
| Sable lâche profond ou moyen dense | Section métallique type H Pieu | TOMLINSON.R.F, 1987 |
| Dépôt de gros Gravier | Pieu en béton précontraint dans le cas d'un battage prévu difficile. Section métallique type H-P et tubulaire à base ouverte sont utilisés mais souvent avec des longueurs plus longues | HANNIGAN.J, 1998 |

❖ Remarque

Dans notre projet on a utilisé les palplanches pour résister aux efforts horizontaux (la force de butée, la force de poussée, l'amarrage et l'accostage, etc.), et les pieux afin de résister aux efforts verticaux (les charges des conteneurs, des camions, des véhicules, etc.).

III.9. Protection cathodique

La protection cathodique est la technique qui permet de conserver dans son intégrité la surface extérieure des structures en acier immergées ou enterrées, en s'opposant au processus électrochimique d'attaque du métal par l'eau de mer (ou le sol), c'est-à-dire **la corrosion**. Les structures en acier tels que les palplanches constituent le champ d'application principal de cette protection.

La protection cathodique peut être utilisée selon deux méthodes qui sont, la protection Cathodique à courant imposé ou la protection cathodique par anodes sacrificielles.

Elle consiste à amener par des moyens extérieurs et artificiels l'ensemble de la surface extérieure du métal à un potentiel suffisamment négatif pour rendre le métal entièrement cathodique et supprimer ainsi tout risque de corrosion extérieure. Le critère de protection cathodique est la valeur du potentiel au-dessous duquel l'acier ne peut se corroder. Pour l'acier enterré ou immergé, le critère de protection est mesuré avec une électrode de référence Cu/CuSO₄ en contact avec le milieu situé au voisinage immédiat du métal de - 850 mV. Ce n'est qu'à partir d'une certaine valeur de courant que le potentiel nécessaire est atteint. Pour réaliser la protection cathodique des palplanches en acier dans l'eau de mer ou enfouies dans le sol, il suffira donc :

- ✓ soit de constituer une pile à l'aide d'un métal plus électronégatif que l'acier (Aluminium, magnésium ou zinc) : c'est la protection par **anode galvanique (ou anode sacrificielle)**.

Principe : on crée un couple galvanique dont la palplanche métallique sera la cathode de la pile et l'anode un métal choisi pour son potentiel plus électronégatif (magnésium, aluminium, zinc).

- ✓ soit de les relier à une source électrique convenablement connectée de manière que l'acier devient la cathode du système et de vérifier que le potentiel de cette cathode atteint bien le critère de protection en tous points : c'est **le courant imposé (ou soutirage de courant)**

Principe

L'abaissement de potentiel des palplanches à la valeur voulue est obtenu en connectant le réseau, en un ou plusieurs de ses points, au pôle négatif d'une source électrique de courant continu. Le champ électrique se répartit dans l'eau de mer, par le déversoir anodique. Les électrons gagnent la palplanche et pénètrent par leur surface latérale, cheminent longitudinalement dans les palplanches jusqu'à la connexion au pôle négatif du redresseur.

Il en résulte un abaissement de potentiel. Cet abaissement de potentiel croît depuis les extrémités des palplanches les plus éloignées de la connexion jusqu'au pôle négatif de l'alimentation pour être au maximum au droit de celle-ci. Il doit être suffisant pour que le critère de protection soit partout atteint et maintenu.

La protection sera de type par soutirage de courant (courant imposé) et sera installée selon la norme AFNOR A 05-610. Pour ce faire, un générateur sera mis en place, la continuité électrique devra être assurée sur les palplanches. (LEM, 2011)

III.9.1. Protection Cathodique par courant impose

Dans le cas ou La protection cathodique des structures métalliques constituant les quais tels que les palplanches sera assurée par un système à courant imposé utilisant des déversoirs de courant, alimentés par des transformateurs-redresseurs. (LEM, 2011)

III.9.2. Protection Cathodique Par anodes sacrificielles

Dans le cas ou La protection cathodique des structures métalliques constituant les quais tels que les palplanches sera assurée par un système galvanique, des anodes sacrificielles seront installées.

- **Anodes sacrificielles**

Les anodes sacrificielles seront à base d'aluminium ou de zinc. Les anodes activées au mercure ne sont pas acceptées.

III.10. Choix de la protection cathodique

Suite a la comparaison des deux systèmes de protection cathodique, le choix sera oriente vers le système galvanique pour les raisons suivantes concernant l'extension du nouveau quai poste 24 :

- ✓ Position géographique
- ✓ Durée de vie assurée
- ✓ Non disponibilité de l'énergie électrique
- ✓ Pas de rupture de circuit

Chapitre III. Présentation du projet

- ✓ Non disponibilité de personnel qualifié en PC
- ✓ Surveillance de l'installation faible

III.11. Calcul du système de protection cathodique (anode sacrificiel)

Etant donné les conditions du site, la meilleure solution consiste à installer le système de protection cathodique par anodes sacrificielles.

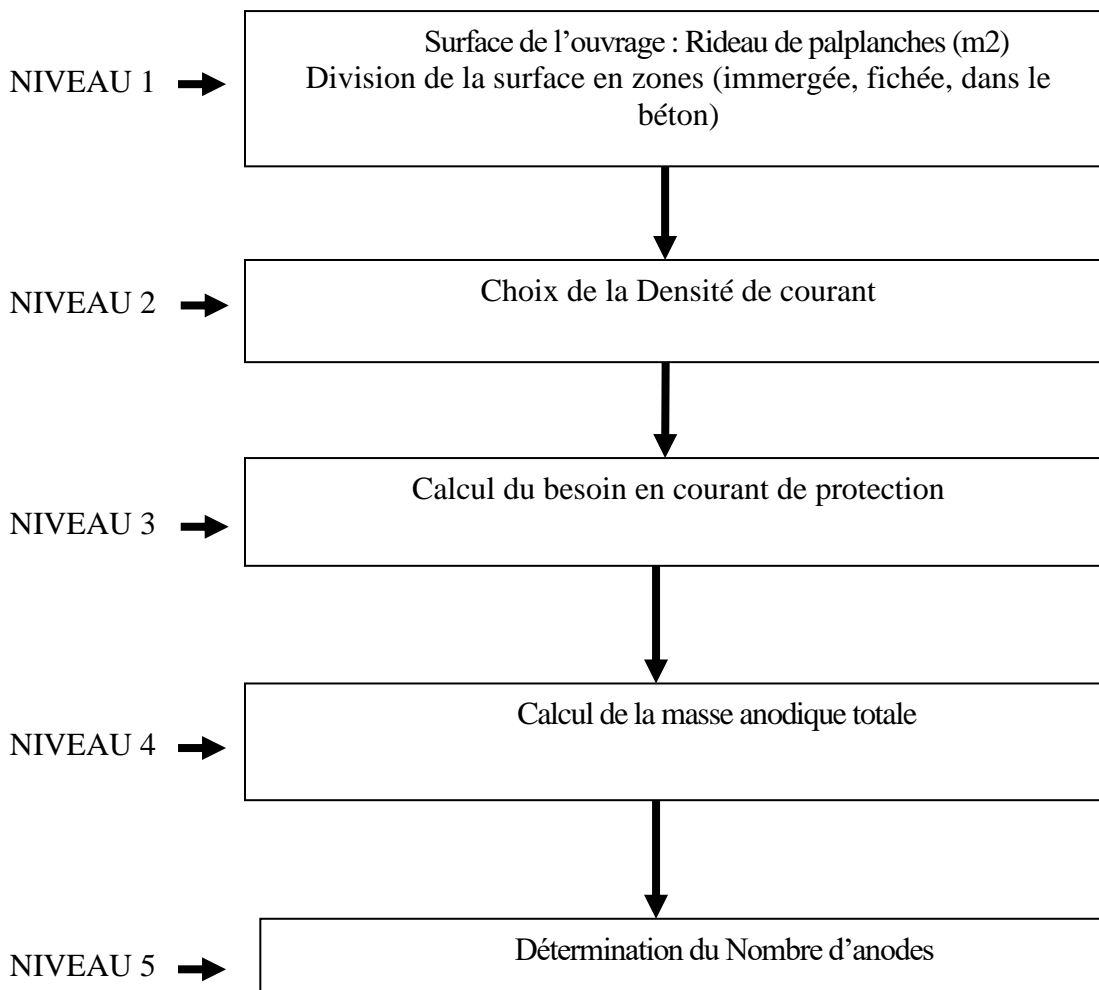
La protection des infrastructures métalliques (palplanches) est assurée par un système galvanique. (LEM, 2011)

III.11.1. Caractéristiques du milieu

- Résistivité de l'eau de mer : 20 à 22 Ω .cm
- Salinité de l'eau de mer : 30 à 35 g/l
- Température moyenne de la mer : 15 à 20 C
- Profondeur maximum inférieure à 20m.

III.11.2. Dimensionnement du système de protection cathodique

Le calcul du système Protection Cathodique de l'ouvrage suit le protocole suivant :



Chapitre III. Présentation du projet

Le système de protection cathodique à mettre en œuvre est dimensionné à partir des données et hypothèses suivantes :

- Caractéristiques dimensionnelles des palplanches à protéger
- Degré d'agressivité du milieu environnant
- Densité de courant de protection
- Durée de vie

a- Surface à protéger

La surface totale de chaque rideau de palplanche est calculée en tenant compte de :

- ✓ La surface en fiche
- ✓ La surface en eau de mer
- ✓ La surface noyée dans le béton

b- Densité de courant

Le courant nécessaire à la protection d'une structure dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ la résistivité du milieu.
- ✓ la surface à protéger.

Les densités de courant sont fixées par expérience.

