

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية  
فرنسيس جاتسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics  
Francis Jeanson



# Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

# Thème

**Etude d'Aménagement du bassin de l'Oued  
El Mohgoun et de l'Appontement Méthanier  
(ex. Jetée Méthane) en Môle Commercial n°5  
au Port d'Arzew**

Présenté par :

Adel ISSAD  
Sihem HAKEM

Encadré par :

M. Douadi RAHMANI  
M. Ahmed ADEL

Promotion 2023/2024

# Remerciements

Al-ḥamdu li-l-lāh ! Merci dieu de nous avoir donné la résilience pour accomplir en temps et en heure ce projet, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés rencontrées.

Au moment d'exprimer notre reconnaissance envers les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail, nous souhaitons tout d'abord remercier M. ADEL Ahmed et M. RAHMANI Douadi qui ont dirigé ce PFE. M. ADEL a su guider nos choix, et nous a fait profiter de ses connaissances. La simplicité et la franchise de M. RAHMANI ont largement contribué à rendre non seulement ces trois mois mais ces trois années agréables. Merci messieurs pour vos orientations, conseils, et vos consignes pertinentes tout au long de ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à M. TAFRAOUT, qui, même si n'a pas été notre encadrant, mais a répondu présent à toutes nos demandes, nous vous sommes très reconnaissants, vous avez marqué notre parcours universitaire. Nous saluons votre ouverture d'esprit, votre confiance et la motivation qu'il sait inspirer aux personnes avec qui il travaille.

Nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude à toute l'équipe du CHEC pour leur soutien inestimable et leur accueil chaleureux. Tout d'abord, nous tenons à remercier particulièrement Mme HUANG JING, directrice commerciale du CHEC Algérie, pour nous avoir offert l'opportunité de travailler dans un environnement si dynamique et enrichissant. M. Stéphane Fu LINJUN, directeur du projet du port d'Arzew, son leadership et sa vision ont été des sources d'inspiration constantes. M. Pierre, directeur adjoint du projet, sa rigueur et son dévouement ont été inestimables. Lamys, ingénieure responsable du projet, son expertise et son engagement ont fait toute la différence. M. Fan, directeur des travaux, vos nombreux conseils, votre hospitalité et votre disponibilité ont été d'un grand soutien.

Enfin, à tout le personnel du CHEC, que ce soit à Hydra ou à Arzew, votre enthousiasme et votre professionnalisme ont rendu notre expérience inoubliable. Votre contribution dépasse largement ce que les mots peuvent exprimer. Merci pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Nos remerciements se dirigent de la même façon au personnel du LEM pour avoir facilité le travail et la logistique administrative; pour la collaboration et l'indispensable soutien des ingénieurs, les jeudis partagés ensemble ont été grandement bénéfiques.

Nous avons évidemment une pensée pour toutes celles et ceux qui nous ont permis de mener à bien ce PFE, à savoir nos familles et nos amis. Nos professeurs qui nous ont toujours soutenu, conseillé, aidé et qui ont fait que nous avons jamais eu le sentiment d'avoir perdu le soleil, nous pensons particulièrement à Mme LARBI, Mme CHIALI, M. BENREDOUANE, M. HAMADI, M. BOUHENNICHE et la liste est longue... Merci aussi à tout le personnel de notre école. Merci pour tout ce qu'ils nous ont apporté, consciemment ou inconsciemment. Ce fut cinq agréables années passées à vos côtés.

Merci à vous cher lecteur !

## **Dédicaces**

Je dédie ce projet de fin d'études à mes parents, mon frère et ma sœur dont le soutien inconditionnel et les encouragements constants ont été la source de ma motivation et de ma persévérance tout au long de ce parcours. Leur amour et leurs sacrifices ont été indispensables à la réalisation de cet objectif.

À mes grands-parents maternels et paternels Allah Yerhamhoum, pour leurs bénédictions, leur sagesse et leur amour qui m'ont toujours inspirée.

À mes professeurs et encadrants, pour leur dévouement et leur expertise, qui ont guidé mes pas et enrichi mon savoir.

À mes amis et collègues, pour leur camaraderie, leur aide précieuse et les moments partagés qui ont rendu ce voyage académique mémorable.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon développement personnel et professionnel, depuis mon jeune âge, je vous en suis infiniment reconnaissante.

**S.HAKEM**

## **Dédicaces**

À mes parents, sources de lumière,  
À mes tantes et oncles chers,  
À ma famille élargie, précieux repères,  
À mon grand-père Papasidou, sage conseiller,  
À mon frère, mes cousins, compagnons de mes jours,  
À mes amis de cœur.

À toi, ma grand-mère, étoile bien-aimée,  
Allah Yermak, que ton âme tant adorée soit en paix,  
Celle qui m'a élevé, que je pleure sans fin,  
Ton souvenir m'habite, lumineux et divin.  
De là-haut, vois, je suis ingénieur aujourd'hui,  
Comme tu l'espérais, j'ai accompli ce défi.  
Sois fière de moi, mon étoile éternelle,  
Chaque pas, chaque succès, est un hommage fidèle.

À mes professeurs, depuis le tout premier jour,  
Chaque leçon, chaque mot, ont forgé mon parcours.  
Grâce à vous, mon chemin s'est illuminé,  
Votre sagesse, votre foi, m'ont tant apporté.

À tous, je dis merci, avec un cœur vibrant,  
Votre soutien, votre amour, sont si inspirants.  
C'est ensemble que nous avons franchi chaque pas,  
Ma réussite est vôtre, chaque jour, chaque mois.

Je vous aime, vous honore, en ce jour spécial,  
Cette dédicace est notre lien, éternel et loyal.  
Je vous offre mon cœur, avec gratitude sans limite et vous dédie ce succès, en  
gage de mon amour.

**A.ISSAD**

## Liste des abréviations et symboles

**EC** : Eurocode.

**NF** : Norme Française.

$\gamma$  : Poids volumique du matériau.

$\gamma'$  : Poids volumique déjaugé.

$\gamma_b$  : Poids volumique du béton.

**C** : Cohésion.

$\varphi$  : Angle de frottement interne.

$\gamma_w$  : Densité de l'eau de mer.

$\eta$  : Coefficient de fissuration.

$f_{c28}$  : Résistance à la compression du béton à 28 jours.

$f_{t28}$  : Résistance à la traction du béton à 28 jours.

**F** : Effort d'amarrage.

**G** : Charges permanentes.

**Q<sub>i</sub>** : Charges d'exploitations.

**SI** : Force d'inertie du séisme.

**K<sub>h</sub>** : Accélération horizontale de séisme.

**K<sub>v</sub>** : Accélération verticale de séisme.

**F<sub>r</sub>** : Coefficient de sécurité au renversement.

**F<sub>g</sub>** : Coefficient de sécurité au glissement.

**F<sub>p</sub>** : Coefficient de sécurité au poinçonnement.

$\delta$  : Angle d'inclinaison de la charge.

**K<sub>a</sub>** : Coefficient de poussée de Mononobé Okabé.

**K<sub>q</sub>** : Coefficient de poussée due aux surcharges.

**P<sub>ex</sub>** : poussée des terres extérieures.

## Liste des abréviations et symboles

**P<sub>rem</sub>** : poussée de remplissage sur les parois internes.

**P<sub>hs</sub>** : poussée hydrostatique du marnage.

**P<sub>hd</sub>** : Poussée hydrodynamique.

**P<sub>q</sub>** : poussée due aux surcharges.

**$\sigma$**  : Contrainte.

**M<sub>r</sub>** : Moment renversant.

**M<sub>s</sub>** : Moment stabilisant.

**S** : Section.

**V** : Volume.

**E<sub>x</sub>** : Séisme horizontale direction x.

**E<sub>y</sub>** : Séisme horizontale direction y.

**E<sub>z</sub>** : Séisme horizontale direction z.

**AMCH** : Analyse Multicritère Hiérarchique.

**HAP** : hydrocarbures aromatiques polycycliques.

**PCB** : Les biphényles polychlorés.

**ELS** : État limite de service.

**ELU** : État limite ultime.

**ELA** : Etat limite accidentel.

**SSAC** : Section sans acier comprimé.

**A<sub>s</sub>** : Section d'armatures.

**EIE** : Etude d'Impact Environnemental.

**EVP** : équivalent vingt pieds.

**LEM** : Laboratoire d'Etude Maritimes.

**BMVE** : Basse Mer Moyenne de Vive-Eau.

**PMVE** : Pleine Mer Moyenne de Vive-Eau.

## Résumé

Ce projet de fin d'études est une étude détaillée d'aménagement du bassin de l'Oued El Mohgoun et de l'appontement méthanier (ex. Jetée Méthane) en môle commercial no5 au Port d'Arzew, un thème proposé par l'Entreprise Portuaire d'Arzew (EPA), étudié par le Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) et concrétisé par un groupement dont La China Harbour Engineering Company Ltd. (CHEC) fait partie et qui est l'atelier de notre stage en plus de Cosider et Meditram. Pour ce faire, nous avons d'abord effectué une recherche bibliographique sur les ouvrages maritimes et le dragage. Puis, nous avons collecté le maximum de données lors de notre visite sur site. Nous avons, ensuite, proposé deux variantes que nous avons, nous-mêmes, esquissé sur AutoCAD et avons fait une analyse multicritère hiérarchique (AMCH) pour adopter le choix de la variante finale, une sorte d'avant-projet sommaire (APS). Par la suite, après avoir calculé les charges, nous avons vérifié la stabilité externe du caisson composant notre quai (vis-à-vis du glissement, renversement et poinçonnement). Pour le calcul du ferrailage, nous avons d'abord procédé à la modélisation de la structure du caisson sur logiciel Robot Structural Analysis, introduit les charges et les combinaisons puis nous avons extraits les moments ultimes (maximums) qui nous ont permis de calculer le ferrailage avec le BAEL 91 rév 99. Nous avons ainsi vérifié les sections d'armature avec le logiciel Expert BA. Ensuite, nous avons analysé et traité les données de la campagne géotechnique relative au produit de dragage et nous avons fait notre constat sur la réutilisabilité de ce produit. Pour finir, amis de l'environnement que nous sommes, nous avons établi une étude d'impact sur l'environnement et proposer des éléments pour réduire les impacts.

**Mots-clés :** quai, caisson, stabilité, radier, dragage, môle, fondation.

## Resume

This final year project is a detailed study of the development of the Oued El Mohgoun basin and the methane jetty (formerly Methane Pier) into commercial pier no. 5 at the Port of Arzew, a theme proposed by Entreprise Portuaire d'Arzew (EPA), studied by the Maritime Studies Laboratory (LEM), and realized by a consortium that includes China Harbour Engineering Company Ltd. (CHEC), which is also the site of our internship, in addition of Cosider et Meditram. To achieve this, we first conducted a bibliographic search on maritime structures and dredging. Then, we collected as much data as possible during our site visit. We then proposed two variants, which we ourselves sketched on AutoCAD, and conducted a hierarchical multi-criteria analysis (HMCA) to choose the final variant, a sort of preliminary design (APS). Subsequently, after calculating the loads, we verified the external stability of the caisson forming our quay (against sliding, overturning, and punching). For the rebar calculation, we first modeled the caisson structure using Robot Structural Analysis software, input the loads and combinations, and then extracted the ultimate moments (maximums), which allowed us to calculate the rebar according to BAEL 91 rev 99. We verified the reinforcement sections using Expert BA software. Next, we analyzed and processed the geotechnical survey data related to the dredged material and assessed its reusability. Finally, as environmentally conscious individuals, we conducted an environmental impact study and proposed measures to mitigate the impacts.

**Keywords:** quay, caisson, stability, raft, box-section, dock, dredging, mole, foundation.

## ملخص

هذا المشروع النهائي هو دراسة تفصيلية لتطوير حوض واد المحقون ورسيف الميثان (الرسيف السابق للميثان) في الرسيف التجاري رقم 5 في ميناء أرزيو، وهو موضوع مقترح من قبل مؤسسة ميناء أرزيو، ودُرس من قبل مختبر الدراسات البحرية وتم تحقيقه من قبل مجموعة تضم شركة تشاينا هاربور للهندسة والتي تعد ورشة تدريبنا بالإضافة إلى كوسيدر وميدترام. لتحقيق ذلك، قمنا أولاً بإجراء بحث ببليوغرافي حول الهياكل البحرية والجرف. ثم جمعنا أكبر قدر ممكن من البيانات أثناء زيارتنا للموقع. بعد ذلك، اقترحنا اثنين من المتغيرات التي قمنا برسمها بأنفسنا على البرنامج وقمنا بإجراء تحليل متعدد المعايير لاتخاذ خيار المتغير النهائي، وهو نوع من التصميم الأولي. بعد ذلك، بعد حساب الأحمال، تحققنا من الاستقرار الخارجي للحوض المكون لرسيفنا (مقابل الانزلاق والانقلاب والانتقاب). لحساب التسليح، قمنا أولاً بنمذجة هيكل الحوض على البرنامج، وأدخلنا الأحمال والمجموعات ثم استخراجنا اللحظات القصوى التي سمحت لنا بحساب التسليح باستخدام الدليل. ثم تحققنا من مقاطع التسليح باستخدام البرنامج. بعد ذلك، قمنا بتحليل ومعالجة بيانات الحملة الجيوتقنية المتعلقة بالمنتج المجروف وقمنا بتقييم إعادة استخدام هذا المنتج. أخيراً، كأصدقاء للبيئة، قمنا بإجراء دراسة لتأثير البيئة واقتراح عناصر لتقليل التأثيرات.

الكلمات المفتاحية: رسيف، صندوق، استقرار، قاعدة، جرف، حاجز، أساس

**Liste des tableaux**

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.1 – Navires de dimensionnement attendus.....  | 22 |
| Tableau II.2 - Les profondeurs liées aux embarcations du projet.....                                       | 22 |
| Tableau II.3 – Linéaire des différents quais pour les embarcations.....                                    | 22 |
| Tableau II.4 – Besoins en surface de terre-pleins.....   | 22 |
| Tableau II.5 - coefficient d'accélération.....   | 23 |
| Tableau II.6 – Devis Quantitatif estimatif (DQE).....  | 26 |
| Tableau II.7 - échelle proposée par Saaty.....   | 27 |
| Tableau II.8 – Matrice de comparaison binaire.....   | 27 |
| Tableau II.9 – cohérence aléatoire.....  | 28 |
| Tableau II.10 – Tableau d'évaluation finale.....   | 29 |
| Tableau IV.1 - Géométrie de caisson.....   | 31 |
| Tableau IV.2 - poids volumique de matériaux.....   | 32 |
| Tableau IV.3 - Masse volumique des remblais.....   | 33 |
| Tableau IV.4 - Poids Propre du caisson.....  | 34 |
| Tableau IV.5 - Récapitulatif du CDG du quai.....   | 35 |
| Tableau IV.6 - charge de calcul exercée par le portique.....   | 37 |
| Tableau IV.7 – Caractéristiques du Reachstacker CS45.....  | 37 |
| Tableau IV.8 - Récapitulatif des coefficients de poussées.....   | 39 |
| Tableau IV.9 - Résultats du calcul de la poussée des terres.....   | 40 |
| Tableau IV.10 - Résultats du calcul de la surcharge d'exploitation.....                                    | 42 |
| Tableau IV.11 – Tableau de répartition des charges.....  | 44 |
| Tableau IV.12 - Résultats de calcul de la force exercée par la Grue LHM 400.....                           | 45 |
| Tableau IV.13 - Résultats de calcul de la force exercée par CS 45.....                                     | 46 |
| Tableau IV.14 - Résultats de calcul de la force exercée par le portique.....                               | 47 |
| Tableau IV.16 - Résultat du calcul de la poussée due au marnage.....                                       | 47 |
| Tableau IV.17 - Résultats de calcul de force hydrodynamique séismique.....                                 | 48 |
| Tableau IV.18 - Résultats de calcul de la sollicitation due à l'amarrage.....                              | 49 |
| Tableau IV.19 - Résultats de calcul de force d'inertie de séisme.....                                      | 50 |
| Tableau IV.20 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas statique).....                    | 51 |
| Tableau IV.21 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas dynamique<br>ascendant).....      | 52 |
| Tableau IV.22 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas dynamique<br>descendant).....     | 53 |
| Tableau IV.23 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement et du renversement.....               | 54 |
| Tableau IV.24 – Caractéristiques géotechniques des enrochements.....                                       | 54 |
| Tableau IV.25 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du poinçonnement au niveau de<br>l'enrochement..... | 55 |
| Tableau IV.26 – Caractéristiques du sol de fondation.....  | 56 |
| Tableau IV.25 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du poinçonnement au niveau de<br>l'enrochement..... | 57 |
| Tableau V.1 – Sollicitations maximums au niveau des voiles extérieurs.....                                 | 59 |
| Tableau V.2 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d'acier (voile ext.).....                | 60 |
| Tableau V.3 – Section d'armatures et choix des barres obtenue par Expert BA (parois<br>ext.).....          | 61 |

## Liste des tableaux et des figures

|  |    |
|--|----|
| Tableau V.4 – Sollicitations maximums au niveau des voiles intérieurs.....                     | 62 |
| Tableau V.5 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d’acier (voile int.).....    | 63 |
| Tableau V.6 – Section d’armatures et choix des barres obtenue par Expert BA (parois int.)..... | 64 |
| Tableau V.7 – Sollicitations maximums au niveau du radier.....                                 | 64 |
| Tableau V.8 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d’acier (radier).....        | 65 |
| Tableau V.9 – Section d’armatures et choix des barres obtenue par Expert BA (radier).....      | 67 |
| Tableau V.10 – Sollicitations maximums au niveau de la dalle.....                              | 67 |
| Tableau V.11 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d’acier (dalle).....        | 68 |
| Tableau V.12 – Section d’armatures et choix des barres obtenue par Expert BA (radier).....     | 70 |
| Tableau V.13 – Récapitulatif des sollicitations ultimes de la poutre de couronnement.....      | 71 |
| Tableau V.14 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d’acier (p. de cour.).....  | 73 |
| Tableau V.15 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d’acier (p. de cour.).....  | 73 |
| Tableau V.16 – Récapitulatif du ferrailage de la poutre de couronnement.....                   | 74 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 - Port Maritime d'Oran.....   | 03 |
| Figure I.2 - Port mixte de Rotterdam au Pays- Bas.....   | 03 |
| Figure I.3 - Port d'Arzew.....   | 04 |
| Figure I.4 - Port de pêche de Cherchell.....   | 04 |
| Figure I.5 - Port de plaisance (marina) de Sidi Fredj.....   | 05 |
| Figure I.6 - schéma montrant une jetée principale (a) ainsi qu'une jetée secondaire (b).....   | 06 |
| Figure I.7 - Les différents types de digues.....   | 07 |
| Figure I.8 - Échelle de Beaufort.....  | 09 |
| Figure I.9 - cycle de la marée.....  | 11 |
| Figure I.10 - graphe de la marée.....  | 11 |
| Figure I.11 - Représentation schématique de trois types de dragues mécanique : à godets ; à benne ; à pelle.....                             | 13 |
| Figure I.12 - Dragues hydrauliques : aspiratrice stationnaires avec conduite de refoulement ; aspiratrice en marche ; dragues fendables..... | 14 |
| Figure I.13 - Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture (BONNET 2000).....                          | 15 |
| Figure I.14 - courbe de compressibilité œdométrique.....   | 17 |
| Figure I.15 - Drains verticaux préfabriqués.....   | 18 |
| Figure II.1 – Emplacement du projet.....   | 19 |
| Figure II.2 – Infrastructures existante au Port d'Arzew.....   | 20 |
| Figure IV.2 – Grue LMH 400.....  | 36 |
| Figure IV.3 – Distribution des contraintes.....  | 56 |
| Figure V.1 – Modèle 3D du caisson modélisé par le logiciel Robot Structural Analysis.....  | 59 |
| Figure V.2 –Tableau de l'analyse modale.....   | 60 |
| Figure V.3 – Schémas des modes 1 et 2 (Robot).....   | 60 |
| Figure V.4 – Plan de ferrailage du caisson .....   | 76 |

## Liste des tableaux et des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure V.5 – Plan de ferrailage de la poutre de couronnement.....            | 77 |
| Figure VI.1 - Plan d'aménagement de la zone d'activité.....                  | 78 |
| Figure VI.2 - Plan de la zone de refoulement.....                            | 79 |
| Figure VI.3 – Photos de la zone de refoulement.....                          | 79 |
| Figure VI.4 - Processus de dragage de la drague suceuse à désagrégateur..... | 81 |
| Figure VI.5 - Plan du processus de dragage avec la drague à benne.....       | 81 |
| Figure VI.6 - Diagramme schématique du dragage en pente.....                 | 82 |
| Figure VI.7 - Schéma du processus d'installation du pipeline.....            | 83 |
| Figure VII.1 - Embouchure d'Oued El Mohgoun.....                             | 84 |

# SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction.....  | 1         |
| <b>Chapitre I – Généralités sur les travaux maritimes .....</b>                  | <b>2</b>  |
| I.1    Définition d’un port .....  | 2         |
| I.2    Rôle du port .....  | 2         |
| I.2.1    Rôle économique.....  | 2         |
| I.2.2    Rôle physique.....  | 2         |
| I.3    Types de ports.....   | 2         |
| I.4    Ouvrages de protection.....   | 6         |
| I.4.1    Les jetées .....  | 6         |
| I.4.2    Les digues .....  | 6         |
| I.5    Ouvrages d’accostage .....  | 8         |
| I.5.1    Les ducs d’Albe.....  | 8         |
| I.5.2    Les appontements .....  | 8         |
| I.5.3    Les quais.....  | 8         |
| I.6    Phénomènes du milieu marin .....  | 9         |
| I.6.1    Le vent.....  | 9         |
| I.6.2    Le Fetch.....   | 9         |
| I.6.3    Les mouvements ondulaires .....   | 10        |
| I.7    Recherche bibliographique : Dragage .....                                 | 13        |
| I.7.1    Définition de dragage .....   | 13        |
| I.7.2    Les techniques de dragage.....  | 13        |
| I.7.3    Terre-plein en remblai hydraulique dragué.....                          | 14        |
| I.7.4    Traitement, Stabilisation et Consolidation des Produits de Dragage..... | 16        |
| I.8    Conclusion .....  | 18        |
| <b>Chapitre II – Présentation du projet et collecte de données .....</b>         | <b>19</b> |
| II.1    Présentation du projet .....   | 19        |
| II.1.1    Présentation du Port d’Arzew .....                                     | 19        |
| II.1.2    Description du projet.....   | 19        |
| II.1.3    Infrastructures existantes.....  | 20        |
| II.2    Collecte de données .....  | 21        |
| II.2.1    Climat et température .....  | 21        |
| II.2.2    La pluviométrie .....  | 21        |
| II.2.3    Le vent.....   | 21        |
| II.2.4    Condition hydrologique (la marée) .....                                | 21        |
| II.2.5    Conditions géologiques .....   | 21        |
| II.2.6    Données physiques (topo-bathymétrique).....                            | 21        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| II.2.7  | Données relatives aux besoins.....                       | 22        |
| II.2.8  | Données sismique.....                                    | 23        |
| II.3  | Conclusion .....   | 23        |
| <b>Chapitre III - Présentation des variantes et analyse multicritère.....</b> |  | <b>24</b> |
| III.1   | Les variantes : .....                                    | 24        |
| Variante n°1 .....  |  | 24        |
| III.1.1   | Description de la variante 1 .....                       | 24        |
| Variante n°2.....   |  | 25        |
| III.1.2   | Description de la variante 2.....                        | 25        |
| III.2   | Estimation de coût de réalisation des variantes .....    | 26        |
| III.3   | Analyse multicritères et choix de la variante .....      | 26        |
| III.3.1   | Matrice de comparaison binaire .....                     | 27        |
| III.3.2   | Normalisation de la matrice .....                        | 27        |
| III.3.3   | Poids des critères .....                                 | 27        |
| III.3.4   | Évaluation de la cohérence.....                          | 28        |
| III.3.5   | Évaluation finale .....                                  | 28        |
| III.4   | Conclusion .....   | 29        |
| <b>Chapitre IV - Stabilité externe du quai.....</b>                           |  | <b>30</b> |
| IV.1  | Conditions de conception.....                            | 30        |
| IV.2  | Géométrie des caissons .....                             | 30        |
| IV.3  | Situation sismique.....                                  | 32        |
| IV.4  | Poids propre .....                                       | 32        |
| IV.5  | Charges et surcharges d'exploitations .....              | 36        |
| IV.5.1  | Charges permanentes G.....                               | 36        |
| IV.5.2  | Charges d'exploitation .....                             | 36        |
| IV.6  | Calcul des efforts .....                                 | 38        |
| IV.6.1  | Poussée des terres.....                                  | 38        |
| IV.6.2  | Poussées dues à la surcharge d'exploitation .....        | 41        |
| IV.6.3  | Poussées dues aux surcharges par la méthode de KREY..... | 43        |
| IV.6.4  | Poussée due au marnage.....                              | 47        |
| IV.6.5  | Poussée hydrodynamique.....                              | 48        |
| IV.6.6  | Sollicitation due à l'amarrage .....                     | 49        |
| IV.6.7  | Efforts dûs au séisme.....                               | 50        |
| IV.7  | Combinaisons de charge .....                             | 52        |
| IV.7.1  | Cas statique .....                                       | 52        |
| IV.7.2  | Cas dynamique ascendant .....                            | 53        |
| IV.7.3  | Cas dynamique descendant .....                           | 54        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| IV.8   | Stabilité contre le glissement et le renversement ..... | 55        |
| IV.9   | Stabilité vis-à-vis au poinçonnement .....              | 55        |
| IV.9.1   | Au niveau de l'encrochement .....                       | 55        |
| IV.9.2   | Au niveau du sol de fondation .....                     | 57        |
| IV.10  | Conclusion .....  | 58        |
| <b>Chapitre V – Calcul du ferrailage .....</b> |   | <b>58</b> |
| V.1  | Sollicitations et combinaisons d'actions.....           | 58        |
| V.1.1  | Poussée des terres .....                                | 58        |
| V.1.2  | Pression de l'eau.....                                  | 58        |
| V.1.3  | Poids des terres .....                                  | 58        |
| V.1.4  | Charges d'exploitation .....                            | 58        |
| V.1.5  | L'accélération du séisme.....                           | 58        |
| V.2  | Modèle Robot et analyse modale.....                     | 59        |
| V.3  | Ferrailage des parois extérieures du caisson .....      | 60        |
| V.3.1  | Ferrailage à l'ELU.....                                 | 62        |
| V.3.2  | Vérification de l'ELS .....                             | 62        |
| V.3.3  | Redimensionnement à l'ELS.....                          | 62        |
| V.3.4  | Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA .....      | 63        |
| V.4  | Ferrailage des parois intérieures du caisson .....      | 63        |
| V.4.1  | Ferrailage à l'ELU.....                                 | 64        |
| V.4.2  | Vérification de l'ELS .....                             | 65        |
| V.4.3  | Redimensionnement à l'ELS selon X .....                 | 65        |
| V.4.4  | Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA .....      | 66        |
| V.5  | Ferrailage du radier.....                               | 66        |
| V.5.1  | Ferrailage à l'ELU.....                                 | 68        |
| V.5.2  | Vérification de l'ELS .....                             | 68        |
| V.5.3  | Redimensionnement à l'ELS.....                          | 69        |
| V.5.4  | Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA .....      | 69        |
| V.6  | Ferrailage de la dalle .....                            | 69        |
| V.6.1  | Ferrailage à l'ELU.....                                 | 71        |
| V.6.2  | Vérification de l'ELS .....                             | 71        |
| V.6.3  | Redimensionnement à l'ELS.....                          | 71        |
| V.6.4  | Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA .....      | 72        |
| V.7  | Ferrailage de la poutre de couronnement .....           | 72        |
| V.7.1  | Efforts agissant sur la poutre de couronnement .....    | 72        |
| V.7.2  | Sollicitations maximums .....                           | 72        |
| V.7.3  | Combinaison de charge .....                             | 73        |

|  |  |    |
|--|--|----|
| V.7.4  | Calcul du ferrailage longitudinal de la poutre de couronnement .....       | 73 |
| V.7.5  | Calcul du ferrailage transversal.....                                      | 75 |
| V.8  | Schémas de ferrailage.....   | 76 |
| V.8.1  | Caisson .....  | 76 |
| V.8.2  | Poutre de couronnement.....  | 77 |
| V.9  | Conclusion.....  | 77 |
| <b>Chapitre VI – Dragage</b> .....                             |  | 78 |
| VI.1   | Géotechnique du produit de dragage .....                                   | 78 |
| VI.2   | Contenu des travaux.....   | 78 |
| VI.3   | Zone de refoulement .....  | 79 |
| VI.4   | Equipement de dragage.....   | 80 |
| VI.4.1   | Groupe de DSD .....  | 80 |
| VI.4.2   | Groupe de drague à benne.....  | 80 |
| VI.5   | Méthodologie de dragage.....   | 80 |
| VI.5.1   | Méthodologie de dragage de la drague suceuse à désagrégateur .....         | 80 |
| VI.5.2   | Méthodologie de dragage avec la Drague à benne.....                        | 81 |
| VI.5.3   | Méthode de dragage en pente.....   | 82 |
| VI.5.4   | Méthode de dragage par assemblage des pipelines .....                      | 83 |
| VI.6   | Conclusion .....   | 83 |
| <b>Chapitre VII – Etude d’Impact sur l’Environnement</b> ..... |  | 84 |
| VII.1  | Analyse de l’état initial .....  | 84 |
| VII.2  | Identification des impacts environnementaux du projet .....                | 85 |
| VII.2.1  | Impacts sur la qualité de l’air .....                                      | 85 |
| VII.2.2  | Impacts sur la qualité de l’eau .....                                      | 85 |
| VII.2.3  | Impacts sur les écosystèmes marins .....                                   | 85 |
| VII.2.4  | Impacts sur les zones résidentielles avoisinantes .....                    | 85 |
| VII.2.5  | Impacts sur la logistique et l’économie : .....                            | 86 |
| VII.3  | Évaluation des effets et mesures pour réduire, supprimer ou compenser..... | 86 |
| VII.3.1  | Mesures pour la qualité de l’air .....                                     | 86 |
| VII.3.2  | Mesures pour la qualité de l’eau.....                                      | 86 |
| VII.3.3  | Mesures pour les écosystèmes marins .....                                  | 86 |
| VII.3.4  | Mesures pour les zones résidentielles avoisinantes .....                   | 86 |
| VII.4  | Contrôle et suivi.....   | 87 |
| Conclusion générale.....                                       |  | 88 |
| Références   |  |    |
| Annexes  |  |    |

## **INTRODUCTION GENERALE**

---



## **Introduction Générale**

De nos jours, plus de 60 % de la population mondiale vit en zone côtière, soit environ 3,8 milliards de personnes résidant à moins de 100 kilomètres du rivage (Lefebvre, 2011). Cette concentration humaine, associée à l'augmentation des flux de marchandises, de matières premières et de voyageurs, souligne l'importance stratégique des zones côtières et des infrastructures portuaires. En effet, 90 % du commerce mondial se fait par voie maritime, démontrant ainsi le rôle vital de la mer dans l'économie globale.

La maritimisation du commerce, phénomène majeur de ces dernières décennies, a poussé les nations en développement à réaliser l'importance du rôle crucial que peut jouer la mer pour leur avenir (Ducruet, 2008). À cet égard, le Ministre algérien de l'industrie et des mines a déclaré : « Nous voulons inverser les réflexions tournées vers le marché local et l'importation, nous voulons que les débats soient axés sur l'export » (ALGERIE ECO, 2018). Cette déclaration souligne une volonté claire de redéfinir les priorités économiques du pays en tirant parti de ses atouts maritimes.

C'est dans ce cadre que l'étude d'aménagement du bassin de l'Oued El Mohgoun et de l'appontement méthanier (ex. Jetée Méthane) en môle commercial n°5 au Port d'Arzew revêt une importance capitale ; il traite à lui seul 39,7 millions de tonnes d'hydrocarbures. Ce projet ambitieux vise à répondre aux besoins croissants en infrastructures portuaires, essentielles pour soutenir le développement économique régional tout en intégrant des considérations environnementales et techniques avancées. Le Port d'Arzew, pilier du commerce maritime algérien, joue un rôle central dans l'économie du pays. Son développement est crucial pour améliorer l'efficacité des opérations portuaires et stimuler les exportations.

Dans le domaine des travaux maritimes, l'aménagement portuaire représente un défi technique de grande envergure, nécessitant une maîtrise des disciplines variées telles que la géotechnique, en particulier la mécanique des sols, la structure, et l'environnement. La conception et la construction de quais, de bassins et de structures maritimes doivent intégrer des critères de stabilité, de durabilité et de résistance aux conditions marines extrêmes, de cout et qualité également. Ce projet met en avant les compétences que nous avons acquises tout au long de notre cursus, notamment l'analyse de la stabilité externe et interne des caissons, la gestion des matériaux de dragage et l'utilisation de logiciels spécialisés comme Robot Structural Analysis pour modéliser et vérifier les structures, dans notre cas ce sont des caissons de quai.

Ce modeste mémoire de projet de fin d'étude se divisera en sept chapitres, les trois premiers se pencheront vers la présentation du projet et son APS, le quatrième et le cinquième traiteront la stabilité externe et interne du caisson constituant le quai avec une initiation au logiciel Robot Structural Analysis, le sixième chapitre traitera le dragage. Pour conclure, comme on nous a toujours appris à l'école à être amis de l'environnement, nous avons mené une étude d'impact environnemental de ce projet

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les travaux maritimes**

---

## **Chapitre I – Généralités sur les travaux maritimes**

Ce chapitre offre un aperçu général des ouvrages maritimes, essentiels pour comprendre le contexte et les défis de notre projet. Cette base théorique qui se conclue par une recherche bibliographique sur le dragage permettra de mieux appréhender les choix et les techniques adoptés dans notre projet.

### **I.1 Définition d'un port**

Un port peut être défini comme l'ensemble des infrastructures nécessaires pour répondre aux besoins des activités se déroulant entre la terre et les navires. Ces infrastructures englobent les services liés aux navires ainsi que ceux liés aux opérations à terre. Les navires attendent des ports des services tels que l'abri, l'amarrage, le ravitaillement et les réparations. Les opérations portuaires à terre, liées aux navires, se concentrent principalement sur le traitement des marchandises et des passagers transportés par voie maritime et transitant par les installations portuaires où ils sont chargés ou déchargés. [1]

### **I.2 Rôle du port**

#### **I.2.1 Rôle économique**

Le port joue plusieurs rôles importants :

- **Rôle industriel** : Le port peut abriter des installations spécifiques dédiées au traitement ou à la transformation des matières premières importées ou exportées. Il peut ainsi servir de centre de production et de transformation industrielle.
- **Rôle de marché** : Le transbordement des marchandises entre les moyens de transport terrestre et maritime (et vice versa) peut être accompagné d'activités commerciales qui font du port un lieu de marché dynamique. Pour remplir cette fonction, le port doit disposer de vastes espaces de stockage et de conditionnement des marchandises.

#### **I.2.2 Rôle 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 ravitaillements (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.3 Types de ports

En termes généraux, les ports peuvent être classés selon leur emplacement ou leur fonction.

Selon leur emplacement, les ports peuvent généralement être classés comme des ports maritimes, des ports intérieurs ou des ports mixtes maritime/intérieur. [2]

- **Les ports maritimes** sont généralement situés dans des zones côtières protégées artificiellement ou naturellement, dans des ports naturels (baies), des estuaires de marée et des embouchures de fleuves. Habituellement, ces ports sont accessibles aux grands navires de haute mer. C'est le cas des ports en Algérie.
- **Les ports intérieurs** sont situés sur des rivières navigables, des canaux et des lacs. Ces ports sont généralement desservis par des bateaux fluviaux et des péniches, à l'exemple du port de Liège en Belgique. On distingue :
  - **Les ports fluviaux** : ce sont des ports intérieurs situés au bord d'un fleuve, d'une rivière ou d'un canal, citons à titre d'exemple le Port de Hamburg en Allemagne, situé sur la rivière Elbe.
  - **Les ports lacustres** : ce sont des installations portuaires situés au bord du lac, facilitant le transport maritime à l'intérieur des terres, on peut prendre le Port de Chicago aux États- Unis, situé sur les rives du lac Michigan comme exemple.
  - **Les ports à secs** : également appelés ports secs, et sont des installations portuaires qui offrent des services de stockage et d'entretien pour les bateaux en dehors de l'eau. Ils sont conçus pour accueillir les embarcations hors de la mer, les protégeant ainsi des marées, de la corrosion et d'autres dommages. En Algérie, nous avons comme exemple le port sec de Oued Semmar, TERPORT.



Figure I.1 - Port Maritime d'Oran

- **Les ports mixtes maritime et intérieur** comprennent généralement des zones spécialisées pour desservir des navires de haute mer de différentes tailles et/ou des bateaux fluviaux, et sont pratiques pour le transbordement de marchandises d'une zone portuaire à une autre. Le Port de Rotterdam (fig.2) est un exemple d'un port mixte.



Figure I.2 - Port mixte de Rotterdam au Pays- Bas

Selon leur **fonction principale**, tous les ports peuvent être soit commerciaux, militaires ou bases navales, ports de pêche, ports de plaisance pour petits navires ou ports de refuge.

- **Les ports commerciaux** sont ceux qui fournissent tous les services nécessaires pour gérer les navires de commerce et le traitement et la manutention de diverses cargaisons passant par le port. Les ports commerciaux peuvent être des ports polyvalents pour accueillir différents types de cargaisons diverses, allant du général au vrac liquide ou sec, aux produits chimiques, ou ils peuvent être hautement spécialisés pour manipuler uniquement un type de cargaison, comme le pétrole, le vrac sec (charbon, minerai de fer, granulats), ou les conteneurs. De plus, les ports commerciaux peuvent inclure des terminaux spéciaux pour le trafic passager et/ou l'industrie touristique. Souvent, dans les grands ports commerciaux, les chantiers navals offrent toutes sortes de services de réparation de base et de maintenance des navires. Le port d'Arzew est le principal port commercial algérien.

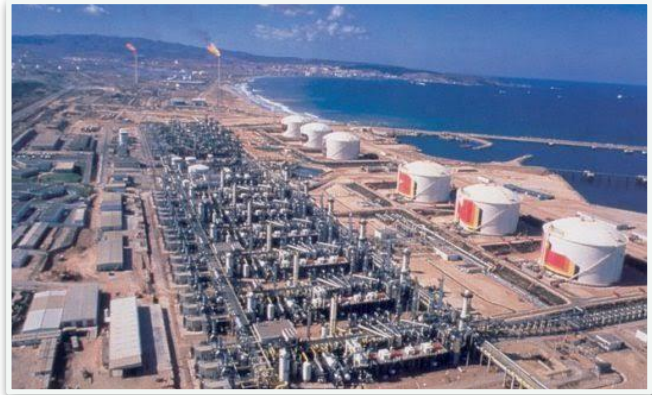


Figure I.3 - Port d'Arzew.

- **Les ports militaires** ou les bases navales sont ceux qui, dans la plupart des cas, sont utilisés exclusivement pour accueillir et servir une flotte de navires de guerre. Typiquement, ils sont autonomes et disposent de toutes sortes d'installations d'approvisionnement, de réparation et de maintenance des navires. En Algérie, la principale base navale est située à la wilaya d'Oran et c'est celle de Mers El-Kébir.
- **Les ports de pêche** sont ceux qui se spécialisent dans l'accueil de différents navires de pêche commerciale tels que les chalutiers et les dragueurs, ainsi qu'une grande variété d'autres. Ces ports peuvent être relativement petits, équipés de fournitures de carburant, d'eau et de nourriture, ainsi que d'équipements de manipulation du poisson, ou s'ils sont assez grands, ils sont équipés d'une usine de réfrigération, de stockage frigorifique et d'installations de transformation du poisson. Les ports de pêche peuvent être situés selon les besoins, mais généralement ils constituent une partie spécialisée des ports commerciaux réguliers. Il existe plus d'une trentaine de port de pêches en Algérie, à titre d'exemple le port de Cherchell (fig.4).



Figure I.4 - Port de pêche de Cherchell.

- **Les marinas** pour petits navires sont des ports conçus pour accueillir des embarcations de plaisance locales et de passage. Ils offrent des espaces d'amarrage et des services divers tels que le carburant, la nourriture et l'approvisionnement en eau douce aux plaisanciers. Ils peuvent également disposer d'installations de restauration, d'hébergement et de loisirs disponibles. Une marina pour petits navires typique est équipée d'équipements de mise à l'eau et de sortie de bateaux, et dans la plupart des cas, elle propose des services de stockage et d'entretien des bateaux. Pour illustrer cela, prenons le port de plaisance de Sidi Fredj.



*Figure I.5 - Port de plaisance (marina) de Sidi Fredj.*

### I.4 Ouvrages de protection

Ce sont généralement les ouvrages extérieurs et ont pour rôle la protection des zones de manœuvre et des postes d'opérations contre l'agitation causée par la houle. Les ouvrages extérieurs sont généralement les jetées ou bien les digues.

#### I.4.1 Les jetées

Ce sont des constructions s'avancant dans une mer, lac ou fleuve, dont le but est de servir à l'embarquement et le débarquement de marchandises et de voyageurs. Les jetées sont de deux natures ; principale et secondaire, la figure suivante illustre ce dont on parle.

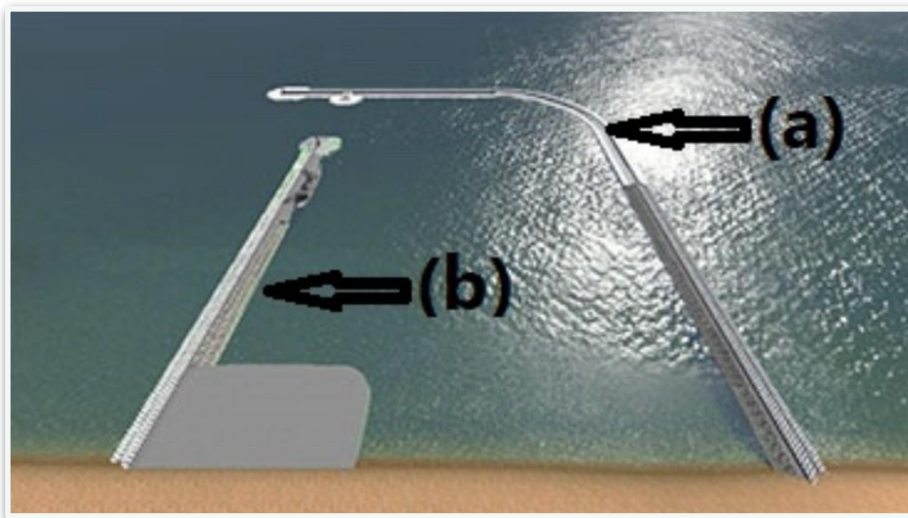


Figure I.6 - schéma montrant une jetée principale (a) ainsi qu'une jetée secondaire (b).

#### I.4.2 Les digues

C'est un remblai longitudinal, naturel ou artificiel, sa fonction est de protéger les ports contre les assauts des houles du large et permettent (par réfraction / diffraction de la houle incidente) de réduire l'agitation intérieure à moins d'un mètre d'amplitude. Elles doivent être construites par des profondeurs plus importantes qu'autrefois (jusqu'à une cinquantaine de mètres) et doivent résister à des vagues dont l'amplitude peut dépasser la dizaine de mètres - d'autant plus grande que la profondeur au pied de l'ouvrage est plus importante. On distingue plusieurs types de digues dont :

##### I.4.2.1 Les digues verticales

La muraille est constituée par les blocs ou des caissons en béton armé qui résistent, par leur poids propre, aux efforts imposés par la houle : ils doivent donc être de grandes dimensions pour être suffisamment lourds. Lorsque la muraille est constituée par des blocs empilés les uns sur les autres, ces derniers ont un poids pouvant atteindre la centaine de tonnes, cette limite étant imposée par les performances des engins de manutention utilisés pour les mettre en place. La réflexion de la houle sur les parois verticales en double l'amplitude, imposant ainsi de porter, à un niveau suffisamment élevé la crête du couronnement afin d'empêcher son franchissement. Les digues verticales sont calculées pour la hauteur de la plus haute vague constatée au cours de 100 ans. Encore faut-il que la houle ne déferle pas contre la muraille, faute de quoi, l'effort à prendre en compte est nettement plus élevé : la condition de non-déferlement est que la profondeur au pied de la muraille soit 2 fois l'amplitude de cette vague

centennale et la profondeur totale au pied de l'assise soit de 2,5 à 3 fois cette amplitude. (soit une hauteur d'au moins 25 mètres pour des vagues de 10 m).

### I.4.2.2 Les digues à talus

La houle incidente vient se briser sur la carapace constituée par des enrochements naturels ou (le plus souvent) par des blocs artificiels en béton de poids très élevé (jusqu'à 50 tonnes). La hauteur de cette carapace doit être suffisante pour éviter le franchissement de l'ouvrage par les vagues déferlantes, ce qui réduirait l'efficacité de la protection des plans d'eau intérieurs. Les dimensions de la digue sont donc déterminées en fonction des caractéristiques (essentiellement l'amplitude de la houle) de la plus forte tempête se produisant en moyenne une fois tous les trente ans. Si une plus forte tempête se produit, l'ouvrage peut être plus ou moins endommagé mais ne serait pas entièrement détruit et pourrait être remis en état avant la tempête suivante. Ce genre d'ouvrage peut être utilisé tant que la profondeur n'excède pas 50 m, au-delà, les consommations en matériaux sont excessives sur un plan économique.

### I.4.2.3 Les digues mixtes

Lorsque les profondeurs sont importantes, la digue est souvent de type mixte : la partie inférieure est constituée sous forme d'un ouvrage à talus, surmonté par un ouvrage de type vertical. Les dimensions et la structure de l'ouvrage vertical doivent être suffisantes pour résister aux efforts des vagues déferlantes. Des procédés utilisant des caissons en béton, dont la paroi extérieure est perforée, permettent une meilleure absorption du choc des lames qu'une paroi pleine. La consommation en enrochements naturels est moindre que pour un ouvrage à talus de même hauteur, la consommation de béton est également moindre que pour un ouvrage de type vertical de hauteur suffisante pour éviter le déferlement. Les houles retenues pour le dimensionnement du projet doivent cependant avoir une fréquence d'apparition cinquantennale (plutôt que trentennale).

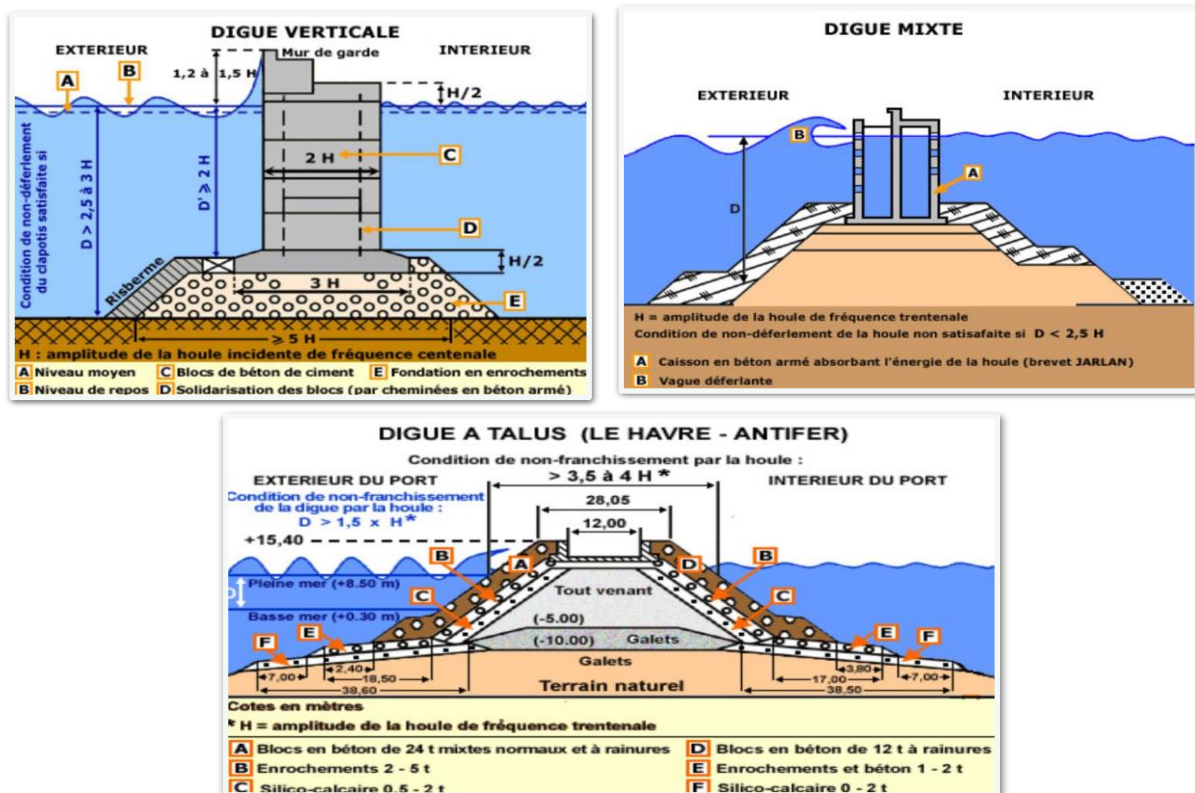


Figure 1.7 - Les différents types de digues.

### I.5 Ouvrages d'accostage

Les ouvrages d'accostage désignent l'ensemble des équipements d'un port qui permettent de :  
Fournir aux navires un dispositif assurant son immobilisation, en permettant son accostage et son amarrage ;  
Réaliser la liaison entre le navire et la terre ;  
Soutenir les terres à la limite du plan d'eau en excluant des installations.

On distingue parmi les ouvrages d'accostage :

#### I.5.1 Les ducs d'Albe

Ce sont des ouvrages en pilotis ancrés dans le fond du bassin, ils jouent le rôle d'appui pour les navires, et permettent leurs amarrages et/ou leurs accostages.

#### I.5.2 Les appontements

Ce sont des plates-formes fixes supportées par des pilotis, ils servent à l'amarrage et à l'accostage des bateaux et navires.

#### I.5.3 Les quais

Ce sont les ouvrages sur le rivage d'un port qui ont comme rôle :

Fournir au navire un dispositif pour son immobilisation, permettant son accostage, son appui et son amarrage ;  
Réaliser la liaison entre le navire et la terre en supportant tout ou partie des installations de transbordement des marchandises ou des voyageurs ;  
Soutenir les terres à la limite du plan d'eau.

On distingue deux grands types de quai :

##### I.5.3.1 Quai massif

Quai en maçonnerie, mur en blocs.  
Quai en caissons.  
Quai en voiles en Béton Armé.  
Quai en gabions de palplanches plates.

##### I.5.3.2 Ouvrages à fondation discontinue

Quais sur piles.  
Quais sur pieux.

### I.6 Ouvrages de signalisation maritimes

Lors de la conception d'un port, la signalisation maritime est essentielle pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic maritime. Voici quelques aspects clés à considérer :

#### I.6.1 Canaux de Navigation

Les canaux de navigation doivent être clairement définis et balisés pour guider les navires entrants et sortants du port. Des balises appropriées, des feux de navigation et des marques de jour doivent être installés pour indiquer les itinéraires sûrs et les dangers.

#### I.6.2 Zones de Mouillage

Les zones de mouillage doivent être délimitées et signalées pour permettre aux navires de jeter l'ancre en toute sécurité. Des bouées d'amarrage et des marques de jour peuvent être utilisées pour indiquer les zones de mouillage autorisées.

#### I.6.3 Signalisation des Obstacles :

Les obstacles tels que les épaves, les récifs et les bancs de sable doivent être signalés pour éviter les accidents. Des balises spécifiques et des feux de navigation peuvent être utilisés pour alerter les navigateurs des dangers.

## I.6 Phénomènes du milieu marin

### I.6.1 Le vent

Le vent joue un rôle crucial dans le fonctionnement des ports, en particulier lors des manœuvres d'accostage et de départ des navires. Les vents océaniques sont influencés par les pressions atmosphériques et peuvent générer des tempêtes violentes, notamment dans les régions tropicales et subtropicales. Les ports doivent être conçus pour résister aux effets du vent afin d'assurer la sécurité des navires et des infrastructures portuaires. Les conditions locales, telles que la topographie, peuvent modifier les schémas de vent, créant des vents locaux et des tunnels de vent. Il est important de tenir compte des vents dominants dans la conception et l'exploitation des ports. Le vent n'est pas constant et peut souffler en rafales, ce qui nécessite une classification de sa force selon l'échelle de Beaufort (fig. 7).

| ECHELLE DE BEAUFORT |                   |                    |  |   |
|---------------------|-------------------|--------------------|--|---|
| ECHELLE             | TERME             | VENT MOYEN EN KM/H | EFFETS EN MER  | EFFETS SUR TERRE  |
| 0                   | CALME             | <1 km/h            | Mer lisse, sans vague  | Fumées verticales   |
| 1-2-3-4-5           | BRISES            | 1 à 38 km/h        | Quelques rides à quelques vagues (vagues: 0.2 à 2.5 m)                   | La fumée indique la direction du vent, les drapeaux flottent    |
| 6                   | VENT FRAIS        | 39 à 49 km/h       | Crêtes d'écumes blanches, embruns (vagues: 2.5 à 4 m)                    | Les branches des arbres s'agitent, parapluies qui se retournent |
| 7                   | GRAND FRAIS       | 50 à 61 km/h       | Trainées d'écumes, lames déferlantes (vagues: 4 à 5.5 m)                 | Les arbres se balancent, la marche contre le vent est freinée   |
| 8                   | COUP DE VENT      | 62 à 74 km/h       | Tourbillons d'écumes à la crête des lames (vagues: 5.5 à 7 m)            | Les branches d'arbres peuvent casser, la marche est difficile   |
| 9                   | FORT COUP DE VENT | 75 à 88 km/h       | Lames déferlantes grosses à énormes, visibilité réduite (vagues: 7 à 9m) | Le vent peut endommager les bâtiments, envol de tuiles          |
| 10                  | TEMPÊTE           | 89 à 102 km/h      | Très grosses lames à longue crête en panache (vagues: 9 à 12m)           | Dégâts importants aux bâtiments, arbres parfois déracinés       |
| 11                  | VIOLENTE TEMPÊTE  | 103 à 117 km/h     | Lames exceptionnellement hautes (vagues: 12 à 16m)                       | Ravages étendus et importants                                   |
| 12                  | OURAGAN           | >128 km/h          | L'air est plein d'écume et d'embruns (vagues <16m)                       | Dégâts majeurs et catastrophiques                               |

Figure I.8 - Échelle de Beaufort.

### I.6.2 Le Fetch

Le **Fetch** est la distance sur laquelle le vent souffle sur une étendue d'eau libre sans rencontrer d'obstacles significatifs, tels que des terres élevées ou des structures maritimes, créant ainsi des vagues. Plus le Fetch est long, plus les vagues peuvent être hautes et puissantes. Le Fetch est un facteur important dans la formation et la taille des vagues, et il est souvent utilisé pour évaluer les conditions de navigation et les risques potentiels pour les navires et les infrastructures côtières.

### I.6.3 Les mouvements ondulaires

On distingue :

#### I.6.3.1 La houle

dont la période varie de 3 à 25 sec. et la hauteur peut atteindre une trentaine de mètres. Elle est produite par l'action du vent à la surface de l'eau. Les caractéristiques de la houle sont :

- **La hauteur ou amplitude** : distance comprise entre le sommet et le niveau de la mer.
- **La longueur d'onde** : distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs (en mètre).
- **La période T** : le temps de passage de deux crêtes consécutives au même point.
- **La fréquence notée  $1/T$**  qui est le nombre de trains de houle passant en un point fixe en une seconde (en Hertz).
- **Célérité** (vitesse moyenne de propagation des crêtes,  $C=L/T$ ).

La hauteur de la houle dépend de plusieurs paramètres dont : la force du vent, sa durée d'action, ainsi que la distance sur laquelle le vent peut souffler sans rencontrer d'obstacles, appelée fetch.

La houle peut se déformer sous quatre formes :

- **Réfraction** : lorsque la houle cylindrique se propage par des profondeurs variables, sa longueur d'onde, son amplitude et sa direction subissent des modifications alors que sa période reste constante
- **Réflexion** : lorsque la houle atteint une paroi verticale, elle se réfléchit en formant un système d'onde stationnaire, appelé **clapotis** ; l'amplitude de ses ondes est sensiblement le double de celle de la houle incidente, la longueur d'onde et leur période reste celle de la houle incidente.
- **Diffraction** : c'est la réduction de l'amplitude des vagues au fur et à mesure qu'on s'éloigne des musoirs des digues, dans l'ombre géométrique de la houle incidente tandis que la longueur d'onde et la période ne sont pas modifiées par la diffraction.
- **Déferlement** : c'est l'effondrement de la fac avec formation d'un bouillonnement (écume) sur la face antérieure.

#### I.6.3.2 Les seiches

dont la période varie de quelques dizaines de secondes à quelques minutes et une amplitude de quelques décimètres. Bien que l'origine de ces ondes de seiches soit mal connue, elles sont considérées comme des oscillations forcées. Elles seraient dues au déferlement des trains de houle des tempêtes sur les plages, qui réfléchissent une certaine énergie sous forme d'ondes très longues. Ces ondes se propagent dans certains ports comme celui d'Alger

### I.6.3.3 Les marées

dont les périodes varie de 12 heures à environ 18 ans et dont l'amplitude peut atteindre sur certaines cotes une quinzaine de mètres, en Algérie, elle varie de 0,3m à 0,4m. On les définit comme un mouvement régulier de montée et de descente des niveaux d'eau dans les océans et les mers, causé par l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. Elle est importante pour la navigation, la pêche et l'écologie côtière.

Le niveau le plus élevé atteint par la mer au cours d'un cycle de marée est appelé pleine mer (ou couramment « marée haute »). Par opposition, le niveau le plus bas se nomme basse mer (ou « marée basse »).

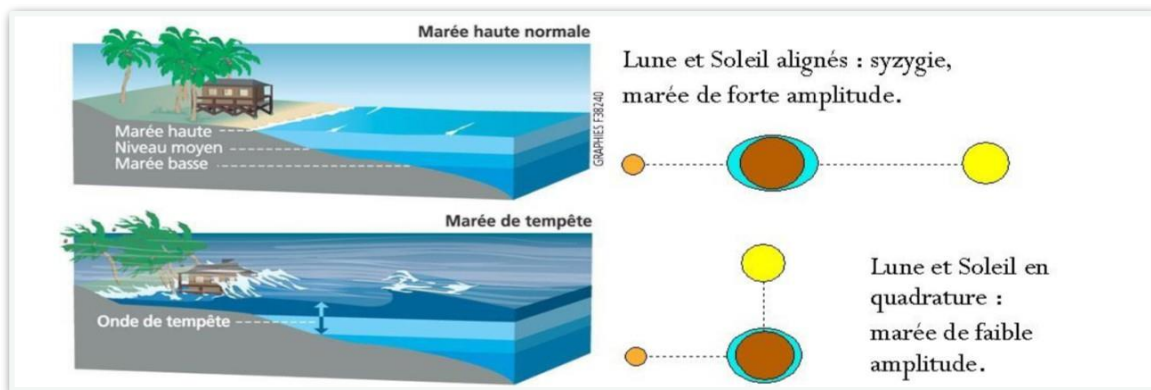


Figure I.9 - cycle de la marée.

On appelle « marnage » l'amplitude totale de variation du plan d'eau entre la basse mer et la pleine mer suivante ; la période au cours de laquelle la marée monte est dite « le montant » ; le niveau baisse pendant « le perdant ». La variation du niveau d'eau est accompagnée de courants de même période appelés « courants de marée » qui transportent les énormes masses d'eau déplacées par la marée.

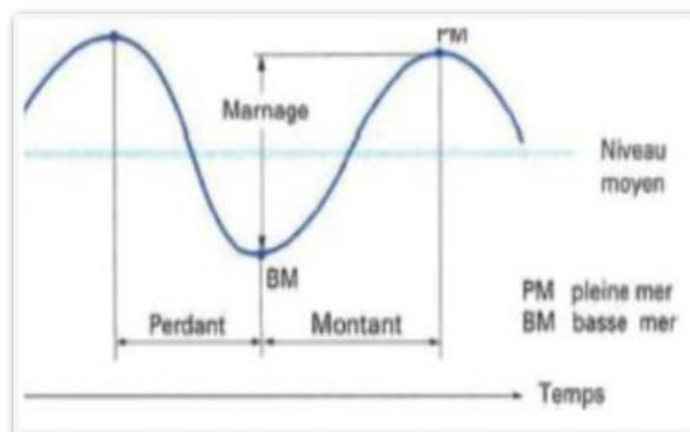


Figure I.10 - graphe de la marée.

### I.6.3.4 Les courants

Un courant marin est un déplacement d'eau de mer régulier, continu et cyclique, caractérisé par sa direction, sa vitesse et son débit. Ce type de déplacement est causé par l'action des forces internes : pesanteur, pression ; par l'action des forces externes : vent, attraction des astres ; ses forces s'ajoutent les effets des forces induites : frottement interne de fluide et force de Coriolis, due à la rotation de la terre.

Parmi les types de courants, on distingue :

- **Les courants généraux ou planétaires** : sont très importants, car ils déplacent des millions de mètres cubes d'eau à la seconde. Véritables fleuves marins d'eau chaude ou froide, ils sillonnent les océans. Ces courants sont mis en mouvement par les vents, puis leur direction est influencée par la rotation de la Terre. Ainsi, se forme plusieurs tourbillons dans chaque océan.
- **Les courants côtiers ou de débris** : ils ont pour origine les vagues, les vents et les irrégularités du sol.
- **Les courants de houle** : sont alternatifs et très forts lors des tempêtes (plusieurs mètres par seconde). Ils affectent surtout la tranche d'eau située près de la surface (de 5 à 10 mètres d'épaisseur) ; leur importance décroît avec la profondeur.
- **Les courants de marée** : relativement faibles loin des côtes, peuvent atteindre des vitesses de plusieurs mètres par seconde près des côtes. Ils affectent pratiquement toute la profondeur d'eau avec la même intensité. Comme ils varient lentement dans le temps, ils peuvent être considérés comme constants à l'échelle de l'heure.

### I.7 Recherche bibliographique : Dragage

#### I.7.1 Définition de dragage

Le dragage consiste à retirer les sédiments et les débris sous-marins dans le but d'élargir, de maintenir ou d'augmenter la profondeur des canaux de navigation ou des voies navigables. Ainsi, les activités de dragage dans les ports, sont inévitables pour assurer la navigation des navires. Les sédiments dragués peuvent aller des graviers et des sables propres aux sédiments fins propres ou contaminés. Alors que les graviers et les sables peuvent être directement utilisés comme matériaux de construction, les sédiments fins contaminés peuvent présenter des risques élevés pour la santé humaine et l'environnement. Le problème qui se pose est que l'élimination en mer des sédiments dragués est nocive pour l'environnement, la rareté des décharges et la demande constante de dragage ont fait naître le besoin de trouver une utilisation bénéfique des sédiments fins et contaminés dragués. [3]

#### I.7.2 Les techniques de dragage

Les techniques de dragage peuvent être classées en deux grandes catégories : les dragues mécaniques et les dragues aspiratrices. [4]

##### I.7.2.1 Les dragues mécaniques

Les types les plus courants incluent les dragues à benne preneuse, les dragues à pelle, et les dragues à godets, comme illustré sur la figure 11. Les sédiments dragués sont déposés dans le puits à déblais de la drague, dans un chaland, ou à terre. Lors du dragage de sédiments fins non cohésifs, les pertes de matériaux peuvent être importantes en raison de la remise en suspension ou d'une mauvaise fermeture de la benne. Cependant, ces dragues sont plus efficaces pour les sédiments cohésifs. Elles sont utilisées dans des zones difficiles d'accès, telles que les bordures de quais et les bassins étroits, et peuvent atteindre des profondeurs de 25 m (pour les dragues à godets) à 30 m (pour les dragues à benne). Lors du dragage de sédiments cohésifs, les matériaux extraits sont généralement compacts (formation de blocs) et contiennent peu d'eau. [4]

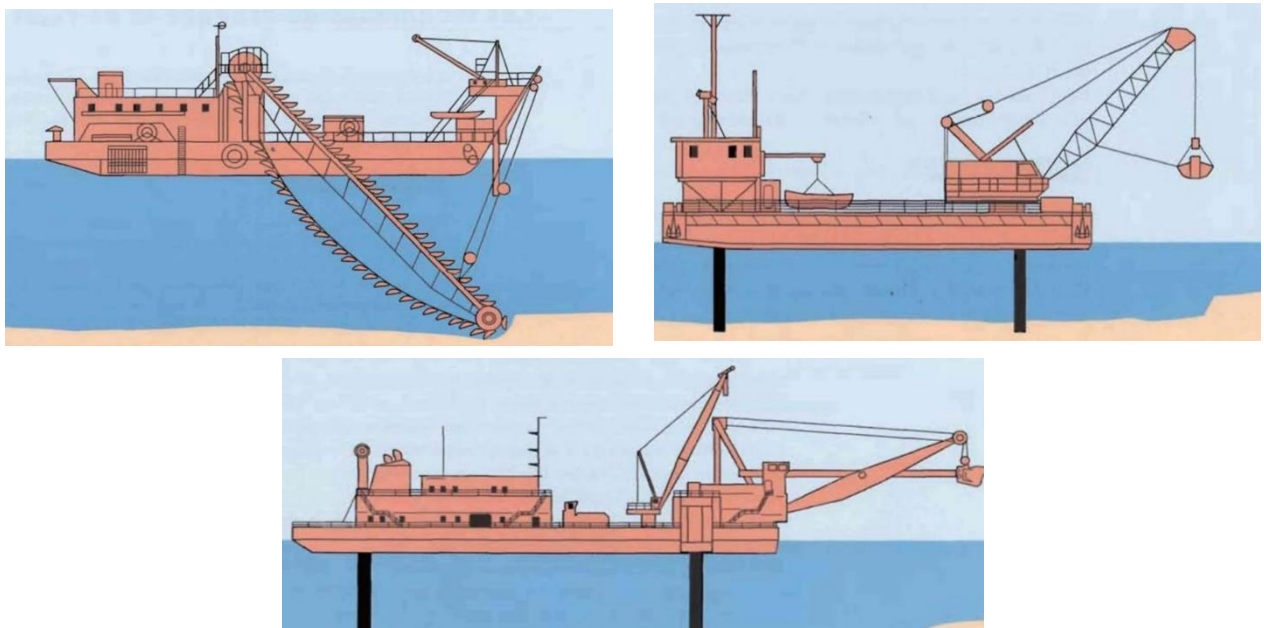


Figure I.11 - Représentation schématique de trois types de dragues mécaniques : à godets ; à benne ; à pelle.

### I.7.2.2 La drague hydraulique

Un mélange d'eau et de sédiments est aspiré à travers un long tube (élinde) muni d'un embout spécifique (bec d'élinde) à l'aide de pompes centrifuges. Selon le type de drague, ce mélange est ensuite dirigé soit vers un puits, soit vers un chaland, soit via des conduites vers une zone de dépôt. La profondeur de dragage atteint généralement jusqu'à environ trente mètres. Pour améliorer l'efficacité du dragage, un désagrégateur peut être ajouté au niveau du bec d'élinde. Toutefois, ce système peut augmenter la remise en suspension des sédiments au fond pendant les opérations de dragage. [4]

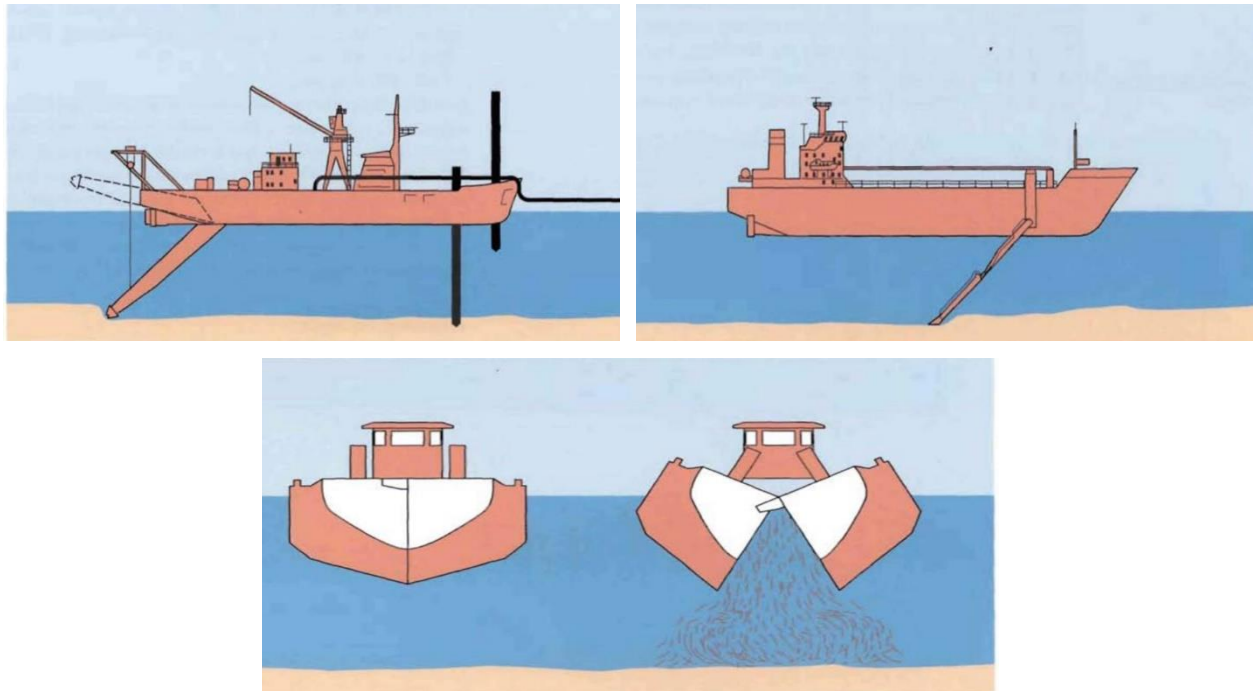


Figure I.12 - Dragues hydrauliques : aspiratrice stationnaires avec conduite de refoulement ; aspiratrice en marche ; dragues fendables.

### I.7.3 Terre-plein en remblai hydraulique dragué

Pour déterminer la réutilisabilité d'un produit de dragage selon la norme EN 16907-6:2018, les étapes à suivre sont les suivantes :

#### I.7.3.1 Phase de Pré-Construction : Collecte de Données Initiales

##### I.7.3.1.1 Caractéristiques du Site

- **Relevés locaux et essais** : Utiliser des levés bathymétriques, topographiques, géotechniques et géophysiques, ainsi que des plongées de reconnaissance pour identifier les caractéristiques du fond marin et des zones de dragage, ainsi que ceux des sédiments bruts (futur produit de dragage) en effectuant des essais spécifiques au laboratoire. L'essai de tamisage est très important dans ce cas, et on peut désormais classer ces sédiments en trois catégories majeures : argile ( $< 2\mu\text{m}$ ), limon (ou silice) (de 2 à  $63\mu\text{m}$ ) ou sable ( $> 63\mu\text{m}$ ). [5]

La figure 13 permet de classer le sédiment selon sa teneur en chacune des fractions citées auparavant.

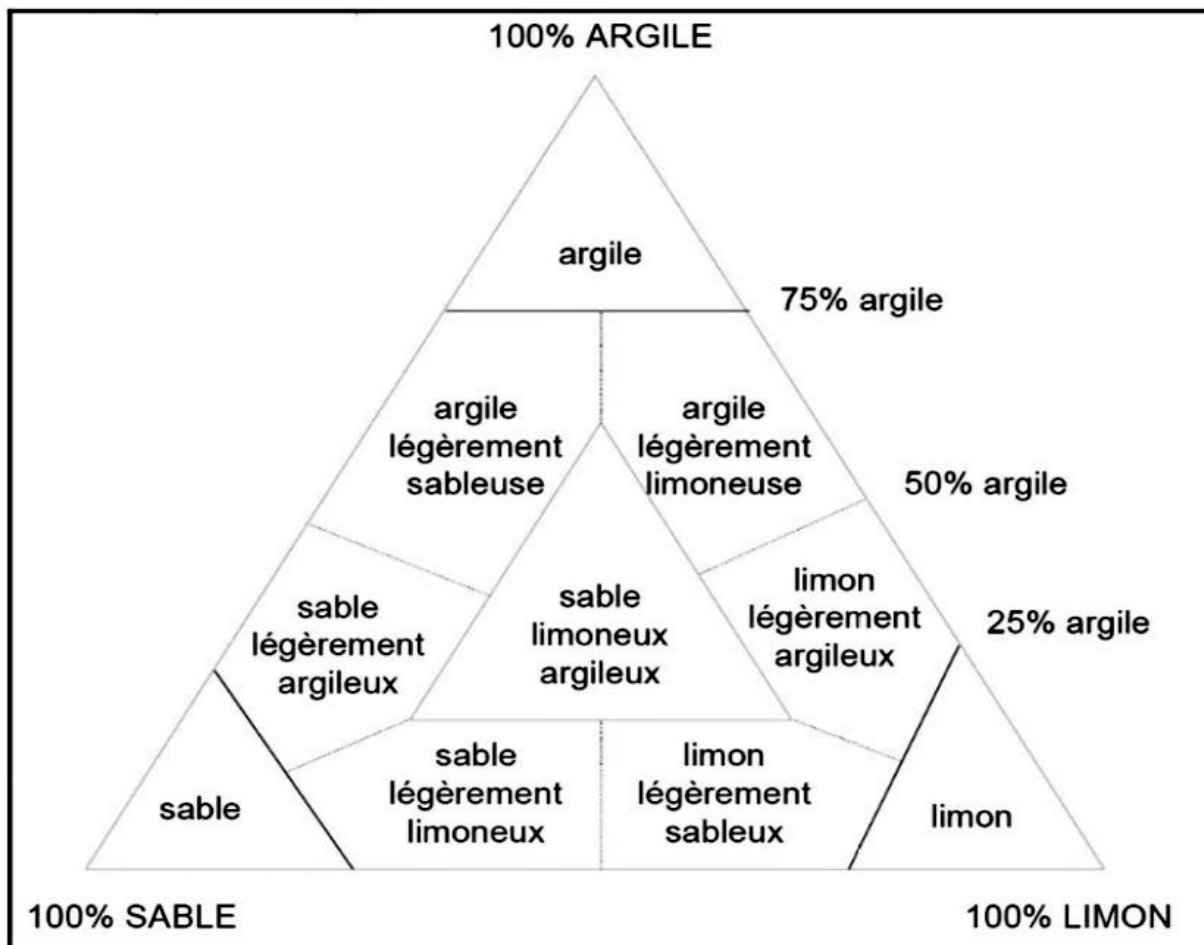


Figure I.13 - Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture (BONNET 2000)

- **Obstacles potentiels** : Identifier et cartographier les obstacles tels que les UXO (engins non explosés), matériaux pollués, épaves, câbles, et autres structures sous-marines.

### I.7.3.1.2 Contraintes Environnementales et Réglementaires

Obtenir les permis nécessaires et évaluer l'impact environnemental des opérations de dragage et de remblayage.

### I.7.3.2 Phase de Préparation : Planification et Conception

#### I.7.3.2.1 Choix du Matériel de Dragage

- **Sélection du matériel** : Choisir le matériel de dragage approprié en fonction des caractéristiques du site et des critères environnementaux. Les options incluent les dragues aspiratrices, les dragues mécaniques, les barges, et les pipelines.

#### I.7.3.2.2 Conception du Plan d'Exécution

- **Démonstration des capacités** : Démontrer que le matériel sélectionné est capable de réaliser le projet conformément aux spécifications techniques et aux exigences de performance.

### I.7.3.3 Phase de Construction : Exécution des Travaux

#### I.7.3.3.1 Mise en Place du Remblai

- **Méthodes de mise en place** : Choisir entre les méthodes hydraulique ou mécanique en tenant compte de la profondeur de l'eau, de la nature du matériau, de la géométrie de la zone, et des exigences environnementales.

- **Gestion des fines** : Utiliser des bassins de décantation pour éliminer les fines des eaux de rejet, si nécessaire.

#### I.7.3.3.2 Contrôle Qualité

- **Surveillance et évaluation** : Mettre en place un système de contrôle qualité pour surveiller et évaluer les processus de construction, en s'assurant de la conformité avec les spécifications. Enregistrer des données de positionnement, de volume transporté, et autres paramètres pertinents à des intervalles de 20 secondes maximum.

### I.7.3.4 Phase de Post-Construction : Évaluation Finale

#### I.7.3.4.1 Inspection et Validation

- **Conformité aux spécifications** : Effectuer des inspections pour vérifier que le terre-plein respecte les spécifications de conception et de performance.

- **Caractéristiques de stabilité** : Assurer que le terre-plein atteint les caractéristiques de stabilité et de portance requises.

## I.7.4 Traitement, Stabilisation et Consolidation des Produits de Dragage

Le traitement, la stabilisation et la consolidation de ces matériaux offrent des solutions efficaces pour réduire leur impact environnemental et les réutiliser de manière bénéfique, notamment en remblai hydraulique dragué.

### I.7.4.1 Le traitement des sédiments pollués :

#### I.7.4.1.1 Traitement biologique :

Cette méthode exploite la capacité de certains micro-organismes à décomposer les substances organiques et les polluants, tels que les HAP, les PCB, les composés chlorés et les hydrocarbures. Leur efficacité est influencée par les conditions environnementales, comme la température, la disponibilité en oxygène et la concentration en nutriments, ainsi que par la capacité des micro-organismes à métaboliser les polluants comme source de nutrition. L'approche consiste à introduire des micro-organismes dans la matrice contaminée pour stimuler et accélérer les processus biologiques de dégradation. [5]

#### I.7.4.1.2 Traitement physico-chimique :

Ce mode de traitement se base sur des interactions physico-chimiques, notamment l'adsorption/désorption, l'oxydation/réduction et l'échange ionique, afin de neutraliser, transformer ou fixer les contaminants.

### I.7.4.2 Stabilisation – Solidification (S/S) :

La technique de stabilisation/solidification (S/S) est couramment utilisée pour traiter les sédiments contaminés. Cette méthode combine des processus chimiques et physiques pour transformer les sédiments en un matériau stable et sûr.

### I.7.4.2.1 Principe de la méthode S/S :

La stabilisation consiste en des réactions chimiques qui réduisent la mobilité des contaminants en diminuant leur solubilité. La solidification, quant à elle, encapsule les contaminants dans une matrice solide, augmentant la résistance à la compression et réduisant la perméabilité du matériau. [6]

### I.7.4.2.2 Agents de liaison utilisés :

Les liants couramment utilisés comprennent le ciment Portland, la chaux, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau granulé. Ces matériaux réagissent avec les sédiments pour améliorer leurs propriétés géotechniques. [6]

### I.7.4.2.3 Processus de mise en œuvre :

La méthode S/S peut être appliquée in situ, en injectant les liants directement dans les sols contaminés, ou ex situ, en mélangeant les sédiments avec les liants après leur extraction. Le mélange peut être effectué par différentes méthodes telles que le mélange humide/sec, basé sur une technologie rotative ou par jet, ou utilisant des tarières ou des lames. [6]

### I.7.4.3 Consolidation et drainage :

La consolidation est une étape critique pour assurer la stabilité à long terme du remblai. Elle vise à réduire leur volume et à améliorer leur capacité portante.

#### I.7.4.3.1 Essai de Consolidation (Oedomètre)

L'essai de consolidation est une méthode clé pour déterminer les caractéristiques de consolidation des sols stabilisés sous une charge unidimensionnelle. Cet essai mesure la déformation des sédiments stabilisés sous différentes contraintes, fournissant des informations sur leur compressibilité et leur résistance. Les courbes  $e$ - $\log \sigma'$  (déformation-contrainte) montrées dans la figure ci-dessous (fig.14) sont analysées pour évaluer la compressibilité et la résistance à la consolidation des matériaux.

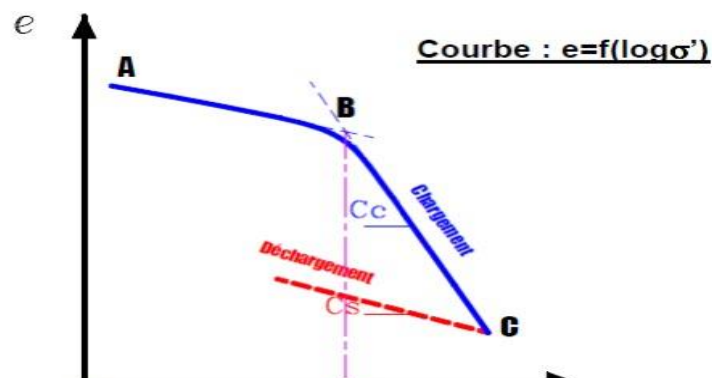


Figure I.14 - courbe de compressibilité œdométrique

Des techniques telles que l'installation de drains verticaux (PVD) et l'application de surcharge sont utilisées pour accélérer la consolidation des sols mous sous-jacents.

### I.7.4.3.2 Drains Verticaux Préfabriqués (PVD)

Les PVD sont installés pour améliorer la perméabilité verticale des sols mous, permettant à l'eau de s'échapper plus rapidement et facilitant ainsi la consolidation. Ces drains sont insérés à des intervalles réguliers et sur toute la profondeur des couches de sol mou. Les dimensions typiques des PVD sont d'environ 100 mm de largeur et 4 mm d'épaisseur et sont installés à des espacements réguliers, souvent entre 1 à 2 mètres.