Dans des conditions tels que le port de Bejaia et selon notre expérience dans le domaine, le besoin en courant afin d'obtenir une protection efficace est de 20 à 100 mA/m² pour les conditions de salinité et de turbulences connues en mer Méditerranée. (LEM, 2011)

Dans ces conditions, la densité de courant nécessaire à la protection des infrastructures métalliques et utilisée pour la note de calcul du système de protection cathodique du rideau des palplanches est comme suit :

- ✓ **20 mA/m²** en fiche
- ✓ **25 mA/m²** dans le béton
- ✓ **70 mA/m²** dans l'eau de mer

c- Calcul du besoin en courant

Le besoin en courant se traduit par la multiplication de la surface à protéger par la densité de courant nécessaire établie qui se traduit par :

Besoin en courant = surface (m²)X densité de courant (mA/m²)

Chapitre III. Présentation du projet

Les surfaces des différentes structures métalliques, ainsi que les quantités de courant nécessaires sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.7. Caractéristiques des palplanches (LEM, 2011)

| Profil | Nombre palplanches | Hauteur palplanche noyée béton (m) | Surface noyée dans béton (m ²) | Hauteur palplanche immergée (m) | Surface immergée (m ²) | Hauteur palplanche fichée (m) | Surface fichée (m ²) |
|---------------|--------------------|------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| AZ18-700 | 104 | 1,5 | 290,16 | 12,5 | 2418,00 | 17,5 | 3385,20 |
| Profil | Nombre palplanches | Hauteur palplanche noyée béton (m) | Surface noyée dans béton (m ²) | Hauteur palplanche immergée (m) | Surface immergée (m ²) | Hauteur palplanche fichée (m) | Surface fichée (m ²) |
| HZ 1180 MA/14 | 105 | 1,5 | 72,13 | 12,5 | 601,12 | 17,5 | 841,57 |

Tableau III.8. Les différentes surfaces et les quantités de courant nécessaires à différentes zones

| Zone | Surface totale | Densité de courant (mA/m ²) | Courant de protection (Ampère) |
|-----------------------|----------------|---|--------------------------------|
| Noyée Dans le béton : | 362,29 | 25 | 9,05 |
| Immergée : | 3019,12 | 70 | 211,33 |
| Fichée : | 4226,77 | 20 | 84,53 |
| Totale : | 7608,18 | 115 | 304,91 |

Le courant total de protection du rideau de palplanche de l'extension du quai 24 est de : 304,91 Ampères.

III.12. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, le site du port de Bejaïa, et particulièrement le poste 24 du nouveau quai situé dans l'arrière port. A cause des caractéristiques moyennes du sol en place du site, le quai avec rideau de palplanches a été retenu. Le quai est réalisé avec deux rideaux : le rideau principal qui constitue la magistrale du quai est constitué de palplanches mixtes HZ/AZ et le rideau arrière en palplanches AZ servant d'ancrage. Les deux rideaux étant reliés par des tirants d'ancrage. Entre ces rideaux, deux rangées de pieux sont enfoncées dans le sol pour reprendre les efforts verticaux dus à l'exploitation du quai. Une attention particulière est portée à la protection cathodique des rideaux métalliques.



**Chapitre IV :
Modélisation
numérique avec Plaxis**

IV.1.Introduction

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode des différences finies et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.

Dans ce chapitre, On présente les différentes étapes de modélisation. Dans tous les cas, la démarche consiste à savoir les procédures de modélisation numérique bidimensionnelle 2D de rideau de palplanches à l'aide de logiciel PLAXIS 2D Version 8 en prenant compte, les charges, le comportement de matériaux, l'environnement de contact et la méthode élaborée.

IV.2.Dimensionnement d'un rideau de palplanches

Une étude de dimensionnement d'un rideau de palplanche, il est important de prendre en compte les données suivant :

- Coupes géotechniques.
- Caractéristiques des sols.
- Les niveaux d'eau.
- Les surcharges.
- Les différents cas d'application des efforts pendant après la construction.
- Les effets dus aux variations de niveau d'eau de part et d'autre du rideau.
- Les résultats d'essais géotechniques (pénétrömètre, pressiomètre, essai proctor).
- Les affouillements éventuels.

IV.3.Présentation du logiciel « PLAXIS 2D, version 8»






PLAXIS est un code de calcul a éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différent types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows.

Chapitre IV. Modélisation numérique avec Plaxis

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves), dont on aura le plaisir de définir en se reportant aux indications du manuel de référence V8 de PLAXIS (BRINKGEREVE.R.B, 2003).

IV.4. Description de la géométrie du modèle

Le projet en cours est modélisé par un modèle géométrique plan à deux dimensions (2D), de 65m de largeur sur 40 m de profondeur. Il est composé de quatre types de sol, répartis comme suit :

-  Le remblai : 3m de hauteur
-  Le sable fin supérieur : 18m de hauteur
-  Le sable limoneux : 5m de hauteur
-  Le sable fin inférieur : 9m de hauteur
-  Le béton pour les poutres.

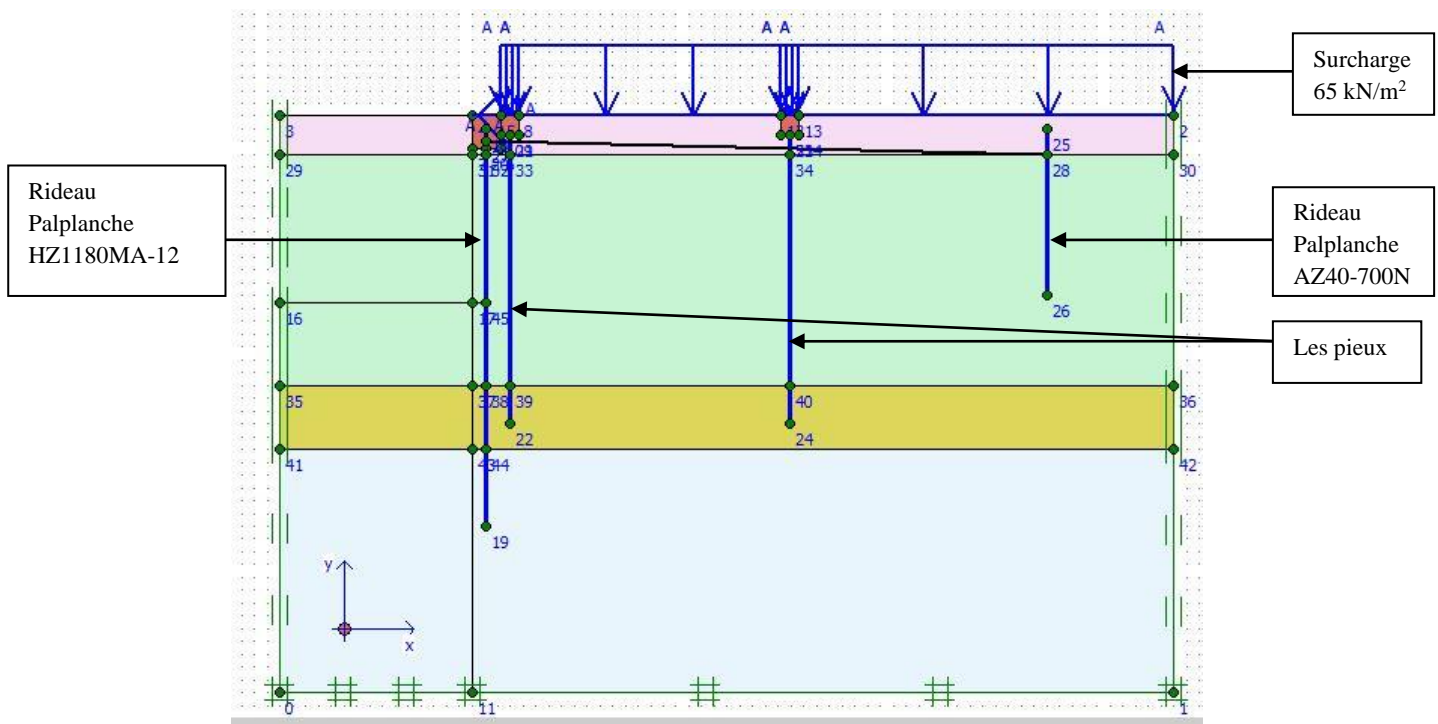


Figure IV.1. Modèle géométrique du projet

Chapitre IV. Modélisation numérique avec Plaxis

IV.5. Caractéristiques des matériaux

IV.5.1. Propriétés des couches de sol et des interfaces

Tableau IV.1. Propriétés des couches de sol et des interfaces

| Paramètre | Désignations | Remblai | Sable fin supérieur | Sable limoneux | Sable fin inférieur | Béton |
|------------------------------------|--|------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Model type | Model | M-C | M-C | M-C | M-C | Linéaire élastique |
| Type de comportement | Type | Non draine | Draine | Draine | Non draine | Non poreux |
| Poids volumique non sature | γ_{unsat} (kN/m ³) | 17 | 16,5 | 17 | 17 | 25 |
| Poids volumique sature | γ_{sat} (kN/m ³) | 20 | 19 | 20 | 20 | / |
| Perméabilité horizontale | k_x | 0,13E-4 | 1m/day | 0,3 | 0,5 | / |
| Perméabilité verticale | k_y (m/day) | 0,13E-4 | 1m/day | 0,3 | 0,5 | / |
| Module d'Young | E_{ref} (kN/m ²) | 1E-4 | 4E+4 | 25E+3 | 2,5E+4 | 2E+5 |
| Coefficient de poisson | ν (nu) | 0,33 | 0,3 | 0,31 | 0,3 | 0,3 |
| Cohésion | C_{ref} (kN/m ²) | 4 | 1 | 5 | 1 | / |
| Angle de frottement | ϕ (phi) (°) | 33 | 31 | 30 | 33,23 | / |
| Angle de dilatance | ψ (psi) (°) | 3 | 1 | 0 | 3,23 | / |
| Facteur de rigidité de L'interface | R_{inter} | 0,67 | 1 | 1 | 1 | 1 |

IV.5.2. Propriétés des éléments structuraux

Les propriétés des palplanches et des pieux, sont données sur le Tableau IV.2

Tableau IV .2. Les éléments structuraux

| Paramètre | Désignations | Pieu | Palplanche HZ1180MA-12 | Palplanche AZ40-700N |
|------------------------|----------------------------|-----------|------------------------|----------------------|
| Type de comportement | Material type | Elastique | Elastoplastique | Elastoplastique |
| Rigidité axiale EA | EA (kN/m ³) | 4,88E+5 | 7,98E+6 | 5,08E+6 |
| Rigidité de flexion EI | EI (kN .m ² /m) | 7,66E+4 | 1,26E+6 | 205,2E+3 |
| Poids | W | 26,65 | 3,904 | 1,61 |
| Coefficient de poisson | ν (nu) | 0,3 | 0.0 ^{xi} | 0.0 ^{xi} |
| Effort normal | kN/m | / | 4400 | 983,8 |

IV.5.3. Propriétés des tirants d'ancrage

On utilisera des éléments d'ancrage nœud à nœud pour modéliser la liaison entre deux points (la plate-forme et la plaque d'ancrage), dont les propriétés sont les suivantes :

Tableau IV.3. Les propriétés de tirant d'ancrage

| Paramètre | Désignations | Tirant d'ancrage | Unités |
|----------------------|----------------|------------------|--------|
| Type de comportement | Material type | Elastique | / |
| Rigidité normal | EA | 1,080E6 | KN |
| espacements | L _s | 16 | M |

IV.5.4. Interfaces

Pour modéliser l'interaction sol-structure les palplanches et les pieux, on place des interfaces des deux côtés des palplanches et des pieux, celles-ci sont identifiées par les deux signes (+) et (-).