Les PVD fonctionnent en créant des chemins verticaux pour l'eau piégée dans les pores du sol, réduisant ainsi la longueur du chemin de drainage et augmentant le taux de consolidation. En conséquence, l'excès de pression interstitielle se dissipe plus rapidement, permettant au sol de se consolider sous la surcharge appliquée en un temps réduit. [7]

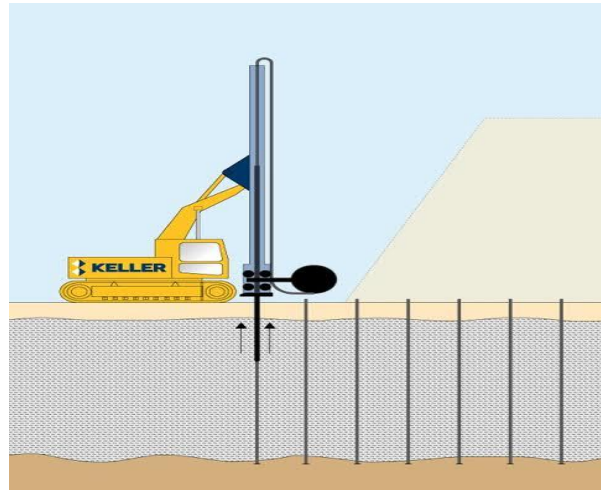


Figure I.15 - Drains verticaux préfabriqués

### I.7.4.3.3 Application de surcharge :

L'application de surcharge est une technique couramment utilisée dans les projets de remblai hydraulique. Cette méthode consiste à appliquer un poids supplémentaire sur le remblai, augmentant ainsi la pression interstitielle et accélérant le processus de consolidation. La surcharge agit en augmentant la contrainte effective sur les sols compressibles. Cette pression supplémentaire pousse l'eau interstitielle hors des pores du sol plus rapidement, permettant aux grains de sol de se rapprocher et de réduire le volume des vides. En conséquence, le sol se consolide plus rapidement sous l'effet de cette surcharge, ce qui réduit le temps nécessaire pour atteindre la densité et la stabilité requises.

## I.8 Conclusion

Les techniques de valorisation, stabilisation et consolidation des produits de dragage offrent des solutions durables et économiquement avantageuses pour la gestion de ces matériaux. En améliorant les propriétés mécaniques des sédiments et en réduisant leur impact environnemental, ces méthodes permettent leur réutilisation dans divers projets de construction, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et écologique des ressources. De plus, l'étude des ouvrages maritimes et des phénomènes des milieux marins joue un rôle crucial dans le développement de ports et d'infrastructures côtières. La compréhension des courants, des marées est essentielle pour concevoir des structures résilientes et durables, capables de résister aux conditions marines exigeantes et de minimiser les impacts négatifs sur l'environnement.

## **Chapitre II**

# **Présentation du projet et collecte des données**

---

# Chapitre II – Présentation du projet et collecte de données

Ce chapitre est dédié à la présentation du projet d'aménagement du môle commercial n°5 au port d'Arzew, du port d'Arzew lui-même ainsi que la collecte des données de base nous permettant de faire une étude complète du projet.

## II.1 Présentation du projet

### II.1.1 Présentation du Port d'Arzew

Poumon de l'économie algérienne, le port d'Arzew, situé dans la wilaya d'Oran, géré par l'Entreprise Portuaire d'Arzew, est étalé sur 22km, situé à 402km à l'ouest d'Alger, ce port constitue la porte de la sortie principale des hydrocarbures exportés d'Algérie avec 39,7 millions de tonnes en 2019 et 34 millions en 2020 soit 52% du trafic national d'hydrocarbures. Disposant d'un site idéalement positionné, le port d'Arzew figure depuis plusieurs années au premier rang des ports nationaux. La position géographique du port est :  
Latitude Nord : 35° 51,617 - Longitude Ouest : 0° 18,237.

### II.1.2 Description du projet

Depuis plusieurs années, le port commercial d'Arzew fait face à un problème de saturation en raison de sa capacité limitée. Actuellement, il ne peut accueillir qu'un nombre restreint d'embarcations, ce qui entrave son efficacité et son potentiel de croissance.

Pour résoudre ce problème et répondre à la demande croissante, l'EPA, maître d'ouvrage, a opté pour un projet d'extension. Dans ce cadre-là, notre projet a pour thème les travaux d'aménagement du bassin de l'Oued El Mogoun et de l'appontement méthanier (ex. jetée en méthane) en mole commercial no. 5 au port d'Arzew, ceci comprend la préfabrication des caissons de quai, l'enlèvement des épaves et la démolition de l'appontement méthane et la jetée sud, dragage et déroctage, réalisation des quais en caissons à -14m, travaux de terrassements du terre-plein et sa consolidation.



Figure II.1 – Emplacement du projet

### II.1.3 Infrastructures existantes

Le port d'Arzew présente un plan d'eau abrité par des jetées dont la surface est évaluée à 165Ha dont une jetée : d'Abri (270ml), Est (400ml), du large (800ml), Sud (550ml), et secondaire (800ml).

Les ouvrages de protection dont la profondeur varie de 0 à 16m ont une longueur totale de 2km environ. Ces ouvrages de protection encadrent quatre bassins :

- Le bassin N°01 est protégé par le môle N°03 et la jetée sud ;
- Le bassin N°02 est protégé par la jetée méthane et la jetée sud ;
- Le bassin N°03 est protégé par la jetée secondaire et le môle méthancier (composé de postes C1 et C2) ;

Le port d'Arzew offre une passe d'entrée libre d'environ 300m de largeur et un cercle d'évitage de 450 m de diamètre juste à l'entrée du port au niveau du poste P3.



Figure II.2 – Infrastructures existante au Port d'Arzew

### II.2 Collecte de données

#### II.2.1 Climat et température

Le climat de la Wilaya d'Oran est méditerranéen, marqué par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et humides. La saison froide s'étend de novembre à avril de l'année suivante. La température moyenne annuelle à Oran est de 17,4°C, avec des températures minimales atteignant -3°C en décembre et des températures maximales atteignant 41°C en août.

#### II.2.2 La pluviométrie

Selon les statistiques de l'Observatoire météorologique de l'aéroport d'El Sénia, la pluviométrie annuelle moyenne dans la région d'Oran est d'environ 406 millimètres. Les précipitations sont particulièrement abondantes d'octobre à avril de l'année suivante, atteignant un pic entre décembre et janvier avec des valeurs approchant les 100 millimètres.

#### II.2.3 Le vent

La direction des vents de mousson d'hiver à Arzew est sud-ouest, tandis que celle des vents d'été est nord-est. En hiver, les vents provenant de l'ouest à sud-ouest sont fréquents et peuvent atteindre des vitesses de 26 km/h. En été, les vents venant de l'est à nord-est sont très fréquents, avec des vitesses atteignant 21,5 km/h.

#### II.2.4 Condition hydrologique (la marée)

La marée atteint son maximum en novembre, environ 35 cm. La marée de vive-eau moyenne est de 25 à 30 cm et la marée de morte-eau moyenne est de 5 à 1 cm.

La zone de l'ingénierie est bien couverte, les vagues sont relativement faibles. On ne tiendra pas compte de la charge de vague pour notre projet.

#### II.2.5 Conditions géologiques

Le site est constitué, de la profondeur de -35,0 m jusqu'à la surface (fond marin), de marnes compactes et indurées, variant de verdâtres à grisâtres, avec des intercalations de couches cinéritiques à certains niveaux et présentant une texture schisteuse par endroits. Cette formation est surmontée par une strate de schiste et de calcschiste, contenant localement des galets hétérométriques.

Cette formation est par endroits recouverte, jusqu'à la surface (fond marin), par une couche de sable grisâtre, de granulométrie fine à moyenne, incluant des fragments coquilliers et des composants gréseux. L'épaisseur de cette couverture sableuse varie en fonction de la topographie et des spécificités locales.

#### II.2.6 Données physiques (topo-bathymétrique)

Le site étudié correspond à l'extrémité NO du golfe d'Arzew, Il est limité au Nord par l'embouchure de l'oued El Mahgoun et au Sud par Chabet Tesmanit.

L'étude de prospection sismique a permis de mettre en évidence deux réflecteurs, l'un représente le toit du fond marin (seabed) et l'autre représente le toit du substratum probable et la base du recouvrement sédimentaire superficiel.

La carte des isobathes du fond marin montre en général des profondeurs qui varient de **1 à 16m** à travers l'ensemble de la zone d'étude. La plage sous marine est irrégulière, elle est marquée par des ruptures de pentes dont la valeur est de 1.3% sur une distance de 650 m et de 3.5% côté Sud Ouest de la zone d'étude plus exactement entre les isobathes 1 et 8m. Les isobathes du toit du substratum probable présentent une morphologie sous-marine semblable à celle du toit du fond marin, avec des valeurs de profondeurs qui varient entre **5 et 19 m**.

La carte des isopaques du recouvrement sédimentaires montre des variations d'épaisseur de sédiments comprises en moyenne entre **0** et **5 m**. La répartition sédimentaire est aléatoire, les plus fortes épaisseurs se situent à l'Ouest du secteur d'étude.

### II.2.7 Données relatives aux besoins de conception

**Tableau II.1 – Navires de dimensionnement attendus**

| Type d'embarcation | nombre | Tonnage (T) | Longueur (m) | Largeur (m) | Tirant d'eau (m) |
|--------------------|--------|-------------|--------------|-------------|------------------|
| Vraquier           | 1      | 50 000      | 230          | 32,3        | 12,5             |
| Poste conteneur    | 2      | 1000 EVP    | 190          | 30          | 10,5             |
| Général cargo      | 1      | 40 000      | 220          | 32          | 11,5             |

**Tableau II.2 - Les profondeurs liées aux embarcations du projet**

| Type d'embarcation | Tirant d'eau (m) | plus basse mer (m) | Profondeur nécessaire (m) |
|--------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| Vraquier           | 12,5             | 0,4                | 14                        |
| Porte-conteneur    | 10,5             | 0,4                | 12                        |
| Général cargo      | 11,5             | 0,4                | 13                        |

**NB :** Profondeur nécessaire = tirant d'eau + pieds de pilote

Pieds de pilote = 10% tirant d'eau [1]

**Tableau II.3 – Linéaire des différents quais pour les embarcations**

| Type d'embarcation | Longueur de gabarit (m) | Linéaire de quai (ml) |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| Vraquier           | $230 + 30 = 260$        | 260                   |
| Porte - conteneur  | $190 + 30 = 220$        | 400                   |
| Général cargo      | $220 + 30 = 250$        | 250                   |

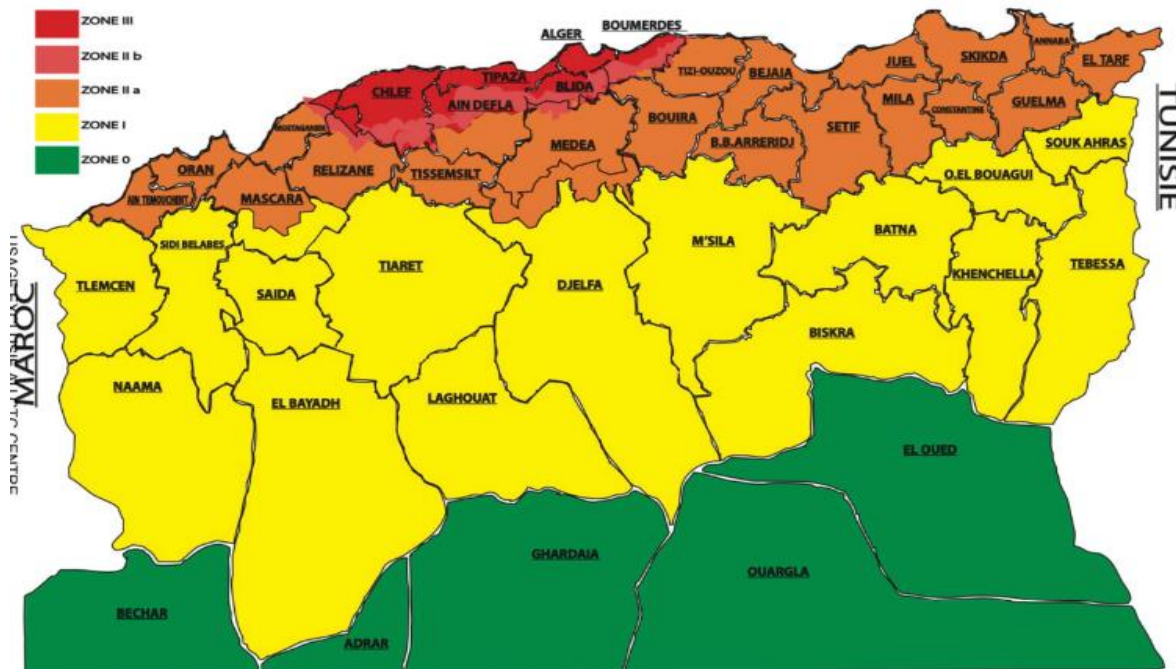
**NB :** les 30 mètres ajoutées à la longueur du navire de conception servent à son amarrage. [1]

**Tableau II.4 – Besoins en surface de terre-pleins**

| Désignation                     | Terre-plein nécessaire (Ha) |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Poste Conteneur                 | 14                          |
| Poste Urée                      | 3,6                         |
| Poste Marchandise               | 1,7                         |
| Zone de réparation et entretien | 1,4                         |

### II.2.8 Données sismique

Selon le règlement parasismique Algérien RPA 99 /version 2003, Arzew est située dans la Zone II-a: zone à sismicité moyenne.



L'ouvrage étant classé dans le groupe 1A : ouvrage d'importance vitale, nous aurons comme coefficient d'accélération 0,25g.

Tableau II.5 - coefficient d'accélération

| Groupe d'usage | Zone |             |      |      |
|----------------|------|-------------|------|------|
|                | I    | IIa         | IIb  | III  |
| 1 A            | 0,15 | <b>0,25</b> | 0,30 | 0,40 |
| 1 B            | 0,12 | 0,20        | 0,25 | 0,30 |
| 2              | 0,10 | 0,15        | 0,20 | 0,25 |
| 3              | 0,07 | 0,10        | 0,14 | 0,18 |

### II.3 Conclusion

Grace à une analyse approfondie des données collectées, après notre visite sur site, nous avons pu établir un cadre solide pour les prochaines étapes de conception de notre projet. Cela nous a permis de comprendre les conditions initiales et les exigences du projet.

## **Chapitre III**

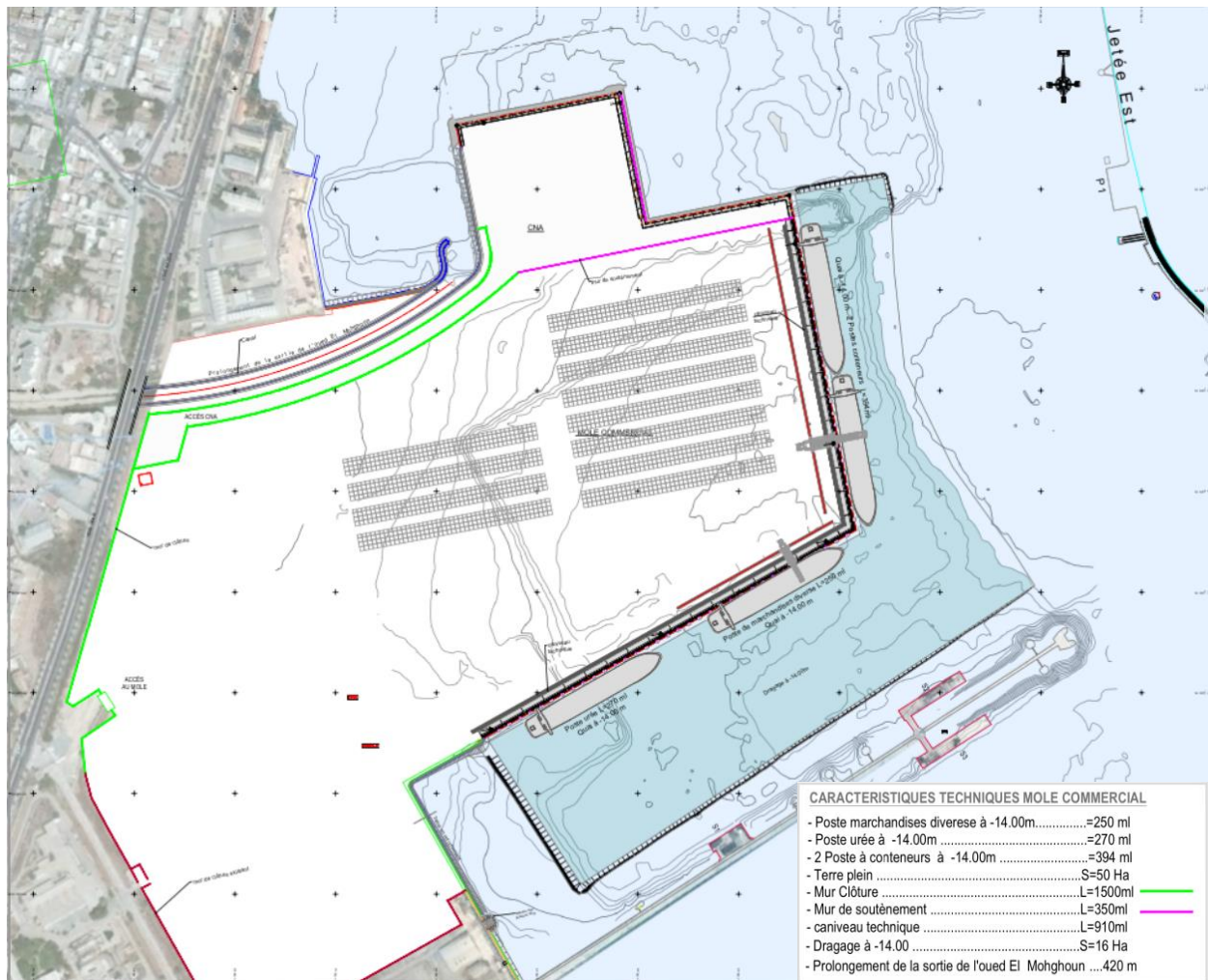
### **Présentation des variantes et Analyse multicritère**

---

## Chapitre III - Présentation des variantes et analyse multicritère

Ce chapitre présente les variantes du projet et l'analyse multicritère utilisée pour choisir la solution optimale. Nous avons évalué différents critères, puis comparé systématiquement chaque variante pour déterminer celle qui répond le mieux aux exigences du projet.

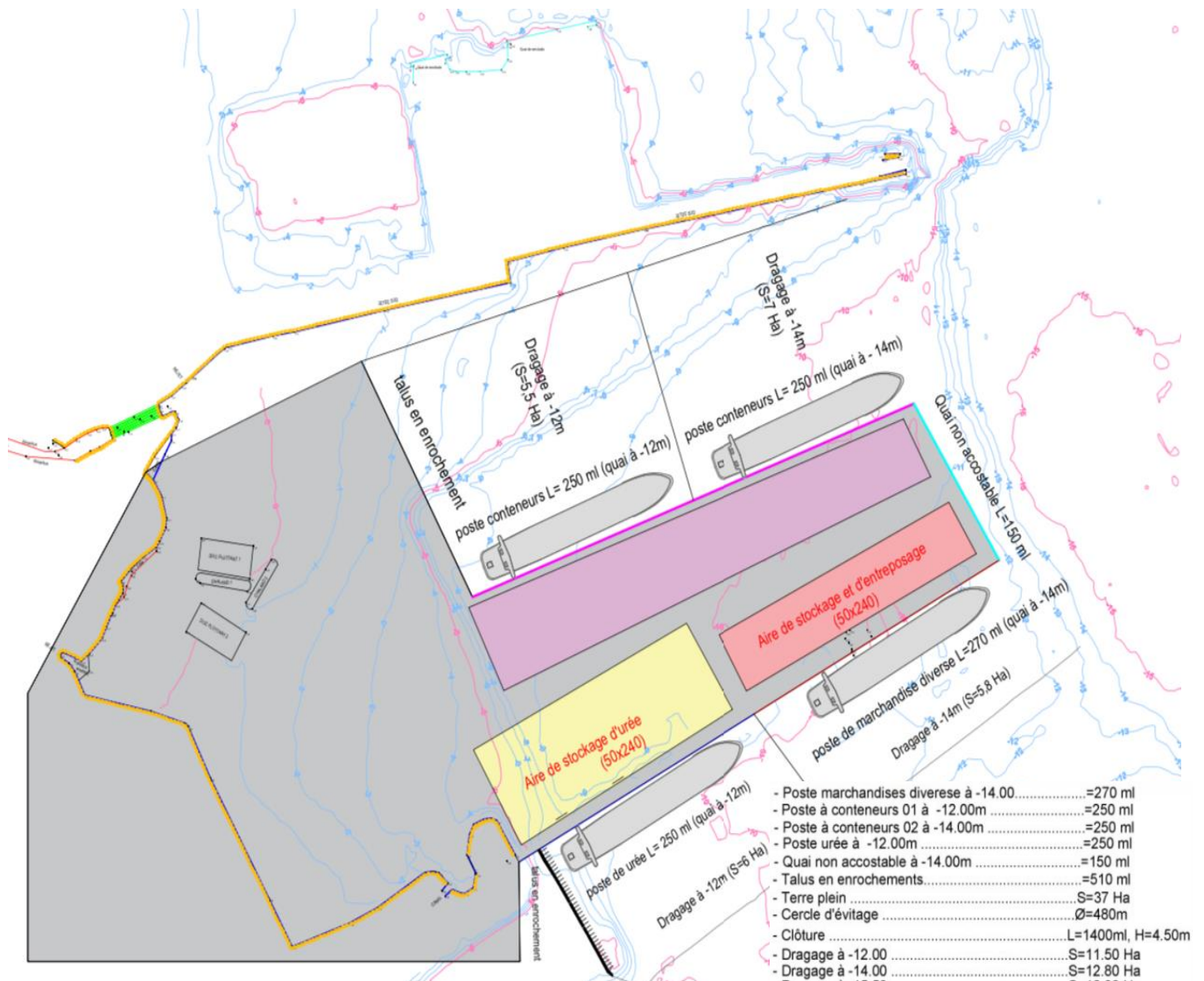
### III.1 Les variantes : Variante n°1



#### III.1.1 Description de la variante 1

Le môle commercial s'étend sur une superficie totale des terres-plein de 50Ha et dispose de 4 postes à quai sur caissons ; un poste à quai pour urée de 270ML à -14m, un poste à quai pour marchandises diverses de 250ML à -14m, deux postes à quai pour conteneurs le premier d'un linéaire total de 394ML à -14m. Dans cette variante le canal de l'Oued El Mohgoun devra être dévié. La surface de dragage à -14m prévu est de 16Ha.

## Variante n°2



### III.1.2 Description de la variante 2

Le môle commercial s'étend sur une superficie totale des terres-plein de 37Ha et dispose de 4 postes à quai sur caissons ; un poste à quai pour urée de 250ML à -12m, un poste à quai pour marchandises diverses de 270ML à -14m, deux postes à quai pour conteneurs le premier d'un linéaire de 250ML à -14m et le second d'un linéaire de 250ML à -12m. Dans cette variante le canal de l'Oued El Mohgoun a été évité et n'a pas à être dévié. La surface de dragage à -14m prévu est de 12,8Ha et à -12m est de 11,5Ha.

### III.2 Estimation de coût de réalisation des variantes

Tableau II.6 – Devis Quantitatif estimatif (DQE).

| Désignation                     |   | Variante 1 (DA)   | Variante 2 (DA)   |
|---------------------------------|---|-------------------|-------------------|
| Installation de chantier        |   | 2 379 622 250,00  | 2 545 793 064,00  |
| Travaux de terrassement         | Travaux de démolition de la jetée méthane                 | 231 670 000,00    | 231 670 000,00    |
|                                 | Travaux de remblaiement des terre-pleins                  | 2 196 500 000,00  | 1 265 410 000,00  |
| Ouvrages d'accostage            | Quais sur caissons  | 7 306 000 000,00  | 9 352 319 475,00  |
|                                 | Equipements pour quais sur caisson                        | 520 400 000,00    | 580 752 735,00    |
| Revêtement et poutre sous-rails |   | 7 715 670 000,00  | 5 709 595 800,00  |
| Drainage                        | Drainage du terre-plein                                   | 206 550 000,00    | 152 847 000,00    |
|                                 | Déviation de l'Oued El Mohgoun (var.1)                    | 207 500 000,00    | -                 |
| Ouvrages divers                 | Mur de soutènement (var.1) / talus en enrochement (var.2) | 36 465 000,00     | 53 134 714,00     |
|                                 | Mur de clôture  | 88 467 500,00     | 82 569 666,00     |
| Dragage                         |   | 5 287 000 000,00  | 8 029 631 250,00  |
| Total en HT                     |   | 26 175 844 750,00 | 28 003 723 704,00 |
| TVA (19%)                       |   | 4 973 410 502,50  | 5 320 707 503,76  |
| Total en TTC                    |   | 31 149 255 252,50 | 33 324 431 207,76 |

### III.3 Analyse multicritères et choix de la variante

Les variantes sont jugées selon 5 critères, qui sont classés par ordre de priorité :

1. Critère technique : complexité de la méthode d'exécution.
2. Critère de sécurité : conditions de manœuvrabilité ;
3. Critère économique : coût ;
4. Critère environnemental : impact sur l'environnement (dragage) ;
5. Critère temporel : délai.

Pour établir le poids de chaque critère, on opte pour la méthode d'analyse multicritères hiérarchique (AMCH)

Tableau II.7 - échelle proposée par Saaty.

| Appréciation  | Degré d'importance |
|---|--------------------|
| Importance égale de deux éléments                       | 1                  |
| Faible importance d'un élément par rapport à un autre   | 3                  |
| Importance moyenne d'un élément par rapport à un autre  | 4                  |
| Importance forte d'un élément par rapport à un autre    | 5                  |
| Importance attestée d'un élément par rapport à un autre | 7                  |
| Importance absolue d'un élément par rapport à un autre  | 9                  |

### III.3.1 Matrice de comparaison binaire

Tableau II.8 – Matrice de comparaison binaire.

| Critères               | Coût | Impact env. | Délai | Manœuvre. | Complexité |
|------------------------|------|-------------|-------|-----------|------------|
| Complexité             | 1    | 3           | 4     | 5         | 7          |
| Navigation             | 1/3  | 1           | 3     | 4         | 5          |
| Coût                   | 1/4  | 1/3         | 1     | 3         | 4          |
| Impact environnemental | 1/5  | 1/4         | 1/3   | 1         | 3          |
| Délai                  | 1/7  | 1/5         | 1/4   | 1/3       | 1          |

### III.3.2 Normalisation de la matrice

$$\begin{pmatrix} 0,52 & 0,63 & 0,47 & 0,375 & 0,35 \\ 0,17 & 0,21 & 0,35 & 0,3 & 0,25 \\ 0,13 & 0,07 & 0,12 & 0,225 & 0,2 \\ 0,1 & 0,05 & 0,04 & 0,075 & 0,15 \\ 0,07 & 0,04 & 0,03 & 0,025 & 0,05 \end{pmatrix}$$

### III.3.3 Poids des critères

$$\text{Poids du critere} = \frac{\text{Somme ligne}}{\text{Nombre de criteres}}$$

$$P_1 = \frac{1,345}{5} = 0,469 | P_2 = 0,256 | P_3 = 0,149 | P_4 = 0,083 | P_5 = 0,043$$

### III.3.4 Évaluation de la cohérence

Pour évaluer la cohérence des poids de critères, il faut que le ratio de cohérence soit inférieur à 10 %, dans ce cas, l'appréciation est jugée cohérente.

$$\text{Indice de cohérence} = \frac{\text{cohérence moyenne} - \text{nombre d'elements}}{\text{nombre d'elements} - 1}$$

$$\text{Ratio de cohérence} = \frac{\text{Indice de cohérence}}{\text{cohérence aleatoire}}$$

La cohérence aléatoire est donnée par le tableau suivant :

**Tableau II.9 – cohérence aléatoire.**

| Nombre de critères  | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|---------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Cohérence aléatoire | 0,00 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 |

Pour obtenir la cohérence moyenne on multiplie chaque colonne de la matrice de comparaison binaire non normalisée par le poids du critère associé. On calcule alors pour chaque ligne la somme des éléments. La cohérence de chaque critère est donnée par la somme précédente divisée par le poids du critère de la ligne. En sommant la cohérence de chaque critère et en divisant par le nombre des critères, on obtient la cohérence moyenne.

$$\begin{pmatrix} 0,469 & 0,768 & 0,569 & 0,415 & 0,301 \\ 0,156 & 0,256 & 0,447 & 0,332 & 0,215 \\ 0,117 & 0,085 & 0,149 & 0,249 & 0,172 \\ 0,094 & 0,064 & 0,05 & 0,083 & 0,129 \\ 0,067 & 0,051 & 0,037 & 0,028 & 0,043 \end{pmatrix}$$

$$C_1 = \frac{\text{Somme ligne}}{P_1} = \frac{2,549}{0,469} = 5,43 \mid C_2 = 5,49 \mid C_3 = 5,18 \mid C_4 = 5,06 \mid C_5 = 5,26$$

$$\text{Cohérence}_{\text{moy}} = \frac{\sum C_i}{\text{nombre de criteres}} = 5,284$$

$$\text{d'où : } I_c = \frac{5,284 - 5}{4} = 0,071. \text{ Ainsi : } R_c = \frac{0,071}{1,12} = 0,063 = 6,3\% < 10\%$$

Donc l'appréciation est jugée cohérente.

### III.3.5 Évaluation finale

**Barème de notation :**

- 3 – Mauvais ;
- 5 – Moyen ;
- 7 – Bon.

**Tableau II.10 – Tableau d'évaluation finale**

| Critères           | Poids | Variante n°1 |               | Variante n°2 |               |
|--------------------|-------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|                    |       | Note         | Note pondérée | Note         | Note pondérée |
| <b>Complexité</b>  | 0,469 | 5            | 2,345         | 3            | 1,407         |
| <b>Navigation</b>  | 0,256 | 8            | 2,048         | 3            | 0,768         |
| <b>Coût</b>        | 0,149 | 8            | 1,192         | 5            | 0,745         |
| <b>Impact env.</b> | 0,083 | 5            | 0,415         | 3            | 0,249         |
| <b>Délai</b>       | 0,043 | 3            | 0,129         | 8            | 0,344         |
|                    |       | $\Sigma$     | 6,129         | $\Sigma$     | 3,513         |

### **III.4 Conclusion**

L'analyse multicritère hiérarchique des deux variantes, prenant compte de la complexité de l'exécution, la navigation, le cout, l'impact environnemental et le délai nous a permis de déterminer la solution la plus équilibrée et appropriée. Grace à cette méthodologie rigoureuse, nous avons pu évaluer de manière objective et comparative chaque critère, aboutissant à une décision éclairée qui optimise à la fois les aspects techniques, économiques et environnementaux du projet. Cette approche nous a garanti le choix final : variante 1 de manière holistique aux exigences et contraintes identifiées.

## **Chapitre IV**

### **Stabilité externe du quai**

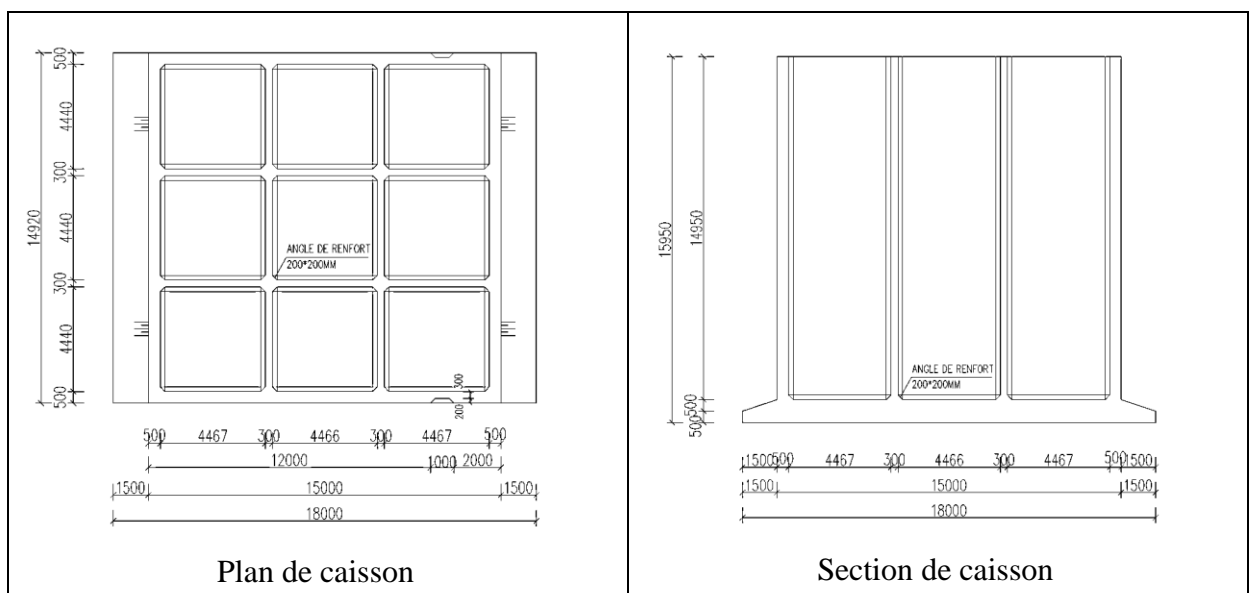
---

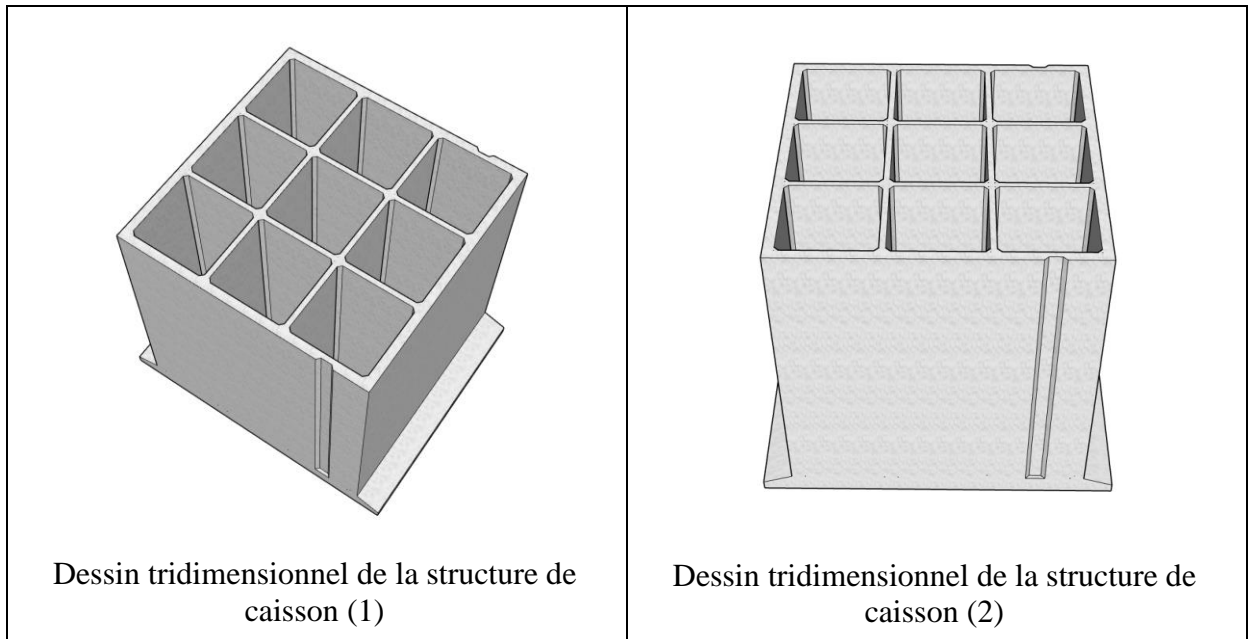
## Chapitre IV - Stabilité externe du quai

### IV.1 Conditions de conception

- Les quais sont composés de caissons en béton armé fermés de type rectangulaire comportant 3 compartiments dans chaque sens (09 chambres au total par caisson).
- Les épaisseurs des parois sont égales à 0,5 m pour les quais à -12m et -14,00 m. Les épaisseurs des parois intérieures qui séparent les chambres sont égales à 0,3 m.
- Les caissons sont remplis de remblai en TVO et sable.
- Les caissons reposent sur une couche d'assise en enrochements (1-15 Kg) dont l'épaisseur est de 1,30 m, cette dernière sera réglée avec une couche de ballast (40-70mm) d'épaisseur égale à 30 cm .Le pied de quai est protégé par des enrochements de (50-200 Kg). Les caissons sont épaulés par une couche de TVC (0-500 kg) en arrière.
- Le couronnement du quai est constitué par une poutre en béton armé arrêté au niveau + 2,50 m, il sert de support pour la fixation des bollards, défenses, échelle de sécurité et rails.
- Le quai est équipé de 46 bollards de 150 T, un chaque 20m défenses de type tronconique SPC 1400 G2.2, SPC 1400 G2.6 et SPC 1400 G2.8, échelles et de rail pour voie de portique. Il est prévu une poutre arrière en béton armé sous rail pour le portique. Nous avons considéré les hypothèses suivantes concernant l'entraxe entre les rails des grues ou portiques de 20,5 m pour les quais à conteneurs et urée.
- Les caissons constituant le quai offre un tirant d'eau de 14,00 m. Un dragage à -14 m sera réalisé avec une souille de dragage.

### IV.2 Géométrie des caissons





**Tableau IV.1 - Géométrie de caisson.**

| Géométrie des Caissons                              | Caisson à -14.00 m  |
|---|---------------------|
| $L_{ext}$ (m) : Largeur entre les voiles extérieurs | 15                  |
| $B$ (m) : Base des caissons (voile + radier)        | $15 + 1,5 \times 2$ |
| $D_{ext}$ (m) : Distance entre parois intérieurs    | 4,46 et 4,48        |
| $V_{ext}$ (m) : Epaisseur voile extérieur           | 0,5                 |
| $V_{int}$ (m) : Epaisseur paroi intérieur           | 0.3                 |
| $H$ (m) : Hauteur du caisson (y compris radier)     | 15,95               |
| $e$ (m) : Epaisseur du radier                       | 1,00                |
| $N$ (m) : Niveau du couronnement                    | +2,50               |

### IV.3 Situation sismique

Comme mentionné auparavant le groupe d'études antisismique de la zone du projet est celui de 1A de la zone IIa. Le coefficient d'accélération sismique correspondant est de 0,25.

Selon la référence d'analyse d'anti-séisme RPA 99 / VERSION 2003 pour la structure du présent projet, il est prévu de faire la vérification de calcul par la méthode pseudo-statique. La force d'inertie sismique supportée par le centre de masse de la structure verticale du terminal est calculée respectivement dans la direction horizontale  $F_H$  et la direction verticale  $F_V$ , et le coefficient de séisme sera calculé selon les formules suivantes:  $K_h = A | K_v = \pm 0,3 K_h$

Dont:  $A$  - coefficient d'accélération de zone, ici  $A = 0,25$  ;

Pour ces travaux :  $K_h = 0,25 | K_v = \pm 0,3 \times K_h = \pm 0,3 \times 0,25 = \pm 0,075$ .

Dans le calcul de la force d'inertie sismique, nous appliquons la masse volumique naturelle pour les structures (sols) au-dessus d'eau et la masse volumique déjaugée pour les structures (sols) immergés.