La rugosité de l'interface est modélisée par le choix d'une valeur convenable du facteur de réduction des efforts à l'interface (R_{inter}) ; dans notre cas, on a supposé que les interfaces sont rigides sauf pour le remblai.

IV.6. Chargements et conditions aux limites

IV.6.1. Conditions aux limites

On applique aux limites du modèle des déplacements imposés nuls, on utilisant le blocage standard du programme PLAXIS.

IV.6.2. Chargements

Pour observer le comportement des éléments constituant le quai, pendant son exploitation (en service), on soumettra la plate-forme de ce dernier à divers types de chargement :

- Chargement uniformément réparti 65 kN/m²

Qui représente les surcharges verticales (conteneurs, grues...).

- Chargement ponctuel

Pour simuler les efforts horizontaux : d'amarrage et d'accostage des navires. La valeur de l'effort de choc admise est de l'ordre de 40 kN par mètres de front d'accostage, répartie sur toute la longueur de l'ouvrage dans des conditions les plus défavorables.

IV.7. Génération du maillage

Après avoir effectué toute la procédure décrite ci-en –haut, on lance la génération du maillage, automatiquement avec un maillage grossier (coarse).

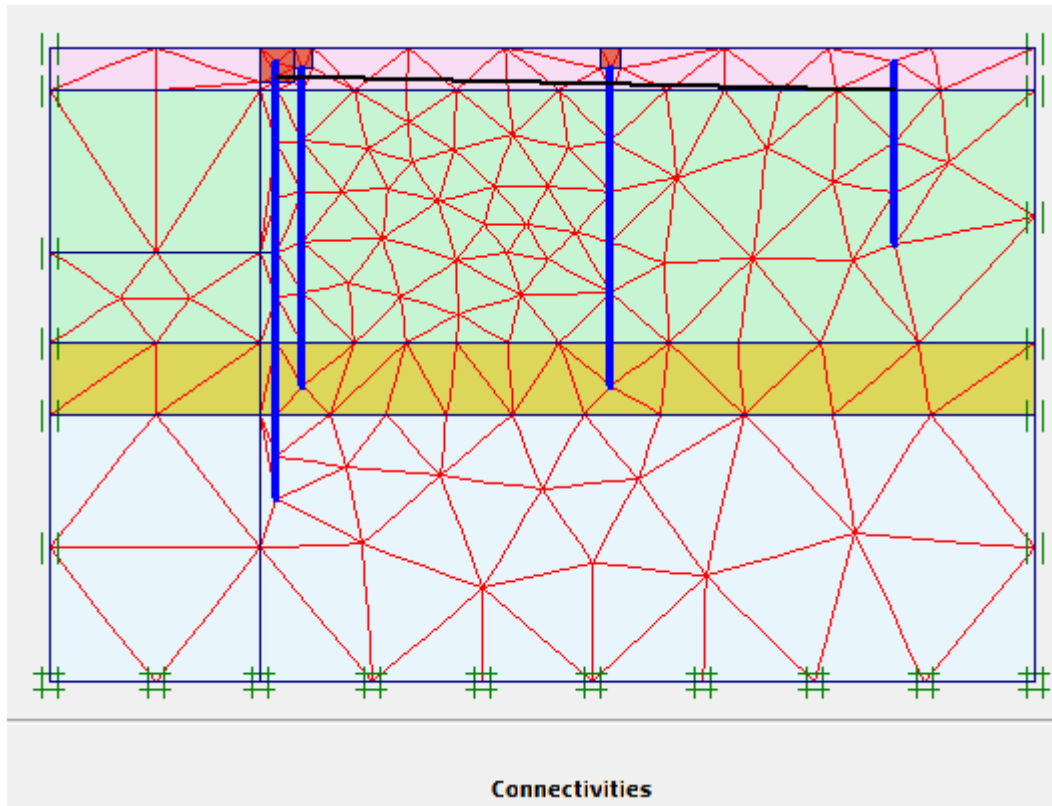


Figure IV.2. Le maillage du modèle.

IV.8. Conditions initiales

A/ Conditions hydrauliques

- **Poids volumique de l'eau**

On valide le poids volumique de l'eau salée : $\gamma = 10,30 \text{ kN/m}^3$.

- **Le niveau de la mer (côte 0.00m)**

Pour représenter le plan d'eau (niveau de la mer), on crée un sol fictif et on positionne une nappe phréatique.

- **La nappe phréatique du coté amont**

Sur le coté amont du quai, il existe une nappe phréatique à niveau de la mer. Pour la représentée on utilisera l'option 'Cluster phreatic level'.

Chapitre IV. Modélisation numérique avec Plaxis

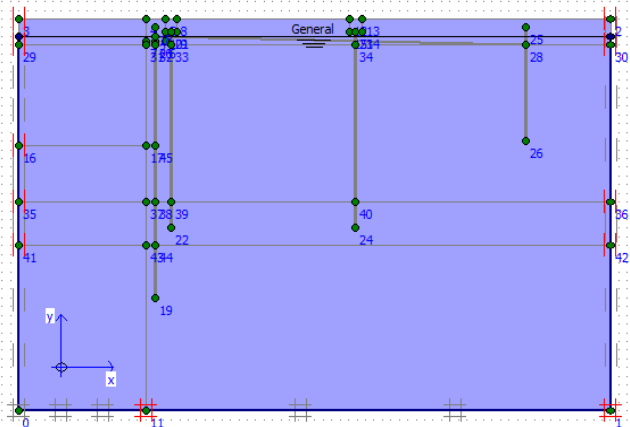
- **Couche de sol sèche**

Les couches de sol qui se trouvent au dessus des nappes phréatiques, ne sont pas saturées ; en d'autres termes on doit annuler les pressions interstitielles, ceci peut être réalisé en sélectionnant l'option Cluster dry.

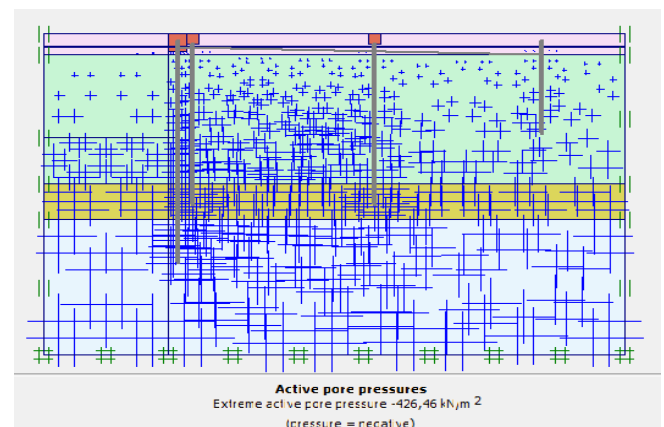
- **Génération des pressions hydrauliques**

On décide de générer les pressions hydrauliques à partir des nappes phréatiques.

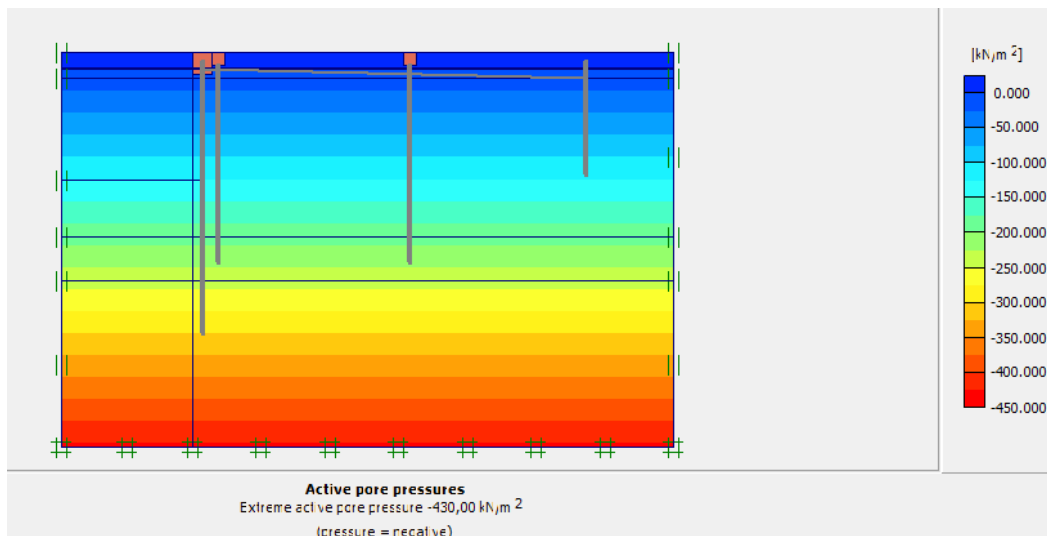
La valeur maximale des pressions interstitielles est $-426,46 \text{ KN/m}^2$



a/ Détermination des nappes phréatiques



b/ Génération des pressions hydrauliques



c/ Génération des pressions hydrauliques en mode shading

Figure IV.3. Les conditions hydrauliques initiales

- **Configuration de la géométrie initiale**

Pour le calcul des contraintes initiales, on désactive les éléments structuraux, les éléments de sol créés par défaut ainsi que les charges. On génère en suite les contraintes initiales en prenant les valeurs de K_0 par défaut (formule de Jaky)

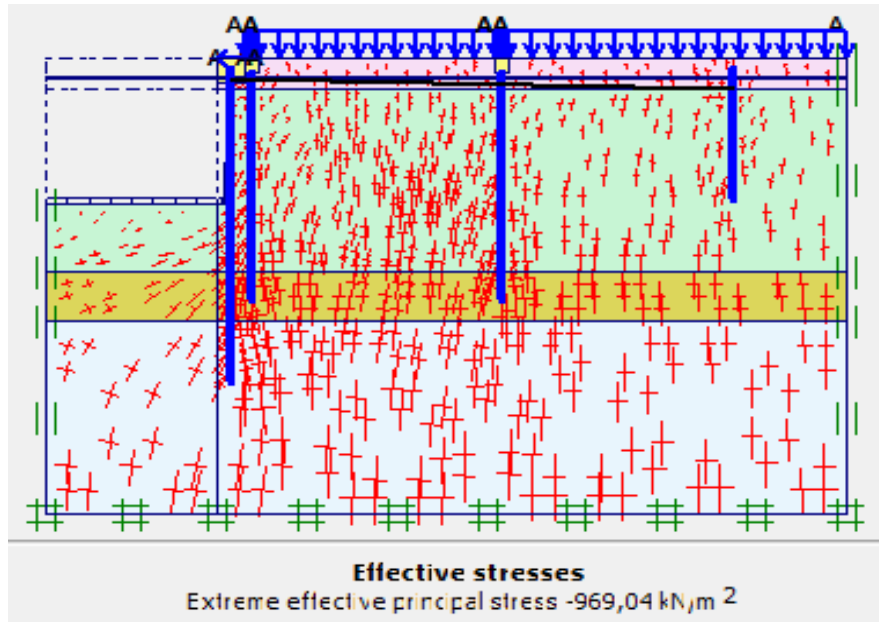


Figure IV.4. Génération des contraintes effectives initiales

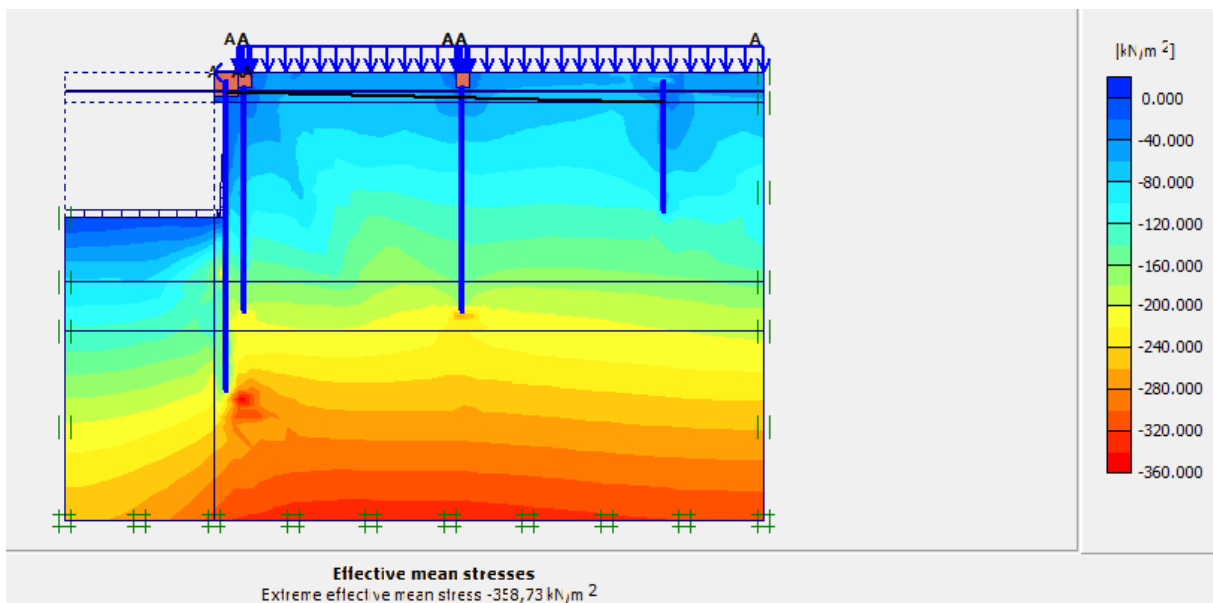


Figure IV.5. Génération des contraintes effectives dans le cas d'amarrage

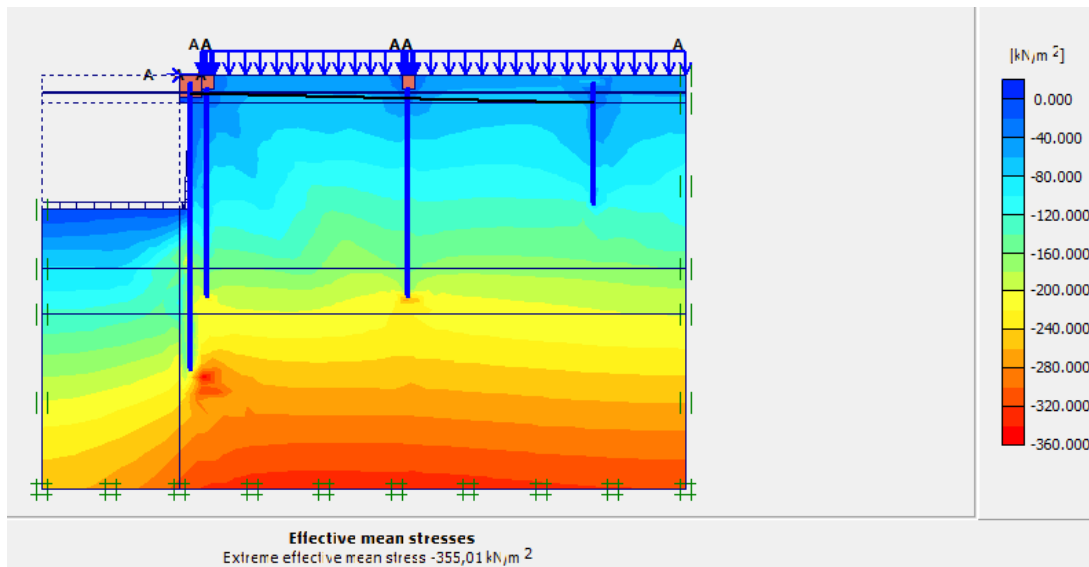


Figure IV.6. Génération des contraintes effectives dans le cas d'accostage

IV.9. Procédure de calculs

Le calcul du modèle de référence utilisé pour notre étude est un calcul plastique, qu'on définit en 06 phases, telles que les 03 premières décrivent la construction par étapes du projet, par contre les 03 autres phases retracent le comportement des palplanches et les pieux soumis à différents chargements.

Phase 0 : Initiation des contraintes (procédure K_0), on détermine les contraintes.

IV.9.1. Phases de réalisation par étapes du projet

Dans le programme de calcul, on sélectionne l'option construction par étape (Staged construction), et puis on insère des phases qu'on définit comme suit :

Phase 1 : Mise en place des palplanches

- On active les palplanches et les interfaces des palplanches-sol.

Phase 2 : Mise en place du pieu.

- On active le pieu et les interfaces pieu-sol, ainsi que les poutres en béton.

Phase 3 : Dragage et excavation autour des palplanches HZ

- On désactive les couches excavées.

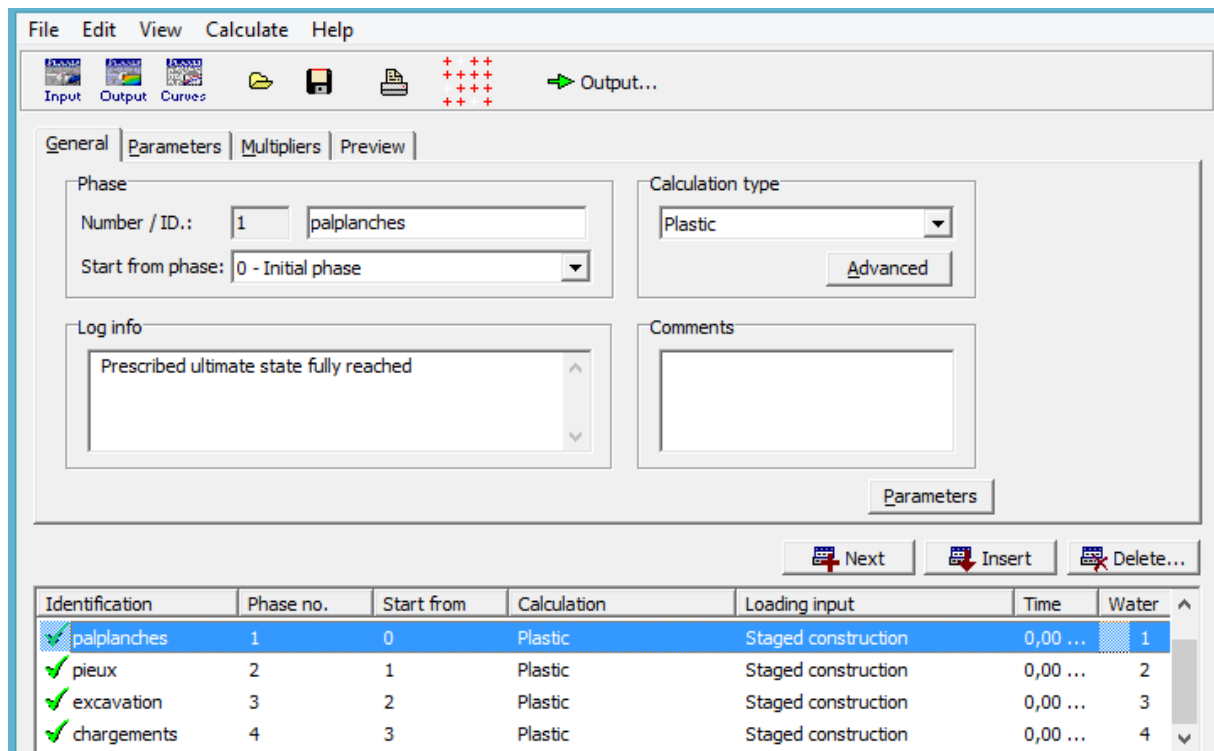


Figure IV.7. Fenêtre de calcul de différentes phases

IV.9.2. Quai en service

Le quai en phase 3 après calcul, représente l'état final des travaux, près à être exploiter. Dans ce qui suit, on entamera la procédure de définition des phases a partir de la phase 3 (Start from phase : 3-<Phase 3>).

Voici différentes possibilités de sollicitation auxquelles le quai est soumis :

Phase 4 : Surcharge uniformément répartie :

- On active la surcharge de 65 kN/m², appliquée sur la plate-forme.

Phase 5 : Effort d'amarrage :

- On applique un effort horizontal de -40 kN/m au bout de la plate-forme.

Surcharge uniformément répartie + un effort d'amarrage :

- On applique à la fois la surcharge de 65 kN/m² et l'effort horizontal de -40 kN/m.

Phase 6 : Effort d'accostage :

- La même démarche que la phase 5, mais avec un effort horizontal de +40 kN/m.