### IV.4 Poids propre

Le poids propre est constitué de celui des éléments composants de la structure, il peut être calculé conformément aux poids volumiques des matériaux suivants :

**Tableau IV.2 - poids volumique de matériaux**

| Matériaux  | Poids Volumique (kN/m <sup>3</sup> ) |
|--|--------------------------------------|
| Eau de mer   | 10,25                                |
| Caisson partie au-dessus de l'eau  | 25,0                                 |
| Caisson partie submergée   | 15,0                                 |
| Couronnement, mur de couronnement  | 25,0                                 |
| Poutre sous rail   | 25,0                                 |
| Béton de propreté  | 24,0                                 |
| Les aciers utilisés pour le caisson et le couronnement sont de classe Fe E40 à la limite de l'élasticité garantie est de 400 MPa | 78,5                                 |

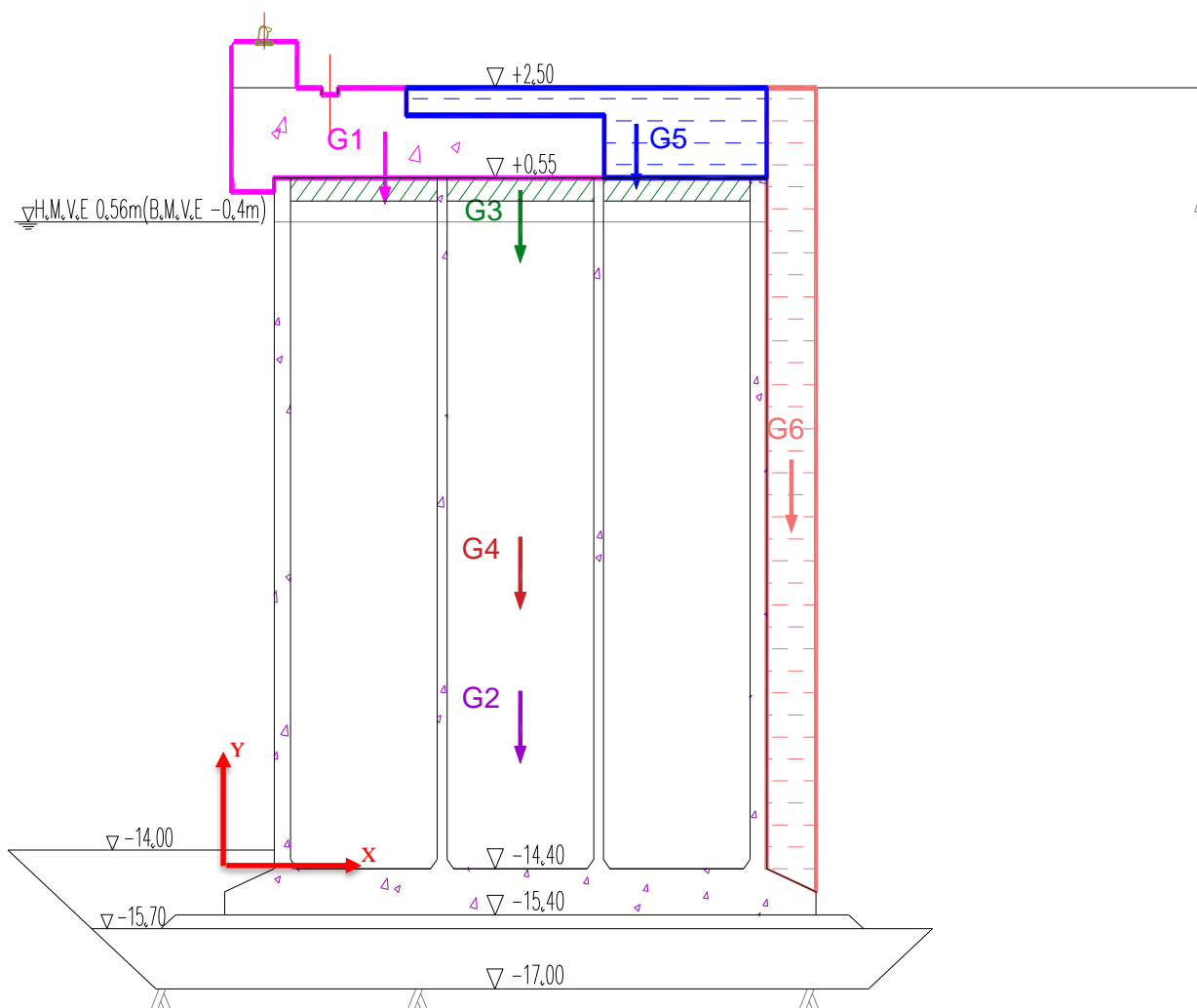
## Stabilité externe du quai

Pour les matériaux de remblai, les paramètres indiqués dans le tableau ci-dessous sont retenus

Tableau IV.3 - Masse volumique des remblais

| Type                                     | Masse volumique naturelle (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohésion n | Masse volumique déjaugé (kN/m <sup>3</sup> ) | Angle de frottement interne (°) |
|--|--|------------|--|---------------------------------|
| Remblai en arrière du quai TVC (0-500kg) | 18   | 0          | 11   | 37                              |
| Enrochement de (1-15kg)                  | 18   | 0          | 11   | 38                              |
| Ballast de réglage                       | 18   | 0          | 11   | 38                              |
| Enrochement (50-200kg)                   | 18   | 0          | 11   | 38                              |

Schéma - poids du caisson :



**Tableau IV.4 - Poids Propre du caisson**

| Niveau d'eau de conception   |         | (m,ZH)               | NGA-0,40m  |
|--|---------|----------------------|------------|
| Poids volumique du béton armé, émergé                                  |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 25,0       |
| Poids volumique du béton armé, immergé                                 |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 15,0       |
| Poids volumique du béton de propreté, émergé                           |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 24,0       |
| Poids volumique du béton de propreté, immergé                          |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 14,0       |
| Poids volumique de TVO, émergé   |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 18,0       |
| Poids volumique de TVO, immergé  |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 11,0       |
| Poids volumique de TVC à remblai, émergé                               |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 18,0       |
| Poids volumique de TVC à remblai, immergé                              |         | (kN/m <sup>3</sup> ) | 11,0       |
| Volume de la poutre de couronnement coulé sur place G1                 | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 312,53     |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 0,0        |
| Volume de caisson G2   | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 43,17      |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 894,91     |
| Volume de la dalle en béton (bouchon) G3                               | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 89,78      |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 0,0        |
| TVO + Sable à remblai dans le caisson G4                               | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 80,8       |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 2513,84    |
| Remblai sur le caisson TVC G5  | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 144,78     |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 0,0        |
| TVC sur le pied arrière de radier G6                                   | émergé  | (m <sup>3</sup> )    | 65,25      |
|  | immergé | (m <sup>3</sup> )    | 320,625    |
| Poids propre total (caisson seul)                                      |         | (kN)                 | 60 974,705 |
| Poids propre total (mètres linéaires)                                  |         | (kN/m)               | 4064,98    |
| Moment de flexion sur la pointe de pied avant (caisson seul)           |         | (kNm)                | 561 701,0  |
| Moment de flexion sur la pointe de pied avant, G×x1 (mètres linéaires) |         | (kN·m/m)             | 37 647,5   |

**Tableau IV.5 - Récapitulatif du CDG du quai**

| ZH  | NGA-0,40m     |                         |                   |                   |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|---|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--|--------|---------|-------|-------|---------|--|--------|---------|-------|-------|---------|--|--------|---------|-------|-------|---------|--|--------|---------|-------|-------|---------|--|------|---------|-------|-------|---------|-----------------|
| Terme                                     | G<br>( kN/m ) | $\Sigma G$<br>( kN/ m ) | $\Sigma x$<br>(m) | $\Sigma y$<br>(m) |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
| Poutre de couronnement coulé sur place G1 | 520,88        | 520,88                  | 4,86              | 16,93             |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 0,0           |                         |                   |                   | Caisson G2                               | 71,95  | 966,86  | 9,00  | 5,18  | 894,91  | Dalle en béton G3                        | 149,63 | 149,63  | 9,00  | 15,70 | 0,0     | TVO+Sable à remblai dans le caisson G4   | 96,96  | 1940,44 | 9,00  | 8,37  | 1843,48 | Remblai sur le caisson G5                | 173,73 | 173,73  | 12,53 | 17,11 | 0,0     | Remblai sur le pied arrière de radier G6 | 78,3 | 313,42  | 17,25 | 10,02 | 235,125 | <b>Au total</b> |
| Caisson G2                                | 71,95         | 966,86                  | 9,00              | 5,18              |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 894,91        |                         |                   |                   | Dalle en béton G3                        | 149,63 | 149,63  | 9,00  | 15,70 | 0,0     | TVO+Sable à remblai dans le caisson G4   | 96,96  | 1940,44 | 9,00  | 8,37  | 1843,48 | Remblai sur le caisson G5                | 173,73 | 173,73  | 12,53 | 17,11 | 0,0     | Remblai sur le pied arrière de radier G6 | 78,3   | 313,42  | 17,25 | 10,02 | 235,125 | <b>Au total</b>                          |      | 4064,96 | 9,26  | 9,46  |         |                 |
| Dalle en béton G3                         | 149,63        | 149,63                  | 9,00              | 15,70             |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 0,0           |                         |                   |                   | TVO+Sable à remblai dans le caisson G4   | 96,96  | 1940,44 | 9,00  | 8,37  | 1843,48 | Remblai sur le caisson G5                | 173,73 | 173,73  | 12,53 | 17,11 | 0,0     | Remblai sur le pied arrière de radier G6 | 78,3   | 313,42  | 17,25 | 10,02 | 235,125 | <b>Au total</b>                          |        | 4064,96 | 9,26  | 9,46  |         |  |      |         |       |       |         |                 |
| TVO+Sable à remblai dans le caisson G4    | 96,96         | 1940,44                 | 9,00              | 8,37              |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 1843,48       |                         |                   |                   | Remblai sur le caisson G5                | 173,73 | 173,73  | 12,53 | 17,11 | 0,0     | Remblai sur le pied arrière de radier G6 | 78,3   | 313,42  | 17,25 | 10,02 | 235,125 | <b>Au total</b>                          |        | 4064,96 | 9,26  | 9,46  |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
| Remblai sur le caisson G5                 | 173,73        | 173,73                  | 12,53             | 17,11             |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 0,0           |                         |                   |                   | Remblai sur le pied arrière de radier G6 | 78,3   | 313,42  | 17,25 | 10,02 | 235,125 | <b>Au total</b>                          |        | 4064,96 | 9,26  | 9,46  |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
| Remblai sur le pied arrière de radier G6  | 78,3          | 313,42                  | 17,25             | 10,02             |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
|   | 235,125       |                         |                   |                   | <b>Au total</b>                          |        | 4064,96 | 9,26  | 9,46  |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |
| <b>Au total</b>                           |               | 4064,96                 | 9,26              | 9,46              |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |        |         |       |       |         |  |      |         |       |       |         |                 |

### IV.5 Charges et surcharges d'exploitations

Les charges concernées pour le calcul de la stabilité

#### IV.5.1 Charges permanentes G

1. Poids propre du quai (parois, caisson, bouchon et radier)
2. Poids du remblai en sable et TVO à l'intérieur des chambres
3. Poutre de couronnement / 20m de plot
4. Poussée des terres TVC (0-500kg) derrière les parois du caisson
5. Poussée due au marnage
6. Poussée hydrodynamique

#### IV.5.2 Charges d'exploitation

1. Surcharge de  $6 \text{ t/m}^2$  sur les terre-pleins derrière le quai
2. Grue type LHM 400
3. Effort d'amarrage (Bollard 150 T)
4. Reach Stacker CS 45 avec spreader pour la manutention des conteneurs pleins
5. Portiques à déchargement

- **Grue mobile LIEBHERR type LHM 400 Lictronic**

Grue calée au travail

Poids total à vide = 390t

Charge levée max = 104t

Entraxe de la voie de roulement = 6m

Dimensions des plaques de calages = 5.50 x 1.80m

Charge max au sol sous les plaques =  $1.9 \text{ t/m}^2$

Base de calage transversale = 12m

Base de calage longitudinale = 19.5m

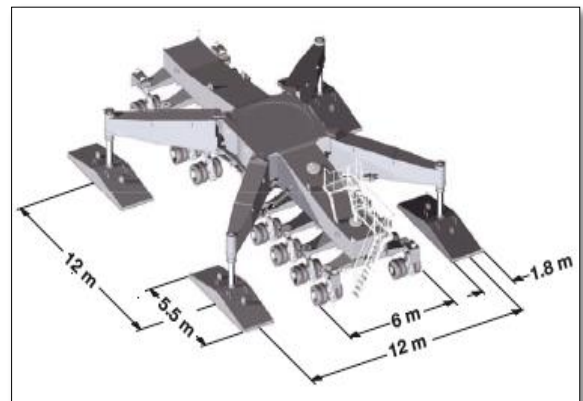


Figure IV.2 – Grue LMH 400

- **Portique à déchargement**

Entraxe des rails (20.50m),

Ecartement des pieds (20m), 24 roues par bogie du côté avant (accostage), 18 roues par bogie du côté arrière.

La charge de portiques à déchargement:

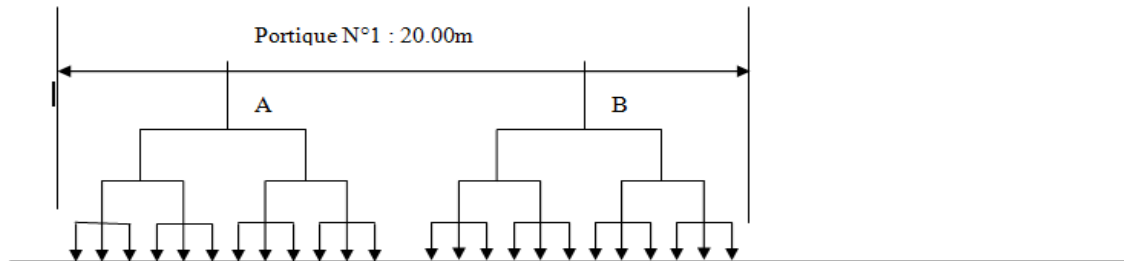
La tension max de roues avant est de 46.4t/roue, la tension max de roues arrière est de 23.7t/roue, les efforts seront majorés de 13% tenant compte des effets du vent.

L'effort horizontal perpendiculaire et parallèle au rail est 10% de tension de roue majorée.

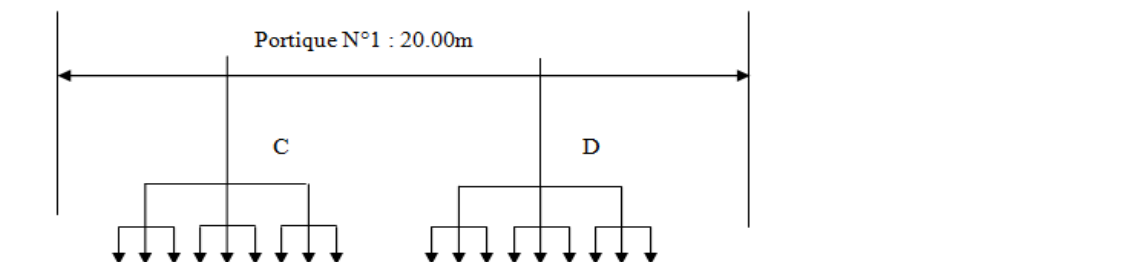
**Tableau IV.6 - charge de calcul exercée par le portique**

|                     | Charge verticale | Charge horizontale |
|---------------------|------------------|--------------------|
| <b>Roue avant</b>   | 52.43 t          | 5.24 t             |
| <b>Roue arrière</b> | 26.78 t          | 2.68 t             |

Répartition des galets sur la poutre côté avant d'appontement :




Répartition des galets sur la poutre côté arrière d'appontement :



- **Reach Stacker CS 45 avec spreader pour la manutention des conteneurs pleins :**

**Tableau IV.7 – Caractéristiques du Reachstacker CS45**

| Type<br>Chariot élévateur  | Principales caractéristiques<br>et performances<br>(Modèle CS 45 k avec spreader) |      |
|--|---|------|
| <b>Reach stacker CS 45<br/>Avec spreader pour la<br/>manutention des conteneurs<br/>pleins</b> | <b>Poids total à vide</b>   | 74T  |
|  | <b>Poids total en charge</b>  | 119T |
|  | <b>Capacité de levage</b>   | 45 T |
|  | <b>Poids total en charge sur pont de<br/>traction (avant)</b>                     | 85 T |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
|  | <b>Poids total en charge sur pont de direction (arrière)</b> | 34 T      |
|   | <b>Ascension rampe à vide</b>                                | 30 %      |
|   | <b>Ascension rampe à charge</b>                              | 24 %      |
|   | <b>Nombre de roues à l'avant</b>                             | 4         |
|   | <b>Nombre de roues à l'arrière</b>                           | 2         |
|   | <b>Pression de gonflage des pneus</b>                        | 10 bars   |
|   | <b>Hauteur de gerbage des conteneurs</b>                     | 3-niveaux |

- **Effort d'amarrage**

L'effort d'amarrage à prendre en considération pour ce quai est de traction de 150 T chaque 20 m.

- **Pression des terres**

La pression des terres provient des matériaux derrière les caissons et parmi le TVC de (0-500kg) et le remblai hydraulique.

## IV.6 Calcul des efforts

### IV.6.1 Poussée des terres

Le calcul des coefficients de poussées sera établi par la méthode de MONONOBÉ-OKABÉ avec les hypothèses suivantes :

- La surface de rupture est plane
- Le rideau se déplace suffisamment pour que l'équilibre limite soit atteint
- Les points du prisme de rupture sont soumis à la même accélération

$$P_1 = S (g_i h_i) K_a$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda - \theta)}{\cos\theta \cos^2\lambda \cos(\delta + \lambda + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \lambda + \theta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]^2}$$

Dont :  $h_i$ —La hauteur de la couche de sol et son poids volumique  $\gamma_i$  ;

$K_a$  - Coefficient de poussée ;

$\varphi$  - Angle de frottement interne ;

$\delta$  - Angle du frottement du sol sur l'écran (frottement mur sol ou sol-sol)

## Stabilité externe du quai

Pour un frottement sol-mur :  $\delta = 2\varphi/3$

Pour un frottement sol-sol :  $\delta = \varphi$

$\lambda$  - Angle de l'inclinaison de l'écran avec la verticale ;

$\beta$  - Angle du terre-plein avec l'horizontale.

$$\theta = \text{Arctg} \left( \frac{K_H}{1 \pm K_V} \right)$$

La pression exercée par les terres sur un écran est donnée par la formule :  $P_1 = S (g_i h_i) K_a$

$h_i$  - Hauteur de la couche des terres et  $g_i$  son poids volumique

$K_a$  - Coefficient de poussée

La poussée des terres est l'aire du diagramme des contraintes qui en résulte.

(1) Les paramètres du calcul—Coefficient  $K_a$

① CAS STATIQUE :

Frottement Sol/sol :  $\varphi = 37^\circ$  ;  $\delta = 37^\circ$  ;  $\beta = \lambda = \theta = 0$

② CAS DYNAMIQUE :

Séisme ascendant :  $\theta = \text{Arctg} ( 0,25 / ( 1 - 0,075 ) ) = 15,12^\circ$

Frottement Sol/sol :  $\varphi = 37^\circ$  ;  $\delta = 37^\circ$  ;  $\beta = \lambda = 0$  ;  $\theta = 15,12^\circ$

Séisme descendant :  $\theta = \text{Arctg} ( 0,25 / ( 1 + 0,075 ) ) = 13,09^\circ$

Frottement Sol/sol :  $\varphi = 37^\circ$  ;  $\delta = 37^\circ$  ;  $\beta = \lambda = 0$  ;  $\theta = 13,09^\circ$

**Tableau IV.8 - Récapitulatif des coefficients de poussées**

| État de calcul             | Coefficient de la poussée des terres $K_a$ (Paroi vertical) |
|----------------------------|---|
| État statique              | 0,233   |
| État sismique (Ascendant)  | 0,467   |
| État sismique (Descendant) | 0,422   |

**Tableau IV.9 - Résultats du calcul de la poussée des terres.**

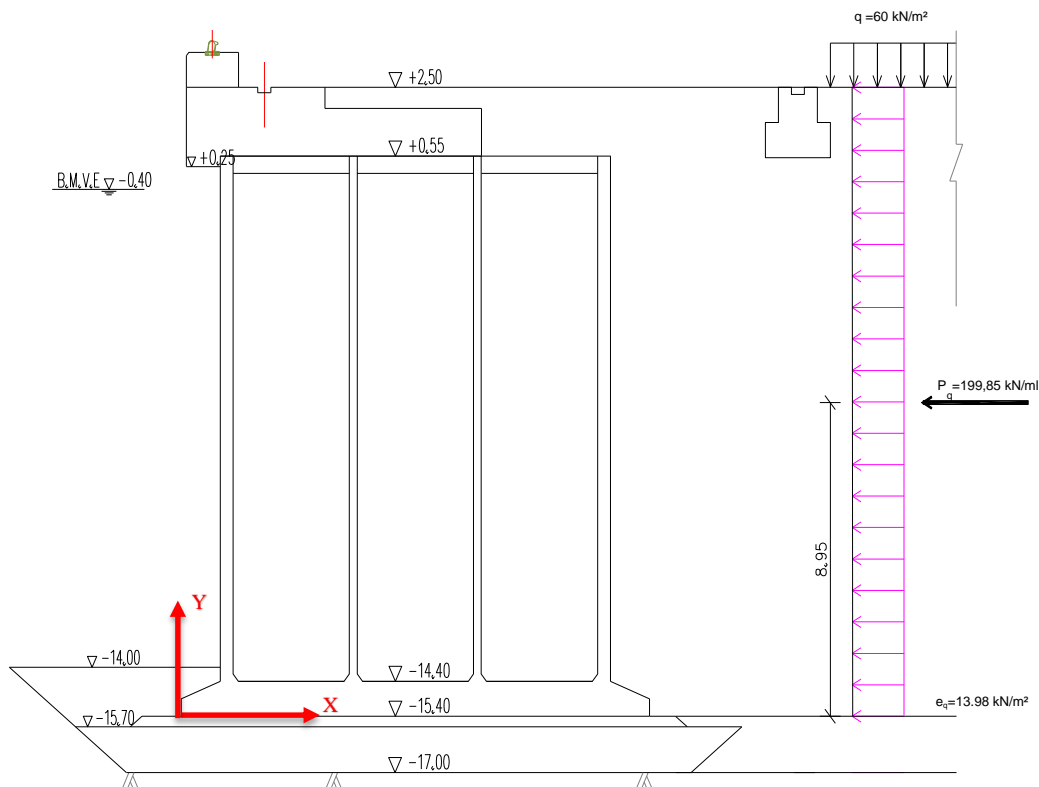
| Type   | Contenu  | Position de l'eau (ZH) |
|--|--|------------------------|
| Poussée des terres<br>Etat statique                    | Force horizontale émergée (KN/ml)                    | 14,08                  |
|  | Force horizontale immergée (KN/ml)                   | 375,98                 |
|  | Force verticale émergée (kN/ml)                      | 10,61                  |
|  | Force verticale immergée (kN/ml)                     | 283,32                 |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$<br>(kN·m/ml) | 2468,53                |
|  | Moment de la force verticale $M_{aV}$<br>(kN·m/ml)   | 5290,74                |
| Poussée des terres<br>en cas de séisme<br>(Ascendant)  | Force horizontale émergée (KN/ml)                    | 28,23                  |
|  | Force horizontale immergée (KN/ml)                   | 753,57                 |
|  | Force verticale émergée (kN/ml)                      | 21,27                  |
|  | Force verticale immergée (KN/ml)                     | 567,86                 |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$<br>(kN·m/ml) | 4 948,14               |
|  | Moment de la force verticale $M_{aV}$<br>(kN·m/ml)   | 10 604,34              |
| Poussée des terres<br>en cas de séisme<br>(Descendant) | Force horizontale émergée (KN/ml)                    | 25,51                  |
|  | Force horizontale immergée (KN/ml)                   | 680,98                 |
|  | Force verticale émergée (kN/ml)                      | 19,22                  |
|  | Force verticale immergée (KN/ml)                     | 513,16                 |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$<br>(kN·m/ml) | 4 471,48               |
|  | Moment de la force verticale $M_a$<br>(kN·m/ml)      | 9 582,84               |



**Tableau IV.10 - Résultats du calcul de la surcharge d'exploitation.**

| Type   | Contenu   | Position de l'eau |
|--|---|-------------------|
|  |   | ZH                |
| Surcharge d'exploitation                               | Force résultante horizontale $E_{aH}$ (kN/ml)     | 199,85            |
|  | Force verticale $E_{aV}$ (kN/ml)                  | 150,6             |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$ (kN·m/ml) | 1 788,66          |
|  | Moment de la force verticale $M_{aV}$ (kN·m/ml)   | 2 710,8           |
| Surcharge d'exploitation en cas de séisme (Ascendant)  | Force horizontale $E_{aH}$ (kN/ml)                | 400,56            |
|  | Force verticale $E_{aV}$ (kN/ml)                  | 301,84            |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$ (kN·m/ml) | 3 585,01          |
|  | Moment de la force verticale $M_{aV}$ (kN·m/ml)   | 5 433,12          |
| Surcharge d'exploitation en cas de séisme (Descendant) | Force horizontale $E_{aH}$ (kN/ml)                | 361,96            |
|  | Force verticale $E_{aV}$ (kN/ml)                  | 272,76            |
|  | Moment de la force horizontale $M_{aH}$ (kN·m/ml) | 3 230,60          |
|  | Moment de la force verticale $M_{aV}$ (kN·m/ml)   | 4 909,68          |

### Schéma de la surcharge d'exploitation :



#### IV.6.3 Poussées dues aux surcharges par la méthode de KREY

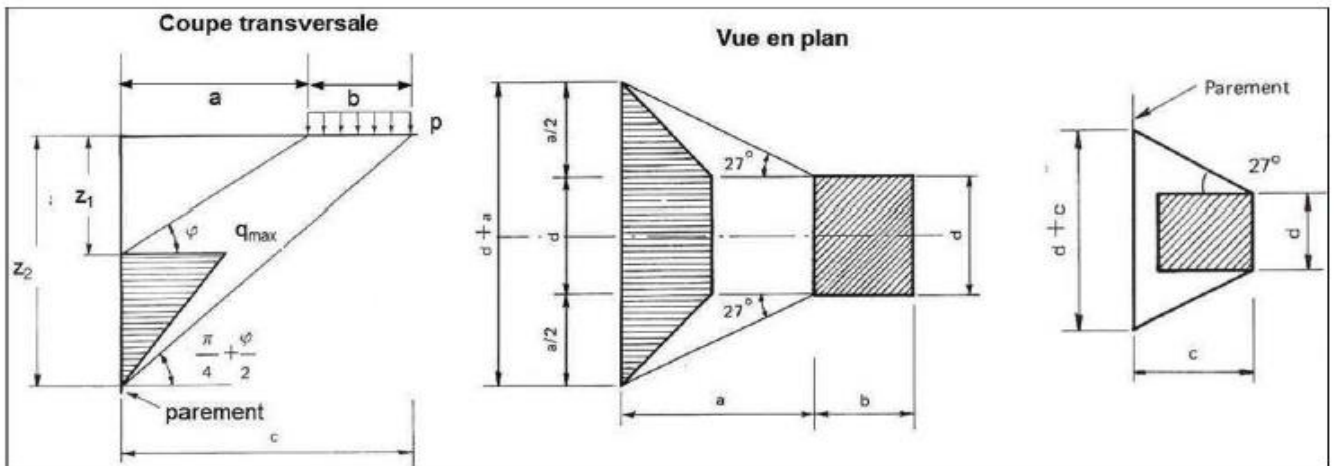
La méthode de KREY permet de déterminer le supplément de poussé exercé sur le parement par une charge uniforme locale (d'intensité  $p$  et de rectangle d'impact  $b \times d$ ) dont le bord le plus proche du parement est à une distance  $a$  de celui-ci.

La diffusion de la poussée se développe dans une zone délimitée par :

- Dans le sens vertical : deux plans passant par les bords parallèles au mur du rectangle d'impact ( $b \times d$ ) et inclinés de  $\varphi$  et de  $\pi/4 + \varphi/2$
- Dans le sens horizontal : deux plans passant par les angles du rectangle d'impact ( $b \times d$ ) les plus proches du parement, et correspondant à une diffusion suivant un angle de  $27^\circ$  environ (pente  $1/2$ ).

## Stabilité externe du quai

En considérant les deux épures, on trouve la surface de charge sur le parement :



Cette méthode est théorique et très approximative. Elle peut être utilisée tant que la charge ne s'approche pas trop près de l'écran ( $b$  petit devant  $a$ ). Dans le cas contraire il est conseillé pour la diffusion horizontale de faire passer les plans verticaux à  $27^\circ$  par l'arrière de la surface de charge. Cela revient à remplacer  $a$  par  $c = a + b$  dans la formule  $q_{\max}$ .

Dans le cas d'une charge ponctuelle on a la formule suivante :

$$(d+a) \cdot (z_2 - z_1), \text{ avec : } z_1 = a \cdot \tan \varphi \text{ et } z_2 = (a + b) \cdot \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\text{et } q_{\max} = \frac{4P}{(2d + a)(z_2 - z_1)} \quad \text{et } P = p \cdot b \cdot d \cdot \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

### Répartition des charges sur les appuis :

La répartition des charges dépend de la position de la flèche, on considère trois positions I, II, III qui définissent des répartitions des charges différentes sur les patins.

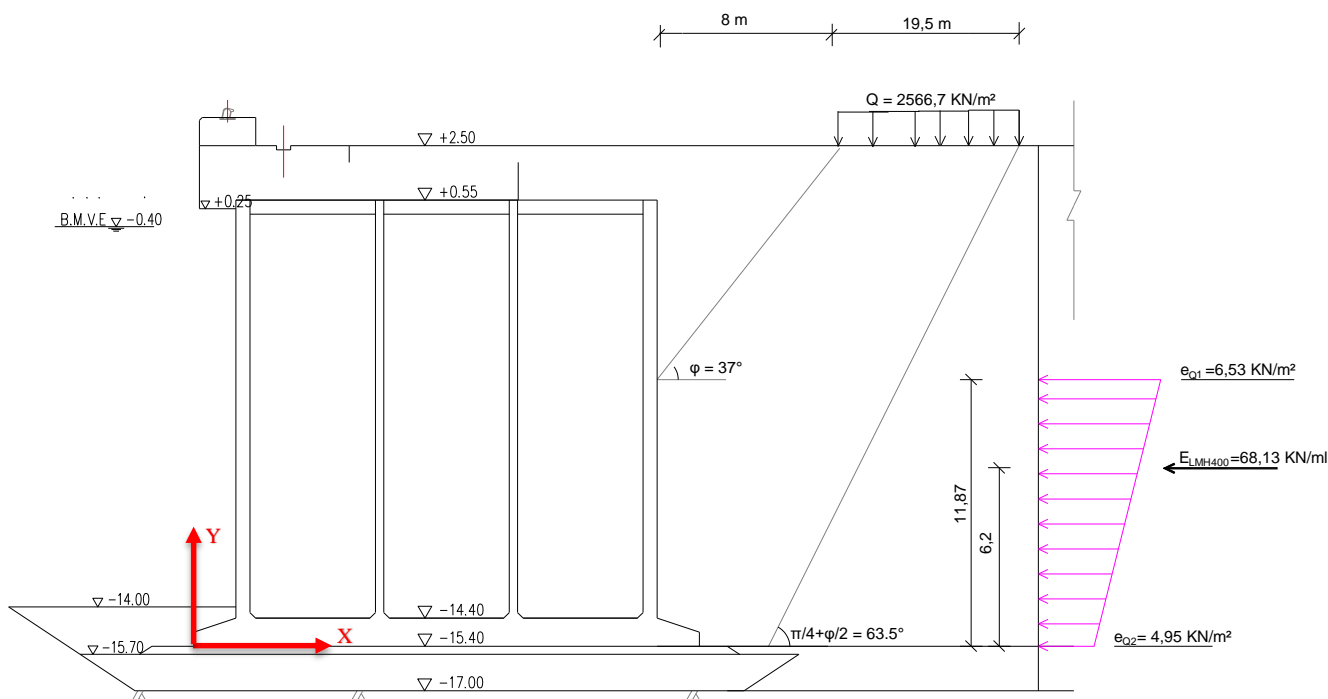
Tableau IV.11 – Tableau de répartition des charges

| SUPPORT<br>POS FLECHE | A               | B       | C      | D       |
|-----------------------|-----------------|---------|--------|---------|
| I                     | 197,6 t         | 49,4 t  | 49,4 t | 197,6 t |
| II                    | <b>259,35 t</b> | 98,8 t  | 98,8 t | 37,05 t |
| III                   | 197,6 t         | 197,6 t | 49,4 t | 49,4 t  |

Tableau IV.12 - Résultats de calcul de la force exercée par la Grue LHM 400

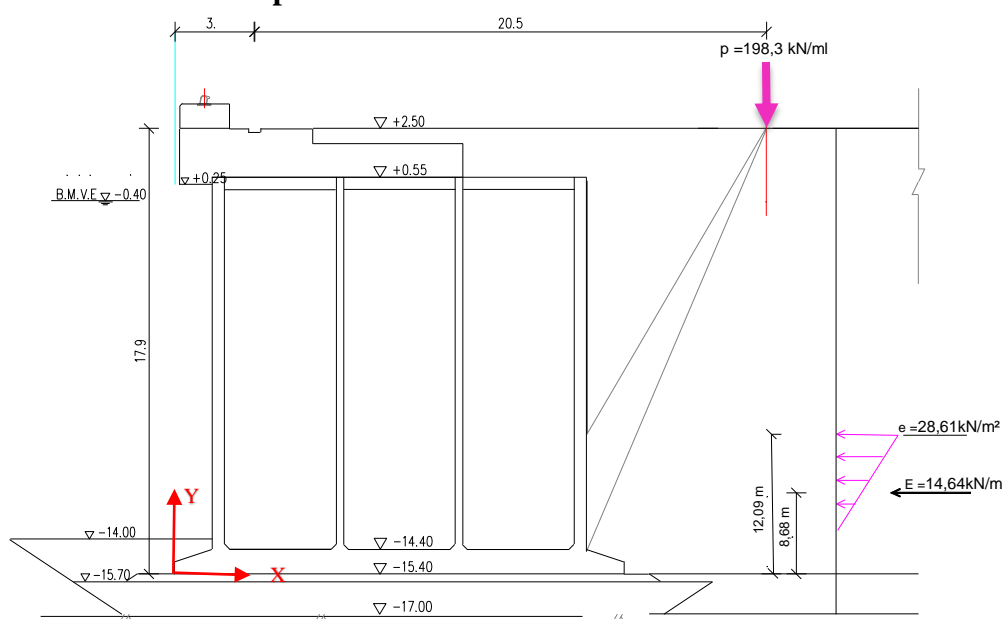
| Type       | Contenu   | Niveau d'eau |
|------------|---|--------------|
|            |   | ZH           |
| Force Grue | Force horizontale de la grue LHM 400<br>(KN/ml)   | 68,13        |
|            | Moment de la force horizontale<br>$M_Z$ (kN.m/ml) | 422,41       |

Schéma de la force exercée par la grue :



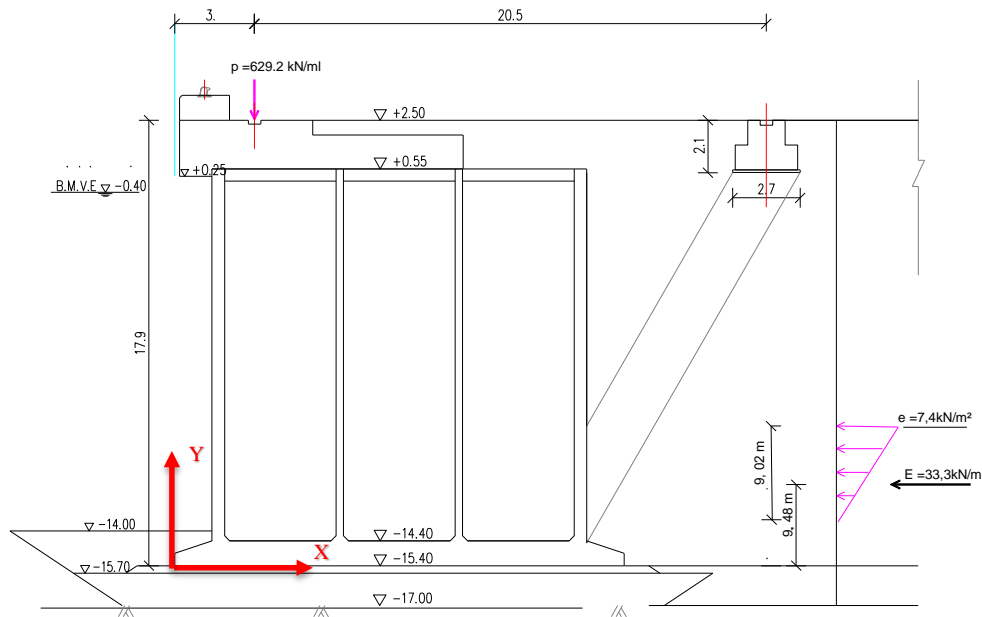
**Tableau IV.13 - Résultats de calcul de la force exercée par CS 45**

| Type                     | Contenu   | Niveau d'eau |
|--------------------------|---|--------------|
|                          |   | ZH           |
| Force Reachstacker CS 45 | Force horizontale de la Reach Stacker CS 45 (KN/ml) | 146,4        |
|                          | Moment de la force horizontale $M_z$ (kN.m/ml)      | 1 272,84     |

**Schéma de la force exercée par le reach stacker CS45**

**Tableau IV.14 - Résultats de calcul de la force exercée par le portique**

| Type                     | Contenu                      | Niveau d'eau (ZH)           |          |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------|
| Portique de déchargement | Grue a portique rail avant   | Force horizontale (KN/ml)   | 62,9     |
|                          |                              | Force verticale (KN/ml)     | 629,2    |
|                          |                              | Moment horizontal (KN.m/ml) | 1 125,91 |
|                          |                              | Moment vertical (KN.m/ml)   | 1 887,6  |
|                          | Grue a portique rail arrière | Force horizontale (KN/ml)   | 33,3     |
|                          |                              | Moment horizontal (KN.m/ml) | 292,04   |

## Schéma de la force exercée par le portique de déchargement :



### IV.6.4 Poussée due au marnage

La pression due au marnage est donnée par la formule suivante :  $\sigma = e \times \gamma_w$

e - Marnage est de 30 cm (e = 0.30 m)

h - Profondeur au pied du quai

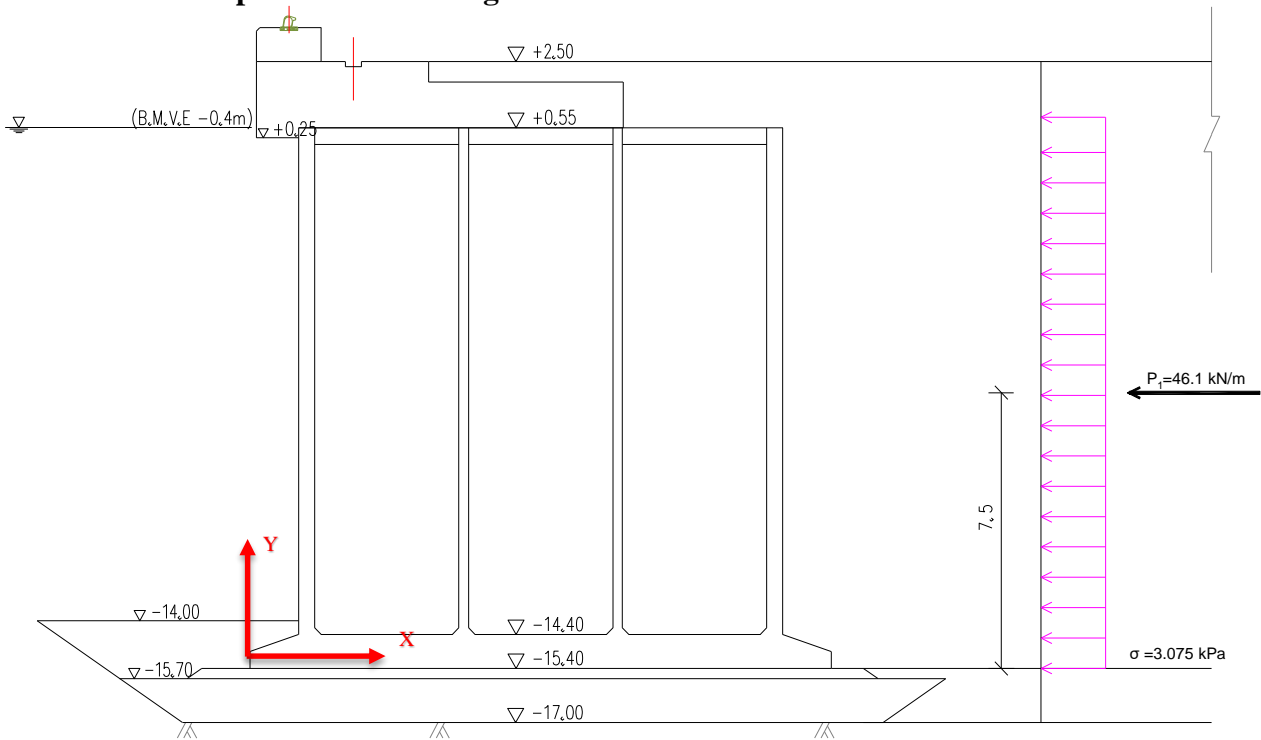
$\gamma_w$  : Densité de l'eau de mer ( $\gamma_w = 10,26 \text{ kN/m}^3$ )

D'où les poussées due au marnage :  $P1 = \sigma \times h \mid y_{g1} = \frac{h}{2}$

Tableau IV.16 - Résultat du calcul de la poussée due au marnage

| Type                   | Contenu                                      | Position de l'eau |
|------------------------|--|-------------------|
|                        |  | ZH                |
| Poussée due au marnage | $\sigma$ (kPa)                               | 3,075             |
|                        | P1 (kN/ml)                                   | 46,17             |
|                        | Moment combiné horizontal $M_{wH}$ (kN.m/ml) | 346,27            |

## Schéma de la poussée du marnage :



### IV.6.5 Poussée hydrodynamique

Elle est donnée par la formule suivante

$$P_h = 0,9917 K_h \gamma_w h^2$$

$K_h$  - Coefficient d'accélération sismique horizontale ( $K_h = 0.25g$ )

Poids volumique de l'eau de mer :  $\gamma_w = 10,26 \text{ kN/m}^3$

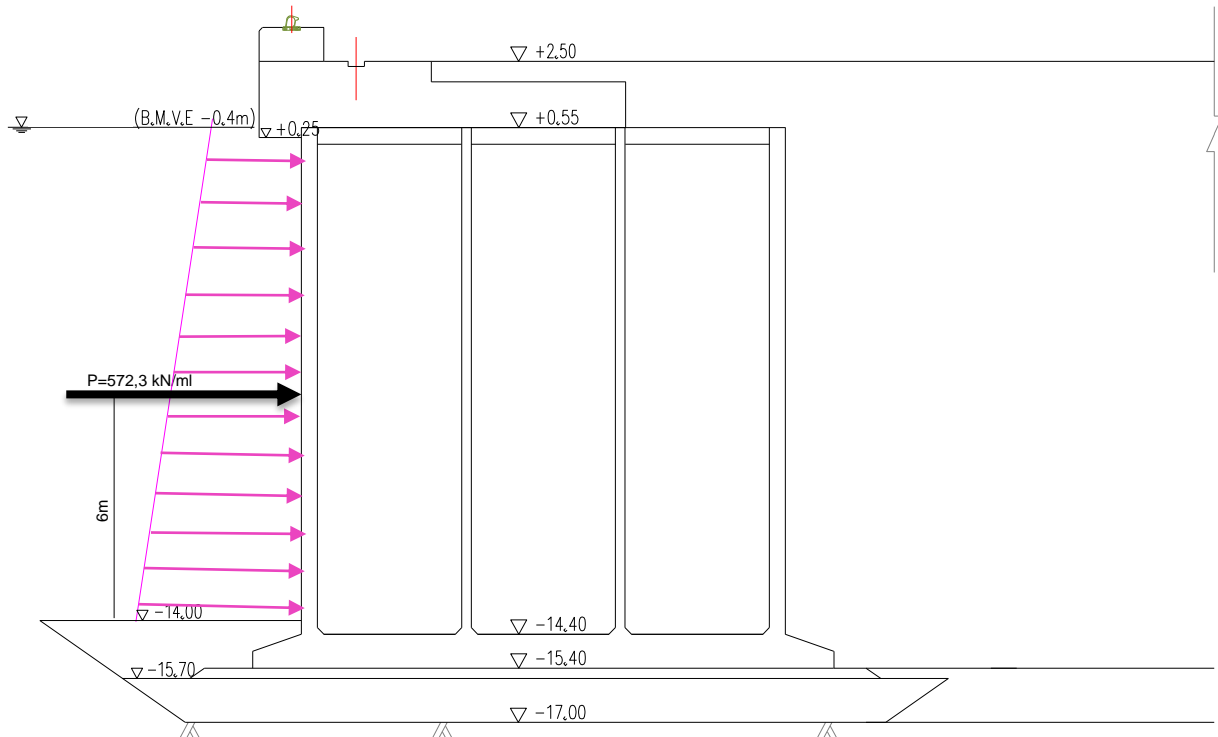
Le bras de levier de la poussée est  $Z = 0,40 h$  à partir du fond marin

$h$  - La profondeur au pied du quai

Tableau IV.17 - Résultats de calcul de force hydrodynamique sismique

| Type                          | Contenu  | Niveau d'eau |
|-------------------------------|--|--------------|
|                               |  | ZH           |
| Force hydrodynamique sismique | Force hydrodynamique sismique<br>$E_{wd}$ (KN/ml)                          | 572,3        |
|                               | Moment résultant de la poussée hydrodynamique séismique<br>$M_z$ (kN.m/ml) | 3433,8       |

### Schéma de la force hydrosynamique sismique :



#### IV.6.6 Sollicitation due à l'amarrage

L'effort d'amarrage est appliqué à +0.30 m au-dessus du niveau supérieur du quai (+2.50), le moment dû à l'effort d'amarrage est :  $M = F \times (h + 3.50 + 0.30)$ .

h - Profondeur en pied de quai

F - Effort d'amarrage

(1) Paramètres de calcul

La spécification du bollard de ce projet est de 1500 kN, disposées à 20 mètres d'intervalle, la force d'amarrage est de  $1500/20=75 \text{ kN/m}$ .