Surcharge uniformément répartie + un effort d'accostage :

- On active la surcharge de 65 kN/m² et l'effort horizontal de +40 kN/m.

On sélectionne les points de courbe et puis on lance le calcul.

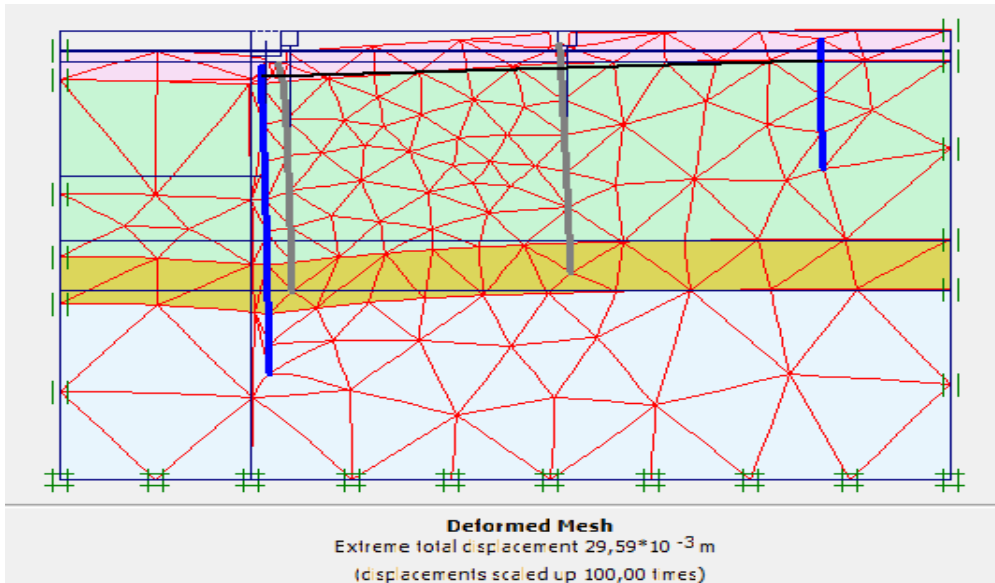


Figure IV.8. Déformation de la phase 1

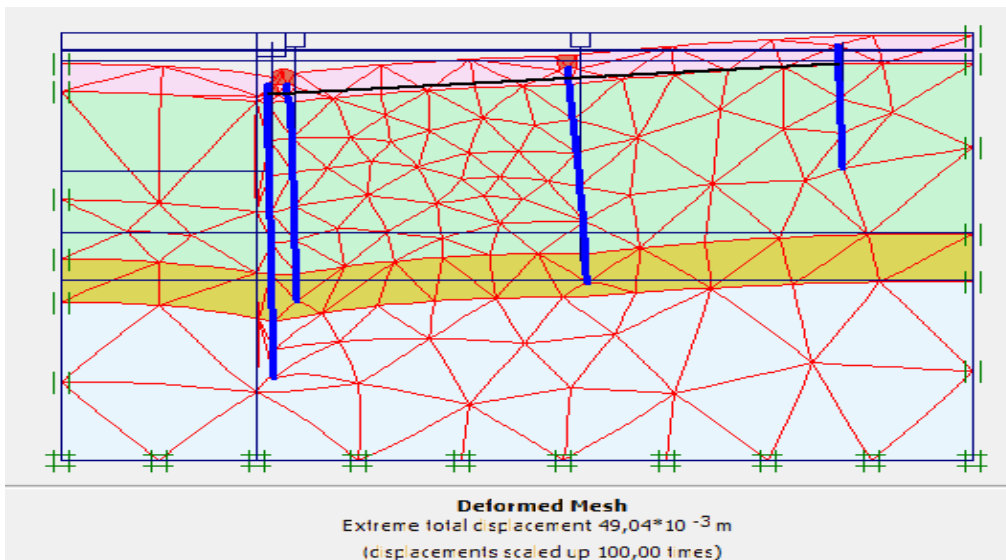


Figure IV.9. Déformation de la phase 2

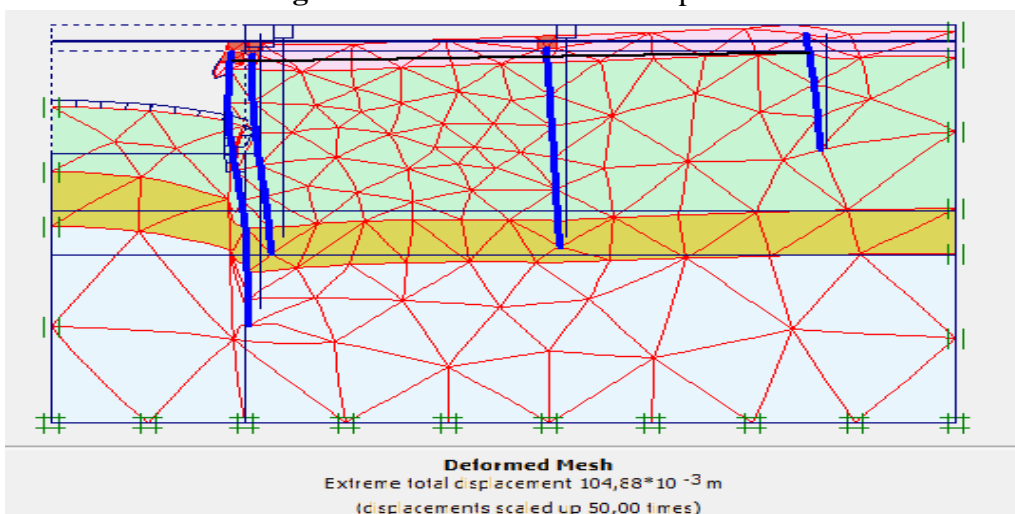
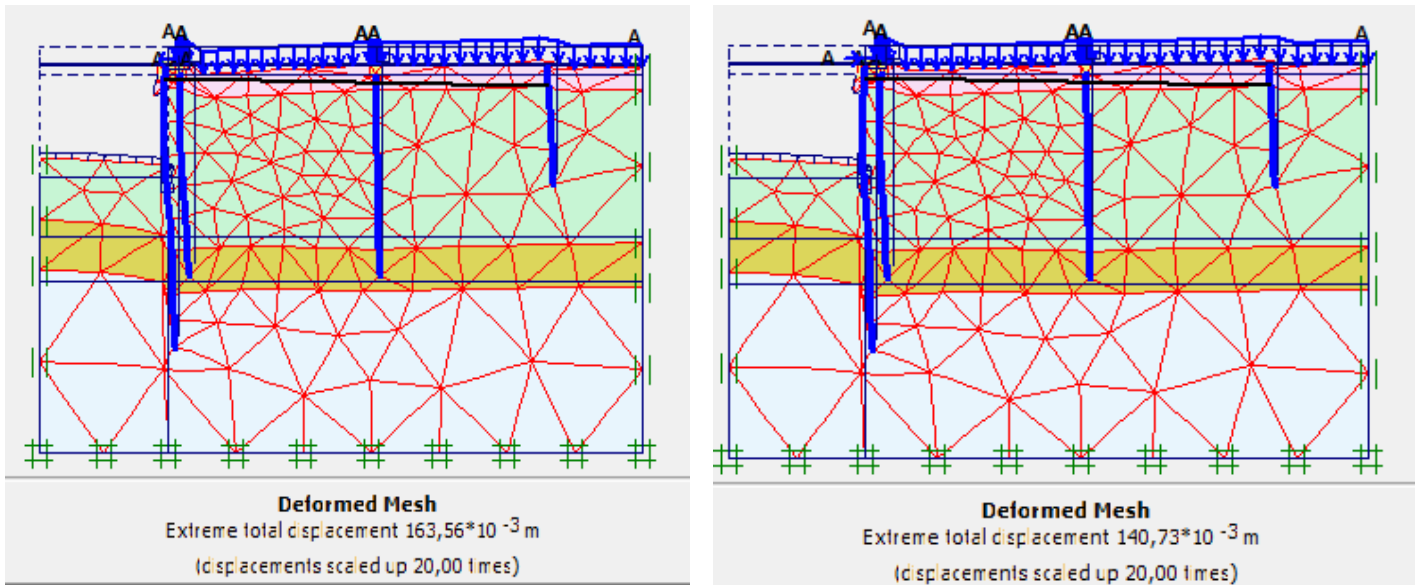