## (2) Résultats de calcul et schéma

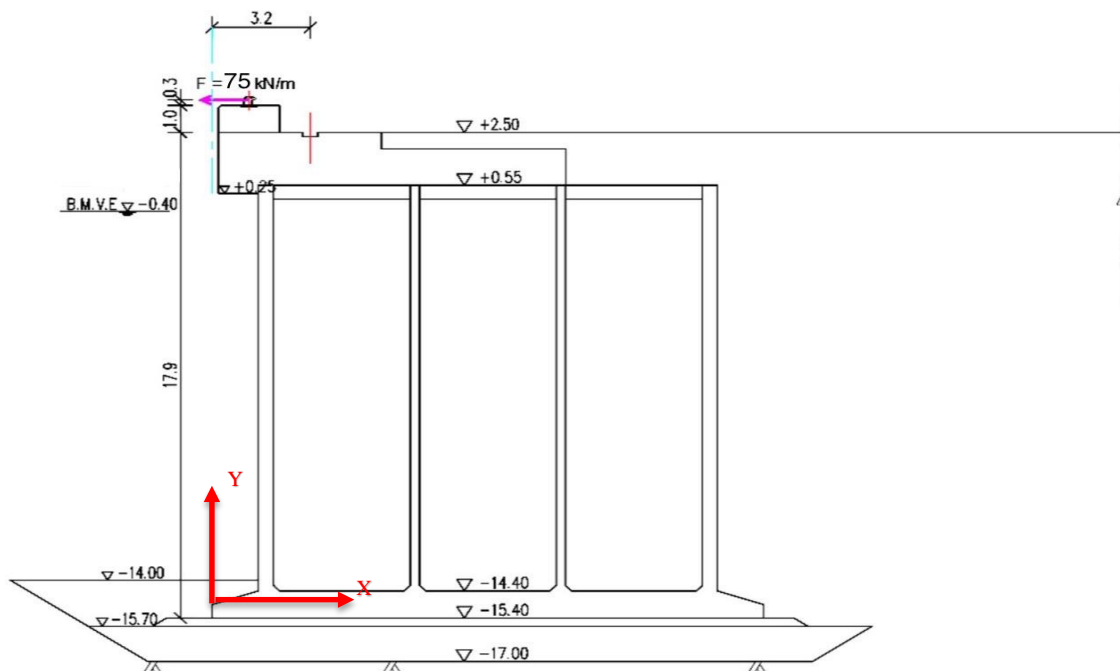


Tableau IV.18 - Résultats de calcul de la sollicitation due à l'amarrage

| Type                           | Contenu   | Niveau d'eau |
|--------------------------------|---|--------------|
|                                |   | ZH           |
| Sollicitation due à l'amarrage | Force d'amarrage (kN/ml)                                | 75           |
|                                | Moment résultant de la force d'amarrage $M_z$ (kN.m/ml) | 1410         |

### IV.6.7 Efforts dûs au séisme

Force horizontale due au séisme (SI):  $SI = K_h \times P$  ; Force verticale due au séisme:  $(1 \pm K_v) \times P$

P : Poids total du mur (y compris les terres dans les évidements et au-dessus des blocs)

**$K_h$**  : Accélération sismique horizontale ;  **$K_v$**  : Accélération sismique verticale.

+  $K_v$  : Séisme descendant ; -  $K_v$  : Séisme ascendant

Voir 3 "Situation sismique" pour le coefficient de séisme.

**Tableau IV.19 - Résultats de calcul de force d'inertie de séisme**

| Type                     | Contenu   |            | Niveau d'eau |
|--------------------------|---|------------|--------------|
|                          |   |            | ZH           |
| Force d'inertie sismique | Force d'inertie de séisme horizontale<br>$F_h$ (kN/ml)                  |            | 1 016,24     |
|                          | Force d'inertie de séisme verticale<br>$F_v$ (kN/ml)                    | Ascendant  | 3 760,1      |
|                          |   | Descendant | 4 369,85     |
|                          | Moment résultant d'inertie de séisme horizontal<br>$M-F_h$ (kN.m/ml)    |            | 9 613,63     |
|                          | Moment de la force d'inertie sismique verticale<br>$M-F_{v1}$ (kN.m/ml) | Ascendant  | 34 818,53    |
|                          |   | Descendant | 40 464,81    |

## IV.7 Combinaisons de charge

### IV.7.1 Cas statique

**Tableau IV.20 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas statique)**

|   |  | $F_H$<br>(kN/ml) | $F_V$<br>(kN/ml) | X(m)  | Y(m)  | $M_h=M_r=$<br>$F_H \times Y$<br>(kN·m/ml) | $M_v=M_s=$<br>$F_V \times X$<br>(kN·m/ml) |
|---|--|------------------|------------------|-------|-------|---|---|
| charge permanente   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| Poids propre structurel (y compris poids du caisson et remblai interne, dalle en béton, poutre de couronnement, etc.) |  |                  | 4064,98          | 9,26  |       |   | 37 641,71                                 |
| Poussée de terre  | État statique (émergé)                       | 14,08            | 10,61            | 18,00 | 15,97 | 2468,53                                   | 5290,74                                   |
|   | État statique (immergé)                      | 375,98           | 283,32           | 18,00 | 5,968 |   |   |
| Poussé de marnage   |  | 46,17            |                  |       | 7,5   | 346,27                                    |   |
| Charge supérieure   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| Q1  | Charge d'exploitation (60kN/m <sup>2</sup> ) | 199,85           | 150,6            | 18,00 | 8,95  | 1 788,66                                  | 2 710,8                                   |
| Q2  | Force d'amarrage (1500kN)                    | 75               |                  |       | 18,8  | 1 410,00                                  |   |
| Q3  | Grue LHM 400                                 | 68,13            |                  |       | 6,2   | 422,41                                    |   |
| Q4  | CS 45 reachstacker (avec épandeur)           | 146,4            |                  |       | 8,68  | 1 272,84                                  |   |
| Q5  | Grue à portique-rail avant                   | 62,9             | 629,2            | 3     | 17,9  | 1 125,91                                  | 1 887,6                                   |
|   | Grue à portique- rail arrière                | 33,3             |                  |       | 8,77  | 292,04                                    |   |
| <b>Combinaisons de charge</b>   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| ELU   | 1,15G+1,5(Q1+Q3)+1,4 Q2                      | 1008,63          | 5238,64          | —     | —     | 8527,625                                  | 53438,5175                                |
|   | 1,15G+1,5(Q1+Q4)+1,4 Q2                      | 1126,04          | 5238,65          | —     | —     | 9803,27                                   | 53438,5175                                |
|   | 1,15G+1,5(Q1+Q5)+1,4 Q2                      | 1050,74          | 6182,45          | —     | —     | 10055,9015                                | 56269,9175                                |
| ELS   | G+Q1+Q2+Q3                                   | 779,21           | 4509,51          | —     | —     | 6435,87                                   | 45 643,25                                 |
|   | G+Q1+Q2+Q4                                   | 857,48           | 4509,51          | —     | —     | 7286,3                                    | 45643,25                                  |
|   | G+Q1+Q2+Q5                                   | 807,28           | 5138,71          | —     | —     | 7431,41                                   | 47530,85                                  |

**IV.7.2 Cas dynamique ascendant**
**Tableau IV.21 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas dynamique ascendant)**

|  |  | $F_H$<br>(kN/ml) | $F_V$<br>(kN/ml) | X(m)  | Y(m)  | $M_H=M_r=$<br>$F_H \times Y$<br>(kN·m/ml) | $M_V=M_s=$<br>$F_V \times X$<br>(kN·m/ml) |
|--|--|------------------|------------------|-------|-------|---|---|
| <b>charge permanente</b>   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| <b>Poids propre structurel (y compris poids du caisson et remblai interne, dalle en béton, poutre de couronnement, etc.)</b> |  |                  | 4064,98          | 9,26  |       |   | 37 641,71                                 |
| Poussée de terre   | État sismique-ascendant (émergé)                         | 28,23            | 21,27            | 18,00 | 15,97 | 4948,14                                   | 10604,34                                  |
|  | État sismique-ascendant (immergé)                        | 753,57           | 567,86           | 18,00 | 5,968 |   |   |
| <b>Poussé de marnage</b>   |  | 46,17            |                  |       | 7,5   | 346,27                                    |   |
| <b>Charge supérieure</b>   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| <b>Q1</b>  | <b>Charge uniformément répartie (60kN/m<sup>2</sup>)</b> | 400,56           | 301,84           | 18,00 | 8,95  | 3 585,01                                  | 5 433,12                                  |
| <b>Q2</b>  | <b>Force d'amarrage (1500kN)</b>                         | 75               |                  |       | 18,8  | 1 410,00                                  |   |
| <b>Q3</b>  | <b>Grue LHM 400</b>                                      | 68,13            |                  |       | 6,2   | 422,41                                    |   |
| <b>Q4</b>  | <b>CS 45 reachstacker (avec épandeur)</b>                | 146,4            |                  |       | 8,68  | 1 272,84                                  |   |
| <b>Q5</b>  | <b>Grue à portique-rail avant</b>                        | 62,9             | 629,2            | 3     | 17,9  | 1 125,91                                  | 1 887,6                                   |
|  | <b>Grue à portique- rail arrière</b>                     | 33,3             |                  |       | 8,77  | 292,04                                    |   |
| <b>Charge sismique</b>   |  |                  |                  |       |       |   |   |
| <b>HS</b>  | <b>Force hydrodynamique séismique</b>                    | 572,3            |                  |       | 6     | 3 433,8                                   |   |
| <b>SI</b>  | <b>Force d'inertie sismique-ascendant</b>                | 1 016,24         | 3 760,1          | 9,26  | 9,46  | 9 613,63                                  | 34 818,53                                 |
| <b>Combinaisons de charge</b>  |  |                  |                  |       |       |   |   |
| <b>ELA</b>   | <b>G+Q1+SI (ascendant)</b>                               | 2 770,90         | 8 716,05         | -     | -     | 21 580,58                                 | 88 497,70                                 |

N.B : SI inclut la force hydrodynamique sismique.

### IV.7.3 Cas dynamique descendant :

**Tableau IV.22 – Récapitulatif des charges et combinaisons de charge (cas dynamique descendant)**

|   |   | $F_H$<br>(kN/ml) | $F_V$<br>(kN/ml) | X(m)  | Y(m)  | $M_h=M_r=$<br>$F_H \times Y$<br>(kN·m/ml) | $M_v=M_s=$<br>$F_V \times X$<br>(kN·m/ml) |
|---|---|------------------|------------------|-------|-------|---|---|
| <b>charge permanente</b>  |   |                  |                  |       |       |   |   |
| Poids propre structurel (y compris poids du caisson et remblai interne, dalle en béton, poutre de couronnement, etc.) |   |                  | 4 064,98         | 9,26  |       |   | 37 641,71                                 |
| Poussée de terre  | État sismique-descendant (émergé)                   | 25,51            | 19,22            | 18,00 | 15,97 | 4 471,48                                  | 9 582,84                                  |
|   | État sismique-descendant (immergé)                  | 680,98           | 513,16           | 18,00 | 5,968 |   |   |
| Poussé de marnage   |   | 46,17            |                  |       | 7,5   | 346,27                                    |   |
| <b>Charge supérieure</b>  |   |                  |                  |       |       |   |   |
| Q1  | Charge uniformément répartie (60kN/m <sup>2</sup> ) | 361,96           | 272,76           | 18,00 | 8,95  | 3 230,60                                  | 4 909,68                                  |
| Q2  | Force d'amarrage (1500kN)                           | 75               |                  |       | 18,8  | 1 410,00                                  |   |
| Q3  | Grue LHM 400  | 68,13            |                  |       | 6,2   | 422,41                                    |   |
| Q4  | CS 45 reachstacker (avec épandeur)                  | 146,4            |                  |       | 8,68  | 1 272,84                                  |   |
| Q5  | Grue à portique-rail avant                          | 62,9             | 629,2            | 3     | 17,9  | 1 125,91                                  | 1 887,6                                   |
|   | Grue à portique- rail arrière                       | 33,3             |                  |       | 8,77  | 292,04                                    |   |
| <b>Charge sismique</b>  |   |                  |                  |       |       |   |   |
| HS  | Force hydrodynamique séismique                      | 572,3            |                  |       | 6     | 3 433,8                                   |   |
| SI  | Force d'inertie-descendant                          | 1 016,24         | 4 369,85         | 9,26  | 9,46  | 9 613,63                                  | 40 464,81                                 |
| <b>Combinaisons de charge</b>   |   |                  |                  |       |       |   |   |

## IV.8 Stabilité contre le glissement et le renversement

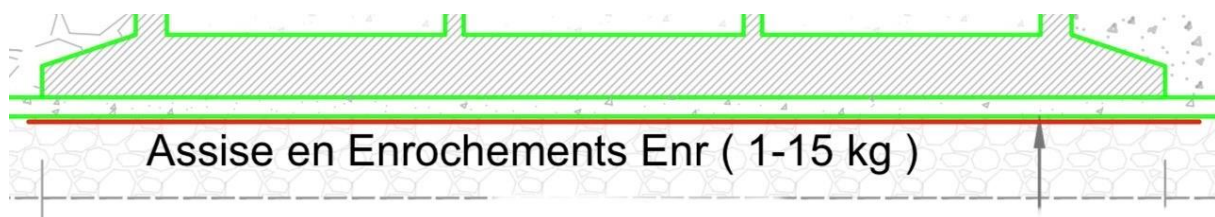
Tableau IV.23 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du glissement et du renversement

| Les combinaisons |                         | $Fg = \frac{Fv}{Fh} \times \tan\phi$ | Coeff. de sécurité | $Fr = \frac{Ms}{Mr}$ | Coeff. de sécurité |
|------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| ELU              | 1,15G+1,5(Q1+Q3) +1,4Q2 | 3,95                                 | ≥1,2               | 6,27                 | ≥1,5               |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q4) +1,4Q2 | 3,54                                 | ≥1,2               | 5,45                 | ≥1,5               |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q5) +1,4Q2 | 4,47                                 | ≥1,2               | 5,60                 | ≥1,5               |
| ELS              | G+Q1+Q2+Q3              | 7,09                                 | ≥1,2               | 4,39                 | ≥1,5               |
|                  | G+Q1+Q2+Q4              | 6,26                                 | ≥1,2               | 3,99                 | ≥1,5               |
|                  | G+Q1+Q2+Q5              | 6,39                                 | ≥1,2               | 4,83                 | ≥1,5               |
| ELA              | G+Q1+SI (ascendant)     | 2,39                                 | ≥1,1               | 4,10                 | ≥1,1               |
|                  | G+Q1+SI (descendant)    | 2,64                                 | ≥1,1               | 4,46                 | ≥1,1               |

## IV.9 Stabilité vis-à-vis au poinçonnement

Il faut s'assurer que la contrainte verticale imposée par le caisson ( $Q_{ref}$ ) est inférieure à la contrainte limite supportée par l'assise en enrochement ou par le sol ( $Q_{lim}$ ). Dans notre cas, on vérifiera la stabilité vis-à-vis du poinçonnement à deux niveaux différents, à savoir au niveau de l'enrochement et au niveau du sol support.

### IV.9.1 Au niveau de l'enrochement



## La vérification se fait à ce niveau

C'est une fondation superficielle rectangulaire  $18 \times 15 \text{ m}^2$  posée sur de ballaste afin de régler le niveau des enrochements, qui est soumise à une force excentrée inclinée. Il n'y a aucun ancrage à considérer, or  $q=0$ . Les données relatives à l'enrochement sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.24 – Caractéristiques géotechniques des enrochements

| $\gamma'$            | $\phi$ | $Q_{adm}$             | C |
|----------------------|--------|-----------------------|---|
| 11 kN/m <sup>2</sup> | 37°    | 600 kN/m <sup>2</sup> | 0 |

Correction de l'inclinaison de la charge verticale :  $Q'_{lim} = Q_{lim} \times e^{-\delta}$  où :  $\delta = \arctan\left(\frac{Qh}{Qv}\right)$

Pour la détermination de la contrainte de verticale imposée par le caisson, nous utilisons la méthode Meyrhoft schématisée ci-dessous (fig. IV.3) :

$$q_{ref} = \frac{V}{B'} \text{ avec : } B' = B - 2E \text{ où : } E = \frac{B}{2} - \frac{Ms - Mr}{V}$$

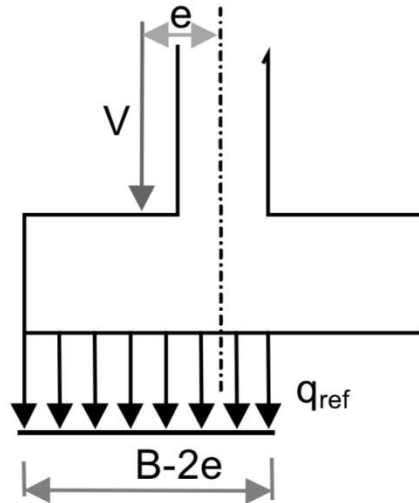


Figure IV.3 - Distribution des contraintes

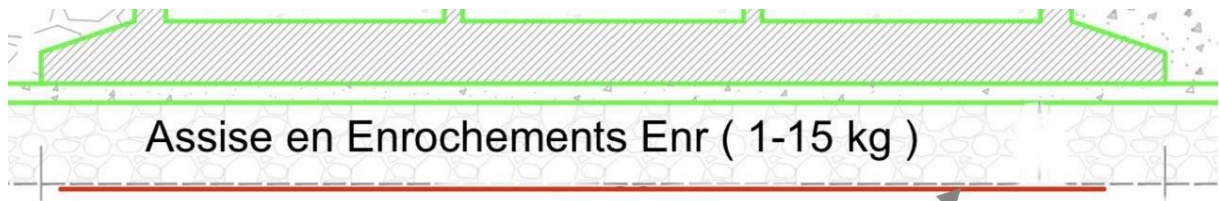
Les détails de calculs sont présentés dans l'annexe C

Les résultats sont prescrits dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.25 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du poinçonnement au niveau de l'enrochement.

| Les combinaisons |                          | $Q'_{lim}$<br>(kPa) | $q_{ref}$<br>(Meyrhoft)<br>(kPa) | Vérification |
|------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------|
| ELU              | $1,15G+1,5(Q1+Q3)+1,4Q2$ | 496,07              | 370,33                           | Vérifiée     |
|                  | $1,15G+1,5(Q1+Q4)+1,4Q2$ | 485,51              | 383,53                           | Vérifiée     |
|                  | $1,15G+1,5(Q1+Q5)+1,4Q2$ | 507,04              | 417,36                           | Vérifiée     |
| ELS              | $G+Q1+Q2+Q3$             | 505,64              | 313,41                           | Vérifiée     |
|                  | $G+Q1+Q2+Q4$             | 497,22              | 321,84                           | Vérifiée     |
|                  | $G+Q1+Q2+Q5$             | 513,43              | 407,91                           | Vérifiée     |
| ELA              | $G+Q1+SI$ (ascendant)    | 441,04              | 412,10                           | Vérifiée     |
|                  | $G+Q1+SI$ (descendant)   | 453,47              | 420,40                           | Vérifiée     |

IV.9.2 Au niveau du sol de fondation :



Assise en Enrochements Enr ( 1-15 kg )

(Poinçonnement)

La vérification se fait à ce niveau

A ce niveau la capacité portante est déterminée par la formule suivante extraire de l'EC7

$$q_u = c' N_c s_c i_c + q'^{N_q} s_q i_q + 0.5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

Tel que :  $C' = \frac{2}{3} C$  et  $\varphi' = \frac{2}{3} \varphi$

Avec les valeurs suivantes de calcul pour les coefficients :

- Capacité portante :

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi'$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi'$$

- Forme de fondation :

$$s_q = 1 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \sin \varphi'$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \left( \frac{B'}{L'} \right)$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$$

- Inclinaison de la charge :

$$i_q = i_\gamma = 1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \varphi'}$$

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$$

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques du sol de fondation :

Tableau IV.26 – Caractéristiques du sol de fondation.

| $\gamma'$            | $\Phi$ | C                    | $N_\gamma$ | $N_q$ | $N_c$ | $s_q$ | $s_\gamma$ | $s_c$ |
|----------------------|--------|----------------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|
| 11 kN/m <sup>2</sup> | 37°    | 30 kN/m <sup>2</sup> | 8,54       | 10,3  | 20,24 | 1,34  | 0,75       | 1,37  |

Les détails des résultats sont inscrits dans l'annexe C.

Les vérifications sont prescrites sur le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.25 – Vérification de la stabilité vis-à-vis du poinçonnement au niveau du sol de fondation.**

| Les combinaisons |                               | $q_u$<br>(kPa) | $q_{ref}$<br>(Meyrhoff)<br>(kPa) | $F_p = \frac{q_u}{q_{ref}}$ | Coefficient<br>de sécurité |
|------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| ELU              | <b>1,15G+1,5(Q1+Q3)+1,4Q2</b> | 820,93         | 370,33                           | 2,22                        | $\geq 1,5$                 |
|                  | <b>1,15G+1,5(Q1+Q4)+1,4Q2</b> | 782,19         | 383,53                           | 2,03                        | $\geq 1,5$                 |
|                  | <b>1,15G+1,5(Q1+Q5)+1,4Q2</b> | 791,07         | 517,36                           | 1,53                        | $\geq 1,5$                 |
| ELS              | <b>G+Q1+Q2+Q3</b>             | 848,11         | 313,41                           | 2,7                         | $\geq 1,5$                 |
|                  | <b>G+Q1+Q2+Q4</b>             | 817,38         | 321,84                           | 2,54                        | $\geq 1,5$                 |
|                  | <b>G+Q1+Q2+Q5</b>             | 821,19         | 407,91                           | 2,01                        | $\geq 1,5$                 |
| ELA              | <b>G+Q1+SI (ascendant)</b>    | 744,05         | 467,64                           | 1,59                        | $\geq 1,5$                 |
|                  | <b>G+Q1+SI (descendant)</b>   | 782,23         | 494,14                           | 1,57                        | $\geq 1,5$                 |

### IV.10 Conclusion

Après avoir calculé les efforts, nous avons vérifié la stabilité externe du quai, entre-autre, la stabilité vis-à-vis du glissement et du renversement ainsi que le poinçonnement, cette étape s'avère cruciale pour la sécurité et la durabilité de l'ouvrage et cela en vérifiant à des facteurs de sécurité préétabli par des normes de calcul. Ces efforts externes engendrent des forces internes qui ne se stabilisent qu'avec le ferrailage de la structure, qui va se présenter dans le chapitre suivant.

## **Chapitre V**

### **Calcul du ferrailage**

---

## Chapitre V – Calcul du ferrailage

Les sollicitations précédemment calculées pour la stabilité externe du quai génèrent des efforts internes. Pour stabiliser ces efforts, il est nécessaire de renforcer la structure de caisson avec des armatures. De ce fait, nous allons dimensionner les sections d'acier de ces éléments conformément aux règles du BAEL 91 rév. 99.

### V.1 Sollicitations et combinaisons d'actions

#### V.1.1 Poussée des terres

Force par unité de surface exercée par terre-plein sur les parois des caissons, répartie triangulairement et définie par la formule :  $P = \Sigma \gamma_i \times h_i \times K_{ai}$  tel que :  $P$  – poussée des terres ;  $\gamma_i$  – poids volumique du remblai ( $18 \text{ kN/m}^3$ ) ;  $h_i$  – hauteur du remblai (sol) ;  $K_{ai}$  – coefficient de poussée.

##### V.1.1.1 La poussée de terres extérieures sur la paroi du caisson :

- Cas statique :  $P_{ex1} = 18 \times 15,95 \times 0,233 = 66,89 \text{ kN/m}^2$
- Cas dynamique :  $H_{ex\ ass} = 781,8 \text{ kN} \mid V_{ex\ ass} = 589,13 \text{ kN}$  (Résultante)  
 $H_{ex\ desc} = 706,49 \text{ kN} \mid H_{ex\ desc} = 532,38 \text{ kN}$  (Résultante)

##### V.1.1.2 La poussée du remplissage sur les parois internes du caisson :

- Cas statique :  $P_{rem1} = 18 \times 14,95 \times 0,233 = 62,7 \text{ kN/m}^2$
- Cas dynamique :  $P_{h\ rem\ ass} = 853,9 \text{ kN} \mid P_{v\ rem\ ass} = 643,46 \text{ kN}$   
 $P_{h\ rem\ desc} = 771,62 \text{ kN} \mid P_{v\ rem\ ass} = 581,45 \text{ kN}$

#### V.1.2 Pression de l'eau

- Cas statique : c'est la pression hydrostatique, agit de manière uniforme sur la paroi externe du caisson du côté mer, et se calcule ainsi :  $P_{hs} = \gamma_e \times h$   
tel que :  $\gamma_e$  – poids volumique de l'eau de mer ( $10,26 \text{ kN/m}^3$ ) ;  $h$  – hauteur d'eau  
 $P_{hs} = 10,26 \times 15 = 153,9 \text{ kN/m}^2$
- Cas dynamique : c'est la pression hydrodynamique, sous une forme semi-parabolique sur la paroi externe du caisson (côté mer), calculée dans le chapitre précédent (IV.6.5) pour  $1\text{m}^2$  de surface nous aurons :  $P_{hd} = \frac{527,3}{15} = 38,15 \text{ kN/m}^2$

#### V.1.3 Poids des terres : c'est une charge surfacique uniforme, agissant sur le radier ainsi que sur une partie des dalles au-dessus du caisson.

- Sur le radier :  $\frac{29106,64}{15,95 \times 15} = 121,65 \text{ kN/m}^2$
- Sur les dalles :  $1,15 \times 18 = 20,7 \text{ kN/m}^2$

#### V.1.4 Charges d'exploitation

Calculées dans le chapitre précédent, et sont, la surcharge uniforme, la grue, le portique ainsi que le reachstacker.

#### V.1.5 L'accélération du séisme

C'est la force d'inertie sismique, dont nous tenons en compte lors la modélisation du caisson avec le logiciel AUTODESK Structural Analysis 2025. Le spectre est donné par le RPA 99 rév. 2003, en spécifiant la zone (II.a), la catégorie d'ouvrage (1A), le site rocheux (S1),

l'amortissement qui est de 10%, le coefficient de comportement qui est de 4 car nous avons un contreventement par des voiles.

La masse sismique participante est :  $G + 0.2 Q$

Les combinaisons de l'ELU et l'ELS considérées dans le calcul de stabilité (IV.8) sont également à considérer.

Les combinaisons accidentelles considérés sont :  $G + Q + E$  et  $0,8 G \pm E$

l'action sismique à considérer est extraite du RPOA 2008 :

$$E = E_x \pm 0,3E_y \pm 0,3E_z / E = E_y \pm 0,3E_x \pm 0,3E_z / E = E_z \pm 0,3E_x \pm 0,3E_y$$

## V.2 Modèle Robot et analyse modale

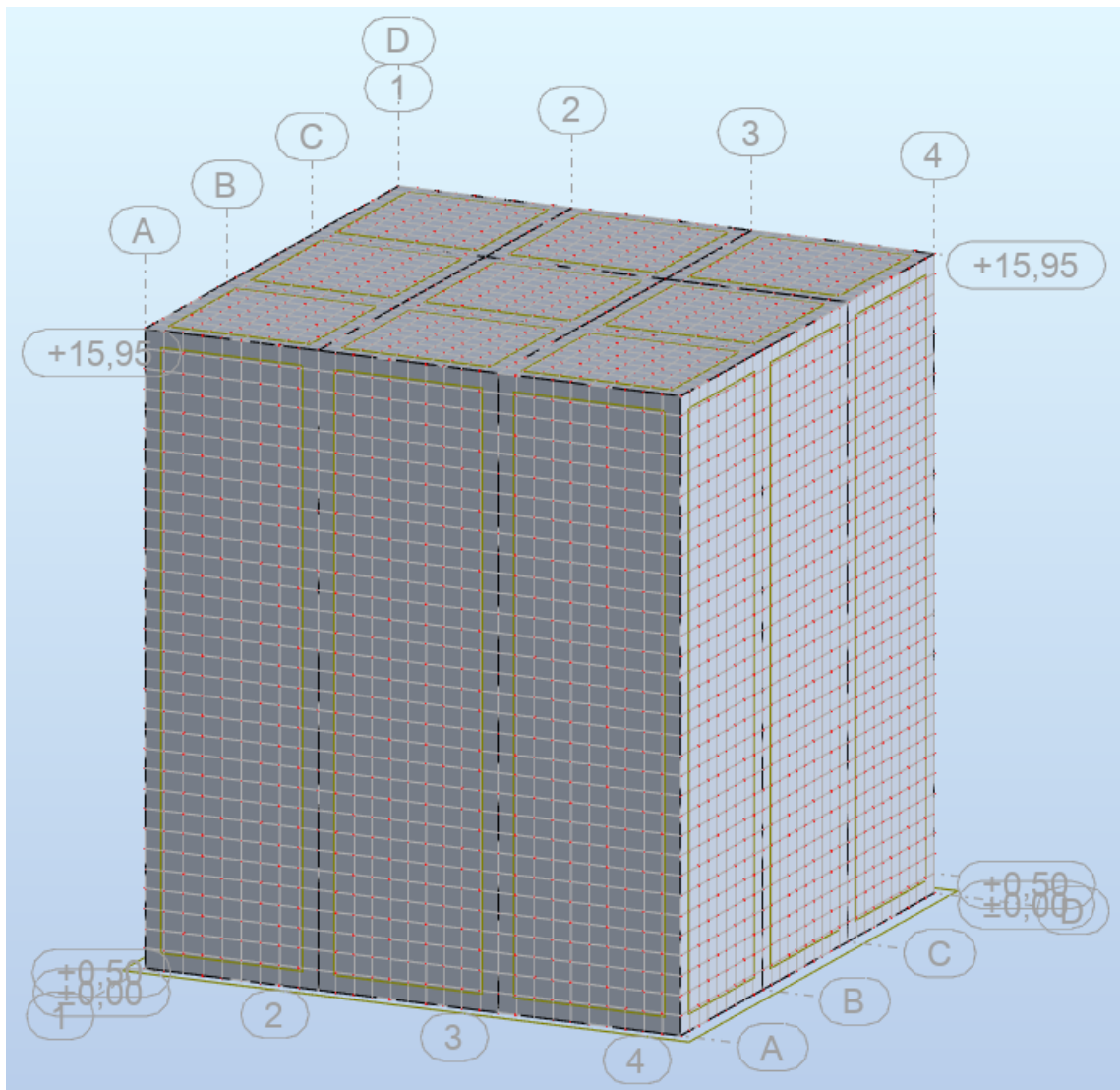


Figure V.1 – Modèle 3D du caisson modélisé par le logiciel Robot Structural Analysis

L'analyse modale a été réalisée sur la structure de caisson en utilisant le logiciel Robot. L'objectif de cette analyse est de déterminer les fréquences naturelles, les périodes correspondantes, et les masses modales et cumulées dans les trois directions (UX, UY, UZ) pour les dix premiers modes. Cette information est cruciale pour comprendre le comportement dynamique de la structure.

| Cas/Mode | Fréquence [Hz] | Période [sec] | Masses Cumulées UX [%] | Masses Cumulées UY [%] | Masses Cumulées UZ [%] | Masse Modale UX [%] | Masse Modale UY [%] | Masse Modale UZ [%] | Tot.mas.UX [kg] | Tot.mas.UY [kg] | Tot.mas.UZ [kg] |
|----------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 14/ 1    | 0,04           | 22,32         | 63,54                  | 36,46                  | 0,00                   | 63,54               | 36,46               | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 2    | 0,04           | 22,32         | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 36,46               | 63,54               | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 3    | 0,07           | 14,65         | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 4    | 6,02           | 0,17          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 5    | 6,04           | 0,17          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 6    | 6,26           | 0,16          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 7    | 6,27           | 0,16          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 8    | 8,14           | 0,12          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 9    | 8,15           | 0,12          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |
| 14/ 10   | 9,49           | 0,11          | 100,00                 | 100,00                 | 0,00                   | 0,00                | 0,00                | 0,00                | 2562478,44      | 2562478,44      | 2562478,44      |

Figure V.2 – Tableau de l'analyse modale

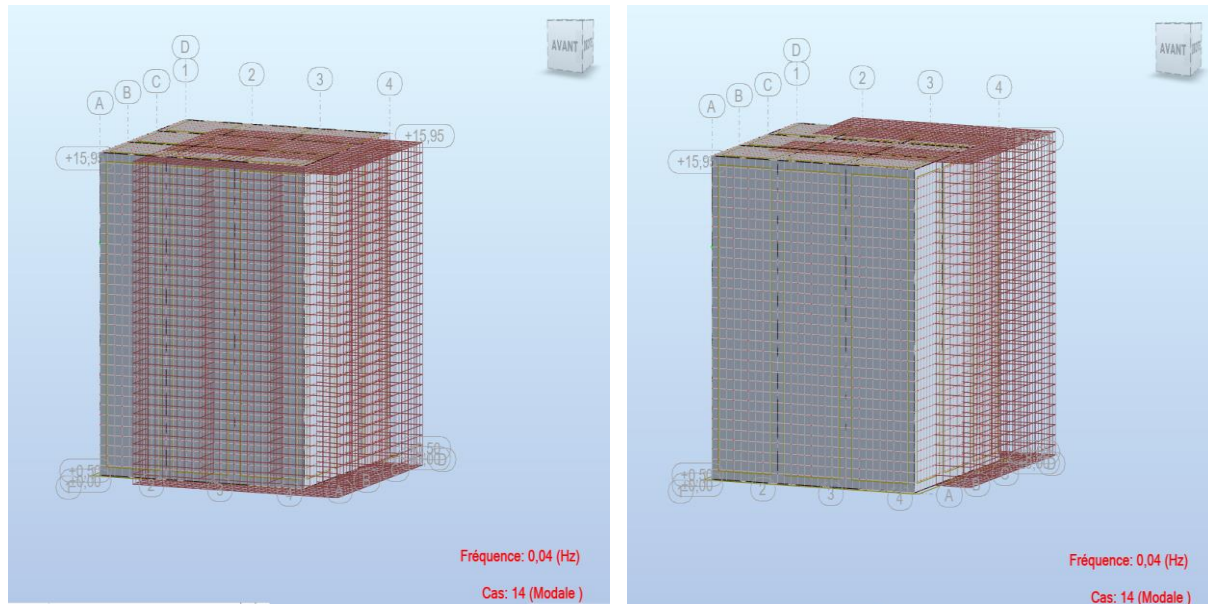


Figure V.3 – Schémas des modes 1 et 2 (depuis Robot)

L'analyse modale indique que la structure de caisson pour les quais est principalement sensible aux mouvements horizontaux, avec une mobilisation de 100% de la masse cumulée dès le deuxième mode. Cette information est essentielle pour la conception de mesures de contrôle des vibrations et pour garantir la stabilité et la sécurité de la structure sous des charges dynamiques.

### V.3 Ferrailage des parois extérieures du caisson

Les parois du caisson ont une forme rectangulaire de 14,95x15 m<sup>2</sup> et une épaisseur de 50 cm.

Du logiciel AUTODESK Robot Structural Analysis, après modélisation de la structure et intégration des charges, on retire les sollicitations ultimes inscrites dans le tableau ci-dessous :

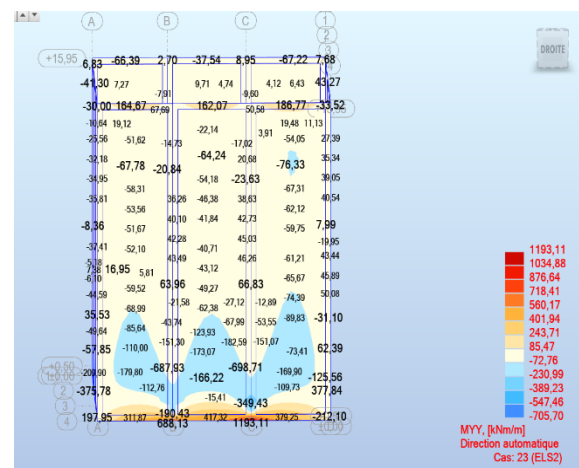
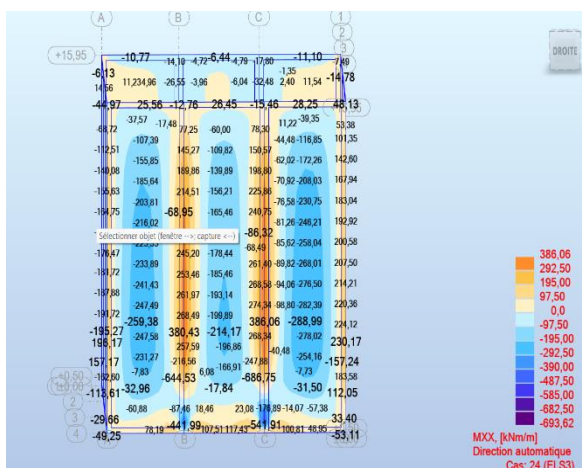
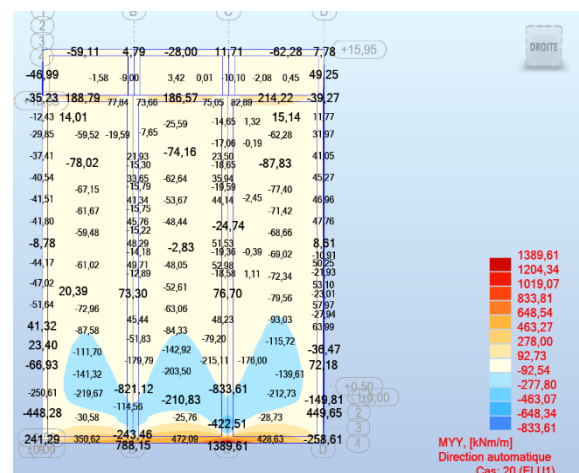
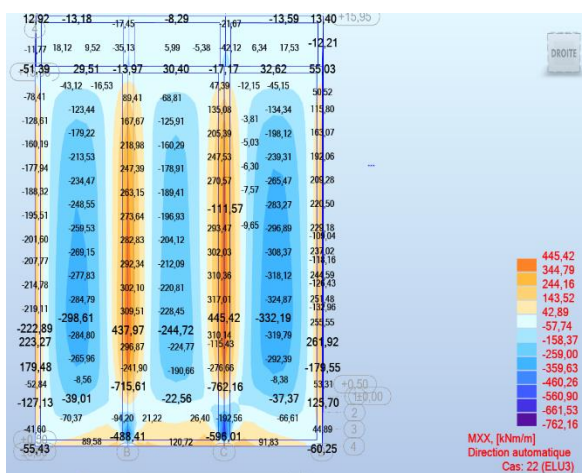
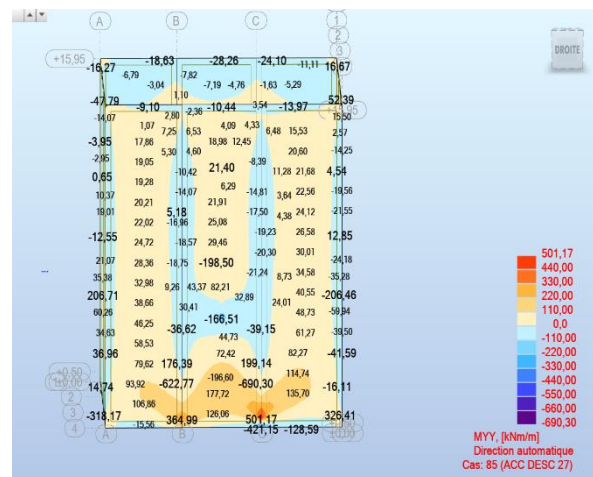
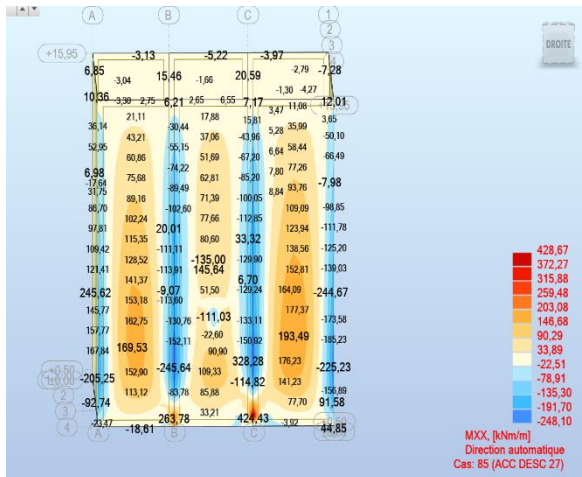
Tableau V.1 – Sollicitations maximums au niveau des voiles extérieurs.

| Combinaisons d'actions | Moment maximum (kN.m/ml) |        |
|------------------------|--------------------------|--------|
|                        | MX                       | MY     |
| ELU                    | 322,19                   | 278,00 |
| ELS                    | 288,99                   | 243,71 |
| ELA                    | 193,49                   | 177,72 |

Nous remarquons que la différence entre les moments selon X et selon Y n'est pas si considérable que ça, d'où nous adoptons le même ferrailage dans les deux sens.

Les figures suivantes représentent les moments extrêmes à l'ELU, l'ELS, et l'ELA.

# Calcul du ferrillage



Selon les règles du BAEL 91 rév. 99, on adopte un ferrillage selon la méthode de calcul de poutre sollicitée en flexion simple. Prenons une section de largeur 100 cm et d'une hauteur de 50 cm. Les caractéristiques de la section à ferriller et la nuance d'acier sont inscrites dans le tableau suivant :

**Tableau V.2 – Caractéristique de la section à ferriller et nuance d'acier (voile ext.)**

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | F <sub>c28</sub> (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|------------------------|--------|--------------------|
| 100    | 50     | 5             | 35                     | FeE400 | Très préjudiciable |

- La compression limite dans le béton :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- La contrainte de compression du béton :  $f_{bc} = \frac{0,85f_{c28}}{1,5} = \frac{0,85 \times 35}{1,5} = 19,83 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$

### V.3.1 Ferrailage à l'ELU

- $\mu = \frac{M_u}{bd^2f_{bu}} = \frac{322,19 \times 10^{-3}}{1 \times 0,45^2 \times 19,83} = 0,08$
- $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{322,19}{288,99} = 1,35 \Rightarrow \mu_c = 0,323$
- $\mu_c > \mu \Rightarrow$  SSAC (section sans armatures comprimées ; il n'y a pas d'acier comprimés)
- $\beta_u = 0,0840$  (du tableau 9-I, annexe D)
- $\mu < 0,186 \Rightarrow \varepsilon_s = 10 \times 10^{-4}$  et  $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 348 \text{ MPa}$
- $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,084 \times \frac{1 \times 0,45 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 21,54 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 1 \times 0,45 \times 10^4 = 6,98 \text{ cm}^2$
- $A_s = 21,54 \text{ cm}^2 > A_{min}(CNF) = 6,98 \text{ cm}^2$

Prenons : 5HA25 = 24,54 cm<sup>2</sup>/ml

### V.3.2 Vérification de l'ELS

- Centre de gravité :  $y = \frac{15(A_s + A'_s)}{b} \left[ \sqrt{1 + \frac{b(d \times A_s + d' \times A'_s)}{7,5(A_s + A'_s)^2}} - 1 \right]$   

$$y = \frac{15 \times 24,54}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 45 \times 24,54}{7,5 \times 24,54^2}} - 1 \right] = 14,88 \text{ cm}$$
- Inertie :  $I = \frac{by^3}{3} + 15[A_s(d - y)^2 + A'_s(y - d')^2]$   

$$I = \frac{100 \times 14,88^3}{3} + 15[24,54(45 - 14,88)^2] = 443767,16 \text{ cm}^4$$
- Contraintes :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{288,99 \times 10^{-3}}{4,43767 \times 10^{-3}} = 65,12 \text{ MPa/m}$   

$$\sigma_{bc} = Ky = 65,12 \times 0,1488 = 9,69 < \overline{\sigma}_{bc}$$
  

$$\sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 65,12(0,45 - 0,1488) = 294,21 > \overline{\sigma}_{st}$$

### V.3.3 Redimensionnement à l'ELS

- $u = \frac{30M_{ser}}{bd^2\overline{\sigma}_{st}} = \frac{30 \times 288,99 \times 10^{-3}}{1 \times 0,45^2 \times 183} = 0,233$
- En fonction de u le tableau 10-IX, annexe D donne les valeurs :  $\rho = \frac{9,252}{1000}$  ;  $k = 0,0456$
- $\sigma_{bc} = 0,0456 \times 183 = 8,34 \text{ MPa}$
- $A_s = 9,252 \times 10^{-3} \times 100 \times 45 = 41,63 \text{ cm}^2$

Prenons : 2 Lits de 7HA20 = 43,98 cm<sup>2</sup>/ml

## V.3.4 Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA

Après introduction des moments maximums à l'ELA sur le logiciel Expert BA, ainsi que les données inscrites dans le tableau précédent, on obtient : 11 cm<sup>2</sup>

**Conclusion :**

Tableau V.3 – Section d'armatures et choix des barres (parois ext.)

| Combinaison d'action | Section d'armatures (cm <sup>2</sup> /ml) | Section retenue | Choix des barres |
|----------------------|---|-----------------|------------------|
| ELU                  | 24,54                                     | 43,98           | 2*7HA20          |
| ELS                  | 43,98                                     |                 |                  |
| ELA                  | 11  |                 |                  |

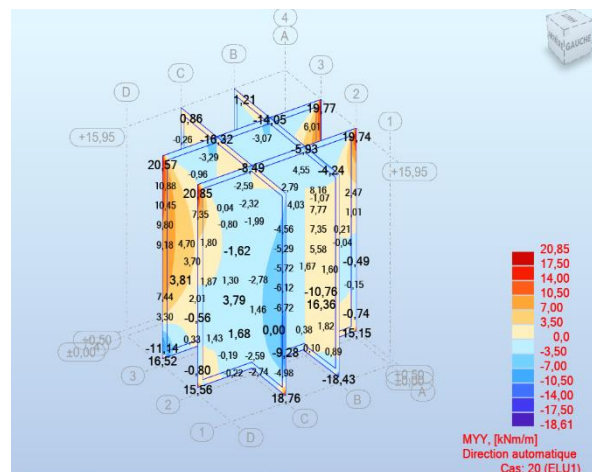
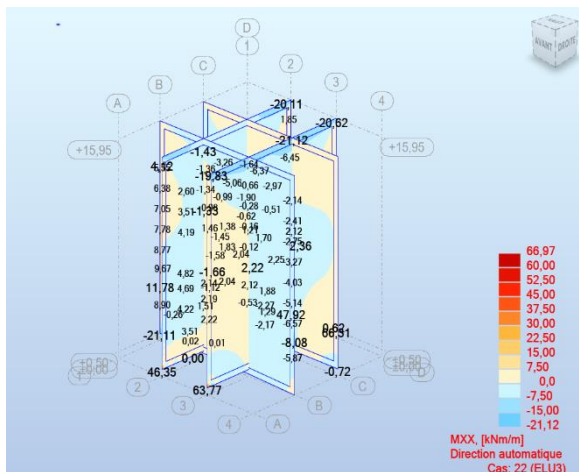
## V.4 Ferrailage des parois intérieures du caisson

Les parois du caisson ont une forme rectangulaire de 14,95x15 m<sup>2</sup> et une épaisseur de 30 cm.

Du logiciel AUTODESK Robot Structural Analysis, après modélisation de la structure et intégration des charges, on retire les sollicitations ultimes inscrites dans le tableau ci-dessous :

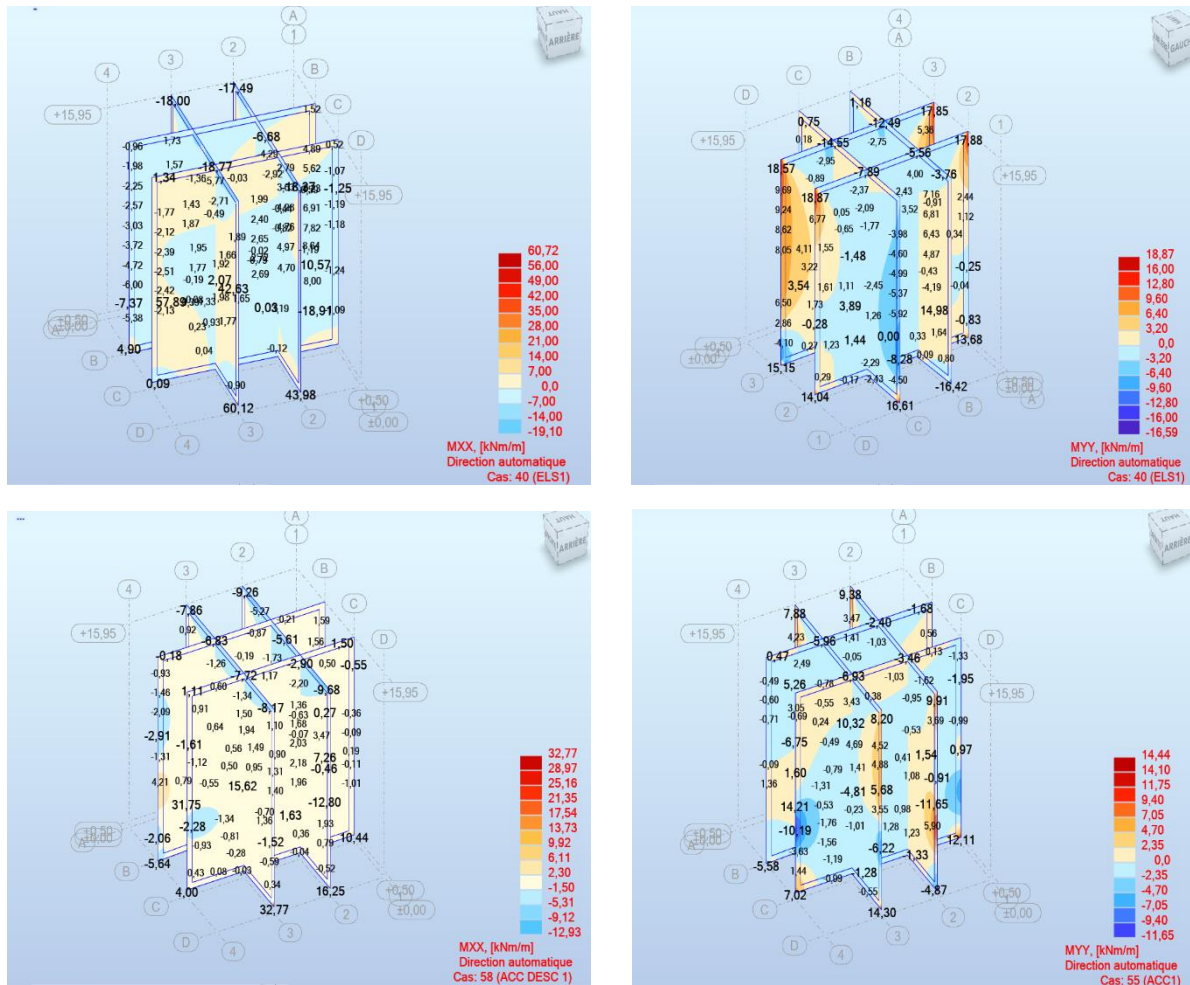
Tableau V.4 – Sollicitations maximums au niveau des voiles intérieurs.

| Combinaisons d'actions | Moment maximum (kN.m/ml) |       |
|------------------------|--------------------------|-------|
|                        | MXX                      | MYY   |
| ELU                    | 60,00                    | 20,85 |
| ELS                    | 56,00                    | 18,87 |
| ELA                    | 32,77                    | 14,44 |



## Calcul du ferrailage

Les figures suivantes représentent les moments extrêmes à L'ELU, l'ELS, et l'ELA.



Selon les règles du BAEL 91 rév. 99, on adopte un ferrailage selon la méthode de calcul de poutre sollicitée en flexion simple. Prenons une section de largeur 100 cm et d'une hauteur de 30 cm. Les caractéristiques de la section à ferriller et la nuance d'acier sont inscrites dans le tableau V.5 suivant :

**Tableau V.5 – Caractéristique de la section à ferriller et nuance d'acier (voile int.)**

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | F <sub>c28</sub> (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|------------------------|--------|--------------------|
| 100    | 30     | 5             | 35                     | FeE400 | Très préjudiciable |

- La compression limite dans le béton :  $\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- La contrainte de compression du béton :  $f_{bc} = \frac{0,85f_{c28}}{1,5} = \frac{0,85 \times 35}{1,5} = 19,83 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\bar{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta f_{tj}}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$

### V.4.1 Ferrailage à l'ELU

- Selon X :  $\mu = \frac{M_u}{bd^2 f_{bu}} = \frac{60 \times 10^{-3}}{1 \times 0,27^2 \times 19,83} = 0,04$
- Selon Y :  $\mu = \frac{M_u}{bd^2 f_{bu}} = \frac{20,85 \times 10^{-3}}{1 \times 0,27^2 \times 19,83} = 0,014$

## Calcul du ferrillage

- Selon X :  $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{60}{56} = 1,07 \Rightarrow \mu_c = 0,219$   
Selon Y :  $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{20,85}{18,87} = 1,1 \Rightarrow \mu_c = 0,255$
- $\mu_c > \mu \Rightarrow SSAC$  (section sans armatures comprimées)
- Selon X :  $\beta_u = 0,0414$   
Selon Y :  $\beta_u = 0,0143$
- $\mu < 0,186 \Rightarrow \varepsilon_s = 10 \times 10^{-4}$  et  $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 348 \text{ MPa}$
- Selon X :  $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,0414 \times \frac{1 \times 0,27 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 6,37 \text{ cm}^2$   
Selon Y :  $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,0143 \times \frac{1 \times 0,27 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 2,2 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 1 \times 0,27 \times 10^4 = 4,19 \text{ cm}^2$
- Selon X : CNF vérifiée !  
Selon Y : non vérifiée donc  $A_s = 4,19 \text{ cm}^2$

**Prenons : selon X - 5HA14 = 7,7 cm<sup>2</sup>/ml et selon Y - 4HA12 = 4,52 cm<sup>2</sup>/ml**

### V.4.2 Vérification de l'ELS

- **Centre de gravité :**  $y = \frac{15(A_s + A'_s)}{b} \left[ \sqrt{1 + \frac{b(d \times A_s + d' \times A'_s)}{7,5(A_s + A'_s)^2}} - 1 \right]$   
Selon X :  $y = \frac{15 \times 7,7}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 27 \times 7,7}{7,5 \times 7,7^2}} - 1 \right] = 6,83 \text{ cm}$   
Selon Y :  $y = \frac{15 \times 4,52}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 27 \times 4,52}{7,5 \times 4,52^2}} - 1 \right] = 5,41 \text{ cm}$
- **Inertie :**  $I = \frac{by^3}{3} + 15[A_s(d - y)^2 + A'_s(y - d')^2]$   
Selon X :  $I = \frac{100 \times 6,83^3}{3} + 15[7,7(27 - 6,83)^2] = 57609,13 \text{ cm}^4$   
Selon Y :  $I = \frac{100 \times 5,41^3}{3} + 15[4,52(27 - 5,41)^2] = 36881,5 \text{ cm}^4$
- **Contraintes :** Selon X :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{56 \times 10^{-3}}{0,5760913 \times 10^{-3}} = 97,2 \text{ MPa/m}$   
Selon Y :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{18,87 \times 10^{-3}}{0,368815 \times 10^{-3}} = 51,16 \text{ MPa/m}$   
Selon X :  $\sigma_{bc} = Ky = 97,2 \times 0,0683 = 6,64 < \overline{\sigma_{bc}}$   
Selon Y :  $\sigma_{bc} = Ky = 51,16 \times 0,0541 = 2,77 < \overline{\sigma_{bc}}$

$$\text{Selon X : } \sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 97,2(0,27 - 0,0683) = 294,08 > \overline{\sigma_{st}}$$

$$\text{Selon Y : } \sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 51,16(0,27 - 0,0541) = 165,68 < \overline{\sigma_{st}}$$

**Selon Y la section à l'ELU satisfait l'ELS (pas besoin de redimensionner à l'ELS)**

### V.4.3 Redimensionnement à l'ELS selon X

- $u = \frac{30M_{ser}}{bd^2\overline{\sigma_{st}}} = \frac{30 \times 56 \times 10^{-3}}{1 \times 0,27^2 \times 183} = 0,125$
- En fonction de u le tableau 10-IX, annexe D donne les valeurs :  $\rho = \frac{4,452}{1000}$  ;  $k = 0,0292$

- $\sigma_{bc} = 0,0292 \times 183 = 5,34 \text{ MPa}$
- Selon X :  $A_s = 4,452 \times 10^{-3} \times 100 \times 27 = 12,02 \text{ cm}^2$

Prenons : selon X - 6HA16 = 12,06 cm<sup>2</sup>/ml et selon Y - 4HA12 = 4,52 cm<sup>2</sup>/ml

### V.4.4 Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA

Après introduction des moments maximums à l'ELA sur le logiciel Expert BA, ainsi que les données inscrites dans le tableau précédent, on obtient : 4,5 cm<sup>2</sup>

**Conclusion :**

Tableau V.6 – Section d'armatures et choix des barres (parois int.)

| Combinaison d'action | Section d'armatures (cm <sup>2</sup> /ml) |         | Section retenue |         | Choix des barres |         |
|----------------------|---|---------|-----------------|---------|------------------|---------|
|                      | Selon X                                   | Selon Y | Selon X         | Selon Y | Selon X          | Selon Y |
| ELU                  | 7,7                                       | 4,52    | 12,06           | 4,52    | 6HA16            | 4HA12   |
| ELS                  | 12,06                                     | 4,52    |                 |         |                  |         |
| ELA                  | 4,5                                       | 4,5     |                 |         |                  |         |

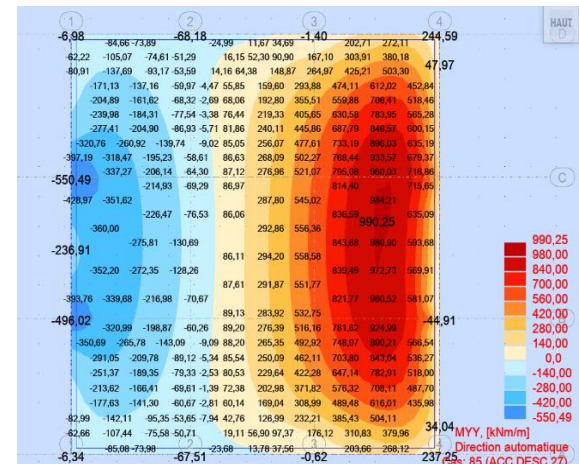
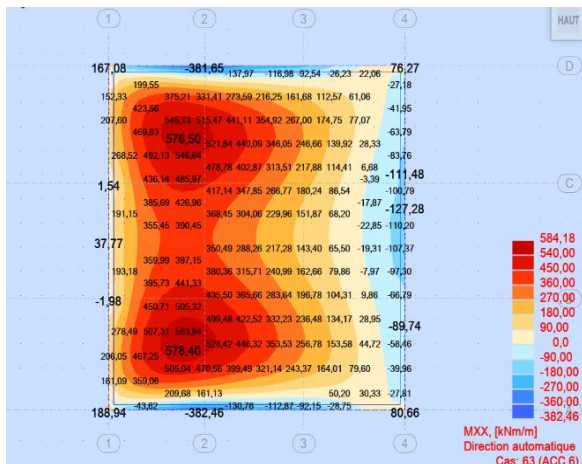
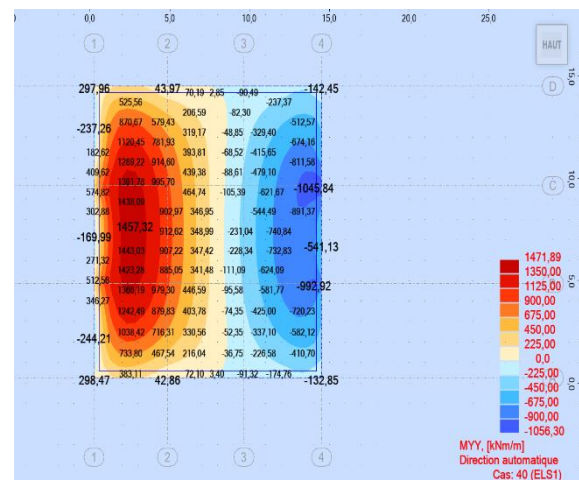
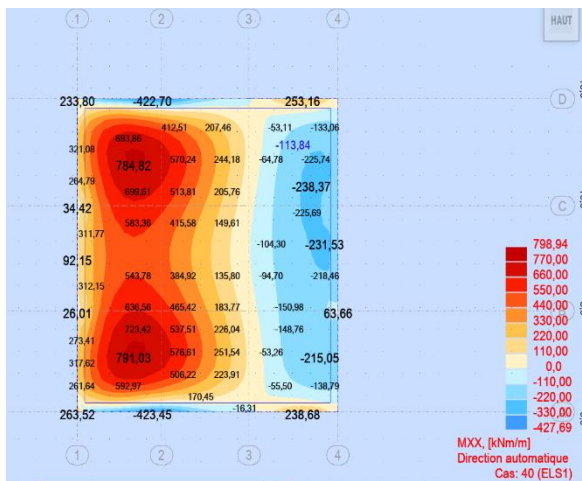
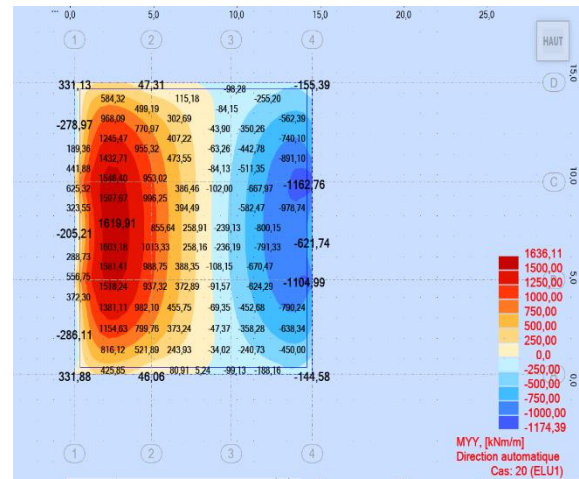
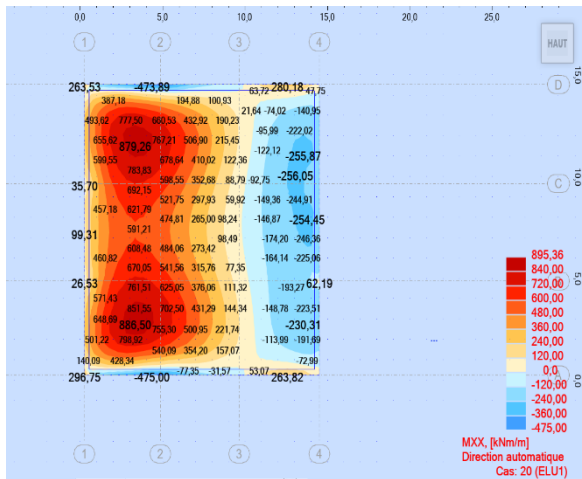
## V.5 Ferrailage du radier

Le radier a une forme carrée de 15x15m<sup>2</sup> et de 1m d'épaisseur, il est exposé aux mêmes sollicitations que celles appliquées aux parois du caisson ; on retire les sollicitations ultimes du logiciel AUTODESK Robot Structural Analysis, après modélisation de la structure et intégration des charges, les résultats sont inscrits dans le tableau V.7 ci-dessous :

Tableau V.7 – Sollicitations maximums au niveau du radier.

| Combinaisons d'actions | Moment maximum (kN.m/ml) |         |
|------------------------|--------------------------|---------|
|                        | MXX                      | MYY     |
| ELU                    | 886,5                    | 1619,91 |
| ELS                    | 791,03                   | 1457,32 |
| ELA                    | 578,4                    | 990,25  |

Les figures suivantes représentent les moments extrêmes à l'ELU, l'ELS et l'ELA.



Selon les règles du BAEL 91 rév. 99, on adopte un ferrailage selon la méthode de calcul de poutre sollicitée en flexion simple. Prenons une section de largeur 100 cm et d'une hauteur de 100 cm. Les caractéristiques de la section à ferrailer et la nuance d'acier sont inscrites dans le tableau V.8 suivant :

**Tableau V.8 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d'acier (radier)**

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | F <sub>c28</sub> (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|------------------------|--------|--------------------|
| 100    | 100    | 5             | 35                     | FeE400 | Très préjudiciable |

- La compression limite dans le béton :  $\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$

- **La contrainte de compression du béton :**  $f_{bc} = \frac{0,85f_{c28}}{1,5} = \frac{0,85 \times 35}{1,5} = 19,83 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$

### V.5.1 Ferrailage à l'ELU

- Selon X :  $\mu = \frac{M_u}{bd^2f_{bu}} = \frac{886,5 \times 10^{-3}}{1 \times 0,9^2 \times 19,83} = 0,056$   
Selon Y :  $\mu = \frac{M_u}{bd^2f_{bu}} = \frac{1619,91 \times 10^{-3}}{1 \times 0,9^2 \times 19,83} = 0,1$
- Selon X :  $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{886,5}{791,03} = 1,12 \Rightarrow \mu_c = 0,255$   
Selon Y :  $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{1619,91}{1457,32} = 1,1 \Rightarrow \mu_c = 0,255$
- $\mu_c > \mu \Rightarrow SSAC$  (section sans armatures comprimées)
- Selon X :  $\beta_u = 0,0583$   
Selon Y :  $\beta_u = 0,1056$
- $\mu < 0,186 \Rightarrow \varepsilon_s = 10 \times 10^{-4}$  et  $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 348 \text{ MPa}$
- Selon X :  $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,0583 \times \frac{1 \times 0,9 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 29,4 \text{ cm}^2$   
Selon Y :  $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,1056 \times \frac{1 \times 0,9 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 54,16 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 1 \times 0,9 \times 10^4 = 13,97 \text{ cm}^2$
- CNF vérifiée selon les deux sens.

**Prenons: selon X – 6HA25 = 29,45 cm<sup>2</sup>/ml et selon Y – 7HA25+7HA20 = 56,35 cm<sup>2</sup>/ml**

### V.5.2 Vérification de l'ELS

- **Centre de gravité :**  $y = \frac{15(A_s + A'_s)}{b} \left[ \sqrt{1 + \frac{b(d \times A_s + d' \times A'_s)}{7,5(A_s + A'_s)^2}} - 1 \right]$   
Selon X :  $y = \frac{15 \times 29,45}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 90 \times 29,45}{7,5 \times 29,45^2}} - 1 \right] = 24,12 \text{ cm}$   
Selon Y :  $y = \frac{15 \times 56,35}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 90 \times 56,35}{7,5 \times 56,35^2}} - 1 \right] = 31,46 \text{ cm}$
- **Inertie :**  $I = \frac{by^3}{3} + 15[A_s(d - y)^2 + A'_s(y - d')^2]$   
Selon X :  $I = \frac{100 \times 24,12^3}{3} + 15[29,45(90 - 24,12)^2] = 250505,28 \text{ cm}^4$   
Selon Y :  $I = \frac{100 \times 31,46^3}{3} + 15[56,35(90 - 31,46)^2] = 277400,4 \text{ cm}^4$
- **Contraintes :** Selon X :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{791,03 \times 10^{-3}}{2,5050528 \times 10^{-3}} = 315,77 \text{ MPa/m}$   
Selon Y :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{1457,32 \times 10^{-3}}{2,774004 \times 10^{-3}} = 525,35 \text{ MPa/m}$   
Selon X :  $\sigma_{bc} = Ky = 315,77 \times 0,2412 = 76,16 > \overline{\sigma}_{bc}$   
Selon Y :  $\sigma_{bc} = Ky = 525,35 \times 0,3146 = 165,28 > \overline{\sigma}_{bc}$

$$\text{Selon X : } \sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 315,77(0,9 - 0,2412) = 3120,44 > \overline{\sigma_{st}}$$

$$\text{Selon Y : } \sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 525,35(0,9 - 0,3146) = 4613,1 > \overline{\sigma_{st}}$$

### V.5.3 Redimensionnement à l'ELS

- Selon X :  $u = \frac{30M_{ser}}{bd^2 \overline{\sigma_{st}}} = \frac{30 \times 791,03 \times 10^{-3}}{1 \times 0,9^2 \times 183} = 0,16$
- Selon Y :  $u = \frac{30M_{ser}}{bd^2 \overline{\sigma_{st}}} = \frac{30 \times 1457,32 \times 10^{-3}}{1 \times 0,9^2 \times 183} = 0,295$
- En fonction de u le tableau 10-IX, annexe D donne les valeurs :
  - Selon X :  $\rho = \frac{6,025}{1000}$  ;  $k = 0,035$
  - Selon Y :  $\rho = \frac{11,37}{1000}$  ;  $k = 0,053$
- Selon X :  $\sigma_{bc} = 0,035 \times 183 = 6,405 \text{ MPa} < \overline{\sigma_{bc}}$
- Selon Y :  $\sigma_{bc} = 0,053 \times 183 = 9,7 \text{ MPa} < \overline{\sigma_{bc}}$
- Selon X :  $A_s = 6,025 \times 10^{-3} \times 100 \times 90 = 54,23 \text{ cm}^2$
- Selon Y :  $A_s = 11,37 \times 10^{-3} \times 100 \times 90 = 102,33 \text{ cm}^2$

Prenons : selon X - 7HA20+7HA25 = 56,35 cm<sup>2</sup>/ml et selon Y – 3\*7HA25 =103,08 cm<sup>2</sup>/ml

### V.5.4 Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA

Après introduction des moments maximums à l'ELA sur le logiciel Expert BA, ainsi que les données inscrites dans le tableau précédent, on obtient: selon X: 15,4 cm<sup>2</sup> et selon Y: 26,6 cm<sup>2</sup>

**Conclusion :**

Tableau V.9 – Section d'armatures et choix des barres (Radier)

| Combinaison d'action | Section d'armatures (cm <sup>2</sup> /ml) |         | Section retenue |         | Choix des barres |         |
|----------------------|---|---------|-----------------|---------|------------------|---------|
|                      | Selon X                                   | Selon Y | Selon X         | Selon Y | Selon X          | Selon Y |
| ELU                  | 29,45                                     | 56,35   | 54,23           | 102,33  | 7HA20 + 7HA25    | 3*7HA25 |
| ELS                  | 54,23                                     | 102,33  |                 |         |                  |         |
| ELA                  | 15,4                                      | 26,6    |                 |         |                  |         |

## V.6 Ferrailage de la dalle

La dalle a une forme carrée, posée sur le remplissage de chaque chambre et qui fait 4,5x4,5m<sup>2</sup> et qui a une épaisseur de 50cm. Les sollicitations maximums sont inscrites dans le tableau suivant :

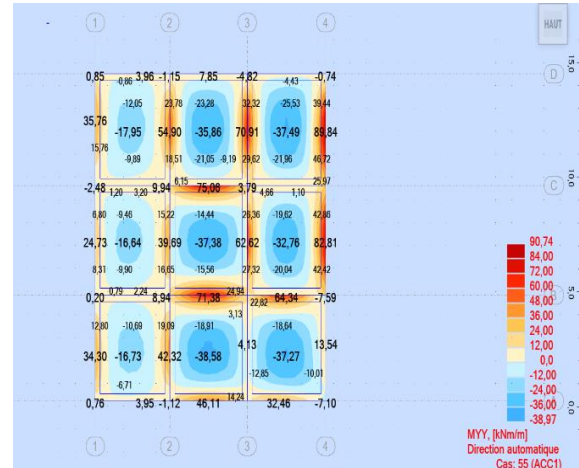
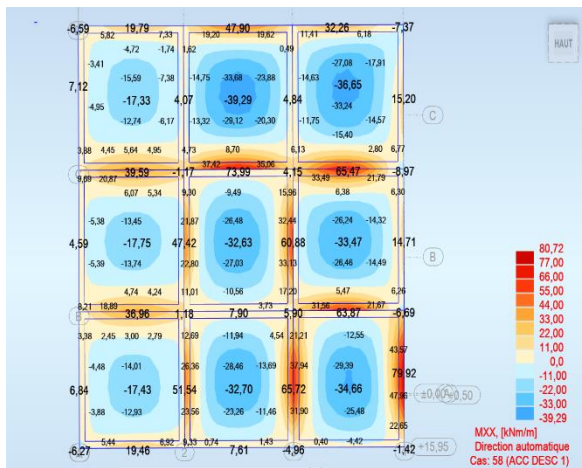
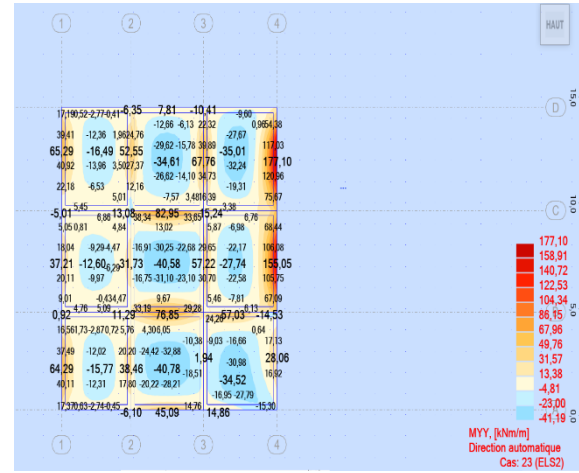
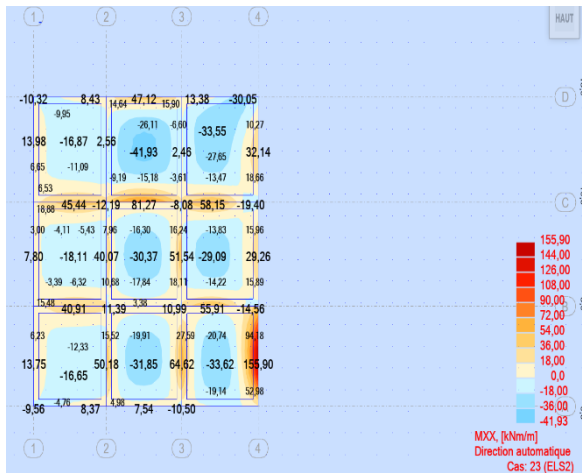
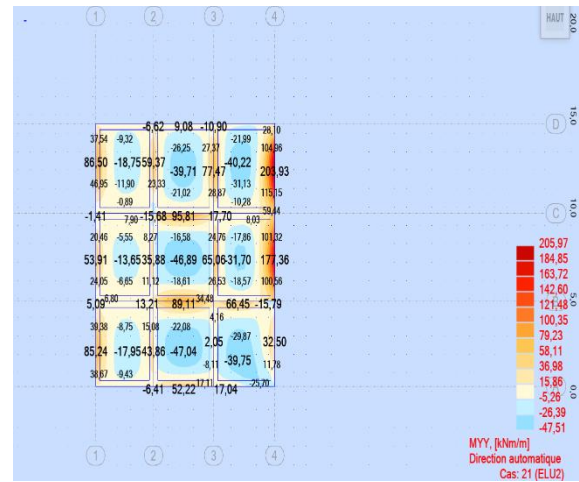
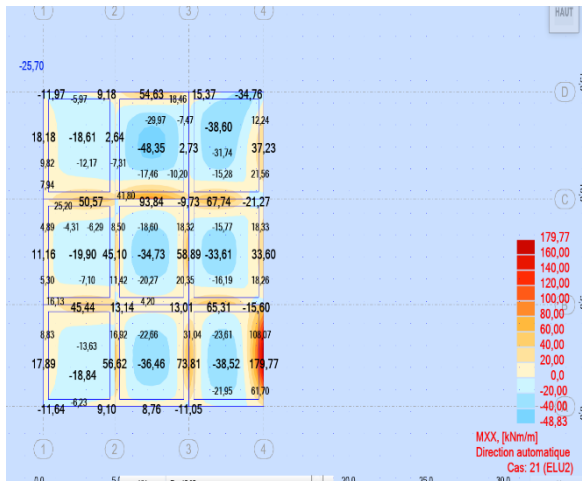
Tableau V.10 – Sollicitations maximums au niveau de la dalle.

| Combinaisons d'actions | Moment maximum (kN.m/ml) |        |
|------------------------|--------------------------|--------|
|                        | MXX                      | MYY    |
| ELU                    | 179,77                   | 203,93 |
| ELS                    | 155,9                    | 177,10 |
| ELA                    | 79,92                    | 89,84  |

Nous remarquons que la différence entre les moments selon X et selon Y n'est pas si considérable que ça, d'où nous adoptons le même ferrailage dans les deux sens.

Les figures suivantes représentent les moments extrêmes à l'ELU, l'ELS, et l'ELA.