Figure IV.10. Déformation de la phase 3



a/Déformation finale : le cas d'amarrage

b /Déformation finale : le cas d'accostage

Figure IV.11. Déformation finale de quai

IV.10. Résultats des calculs de force dans le cas d'amarrage

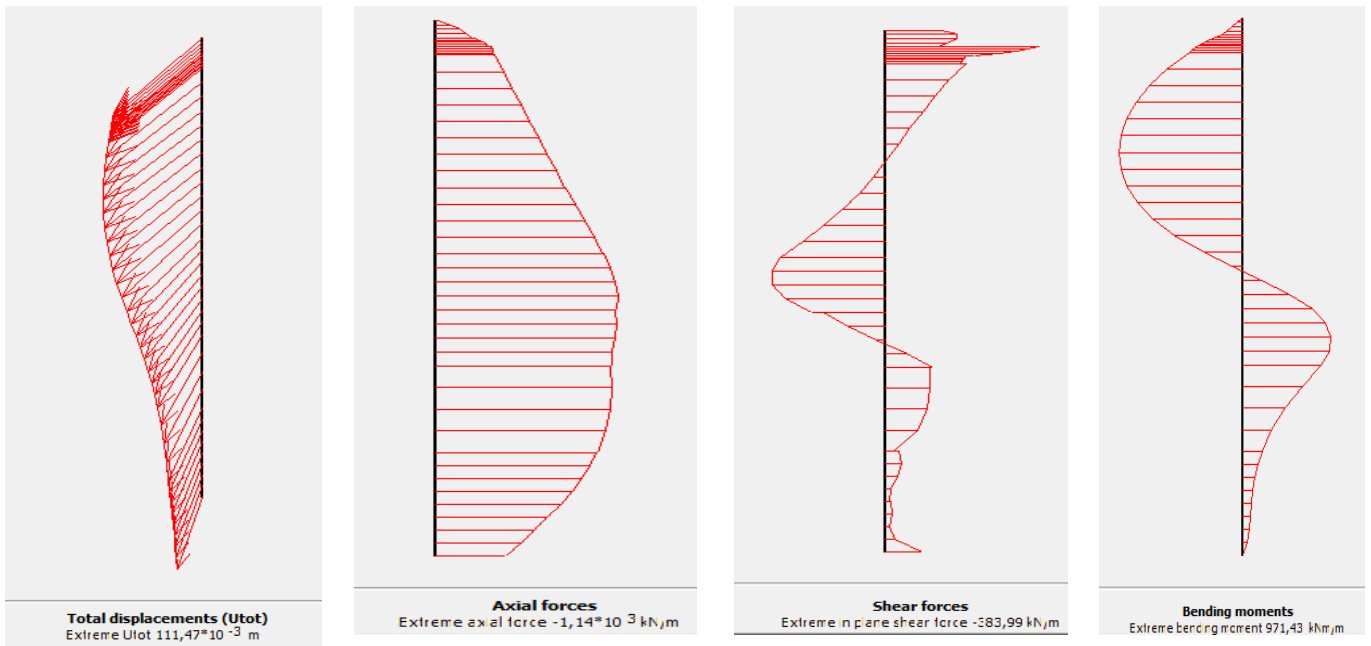


Figure IV.12. Les forces agissantes sur palplanche HZ

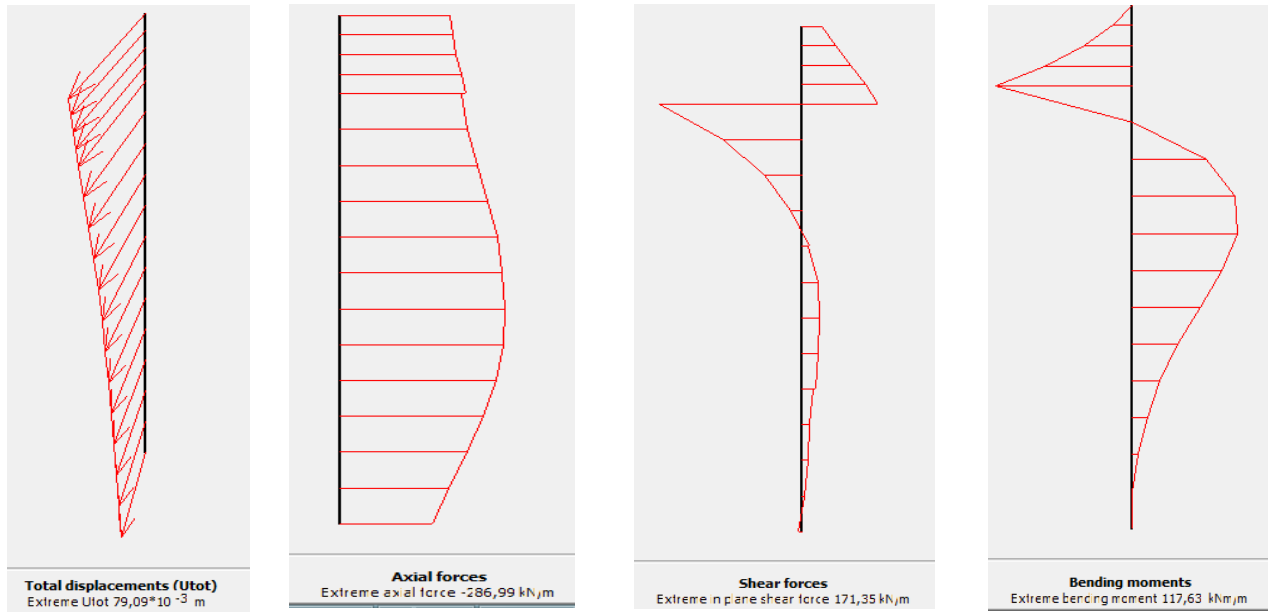


Figure IV.13. Les forces agissantes sur palplanche AZ

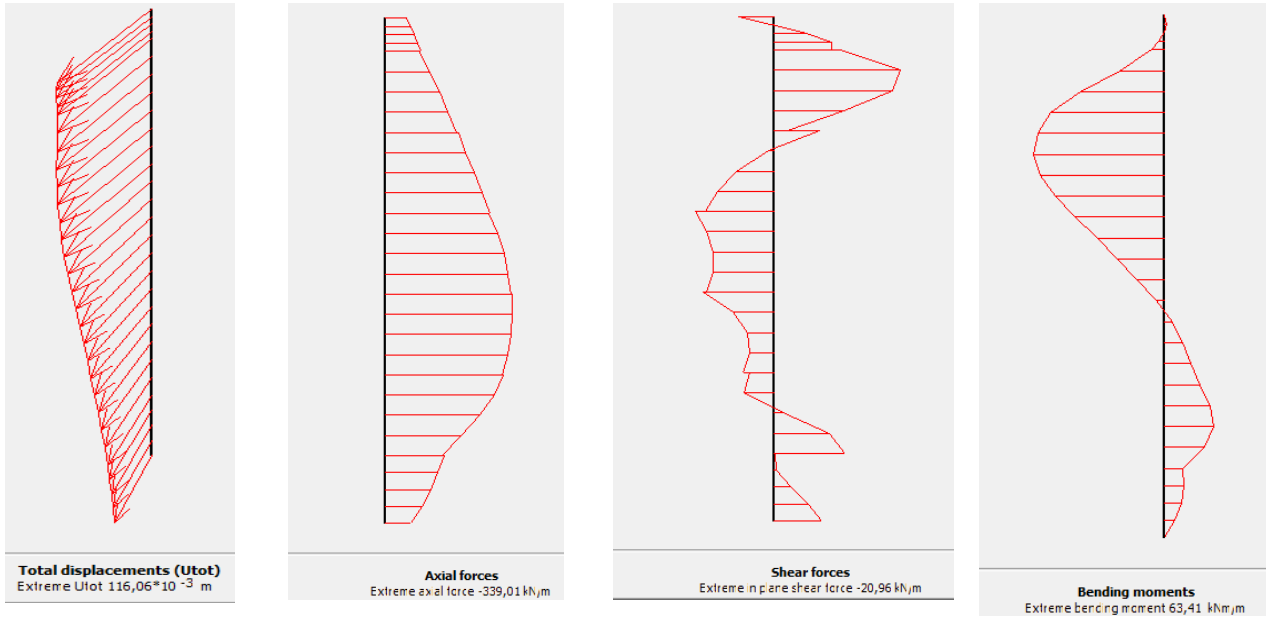


Figure IV.14. Les forces agissantes sur le pieu situé à gauche

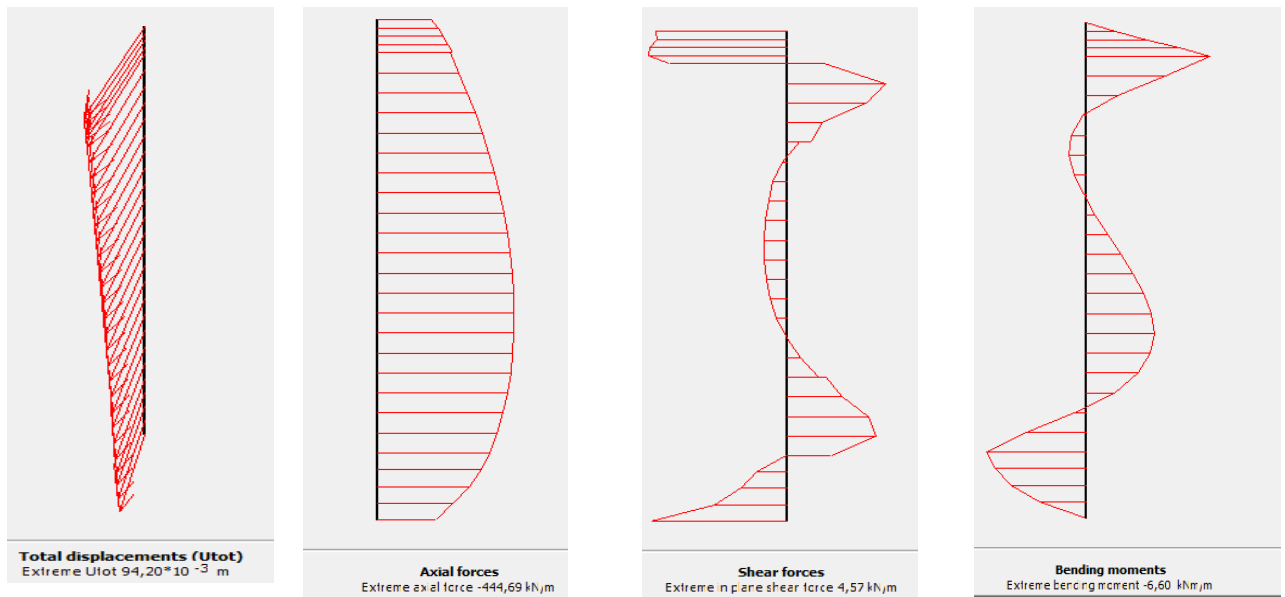


Figure IV.15. Les forces agissantes sur le pieu situé à droite

IV.11. Résultats des calculs de force dans le cas d'accostage

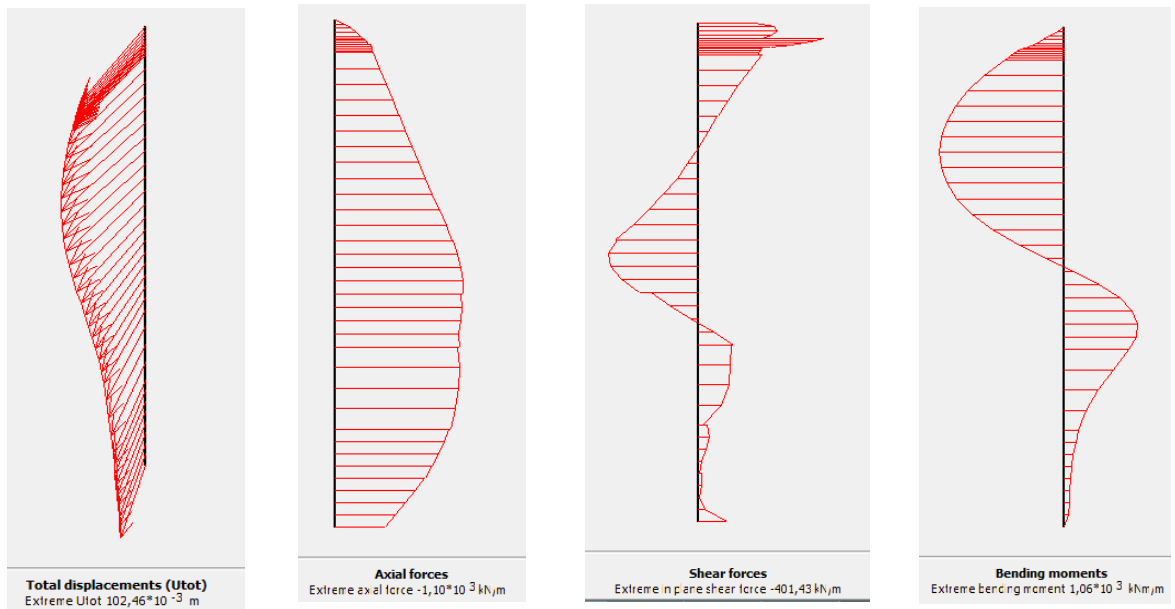


Figure IV.16. Les forces agissantes sur palplanche HZ

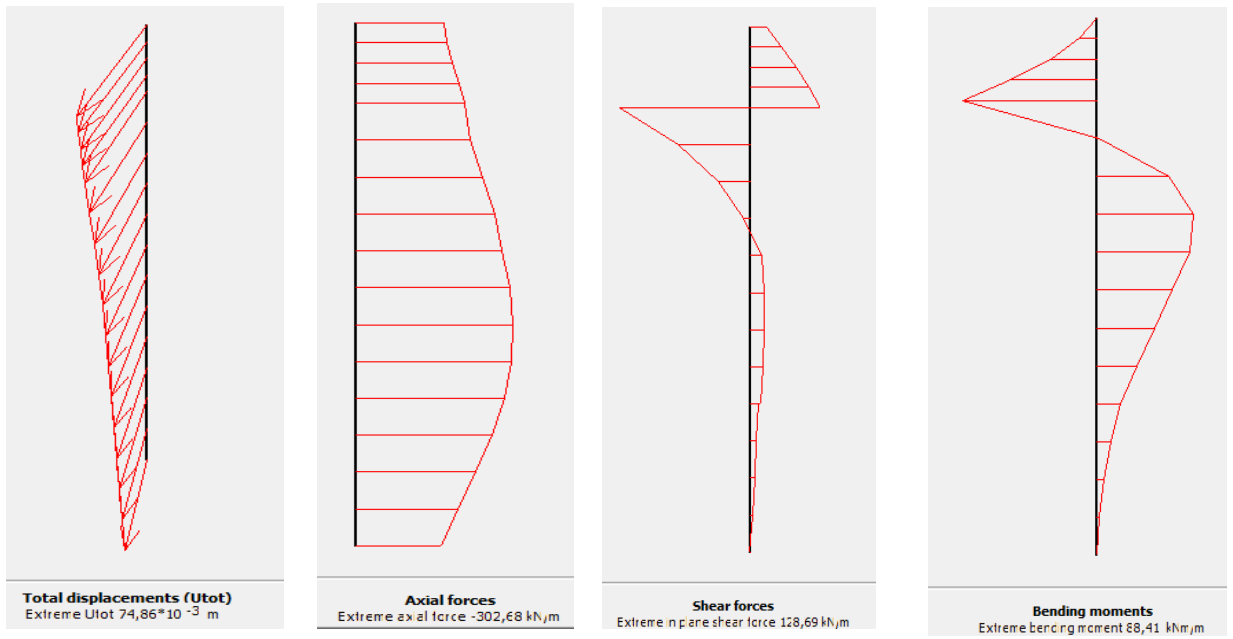


Figure IV.17. Les forces agissantes sur palplanche AZ

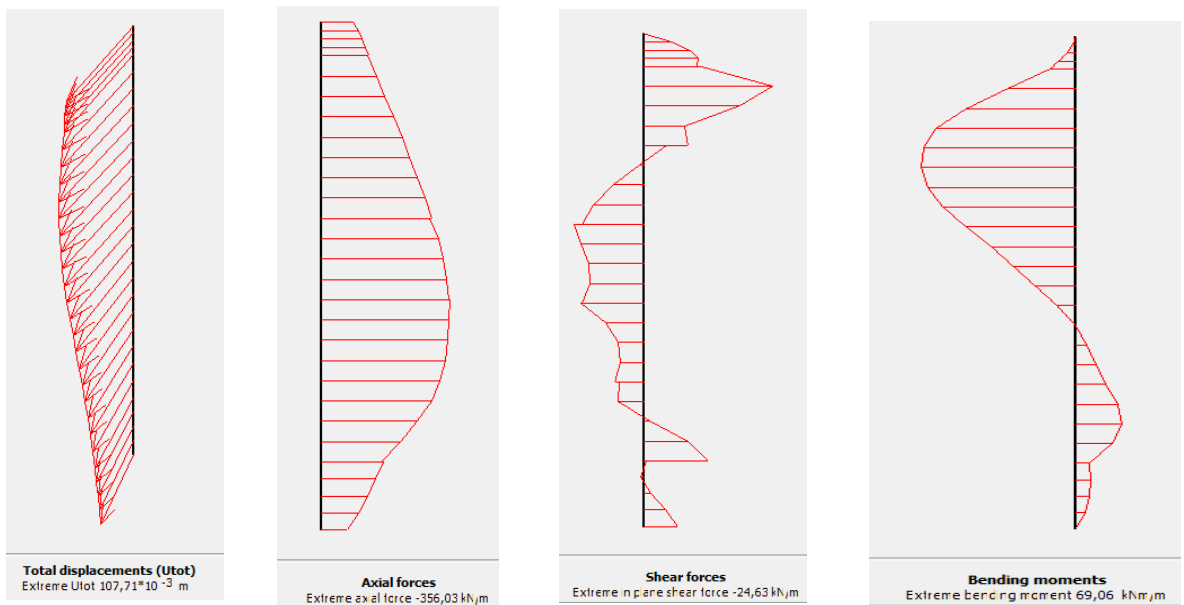


Figure IV.18. Les forces agissantes sur le pieu situé à gauche

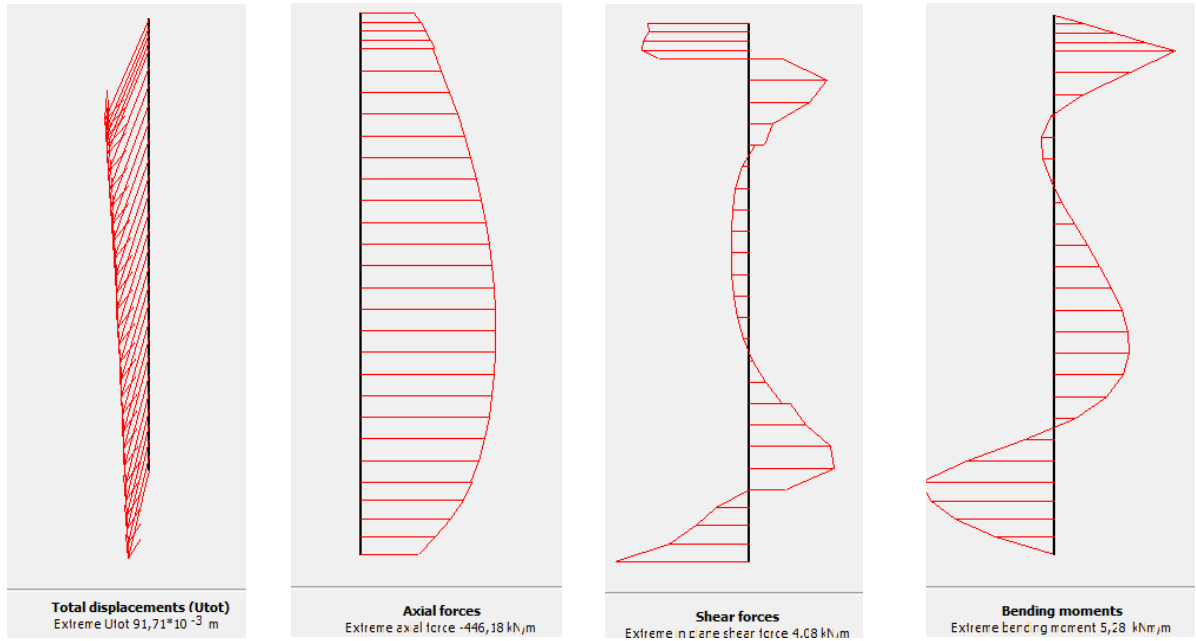


Figure IV.19. Les forces agissantes sur le pieu situé à droite

Tableau IV.4. Les résultats des calculs de force dans le cas d'amarrage

| | Déplacements(m) | Efforts normal (kN/m) | Efforts tranchant (kN) | Moments (kN.m) |