# Calcul du ferrailage



Selon les règles du BAEL 91 rév. 99, on adopte un ferrailage selon la méthode de calcul de poutre sollicitée en flexion simple. Prenons une section de largeur 100 cm et d'une hauteur de 50 cm. Les caractéristiques de la section à ferrailer et la nuance d'acier sont inscrites dans le tableau V.11 suivant :

**Tableau V.11 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d'acier (dalle)**

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | F <sub>c28</sub> (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|------------------------|--------|--------------------|
| 100    | 50     | 5             | 35                     | FeE400 | Très préjudiciable |

- La compression limite dans le béton :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- La contrainte de compression du béton :  $f_{bc} = \frac{0,85f_{c28}}{1,5} = \frac{0,85 \times 35}{1,5} = 19,83 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$

### V.6.1 Ferrailage à l'ELU

- $\mu = \frac{M_u}{bd^2f_{bu}} = \frac{203,93 \times 10^{-3}}{1 \times 0,45^2 \times 19,83} = 0,05$
- $\gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{322,19}{288,99} = 1,35 \Rightarrow \mu_c = 0,323$
- $\mu_c > \mu \Rightarrow$  SSAC (section sans armatures comprimées ; il n'y a pas d'acier comprimés)
- $\beta_u = 0,0519$  (du tableau 9-I, annexe D)
- $\mu < 0,186 \Rightarrow \varepsilon_s = 10 \times 10^{-4}$  et  $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 348 \text{ MPa}$
- $A_s = \beta_u \frac{bdf_{bc}}{\sigma_s} = 0,0519 \times \frac{1 \times 0,45 \times 19,83}{348} \times 10^4 = 13,31 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 1 \times 0,45 \times 10^4 = 6,98 \text{ cm}^2$
- $A_s = 13,31 \text{ cm}^2 > A_{min}(CNF) = 6,98 \text{ cm}^2$

Prenons : 5HA20 = 15,71 cm<sup>2</sup>/ml

### V.6.2 Vérification de l'ELS

- Centre de gravité :  $y = \frac{15(A_s + A'_s)}{b} \left[ \sqrt{1 + \frac{b(d \times A_s + d' \times A'_s)}{7,5(A_s + A'_s)^2}} - 1 \right]$   

$$y = \frac{15 \times 15,71}{100} \left[ \sqrt{1 + \frac{100 \times 45 \times 15,71}{7,5 \times 15,71^2}} - 1 \right] = 12,21 \text{ cm}$$
- Inertie :  $I = \frac{by^3}{3} + 15[A_s(d - y)^2 + A'_s(y - d')^2]$   

$$I = \frac{100 \times 12,21^3}{3} + 15[15,71(45 - 12,21)^2] = 314044,36 \text{ cm}^4$$
- Contraintes :  $K = \frac{M_{ser}}{I} = \frac{177,1 \times 10^{-3}}{3,14044 \times 10^{-3}} = 56,39 \text{ MPa/m}$   

$$\sigma_{bc} = Ky = 56,39 \times 0,1221 = 6,88 \text{ MPa} < \overline{\sigma}_{bc}$$
  

$$\sigma_s = 15K(d - y) = 15 \times 56,39(0,45 - 0,1221) = 277,35 \text{ MPa} > \overline{\sigma}_{st}$$

### V.6.3 Redimensionnement à l'ELS

- $u = \frac{30M_{ser}}{bd^2\overline{\sigma}_{st}} = \frac{30 \times 177,1 \times 10^{-3}}{1 \times 0,45^2 \times 183} = 0,144$
- En fonction de u le tableau 10-IX, annexe D donne les valeurs :  $\rho = \frac{5,235}{1000}$  ;  $k = 0,0322$
- $\sigma_{bc} = 0,0322 \times 183 = 5,89 \text{ MPa}$
- $A_s = 5,235 \times 10^{-3} \times 100 \times 45 = 23,55 \text{ cm}^2$

Prenons : 5HA25 = 24,54 cm<sup>2</sup>/ml

### V.6.4 Ferrailage à l'ELA par le logiciel Expert BA

Après introduction des moments maximums à l'ELA sur le logiciel Expert BA, ainsi que les données inscrites dans le tableau précédent, on obtient : 6,6 cm<sup>2</sup>

**Conclusion :**

Tableau V.12 – Section d'armatures et choix des barres

| Combinaison d'action | Section d'armatures (cm <sup>2</sup> /ml) | Section retenue | Choix des barres |
|----------------------|---|-----------------|------------------|
| ELU                  | 15,71                                     | 24,54           | 5HA25            |
| ELS                  | 24,54                                     |                 |                  |
| ELA                  | 6,6                                       |                 |                  |

## V.7 Ferrailage de la poutre de couronnement

La poutre de couronnement est une poutre en béton armé coulée sur place, posée sur le quai afin de maintenir et d'assurer la liaison entre les caissons. Elle tient l'équipement d'amarrage : les bollards, et celui d'accostage : les défenses ainsi que le portique. Elle est coulée sur une longueur de 15 m.

### V.7.1 Efforts agissant sur la poutre de couronnement

#### V.7.1.1 Horizontalement

Considérons que la poutre est très rigide, donc sa réaction est linéairement répartie. L'effort horizontal qui agit sur la poutre de couronnement est l'effort d'amarrage sur les bollards pris égal à 75 kN/ml.

$$M_{max} = \frac{ql^2}{32} = \frac{75 \times 15^2}{32} = 527,34 \text{ kN.m}$$

$$V_{max} = \frac{ql}{4} = \frac{75 \times 15}{4} = 281,25 \text{ kN}$$



#### V.7.1.2 Verticalement

##### V.7.1.2.1 Poids propre de la poutre

$G = 520,88 \text{ kN/ml}$  (Calculé précédemment, voir chap.IV.4)

##### V.7.1.2.2 Charge du portique

$P = 629,2 \text{ kN}$

### V.7.2 Sollicitations maximums

#### V.7.2.1 Poutre de couronnement en service

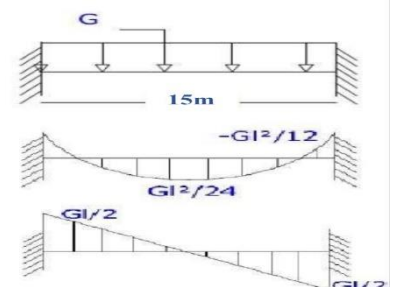
Encastée des deux côtés dans ce cas, deux cas de calculs sont à considérer :

##### V.7.2.1.1 Calcul sous influence du poids propre

$$M_{max}^{appui} = -\frac{Gl^2}{12} = -\frac{520,88 \times 15^2}{12} = -9766,5 \text{ kN.m}$$

$$M_{max}^{travée} = \frac{Gl^2}{24} = \frac{520,88 \times 15^2}{24} = 4883,25 \text{ kN.m}$$

$$V_{max} = \frac{Gl}{2} = \frac{520,88 \times 15}{2} = 3906,6 \text{ kN}$$



### V.7.2.1.2 Calcul sous influence du portique

Les sollicitations défavorables sont obtenues en mettant la charge concentrée à mi-travée.

$$M_{max}^{appui} = \frac{Pl}{8} = \frac{629,2 \times 15}{8} = 1179,75 \text{ kN.m}$$

$$M_{max}^{travée} = -\frac{Pl}{8} = -\frac{629,2 \times 15}{8} = -1179,75 \text{ kN.m}$$

$$V_{max} = \frac{P}{2} = \frac{629,2}{2} = 314,6 \text{ kN}$$

### V.7.2.2 Tassement d'un caisson au niveau du joint (accidentel) :

La poutre travaille en console (encastrée d'un côté et libre de l'autre), comme ce cas est rare on néglige l'influence du portique, on tient compte que poids propre.

$$M_{max}^{appui} = -\frac{Gl^2}{2} = -\frac{520,88 \times 7,5^2}{2} = -14649,75 \text{ kN.m}$$

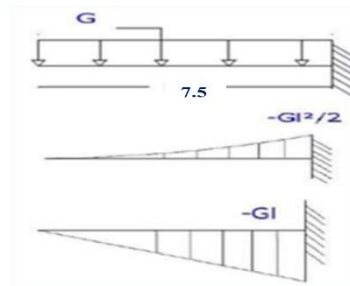
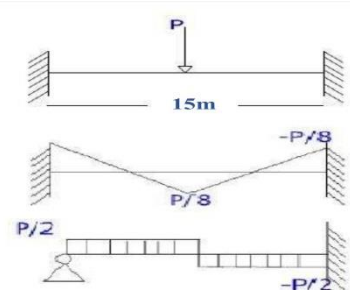
$$M_{max}^{travée} = -\frac{Gl^2}{12} = -\frac{520,88 \times 15^2}{12} = -9766,5 \text{ kN.m}$$

$$V_{max} = -Gl = 520,88 \times 7,5 = 3906,6 \text{ kN}$$

Récapitulons :

**Tableau V.13 – Récapitulatif des sollicitations ultimes de la poutre de couronnement**

| Cas                         | Sous influence de poids propre (1) |                    |           | Sous influence du portique (2) |                    |           | (1)+(2)           |                    |           |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------|
|                             | $M_{max}^{appui}$                  | $M_{max}^{travée}$ | $V_{max}$ | $M_{max}^{appui}$              | $M_{max}^{travée}$ | $V_{max}$ | $M_{max}^{appui}$ | $M_{max}^{travée}$ | $V_{max}$ |
| <b>ELS</b>                  | -9766,5                            | 4883,25            | 3906,6    | 1179,75                        | -1179,75           | 314,6     | -8586,75          | 3703,5             | 4221,2    |
| <b>Tassement du caisson</b> | -14649,75                          | -9766,5            | 3906,6    | Influence non considérée       |                    |           | -14649,75         | -9766,5            | 3906,6    |



## V.7.3 Combinaison de charge

Le ferrailage de la poutre de couronnement se fera à l'ELS en considérant une fissuration très préjudiciable, avec la combinaison G+Q+1,4AM

### V.7.4 Calcul du ferrailage longitudinal de la poutre de couronnement

Considérons les deux cas de chargement pour le ferrailage :

- Poutre de couronnement en service ;
- Poutre de couronnement dans le cas du tassement d'un caisson au niveau du joint

#### V.7.4.1 Ferrailage sous chargement vertical de la poutre de couronnement en service

Prenons une section de hauteur 195 cm et largeur de 530 cm.

**Tableau V.14 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d'acier (p. de cour.)**

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | $F_{c28}$ (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|-----------------|--------|--------------------|
| 530    | 195    | 5             | 35              | FeE400 | Très préjudiciable |

#### V.7.4.1.1 Sur appuis

- La compression dans le béton :  $\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\bar{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$
- $X = \frac{15\bar{\sigma}_{bc}}{15\bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} d = \frac{15 \times 21}{15 \times 21 + 183} \times 1,75 = 1,11 \text{ m}$

## Calcul du ferrailage

- $Z = d - \frac{X}{3} = 1,75 - \frac{1,11}{3} = 1,38 \text{ m}$
- $\overline{M}_1 = \frac{1}{2} \times b \times X \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z = \frac{1}{2} \times 5,3 \times 1,11 \times 21 \times 1,38 \times 10^3 = 85244,67 \text{ kN.m}$
- $M_{ser} = 9766,5 < \overline{M}_1 = 85244,67 \Rightarrow SSAC$  (Section sans armatures comprimées)
- $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{9766,5 \times 10^{-3}}{1,38 \times 183} \times 10^4 = 386,73 \text{ cm}^2 \Rightarrow \frac{A_{ser}}{ml} = 72,36 \text{ cm}^2/ml$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 5,3 \times 1,75 \times 10^4 = 143,99 \text{ cm}^2$
- $A_{min}(CNF) = 143,99 < A_{ser} = 386,73$  Vérifié !

Prenons  $3*5HA25 = 73,62 \text{ cm}^2/ml$

### V.7.4.1.2 En travée

- **La compression dans le béton** :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$
- $X = \frac{15\overline{\sigma}_{bc}}{15\overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} d = \frac{15 \times 21}{15 \times 21 + 183} \times 1,75 = 1,11 \text{ m}$
- $Z = d - \frac{X}{3} = 1,75 - \frac{1,11}{3} = 1,38 \text{ m}$
- $\overline{M}_1 = \frac{1}{2} \times b \times X \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z = \frac{1}{2} \times 5,3 \times 1,11 \times 21 \times 1,38 \times 10^3 = 85244,67 \text{ kN.m}$
- $M_{ser} = 4883,25 < \overline{M}_1 = 85244,67 \Rightarrow SSAC$  (Section sans armatures comprimées)
- $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{4883,25 \times 10^{-3}}{1,38 \times 183} \times 10^4 = 193,36 \text{ cm}^2 \Rightarrow \frac{A_{ser}}{ml} = 36,48 \text{ cm}^2/ml$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 5,3 \times 1,75 \times 10^4 = 143,99 \text{ cm}^2$
- $A_{min}(CNF) = 143,99 < A_{ser} = 193,36$  Vérifié !

Prenons  $8HA25 = 39,27 \text{ cm}^2/ml$

### V.7.4.2 Ferrailage sous chargement vertical de la poutre de couronnement dans le cas du tassement d'un caisson au niveau du joint

#### V.7.4.2.1 Sur appuis

- **La compression dans le béton** :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$
- $X = \frac{15\overline{\sigma}_{bc}}{15\overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} d = \frac{15 \times 21}{15 \times 21 + 183} \times 1,75 = 1,11 \text{ m}$
- $Z = d - \frac{X}{3} = 1,75 - \frac{1,11}{3} = 1,38 \text{ m}$
- $\overline{M}_1 = \frac{1}{2} \times b \times X \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z = \frac{1}{2} \times 5,3 \times 1,11 \times 21 \times 1,38 \times 10^3 = 85244,67 \text{ kN.m}$
- $M_{ser} = 14649,75 < \overline{M}_1 = 85244,67 \Rightarrow SSAC$  (Section sans armatures comprimées)
- $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{14649,75 \times 10^{-3}}{1,38 \times 183} \times 10^4 = 580,1 \text{ cm}^2 \Rightarrow \frac{A_{ser}}{ml} = 109,45 \text{ cm}^2/ml$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 5,3 \times 1,75 \times 10^4 = 143,99 \text{ cm}^2$
- $A_{min}(CNF) = 143,99 < A_{ser} = 580,1$  Vérifié !

Prenons  $3*5HA25 + 2*6HA20 = 116,56 \text{ cm}^2/ml$

#### V.7.4.2.2 En travée

- **La compression dans le béton** :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$

## Calcul du ferrailage

- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$
- $X = \frac{15\overline{\sigma}_{bc}}{15\overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} d = \frac{15 \times 21}{15 \times 21 + 183} \times 1,75 = 1,11 \text{ m}$
- $Z = d - \frac{X}{3} = 1,75 - \frac{1,11}{3} = 1,38 \text{ m}$
- $\overline{M}_1 = \frac{1}{2} \times b \times X \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z = \frac{1}{2} \times 5,3 \times 1,11 \times 21 \times 1,38 \times 10^3 = 85244,67 \text{ kN.m}$
- $M_{ser} = 0 < \overline{M}_1 = 85244,67 \Rightarrow \text{SSAC (Section sans armatures comprimées)}$
- $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{0}{1,38 \times 183} \times 10^4 = 0 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 5,3 \times 1,75 \times 10^4 = 143,99 \text{ cm}^2$
- $A_{min}(CNF) > A_{ser}$  Non vérifié !
- Donc prenons  $A_{min}(CNF) = 143,99 \text{ cm}^2 \Rightarrow 27,17 \text{ cm}^2/\text{ml}$

Prenons 6HA25/ml = 29,45 cm<sup>2</sup>/ml

### V.7.4.3 Ferrailage sous chargement horizontal

Tableau V.15 – Caractéristique de la section à ferrailer et nuance d'acier (p. de cour.)

| B (cm) | h (cm) | Enrobage (cm) | F <sub>c28</sub> (MPa) | Acier  | Fissuration        |
|--------|--------|---------------|------------------------|--------|--------------------|
| 195    | 530    | 5             | 35                     | FeE400 | Très préjudiciable |

- **La compression dans le béton** :  $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = 0,6 \times 35 = 21 \text{ MPa}$
- D'où :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{c28} = 0,6 + 0,06 \times 35 = 2,7 \text{ MPa}$
- Fiss. très préjudiciable donc :  $\overline{\sigma}_{st} = 0,8 \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max\{0,5f_e; 110\sqrt{\eta}f_{tj}\} \right\} = 183 \text{ MPa}$
- $X = \frac{15\overline{\sigma}_{bc}}{15\overline{\sigma}_{bc} + \overline{\sigma}_{st}} d = \frac{15 \times 21}{15 \times 21 + 183} \times 4,77 = 3,01 \text{ m}$
- $Z = d - \frac{X}{3} = 4,77 - \frac{3,01}{3} = 3,77 \text{ m}$
- $\overline{M}_1 = \frac{1}{2} \times b \times X \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z = \frac{1}{2} \times 1,95 \times 3,01 \times 21 \times 3,77 \times 10^3 = 232344,1 \text{ kN.m}$
- $M_{ser} = 1,4 M_{max} = 738,27 < \overline{M}_1 = 232344,1 \Rightarrow \text{SSAC}$
- $A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z \times \overline{\sigma}_{st}} = \frac{738,27 \times 10^{-3}}{3,77 \times 183} \times 10^4 = 10,7 \text{ cm}^2$
- CNF :  $A_{min} = 0,23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} b \times d = 0,23 \times \frac{2,7}{400} \times 1,95 \times 4,77 \times 10^4 = 144,4 \text{ cm}^2$
- $A_{min}(CNF) > A_{ser}$  Non vérifié !
- Donc prenons  $A_{min}(CNF) = 144,4 \text{ cm}^2 \Rightarrow 74,05 \text{ cm}^2/\text{ml}$

Prenons 2\*8HA25 = 78,54 cm<sup>2</sup>/ml

### V.7.5 Calcul du ferrailage transversal

$$\overline{\tau}_u = \min \left\{ 0,15 \frac{f_{cj}}{\gamma_b}; 4 \text{ MPa} \right\} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$V_u^{max} = 4221,2 \text{ kN}$$

$$\tau_u^{max} = \frac{V_u^{max}}{bd} = \frac{4221,2 \times 10^{-3}}{1,95 \times 4,77} = 0,453 \text{ MPa}$$

$$\tau_u^{max} < \overline{\tau}_u \Rightarrow \text{Vérifié ! } S_t \leq \min\{1\text{m}; 0,8h; 3b\} = 1\text{m}$$

Prenons  $S_t = 40 \text{ cm}$

$$A_t \geq \frac{\tau_u^{max} b S_t}{0,8 f_e} = \frac{0,453 \times 1,95 \times 0,4}{0,8 \times 400} \times 10^4 = 11,04 \text{ cm}^2$$

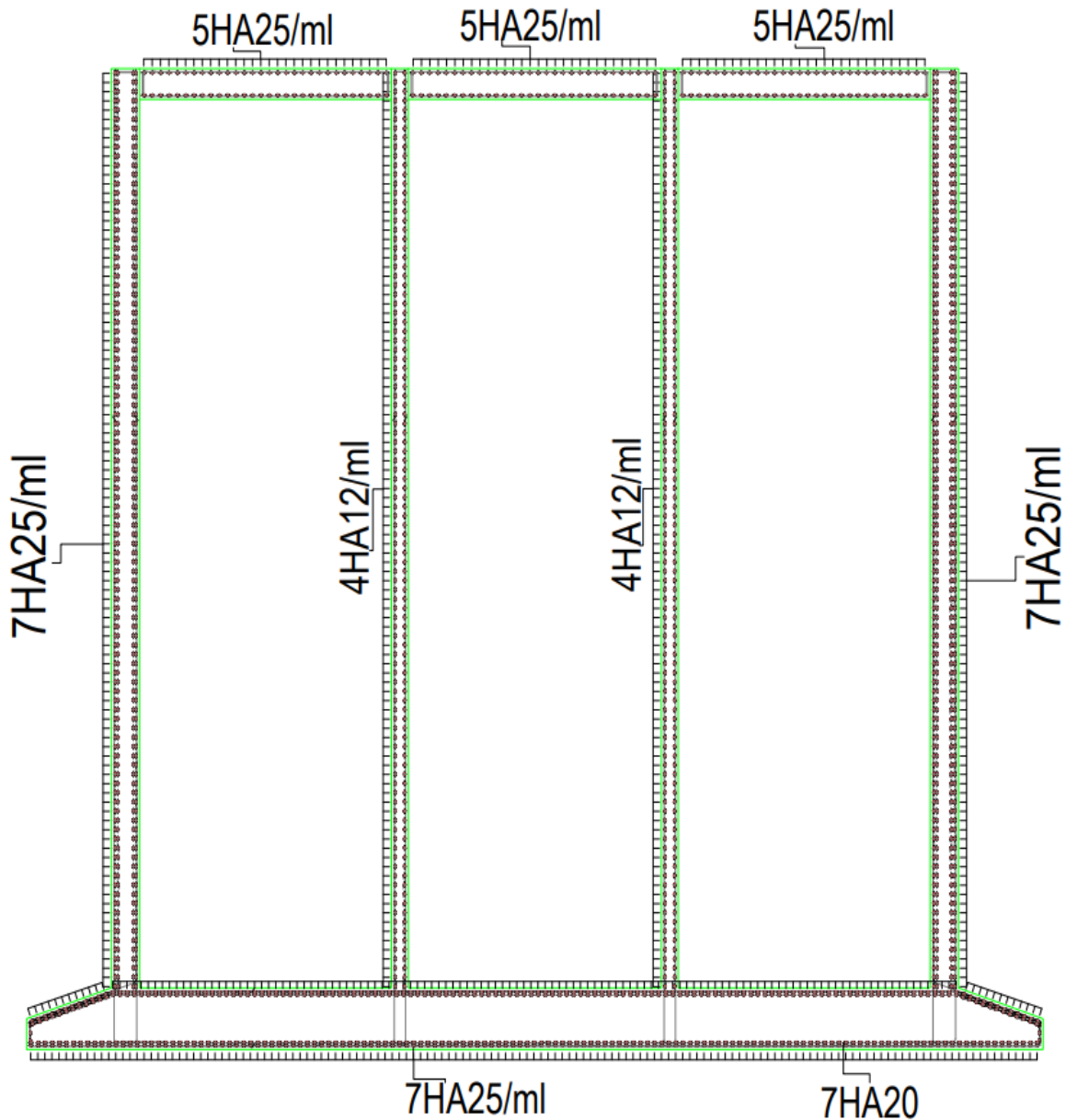
Prenons 6HA16 = 12,06 cm<sup>2</sup>/ml

**Tableau V.16 – Récapitulatif du ferrailage de la poutre de couronnement.**

|                     |            | Armature longitudinale | Armature transversale |
|---------------------|------------|------------------------|-----------------------|
| Efforts verticaux   | Sur appuis | 3*5HA25+2*6HA20        | 6HA16                 |
|                     | En travée  | 8HA25                  |                       |
| Efforts horizontaux |            | 2*8HA25                |                       |

**V.8 Schémas de ferrailage**

**V.8.1 Caisson**



*Figure V.4 – Plan de ferrailage du caisson*

### V.8.2 Poutre de couronnement

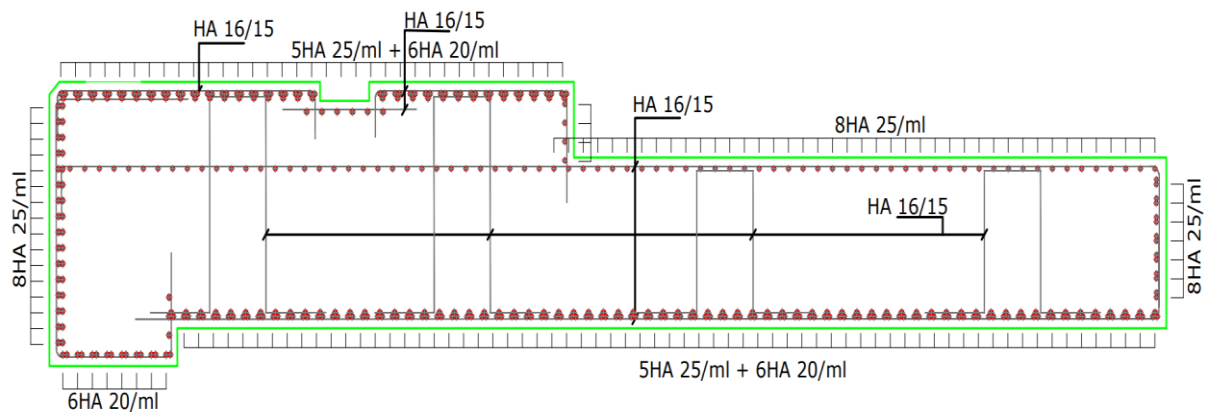


Figure V.5 – Plan de ferrailage de la poutre de couronnement

## V.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une initiation sur l'outil numérique dans le calcul des structures (Robot Structural Analysis, Expert BA) et nous avons amélioré nos connaissances sur ces outils, qui ont une exigence très forte sur le marché de travail actuel. Nous avons également appliqué les règles du BAEL 91 révisé 99 et bien cerné la démarche du calcul du ferrailage qui est : ferrailer à l'ELU, vérifier à l'ELS si ça ne passe pas, on redimensionne à l'ELS.

## **Chapitre VI**

### **Dragage**

---

## Chapitre VI – Dragage

Ce chapitre décrit la méthodologie de dragage pour le projet, basée sur la campagne géotechnique de l'Annexe E. Il détaille également le contenu des travaux de construction, incluant les différentes zones de dragages, ainsi les équipements utilisés pour assurer une exécution efficace et précise du projet.

### VI.1 Géotechnique du produit de dragage :

En se référant à la campagne géotechnique, présentée dans l'annexe E, le volume à draguer (1,5 million de m<sup>3</sup>) est constitué essentiellement des schistes et de marne, dont l'état naturel (en place) présente de bonnes caractéristiques mécaniques, ceci est dû à leur âge géologique très ancien (millénaire). Néanmoins, il faut faire attention qu'ils ne perdront pas de compacité une fois dragués, sinon il serait nécessaire de passer à des techniques de consolidation ou de compléter (ou éventuellement traiter) avec un matériau de remplissage présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Car on risque de faire face au gonflement ou matelassage au tassement qui se répercutera sur les phases de réalisation ainsi que l'exploitation.

### VI.2 Contenu des travaux

Le contenu de la construction de ce projet comprend quatre parties : la zone de tranchée de fondation du quai à conteneurs (-17 m), la zone du bassin du quai à conteneurs (-14 m), la zone de quai temporaire et la fosse profonde de dock flottant, comme le montre la figure suivante.

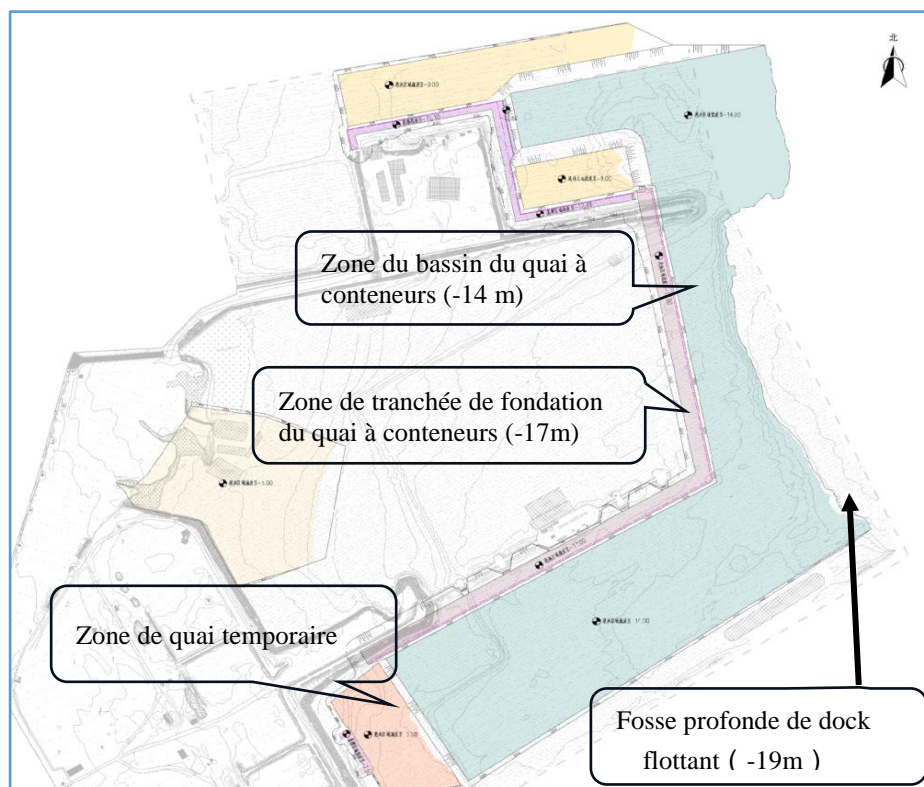


Figure IV.1 - Plan d'aménagement de la zone d'activité

### VI.3 Zone de refoulement

La zone de refoulement de ce projet est d'environ 150 000 m<sup>2</sup>. L'élévation du terrain naturel diminue progressivement de +1 m à -10 m de l'Ouest à l'Est. La capacité de stockage des matériaux dragués est d'environ 1 000 000 m<sup>3</sup>.

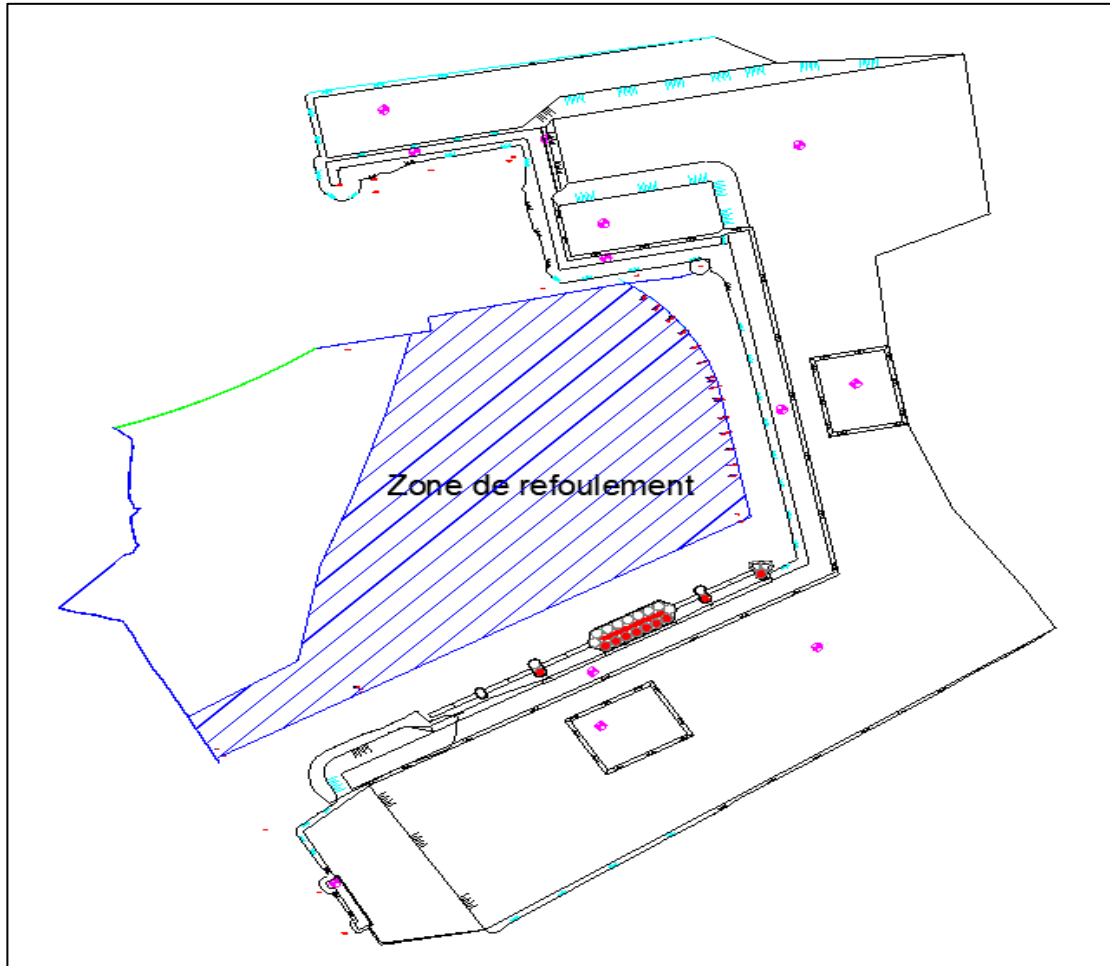


Figure IV.2 - Plan de la zone de refoulement



Figures IV.3 – Photos de la zone de refoulement

## **VI.4 Equipement de dragage**

Pour ce projet, il sera mobilisé un groupe de drague suceuse à désagrégateur et un groupe de bateaux à benne preneuse pour les travaux de dragage et de déroctage, avec un temps de travail de 7 jours par semaine et 24 heures par jour.

### **VI.4.1 Groupe de DSD**

- Drague Suceuse à Désagrégateur (DSD) -TIAN QI HAO, convient à une puissance de coupe suffisante pour les conditions de sol attendues jusqu'à 20 MPa qui ont été rencontrées lors de l'étude géotechnique du sol.
- Bateau à ancre - JIN HANG TINNG 39 est un navire de support, utilisé comme navire mobile pour le navire TIAN QI HAO, pour le transport du personnel et pour le chargement et le déchargement des fournitures.

### **VI.4.2 Groupe de drague à benne**

- Le Drague à benne DA RUN 36 peut nettoyer les sédiments mous de la partie supérieure et d'autres coins de la zone de dragage.
- Barge à boue - DA RUN 38. Equipée d'un navire, elle charge et transporte les sédiments dragués jusqu'à la zone de déversement désignée par le maître d'ouvrage
- Barge à boue - DA RUN 39. Equipée d'un navire, elle charge les sédiments de dragage et les transporte jusqu'à la zone de déversement désignée par le maitre d'ouvrage.
- Bateau à ancre - DA RUN 77. Navire de soutien, utilisé comme navire mobile DA RUN 36, ramassant et transportant du personnel, et chargeant et déchargeant des fournitures.

## **VI.5 Méthodologie de dragage**

### **VI.5.1 Méthodologie de dragage de la drague suceuse à désagrégateur**

#### **VI.5.1.1 Technologie de drague suceuse à désagrégateur**

Ordre et direction de drague suceuse : conformément à la zone de construction de drague, creuser le long de la direction du long côté de rectangle avec 1,0 à 1,2 fois de la largeur et longueur de drague par couches une par une. La drague suceuse mise en œuvre dans ce projet est remorquée par le bateau d'ancrage à la zone de construction et positionné avec précision par le DGPS au début de dragage de la zone de construction. Après avoir terminé les travaux de préparation tels que la liaison des chemins de livraison de boue et avoir descendu la fraise en fonction de la position de la ligne de drainage indiquée par le système de positionnement DGPS, on procède au dragage et à la fouille. La boue cassée par la fraise est transportée par le chemin avec la pompe à boue à haute puissance de la drague à godets jusqu'à la zone de remplissage.

#### **VI.5.1.2 Principes de base**

La drague suceuse à désagrégateur est traînée jusqu'à la zone de construction par le remorqueur, et le DGPS est utilisé pour localiser avec précision le point de départ de l'excavation dans la zone de construction. Après l'achèvement des travaux de distribution de la carte de raccordement avec la conduite de décharge de boue, le pont de coupe est abaissé à une profondeur fixe en fonction de la position de l'alésoir définie par l'affichage du système de positionnement DGPS. Au cours de l'excavation, le sol brisé par l'alésoir est transporté vers la

zone de remplissage par la conduite de drainage par la pompe à boue centrifuge de grande puissance de la drague.

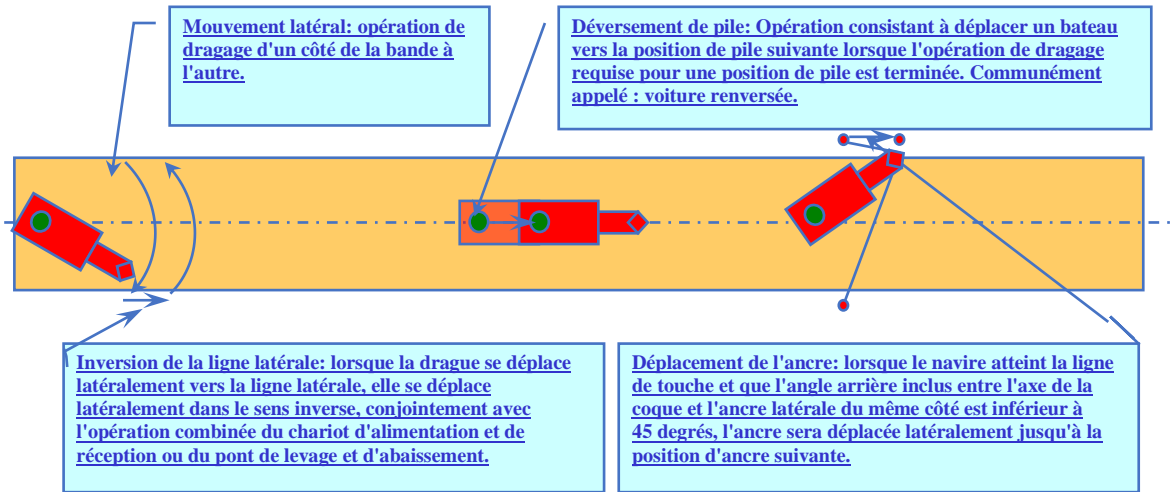


Figure IV.4 - Processus de dragage de la drague suceuse à désagrégateur

## VI.5.2 Méthodologie de dragage avec la Drague à benne

### VI.5.2.1 Principes de base

La drague à benne réalise un type de dragage non continu, qui consiste à ouvrir le godet vide et le plonger au fond de l'eau → Fermer le godet pour prélever la boue → Soulever le godet lourd et ensuite tourner la grue pour déplacer le godet lourd au-dessus de la barge à boue → Ouvrir le godet et décharger la boue → puis faire tourner la grue en sens inverse pour plonger le godet vide dans le point d'excavation.

### VI.5.2.2 Processus de dragage

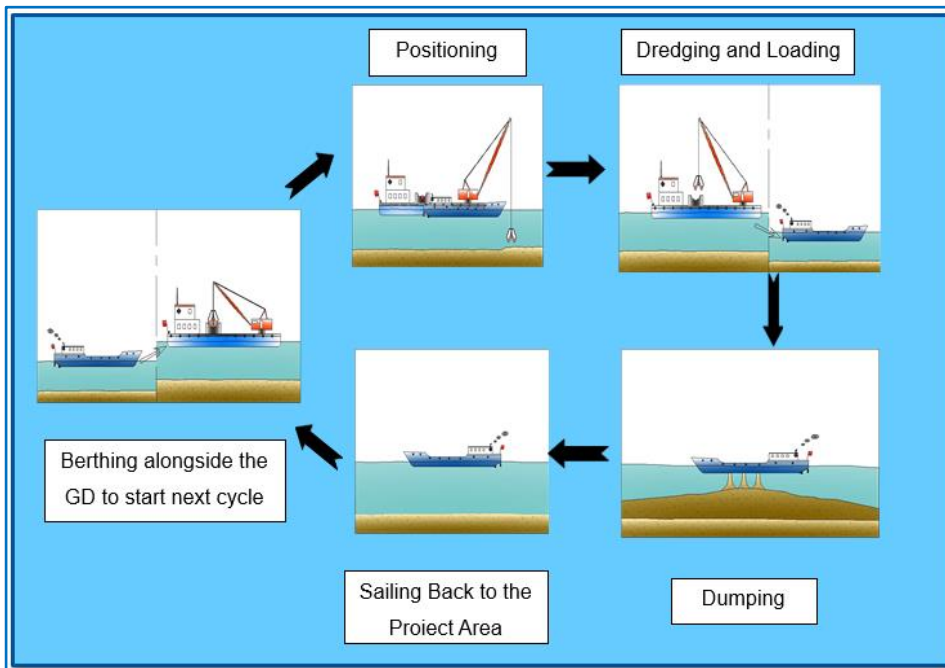


Figure IV.5 - Plan du processus de dragage avec la drague à benne

(1) Méthode de dragage par section et colonne:

Le dragage par section sera réalisé en fonction de la largeur effective de dragage, de la profondeur moyenne de l'eau d'origine et de la largeur d'excavation de 20 mètres (22,5 mètres de large) pour Darun 36. Dans chaque section, la grille d'excavation est formée en la divisant verticalement et horizontalement, avec une distance horizontale de 20 mètres. Selon l'ouverture maximale de la benne preneuse de 8,7 m, la longueur longitudinale est déterminée à 8,0 m. Chaque zone de dragage est divisée et draguée selon la méthode ci-dessus.

### (2) Méthode de dragage en couches:

En raison de l'épaisseur relativement petite de la couche à draguer dans la zone de dragage, le dragage par couches est réalisé en fonction de l'épaisseur de la couche de boue excavée par chaque godet du navire Darun 36. L'épaisseur moyenne de la couche de sédiment excavée ou dragué varie de moins de 2 m et l'épaisseur spécifique de la couche dépend de l'essai d'excavation d'essai et de la qualité du sol.

### (3) Méthode de dragage en ligne:

La méthode d'excavation verticale est adoptée pour l'activité de Darun 36. Dans les zones où l'épaisseur de la couche de boue sur la section d'excavation est  $\geq 1,0$  m, la méthode d'excavation parallèle est adoptée, c'est-à-dire en commençant d'un côté de chaque rangée de blocs de grille puis abaisser la benne. Chaque bloc est creuser 12 fois par le godet, et la largeur de la benne est de  $2,8 \text{ m} \times 12 \text{ godets} > 20 \text{ m}$  (largeur de chaque bloc), chevauchement entre les godets  $> 1$  mètre; L'ouverture maximale de la benne preneuse est de 8,7 m et la longueur du bloc carré est de 8,0 m. La plage de dragage efficace de la benne peut couvrir la longueur du bloc à chaque fois pour garantir qu'il n'y a pas de fuite en creusant.

### (4) Méthode de dragage: Cas de sol dur

Lorsque des couches de sol dur sont rencontrées dans la zone de dragage, les méthodes suivantes sont adoptées pour l'excavation.

## VI.5.3 Méthode de dragage en pente

En utilisant la méthode de dragage par escalier, la pente de conception est formée après un effondrement en couches. Le dragage part du terrain naturel d'origine et s'effectue couche par couche en fonction de l'épaisseur des couches. Pour le dragage de la section de pente, une méthode de dragage typique est adoptée et la divulgation technique du navire sera ajustée en fonction des résultats de dragage typiques pour améliorer la précision de l'excavation de la pente.