|----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Palplanche HZ | $111,47 \cdot 10^{-3}$ | $-1,14 \cdot 10^3$ | -383,99 | 971,43 |
| Palplanche AZ | $79,09 \cdot 10^{-3}$ | -286,99 | 171,35 | 117,63 |
| Pieu du gauche | $116,06 \cdot 10^{-3}$ | -339,01 | -20,96 | 63,41 |
| Pieu du Droite | $94,20 \cdot 10^{-3}$ | -444,69 | 4,57 | -6,60 |

Tableau IV.5. Les résultats des calculs de force dans le cas d'accostage

| | Déplacements(m) | Efforts normal (kN/m) | Efforts tranchant (kN) | Moments (kN.m) |
|----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Palplanche HZ | $102,46 \cdot 10^{-3}$ | $-1,10 \cdot 10^3$ | -401,43 | $1,06 \cdot 10^3$ |
| Palplanche AZ | $74,86 \cdot 10^{-3}$ | -302,68 | 128,69 | 88,41 |
| Pieu du gauche | $107,71 \cdot 10^{-3}$ | -356,03 | -24,63 | 69,06 |
| Pieu du Droite | $91,71 \cdot 10^{-3}$ | -446,18 | 4,08 | 5,28 |

IV.12. Comparaison et interprétation

L'effort d'amarrage est le plus défavorable qui enregistre un grand déplacement des palplanches et pieux (comme indiqué dans le Tableau IV.4), et la présence de la surcharge ne fait qu'accentuée sa déformation ; et le tirant d'ancrage travail beaucoup plus en présence de l'effort d'accostage, d'où le nombre élevé de points plastiques autour de la plaque d'ancrage.

L'amarrage des navires dus aux manœuvres d'amarrage, déplacement sous l'effet du vent, courant, passage des autres navires, etc ; font réagirent le pieu et le tirant d'ancrage qui présente un enjeu majeur pour absorber les efforts subit par la poutre de couronnement et les transmettre au sol, ainsi les contraintes effectives augmentent ou on enregistre une contrainte effective qui égale à -358.73kN/m^2 (Figure IV.5).

-Lors de l'accostage, on remarque une diminution du déplacement des palplanches et les pieux et de l'effort mobilisé par tirant d'ancrage (Tableau IV.5) par rapport à l'effort d'amarrage.

-On remarque que passant d'une phase à l'autre la déformation augmentent (Figure IV.8, IV.9, IV.10, IV.11).

-A partir des résultats on a constaté que la palplanche principale (dans notre cas palplanche HZ 1180MA-12) qui supportent les forces horizontales les plus élevés par rapport à la palplanche AZ 40-700N, et les pieux sont conçu pour supporter les forces verticales.

IV.13. Conclusion

La simulation avec le code Plaxis nécessite l'introduction des différents paramètres, les caractéristiques des sols, de l'écran de soutènement et des ancrages, données liées à l'eau aux phases de la réalisation et aux coefficients de réaction des sols qu'il faut déterminer par une étude géotechnique.

Un bon modèle numérique d'ouvrage doit permettre de prévoir simultanément tous les aspects de la réponse du sol et des structures aux sollicitations qui leur sont imposées (déplacements verticaux et horizontaux, contraintes et pressions interstitielles, moments et efforts dans les structures).

Les validations réalisées montrent que, si l'on dispose de suffisamment de données et notamment d'essais, les modèles numériques permettent de décrire, d'une manière relativement réaliste certains aspects du fonctionnement des ouvrages et les résultats de calcul soient globalement satisfaisants.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail qui rentre dans le cadre d'un projet de fin d'études de Master en Génie Civil, option Géotechnique, a pour objectif d'étudier l'aménagement d'un ouvrage portuaire utilisant un rideau de palplanches métalliques, proposé par le Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) d'Alger.

Dans un premier temps, on a montré le rôle important que joue un port dans le développement d'une région ou d'un pays. Puis, on a donné un aperçu général sur l'infrastructure portuaire en Algérie, qui reste malheureusement très en deçà des normes internationales actuelles.

Le port de Bejaia est, depuis quelques années, entré dans une dynamique de croissance, pour devenir le deuxième port commercial dans notre pays. L'extension de ce port nous ramène au nouveau quai de l'arrière port et plus précisément au poste 24, qui est aménagé avec une magistrale de 200 mètres constituée d'un rideau principal en palplanches ancré sur un rideau secondaire situé dans les terres. Deux rangées de pieux en béton armé reprennent la quasi-totalité des efforts verticaux dus à l'exploitation du quai en question.

D'un point de vue théorique, on s'est intéressé au comportement d'un rideau de palplanches, où on a fait la distinction entre un rideau libre en tête (sans ancrage ou en porte-à-faux) et un rideau ancré. Pour chacun de ces cas, on a présenté la différence qui existe entre un rideau fiché dans un sol granulaire (sable) et dans un sol cohérent (argile), pour ensuite, effectuer une application numérique concrète pour le rideau de palplanches du poste 24 du port de Bejaïa.

Dans la deuxième partie du travail consacré à la modélisation numérique d'un rideau de palplanches, on a utilisé le code de calcul Plaxis 2D, pour simuler le comportement du sol constitué de quatre couches de différents sables et celui des éléments structurants (deux rideaux de palplanches, tirant d'ancrage, deux rangées de pieux, deux poutres sous rails et une poutre de couronnement).

Dans cette modélisation, deux cas relatifs à l'exploitation du quai ont été traités : cas de l'accostage des navires et cas de leur amarrage. Les résultats sous forme de diagrammes, ont donné, des déplacements, des efforts et des moments plus importants pour le cas de l'amarrage que pour le cas d'un accostage.

Le cas de l'amarrage des bateaux est plus défavorable pour la stabilité du quai, car la force d'amarrage, horizontale s'ajoute à la poussée des terres qui agit sur le rideau principal ; par contre, la force d'accostage est en sens contraire de la poussée. Ces forces doivent être

étudiées avec beaucoup d'attention car leur action brusque, instantanée et répétée a un effet néfaste sur la stabilité d'ensemble d'un quai portuaire.

Comme dans tout projet, il convient de prendre du recul sur le travail effectué et d'en analyser les points forts et les points faibles. Ceci permet d'en définir les limites et ainsi de déterminer des pistes d'améliorations et des perspectives pour des travaux ultérieurs portant sur le même sujet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARCELORMITTAL (2022) « Palplanches catalogue général » Paris.
- BRAJA M.D. (2019) « Soil Mechanics Fundamentals» Edition 7. Etats-Unis.
- BRINKGEREVE R.B. (2003) « PLAXIS Version 8, Manuel de référence » DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas
- CHAPON J. (1975) «Travaux maritimes Tome II : Les ouvrages intérieurs des ports maritimes-Dégagements des accès et plans d'eau des ports» Eyrolles, Paris, 3^{ème} Edition
- CHAPON J. (1978) «Travaux maritimes Tome I : Le milieu marin, le navire, la navigation, les côtes, les ouvrages extérieurs des ports maritimes» Eyrolles, Paris, 4^{ème} Edition
- ESKANDARI, L., & KALANTARI, B. (2011). Basic Types of Sheet Pile Walls and Their Application in the Construction Industry—a Review. EJGE. Vol.16; pp 1533-1541.
- HANNIGAN P.J., GOBLE G.G., THENDEAN.G., LIKINS G.E et RAUSCHE.F. (1998) «Design and construction of Driven Foundation .workshop Manuel-volume I » Report N° FHWA_HI-97-013, U.S Department of transportation,Federal Highway Administration, 828p
- JOSSEAUME H. (1974). Méthode de calcul des rideaux de palplanches. Etude bibliographique. Bulletin Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées. N°72. pp 177-212.

- Laboratoire d'Etudes Maritimes LEM (2011) « Etude d'extension du nouveau quai poste 24 du port de Bejaïa », Rapport technique_Mission 3 : Avant projet détaillé Alger.
- MCIF Société canadienne de géotechnique (2006) « Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations » 4^{ème} Edition.
- PLUMELLE C. (2003) « Cours-Fondations-Profondes ». Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Paris
- PLUMELLE C. (2004-2005) « Chapitre XV/Pieux cours CNAM , option Géotechnique B1/B6»
- TSCHEBOTARIOFF G.P, BROWN P.P (1948) « Lateral earth pressure as a problem of deformation or of rupture », Comptes-rendus du II^e CIMSTF,vol.II, pp :81-86.
- TOMLINSON R.F. (1987) « Current and potential uses of geographical information systems The North American experience» INT.Journal of GIS, 1. pp: 203-218.

Annexe n°1

Disposition des points de sondage carottés et coupes lithologiques

COUPES LITHOLOGIQUES

SC1

| Hm | Litho | Description des couches |
|-----|-------|---|
| 0 | | La plate forme en béton |
| -1 | | Remblais |
| -2 | | |
| -3 | | Galets et sables fins |
| -4 | | |
| -5 | | Sable fin lâche à débris de coquilles, cimenté par la vase entre 18.60 et 20.50m. |
| -6 | | |
| -7 | | |
| -8 | | |
| -9 | | |
| -10 | | |
| -11 | | |
| -12 | | |
| -13 | | |
| -14 | | |
| -15 | | |
| -16 | | |
| -17 | | Vase très plastique grise à noire |
| -18 | | |
| -19 | | Vase sableuse |
| -20 | | Sables limoneux |
| -21 | | |
| -22 | | |
| -23 | | |
| -24 | | |
| -25 | | |
| -26 | | |
| -27 | | |
| -28 | | |
| -29 | | |
| -30 | | |
| -31 | | |
| -32 | | Sable fin lâche à débris de coquilles, présentant de la vase par endroits |
| -33 | | |
| -34 | | |
| -35 | | |
| -36 | | |
| -37 | | |
| -38 | | |
| -39 | | |
| -40 | | |
| -41 | | |
| -42 | | |
| -43 | | |
| -44 | | |
| -45 | | |

SC2

| Hm | Litho | Description des couches |
|-----|-------|---|
| 0 | | |
| -1 | | Remblais |
| -2 | | |
| -3 | | Sables moyens à fins lâches, présentant des cailloux centimétriques et qqs graviers |
| -4 | | |
| -5 | | Sables limoneux |
| -6 | | |
| -7 | | |
| -8 | | |
| -9 | | |
| -10 | | |
| -11 | | |
| -12 | | |
| -13 | | |
| -14 | | |
| -15 | | |
| -16 | | |
| -17 | | Vase très plastique grise à noire |
| -18 | | |
| -19 | | Vase sableuse |
| -20 | | Sables fins |
| -21 | | |
| -22 | | |
| -23 | | |
| -24 | | |
| -25 | | |
| -26 | | |
| -27 | | |
| -28 | | |
| -29 | | |
| -30 | | |
| -31 | | |
| -32 | | |
| -33 | | |
| -34 | | |
| -35 | | |
| -36 | | |
| -37 | | |
| -38 | | |
| -39 | | |
| -40 | | |
| -41 | | |
| -42 | | |
| -43 | | |
| -44 | | |
| -45 | | |

SC3

| Hm | Litho | Description des couches |
|-----|-------|---------------------------------------|
| 0 | | |
| -1 | | Remblais |
| -2 | | |
| -3 | | Sables moyens à fins |
| -4 | | |
| -5 | | |
| -6 | | |
| -7 | | |
| -8 | | |
| -9 | | |
| -10 | | |
| -11 | | |
| -12 | | |
| -13 | | |
| -14 | | |
| -15 | | |
| -16 | | |
| -17 | | |
| -18 | | |
| -19 | | |
| -20 | | |
| -21 | | Vase très plastique grise à noire |
| -22 | | |
| -23 | | Vase sableuse |
| -24 | | Sables limoneux présentant de la vase |
| -25 | | |
| -26 | | |
| -27 | | |
| -28 | | |
| -29 | | |
| -30 | | |
| -31 | | |
| -32 | | |
| -33 | | |
| -34 | | |
| -35 | | |
| -36 | | |
| -37 | | |
| -38 | | |
| -39 | | |
| -40 | | |
| -41 | | |
| -42 | | |
| -43 | | |
| -44 | | |
| -45 | | |

Annexe n°2

Plan de masse et implantation