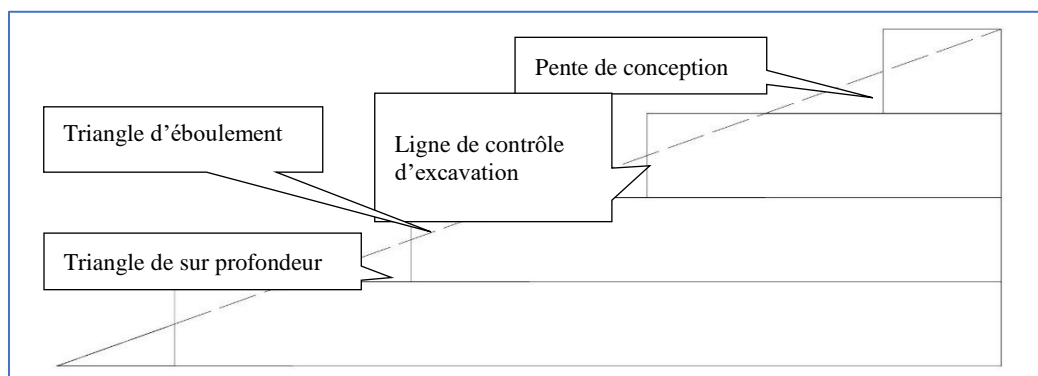


Figure IV.6 - Diagramme schématisant le dragage en pente

### VI.5.4 Méthode de dragage par assemblage des pipelines

Il faut connecter les pipelines ensemble pour avoir un tuyau auto-flottant à travers des brides pour former une canalisation de refoulement hydraulique entièrement connectée:

- Etape 1: Transporter le pipeline jusqu'au chantier de construction à l'aide d'une chargeuse ;
- Etape 2: Utiliser une pelle hydraulique pour soulever les pipelines flottants et les pipelines en acier et les aligner avec la plaque à bride, puis serrer manuellement les boulons pour former le groupe de pipelines auto-flottants et le groupe de pipelines en acier ;
- Etape 3: Utiliser une pelle pour retirer le groupe de tuyaux ou pipelines auto-flottants dans la mer et glisser une section jusqu'à l'arrière de la drague suceuse à désagrégateur en reliant par des boulons en utilisant un bateau d'ancrage.
- Etape 4: Connecter le tuyau auto-flottant et le tuyau en acier pour terminer l'installation et l'assemblage de tous les pipelines.

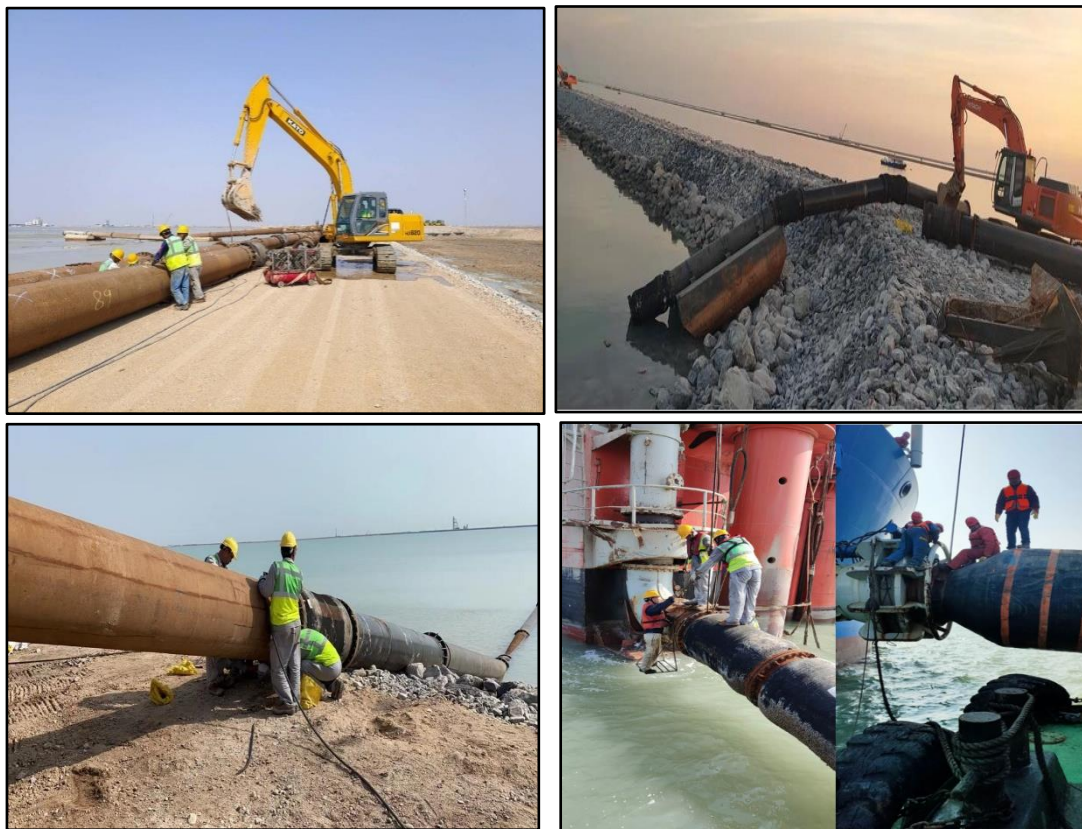


Figure IV.7 - Schéma du processus d'installation du pipeline

### VI.6 Conclusion

En résumé, le projet de dragage utilise des techniques et équipements spécialisés pour assurer une exécution efficace et précise. La méthodologie de dragage, à savoir les techniques par couches, par sections et en pente, est soigneusement planifiée pour garantir la stabilité et la précision des travaux, minimisant les risques associés aux matériaux dragués.

## **Chapitre VII**

# **Etude d'Impact sur l'Environnement**

---

## Chapitre VII – Etude d'Impact sur l'Environnement

L'étude d'impact sur l'environnement (EIE), un des principaux outils de l'évaluation environnementale, est également considérée comme un outil d'aide à la décision. Elle désigne l'ensemble de la démarche destinée à analyser les effets sur l'environnement d'un projet, dans notre cas d'aménagement, de mesurer leur acceptabilité environnementale ainsi que d'explicitier des considérations environnementales. L'EIE fournit une base solide pour la gestion des conséquences sur l'environnement des actions d'aménagement, en favorisant l'intégration des objectifs fondamentaux que sont la protection de l'environnement et le développement durable.

### VII.1 Analyse de l'état initial

L'analyse de l'état initial du site et de son environnement rassemble les données nécessaires et suffisantes pour caractériser l'état de chaque composante de l'environnement, notamment le climat et la température, la pluviométrie, le vent, les conditions hydrologiques et géologiques, ainsi que les données physiques (topo-bathymétrique) avant réalisation du projet. Tous ces données ont été dans le chapitre II volet collecte de données.

Nous ajoutons à ça :

- Il est à noter que l'embouchure de Oued El Mogoun déverse exactement là où la variante du mole a été choisie comme montré dans la figure ci-dessous :



Figure VII.1 - Embouchure de Oued El Mogoun

- **Qualité de l'air** : La qualité de l'air dans la région du port d'Arzew est modérément affectée par les émissions des navires, des équipements portuaires et des transports routiers. Les émissions de particules et de gaz à effet de serre (GES) sont présentes, notamment en raison de l'utilisation de carburants lourds par les navires et les engins de manutention.
- **Qualité de l'eau** : La qualité de l'eau dans la zone portuaire est impactée par les déversements accidentels et les eaux de ballast des navires. La gestion actuelle des eaux usées portuaires est insuffisante, contribuant à une pollution modérée des eaux côtières.
- **Ecosystème marin** : La biodiversité marine est relativement diversifiée, mais certaines espèces sont vulnérables à la pollution et à l'augmentation du trafic maritime. Les habitats marins proches du port sont sujets à des perturbations dues aux activités portuaires.

- **Zones résidentielles avoisinantes** : La population locale est exposée à des nuisances sonores et à des émissions polluantes provenant du port, affectant la qualité de vie et la santé des résidents.
- **Infrastructures existantes** : Les infrastructures portuaires actuelles sont vieillissantes et limitent la capacité d'accueil des navires de grand tonnage. Les installations existantes ne peuvent accueillir que des navires de faible tonnage, ce qui entraîne des inefficacités logistiques et des impacts environnementaux négatifs. En effet, l'infrastructure actuelle limite le volume d'exportation hors hydrocarbures à 2,5 voire 3 millions de tonnes par an avec une moyenne de séjour des navires entre 5 à 10 jours.
- **Activité de l'urée** : à chaque expédition, environ 200 camions passent par la ville d'Arzew en transportant l'urée vers le port. Cette logistique classique pollue quotidiennement l'environnement par les pertes de l'urée sur la route principale qui génère parfois des chaussées glissantes, nonobstant les nuisances qui proviennent du passage des camions en zone urbaine.

## VII.2 Identification des impacts environnementaux du projet

### VII.2.1 Impacts sur la qualité de l'air

**Phase de construction** : Augmentation temporaire des émissions de particules et de GES en raison des activités de construction et de l'utilisation de machines de chantier.

**Phase d'exploitation** : Réduction des émissions à long terme grâce à des infrastructures modernes permettant une logistique plus efficace et une diminution du temps de séjour des navires. Les nouvelles installations permettront également de réduire le nombre de camions nécessaires pour le transport des marchandises.

### VII.2.2 Impacts sur la qualité de l'eau

**Phase de construction** : Risques de déversements de substances polluantes durant les travaux de dragage et de construction. La démolition de la jetée méthane existante aura des répercussions sur la qualité de l'eau. En effet, les matières en suspension soulevées par les travaux peuvent provoquer des nuages turbides nuisibles à la vie marine. Cette augmentation de la turbidité entraînera une réduction de la pénétration de la lumière et le colmatage des organismes benthiques.

**Phase d'exploitation** : Amélioration de la gestion des eaux de ballast et des déversements avec des installations modernes équipées de systèmes de traitement des eaux usées.

### VII.2.3 Impacts sur les écosystèmes marins

**Phase de construction** : Perturbation temporaire des habitats marins lors des travaux de dragage et de construction. Les activités de construction peuvent entraîner la remise en suspension de sédiments et la dispersion de polluants.

**Phase d'exploitation** : Réduction des impacts à long terme grâce à une meilleure gestion environnementale du port et à la mise en place de mesures de protection des habitats marins.

### VII.2.4 Impacts sur les zones résidentielles avoisinantes

**Phase de construction** : Nuisances sonores et émissions de poussières durant la phase de construction. Les travaux peuvent causer des désagréments pour les résidents proches du port.

**Phase d'exploitation** : Amélioration des conditions de vie grâce à une réduction des nuisances sonores et des émissions polluantes après la mise en service du môle. La nouvelle logistique portuaire réduira le passage des camions en zone urbaine.

### VII.2.5 Impacts sur la logistique et l'économie :

**Phase d'exploitation :** Le nouveau môle permettra d'accueillir des navires de plus grand tonnage, réduisant les coûts logistiques et augmentant l'efficacité du port. Cela encouragera l'exportation de produits locaux et la création de nouveaux emplois.

## VII.3 Évaluation des effets et mesures pour réduire, supprimer ou compenser

### VII.3.1 Mesures pour la qualité de l'air

#### Réduction des émissions :

Utilisation des carburants appropriés, à faible teneur en soufre et en plomb, conformément aux instructions des décideurs ; Utilisation de technologies de construction à faibles émissions, équipement des machines de chantier avec des filtres à particules, et mise en place de zones tampons végétalisées pour absorber les polluants atmosphériques.

**Surveillance continue :** Inspection et entretien régulier des véhicules, des engins et équipements qui sont utilisés pour les travaux et mise en place de stations de surveillance de la qualité de l'air pour mesurer les émissions durant les travaux et après l'ouverture du môle. Application de mesures correctives si les niveaux de pollution dépassent les normes.

### VII.3.2 Mesures pour la qualité de l'eau

**Déviations du canal de Oued El Mohgoun :** Concevoir un aménagement de déviation de l'embouchure de l'oued durable de telle façon à ce qu'il change de cours d'eau sans qu'il y ait d'effet néfaste par rapport à la circulation d'eau et au drainage du terre-plein.

**Prévention des déversements :** Installation de barrières flottantes et de systèmes de collecte pour contenir les déversements accidentels. Utilisation de matériaux non toxiques et de techniques de dragage respectueuses de l'environnement.

**Traitement des eaux usées :** Installation de stations de traitement des eaux usées portuaires modernes pour éliminer les polluants avant le rejet dans l'environnement. Programme de surveillance régulier pour détecter et traiter toute pollution éventuelle.

### VII.3.3 Mesures pour les écosystèmes marins

**Réduction des perturbations :** Planification des travaux de dragage en dehors des périodes de reproduction des espèces sensibles. Mise en place de récifs artificiels et de zones protégées pour compenser la perte d'habitats naturels.

**Important à connaître :** La construction des quais d'un port maritime va détruire les peuplements benthiques sur l'emprise des ouvrages, modifier les courants locaux qui vont agir eux-mêmes sur la granulométrie et la distribution des sédiments. Les peuplements de proximité vont en être modifiés (par exemple, remplacement des filtreurs par des détritivores, adaptation des peuplements à des faciès envasés...). Ils peuvent être aussi un obstacle à la migration des alevins de poissons. A contrario, les parties immergées des mêmes quais constituent un support favorable à la fixation de nombreux organismes et délimitent des espaces et refuges pour les formes juvéniles de poissons et crustacés. Dès lors, nous pouvons considérer cette action comme nulle. (D. Amoureux, 2001)

### VII.3.4 Mesures pour les zones résidentielles avoisinantes

**Réduction des nuisances :** Utilisation de barrières acoustiques et de technologies de construction silencieuses pour réduire les nuisances sonores durant les travaux. Planification des travaux les plus bruyants en dehors des heures de pointe et des périodes de repos.

**Amélioration des infrastructures :** Mise en place de voies de contournement pour le transport de marchandises afin de réduire le passage des camions en zone urbaine. Installation de systèmes de filtration pour réduire les émissions de poussières. Pour illustrer cela, pour le trafic d'urée, il est prévu que tout rentrera dans l'ordre avec la réalisation d'un convoyeur reliant

l'usine d'urée au futur Môle 5 et les 1,2 million de tonnes/an passeront inaperçus et sans effets néfastes à l'environnement. De ce fait, l'exploitation du convoyeur pourrait épargner l'environnement de la pollution. Aussi, le nouveau môle pourrait facilement traiter 4 millions de tonnes par an sans compter le volume conteneurisé avec une réduction de séjour des navires qui va être entre 3 à 5 jours. (F. KORBAA, 2023)

### VII.4 Contrôle et suivi

Pendant la construction, un responsable environnement sera désigné sur le chantier pour mettre en place l'analyse environnementale du site, programmer des actions de formation, et contrôler le respect des consignes environnementales.

- Pour la gestion des déchets : Collecte et évacuation des déchets solides ménagers, pour garantir cela, un bac sur le chantier sera mis à la disposition des ouvriers et une évacuation est prévue tous les deux jours à la décharge principale. Pour la collecte et l'évacuation des déchets de constructions, afin de faciliter le traitement des déchets de construction un système de tri sera adopté par la mise en place des bennes dans le chantier et une signalisation de la zone d'évacuation se fera par ruban de balisage.
- Limitation de la vitesse des engins dans les chantiers et en ville et cela par l'installation de panneaux de signalisation et la sensibilisation des conducteurs d'engin.
- Placer des bâches de protection au-dessus des bennes pour éviter la propagation des poussières pendant le stockage et le transport des déchets

## **CONCLUSION GENERALE**

---

## Conclusion Générale

En conclusion, ce projet de fin d'études a représenté une véritable plongée au cœur des travaux publics appliqués aux infrastructures portuaires. La collaboration avec China Harbour Engineering Company et le Laboratoire d'Etudes Maritimes lors de notre stage de trois mois a été une expérience formatrice, où nous avons pu mettre en pratique les concepts théoriques appris en cours. Cette immersion dans le monde professionnel nous a permis de comprendre l'importance de la rigueur, de la précision et de l'innovation dans la réalisation de projets d'une telle envergure.

Le travail sur l'aménagement du môle commercial n°5 au Port d'Arzew n'a pas été facile, il a renforcé notre conviction quant à l'importance cruciale des infrastructures portuaires. Nous avons beaucoup appris ; lire une norme de conception, rédiger une note de calcul, utiliser des logiciels de modélisation et de conception ainsi que d'interpréter les résultats. Nous avons aussi beaucoup tiré :

- Le critère de choix entre un quai en caisson et un quai en blocs est la profondeur ; en effet plus la profondeur augmente plus on privilégie le caisson car il résiste mieux, généralement c'est au-delà d'environ 10 m qu'on ne peut plus faire appel aux blocs.
- Pour le calcul des poussées, le calcul sans frottement permet de se placer en sécurité (poussée plus importante).
- Après la détermination des efforts résultants sous différentes combinaisons de chargement, il faut vérifier sur la base du fascicule 62 Titre V: La capacité portante du sol (stabilité au poinçonnement), le renversement et glissement.
- En milieu marin, la fissuration est considérée comme très préjudiciable.
- Les deux critères physiques les plus importants pour la classification des sols en vue des dragages sont la granulométrie, et la cohésion.
- Le choix de l'équipement de dragage le plus adapté et le plus économique est conditionné par : les caractéristiques du sol, les contraintes nautiques (hauteur d'eau, courants, houle), la distance de transport (site de dépôt)
- Les différents types de dragues sont : les dragues mécaniques, les dragues hydrauliques, les dragues pneumatiques (déroctage).
- Les quatre étapes de l'EIE sont : l'analyse de l'état initial, identification des impacts du projet sur l'environnement, évaluation des effets, contrôle et le suivi.

En définitive, ce mémoire de PFE et cette expérience de stage nous ont permis de grandir en tant qu'ingénieurs en travaux publics, en nous confrontant à des défis techniques et en nous poussant à repousser nos limites. Nous sommes désormais prêts à relever de nouveaux défis et à contribuer de manière significative au domaine passionnant des travaux maritimes et des infrastructures portuaires.

## **Bibliographie**

---

# Références bibliographiques

- [1] Technique de l'ingénieur, Ports de commerce et de pêche - Aménagement et équipements intérieurs (1994)
- [2] Gregory P. Tsinker. Handbook of port and harbor engineering : geotechnical and structural aspects.
- [3] Gregory Paul Makusa, Stabilization-Solidification of Higher Water Content Dredged Sediments
- [4] Claude Alzieu, Dragages et environnement marin (1999)
- [5] Franck AGOSTINI, Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins (2006)
- [6] Abdul Siddij Hossain, Improvement of Dredged Sediments (2017)
- [7] Jan van't Hoff, Aart Nooy van der Kolff, Hydraulic Fill Manual (2012)
- [8] Fouad KOBRAA, la Gouvernance Des Plateformes Portuaires (2023)
- [9] Jean-Pierre Mouglin, Béton Armé, EYOLLES (2006)
- [10] Gregory P. Tsinker, Port Engineering : Planning, construction, maintenance and security (2004)
- [11] Hafid TABET. Ouvrages d'accostage 0405.pdf | Séminaire sur la maintenance des infrastructures portuaires LEM, 10-11 avril 2005-Alger.
- [12] Ministère de l'habitat, Règles parasismiques algériennes RPA 99/version 2003.
- [13] Ministère des travaux publics. Règles para-sismique applicable au domaine des ouvrages d'art, RPOA 2008.
- [14] Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- [15] Fascicule n°62 - Titre V : Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil.
- [16] Eurocode 2 partie 3 annexe informative n°2 : Soil pressure distribution
- [17] Quais-poids - Annexe : Détermination de la contrainte de référence sous une fondation superficielle, extrait de ROSA 2000 édition n°1 – © METL / CETMEF
- [18] J. Costet, G. Sanglerat, cours pratique de mécanique des sols, DUNOD (1981)
- [19] Recommandations du comité pour les ouvrages riverains, les ports et les chenaux, EAU (2004)

[20] PIANC RAPPORT N° 180-2015 Instructions pour la protection des structures d'accostage contre les coulées causées par les navires

[21] Eurocode 7: Calcul géotechnique Partie 1: Règles générales

[22] BS 8004:1986 Code de pratique pour Fondations

[23] Braja M.Das Principes de l'étude géotechnique (cinquième édition), 2006

[24] J. CHAPON, Travaux Maritimes TOM I, II, EYROLLES 1984

## Références - webographie

[https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-portguadeloupe/site/DOCS/ETUDES\\_MO/QUAI\\_POIDS/NDC\\_CAISSON\\_COURANT\\_CLASSE\\_B.PDF](https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-portguadeloupe/site/DOCS/ETUDES_MO/QUAI_POIDS/NDC_CAISSON_COURANT_CLASSE_B.PDF) [consulté le 25/04/2024]

<https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/SB-OA-2016-2.pdf> [consulté le 12/03/2024]

[http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/Sergent\\_Guide\\_RF\\_2\\_sept2012.pdf](http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/Sergent_Guide_RF_2_sept2012.pdf) [consulté le 25/04/2024]

<https://core.ac.uk/download/pdf/39986141.pdf> [consulté le 29/05/2024]

<https://www.arzewports.dz> [consulté du 03/2024 au 06/2024]

## Programmes et logiciels

AUTODESK Robot Structural Analysis 2025 (License Etudiant)

AUTODESK AutoCAD 2024 (License Etudiant)

Expert BA 2015

Microsoft Office (Word, Excel)

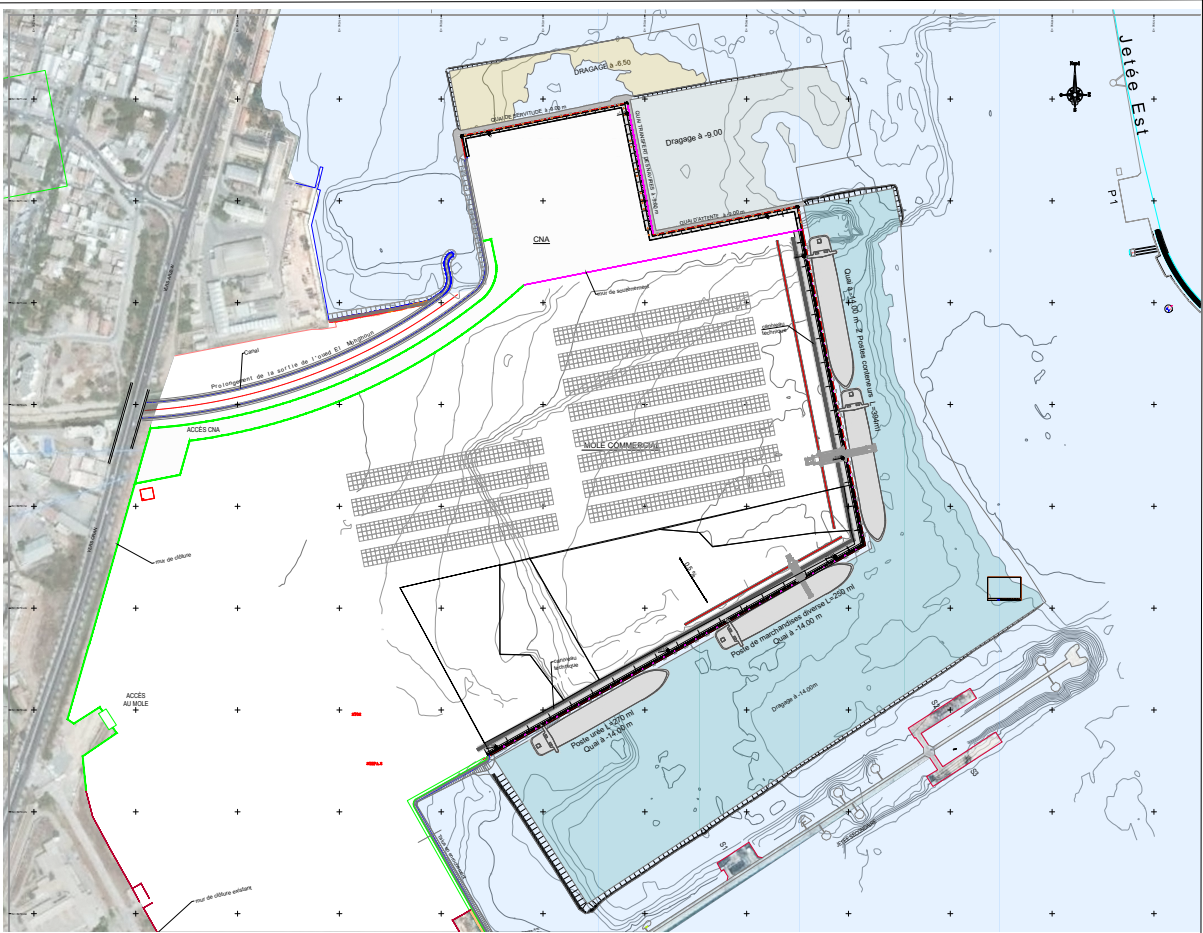
## **ANNEXES**

---

# **Annexe A – Levé topo-bathymétrique**



# **Annexe B – Plan de la variante retenue**



| CARACTERISTIQUES TECHNIQUES CMA |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| - Quai de service à 6.50        | = 205.17 m Avancée 20.74m  |
| - Quai transfert des navires    | = 165.00 m Avancée 35.00 m |
| - Quai d'attente à 9.00         | = 180 m                    |
| - Dragage à -6.00               | S=13.14                    |
| - Dragage à -9.00               | S=3.2 Ha                   |

| CARACTERISTIQUES TECHNIQUES MOLE COMMERCIAL      |           |
|--|-----------|
| - Poste marchandises diverses à -14.00m          | =250 ml   |
| - Poste urée à -14.00m                           | =270 ml   |
| - 2 Poste à conteneurs à -14.00m                 | =394 ml   |
| - Terre plein                                    | S=3.16 Ha |
| - Mur Ouvre                                      | L=1500m   |
| - Mur de soutènement                             | L=450m    |
| - cariveau technique                             | L=910m    |
| - Dragage à -14.00                               | S=16 Ha   |
| - Prolongement de la sortie de l'oued El Mehroun | = 420 m   |



Adresse : Rue Sidi Garidi b.p. 32 Vieux Kouba -16051, Alger  
 Fax : (023) 70 19 38 Site web : [www.enstp.edu.dz](http://www.enstp.edu.dz)  
 Tel : (023) 70 19 04 E-mail : [enstp@enstp.edu.dz](mailto:enstp@enstp.edu.dz)

| PROJET DE FIN D'ETUDES  | Réalisé par               | Encadré par                        | Echelle | N° Planche   | Année universitaire |
|---|---------------------------|------------------------------------|---------|--------------|---------------------|
| Etude d'Aménagement du Bassin de l'Oued El Mehroun et de l'appointement Méthanier (ex. Jetée Méthane) en Môle Commercial no.5 ou Port d'Arzew | Adel ISSAD<br>Sihem HAKEM | M. Douaal RAHMANI<br>M. Ahmed ADEL | 1/500   | Planche no.2 | 2023 / 2024         |

## Annexe C – Résultats de calcul de la stabilité au poinçonnement

| Les combinaisons |                            | FH<br>(kNml) | FV<br>(kN/ml) | MH<br>(kN.m/ml) | MV<br>(kN.m/ml) | E          | $\delta$   | B' (m)     | $q_{ref}$ (kPa)<br>(Meyrhof) |
|------------------|----------------------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|------------------------------|
| ELU              | 1,15G+1,5(Q1+Q3)+1,4<br>Q2 | 1008,6345    | 5238,6465     | 8527,625        | 53438,5175      | 0,42700457 | 0,19020963 | 14,1459909 | 370,327293                   |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q4)+1,4<br>Q2 | 1126,0395    | 5238,6465     | 9803,27         | 53438,5175      | 0,67051117 | 0,21172699 | 13,6589777 | 383,531376                   |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q5)+1,4<br>Q2 | 1050,7395    | 6182,4465     | 10055,9015      | 56269,9175      | 1,52496305 | 0,1683467  | 11,9500739 | 517,356341                   |
| ELS              | G+Q1+Q2+Q3                 | 779,21       | 4 509,51      | 6435,87         | 45 643,25       | 0,30562301 | 0,17110307 | 14,388754  | 313,405178                   |
|                  | G+Q1+Q2+Q4                 | 857,48       | 4509,51       | 7286,3          | 45643,25        | 0,49420891 | 0,187906   | 14,0115822 | 321,841598                   |
|                  | G+Q1+Q2+Q5                 | 807,28       | 5138,71       | 7454,721        | 47530,85        | 1,20113044 | 0,15582422 | 12,5977391 | 407,90732                    |
| ELA              | G+Q1+SI (ascendant)        | 2770,9       | 8716,05       | 21580,58        | 88497,7         | 1,3225406  | 0,30780391 | 15,3549188 | 567,638951                   |
|                  | G+Q1+SI (descendant)       | 2656,99      | 9239,97       | 20749,51        | 92599,04        | 1,22405159 | 0,27999967 | 15,5518968 | 594,137816                   |

| Les combinaisons |                            | $i_q = i_\gamma$ | $i_c$      | $q_{lim}$ (kPa) |
|------------------|----------------------------|------------------|------------|-----------------|
| ELU              | 1,15G+1,5(Q1+Q3)+1,4<br>Q2 | 0,7914976        | 0,76907799 | 820,937525      |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q4)+1,4<br>Q2 | 0,76852677       | 0,74363718 | 782,196617      |
|                  | 1,15G+1,5(Q1+Q5)+1,4<br>Q2 | 0,82179347       | 0,80263148 | 791,071559      |
| ELS              | G+Q1+Q2+Q3                 | 0,80969338       | 0,7892303  | 848,105425      |
|                  | G+Q1+Q2+Q4                 | 0,79167          | 0,76926892 | 817,380859      |
|                  | G+Q1+Q2+Q5                 | 0,83253479       | 0,81452778 | 821,185556      |
| ELA              | G+Q1+SI (ascendant)        | 0,66386575       | 0,62772228 | 707,214921      |
|                  | G+Q1+SI (descendant)       | 0,69652258       | 0,6638906  | 749,770786      |

# Annexe D – Tableaux relatifs au chap. de ferrailage

Tableau 09-I :  $\beta_u = f(\mu)$  pour  $\mu \leq \mu_{limite}$

$$A_s = \beta_u \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{bc}}{\sigma_{su}}$$

| $\mu$ | $\beta$ | $\mu$ | $\beta$ | $\mu$ | $\beta$ | $\mu$ | $\beta$ | $\mu$ | $\beta$ |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 0,002 | 0,0020  | 0,102 | 0,1078  | 0,202 | 0,2280  | 0,302 | 0,3707  | 0,402 | 0,5573  |
| 0,004 | 0,0040  | 0,104 | 0,1108  | 0,204 | 0,2306  | 0,304 | 0,3739  | 0,404 | 0,5618  |
| 0,006 | 0,0061  | 0,106 | 0,1131  | 0,206 | 0,2332  | 0,306 | 0,3771  | 0,406 | 0,5664  |
| 0,008 | 0,0081  | 0,108 | 0,1153  | 0,208 | 0,2358  | 0,308 | 0,3803  | 0,408 | 0,5710  |
| 0,010 | 0,0102  | 0,110 | 0,1176  | 0,210 | 0,2384  | 0,310 | 0,3836  | 0,410 | 0,5757  |
| 0,012 | 0,0122  | 0,112 | 0,1198  | 0,212 | 0,2411  | 0,312 | 0,3868  | 0,412 | 0,5805  |
| 0,014 | 0,0143  | 0,114 | 0,1221  | 0,214 | 0,2437  | 0,314 | 0,3901  | 0,414 | 0,5853  |
| 0,016 | 0,0163  | 0,116 | 0,1244  | 0,216 | 0,2463  | 0,316 | 0,3934  | 0,416 | 0,5901  |
| 0,018 | 0,0184  | 0,118 | 0,1267  | 0,218 | 0,2490  | 0,318 | 0,3967  | 0,418 | 0,5950  |
| 0,020 | 0,0205  | 0,120 | 0,1290  | 0,220 | 0,2517  | 0,320 | 0,4000  | 0,420 | 0,6000  |
| 0,022 | 0,0225  | 0,122 | 0,1313  | 0,222 | 0,2543  | 0,322 | 0,4033  | 0,422 | 0,6050  |
| 0,024 | 0,0248  | 0,124 | 0,1336  | 0,224 | 0,2570  | 0,324 | 0,4067  | 0,424 | 0,6101  |
| 0,026 | 0,0267  | 0,126 | 0,1359  | 0,226 | 0,2597  | 0,326 | 0,4101  | 0,426 | 0,6153  |
| 0,028 | 0,0288  | 0,128 | 0,1382  | 0,228 | 0,2624  | 0,328 | 0,4135  | 0,428 | 0,6205  |
| 0,030 | 0,0309  | 0,130 | 0,1405  | 0,230 | 0,2652  | 0,330 | 0,4169  | 0,430 | 0,6258  |
| 0,032 | 0,0330  | 0,132 | 0,1428  | 0,232 | 0,2679  | 0,332 | 0,4203  | 0,432 | 0,6312  |
| 0,034 | 0,0351  | 0,134 | 0,1452  | 0,234 | 0,2706  | 0,334 | 0,4238  | 0,434 | 0,6367  |
| 0,036 | 0,0372  | 0,136 | 0,1475  | 0,236 | 0,2734  | 0,336 | 0,4273  | 0,436 | 0,6422  |
| 0,038 | 0,0393  | 0,138 | 0,1498  | 0,238 | 0,2761  | 0,338 | 0,4308  | 0,438 | 0,6478  |
| 0,040 | 0,0414  | 0,140 | 0,1522  | 0,240 | 0,2789  | 0,340 | 0,4343  | 0,440 | 0,6536  |
| 0,042 | 0,0435  | 0,142 | 0,1546  | 0,242 | 0,2817  | 0,342 | 0,4379  | 0,442 | 0,6594  |
| 0,044 | 0,0456  | 0,144 | 0,1569  | 0,244 | 0,2845  | 0,344 | 0,4414  | 0,444 | 0,6653  |
| 0,046 | 0,0477  | 0,146 | 0,1593  | 0,246 | 0,2873  | 0,346 | 0,4450  | 0,446 | 0,6714  |
| 0,048 | 0,0498  | 0,148 | 0,1617  | 0,248 | 0,2901  | 0,348 | 0,4486  | 0,448 | 0,6775  |
| 0,050 | 0,0519  | 0,150 | 0,1641  | 0,250 | 0,2929  | 0,350 | 0,4523  | 0,450 | 0,6838  |
| 0,052 | 0,0541  | 0,152 | 0,1664  | 0,252 | 0,2957  | 0,352 | 0,4559  | 0,452 | 0,6902  |
| 0,054 | 0,0562  | 0,154 | 0,1688  | 0,254 | 0,2986  | 0,354 | 0,4596  | 0,454 | 0,6967  |
| 0,056 | 0,0583  | 0,156 | 0,1713  | 0,256 | 0,3014  | 0,356 | 0,4633  | 0,456 | 0,7034  |
| 0,058 | 0,0604  | 0,158 | 0,1737  | 0,258 | 0,3043  | 0,358 | 0,4671  | 0,458 | 0,7102  |
| 0,060 | 0,0626  | 0,160 | 0,1761  | 0,260 | 0,3072  | 0,360 | 0,4708  | 0,460 | 0,7172  |
| 0,062 | 0,0647  | 0,162 | 0,1785  | 0,262 | 0,3101  | 0,362 | 0,4746  | 0,462 | 0,7243  |
| 0,064 | 0,0668  | 0,164 | 0,1809  | 0,264 | 0,3130  | 0,364 | 0,4785  | 0,464 | 0,7317  |
| 0,066 | 0,0690  | 0,166 | 0,1834  | 0,266 | 0,3159  | 0,366 | 0,4823  | 0,466 | 0,7392  |
| 0,068 | 0,0711  | 0,168 | 0,1858  | 0,268 | 0,3188  | 0,368 | 0,4862  | 0,468 | 0,7470  |
| 0,070 | 0,0732  | 0,170 | 0,1883  | 0,270 | 0,3218  | 0,370 | 0,4901  | 0,470 | 0,7551  |
| 0,072 | 0,0754  | 0,172 | 0,1908  | 0,272 | 0,3247  | 0,372 | 0,4940  | 0,472 | 0,7634  |
| 0,074 | 0,0775  | 0,174 | 0,1932  | 0,274 | 0,3277  | 0,374 | 0,4980  | 0,474 | 0,7720  |
| 0,076 | 0,0797  | 0,176 | 0,1957  | 0,276 | 0,3307  | 0,376 | 0,5020  | 0,476 | 0,7809  |
| 0,078 | 0,0818  | 0,178 | 0,1982  | 0,278 | 0,3337  | 0,378 | 0,5060  | 0,478 | 0,7902  |
| 0,080 | 0,0840  | 0,180 | 0,2007  | 0,280 | 0,3367  | 0,380 | 0,5101  | 0,480 | 0,8000  |
| 0,082 | 0,0861  | 0,182 | 0,2032  | 0,282 | 0,3397  | 0,382 | 0,5142  |       |         |
| 0,084 | 0,0883  | 0,184 | 0,2057  | 0,284 | 0,3427  | 0,384 | 0,5183  |       |         |
| 0,086 | 0,0904  | 0,186 | 0,2075  | 0,286 | 0,3458  | 0,386 | 0,5225  |       |         |
| 0,088 | 0,0926  | 0,188 | 0,2101  | 0,288 | 0,3488  | 0,388 | 0,5267  |       |         |
| 0,090 | 0,0948  | 0,190 | 0,2128  | 0,290 | 0,3519  | 0,390 | 0,5310  |       |         |
| 0,092 | 0,0989  | 0,192 | 0,2151  | 0,292 | 0,3550  | 0,392 | 0,5352  |       |         |
| 0,094 | 0,0991  | 0,194 | 0,2177  | 0,294 | 0,3581  | 0,394 | 0,5396  |       |         |
| 0,096 | 0,1013  | 0,196 | 0,2203  | 0,296 | 0,3613  | 0,396 | 0,5439  |       |         |
| 0,098 | 0,1034  | 0,198 | 0,2228  | 0,298 | 0,3644  | 0,398 | 0,5483  |       |         |
| 0,100 | 0,1056  | 0,200 | 0,2254  | 0,300 | 0,3675  | 0,400 | 0,5526  |       |         |

Tableau 10-IX : Dimensionnement des aciers à l'ELS lorsque la condition de fissuration est la plus défavorable

$$u = \frac{30 M_{ser}}{b d^2 \sigma_s} - \alpha = \frac{y}{d} - \rho = \frac{A_s}{b d} - k = \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_s}$$

| u    | α      | 1000 ρ | k      | u    | α      | 1000 ρ | k      | u    | α      | 1000 ρ | k      |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| 0,02 | 0,1346 | 0,698  | 0,0104 | 0,82 | 0,6240 | 34,51  | 0,1106 | 1,62 | 0,7434 | 71,79  | 0,1931 |
| 0,04 | 0,1863 | 1,422  | 0,0153 | 0,84 | 0,6284 | 35,42  | 0,1127 | 1,64 | 0,7454 | 72,74  | 0,1952 |
| 0,06 | 0,2243 | 2,162  | 0,0193 | 0,86 | 0,6327 | 36,33  | 0,1148 | 1,66 | 0,7474 | 73,69  | 0,1972 |
| 0,08 | 0,2552 | 2,915  | 0,0228 | 0,88 | 0,6369 | 37,24  | 0,1169 | 1,68 | 0,7493 | 74,64  | 0,1992 |
| 0,10 | 0,2816 | 3,679  | 0,0261 | 0,90 | 0,6410 | 38,15  | 0,1190 | 1,70 | 0,7512 | 75,60  | 0,2013 |
| 0,12 | 0,3047 | 4,452  | 0,0292 | 0,92 | 0,6450 | 39,07  | 0,1211 | 1,72 | 0,7531 | 76,55  | 0,2033 |
| 0,14 | 0,3255 | 5,235  | 0,0322 | 0,94 | 0,6489 | 39,98  | 0,1232 | 1,74 | 0,7549 | 77,50  | 0,2053 |
| 0,16 | 0,3443 | 6,025  | 0,0350 | 0,96 | 0,6527 | 40,90  | 0,1253 | 1,76 | 0,7567 | 78,46  | 0,2074 |
| 0,18 | 0,3615 | 6,822  | 0,0377 | 0,98 | 0,6565 | 41,82  | 0,1274 | 1,78 | 0,7585 | 79,41  | 0,2094 |
| 0,20 | 0,3774 | 7,626  | 0,0404 | 1,00 | 0,6601 | 42,74  | 0,1295 | 1,80 | 0,7603 | 80,37  | 0,2114 |
| 0,22 | 0,3922 | 8,436  | 0,0430 | 1,02 | 0,6637 | 43,66  | 0,1316 | 1,82 | 0,7620 | 81,32  | 0,2134 |
| 0,24 | 0,4060 | 9,252  | 0,0456 | 1,04 | 0,6672 | 44,58  | 0,1336 | 1,84 | 0,7637 | 82,28  | 0,2155 |
| 0,26 | 0,4190 | 10,07  | 0,0481 | 1,06 | 0,6706 | 45,51  | 0,1357 | 1,86 | 0,7654 | 83,24  | 0,2175 |
| 0,28 | 0,4313 | 10,90  | 0,0506 | 1,08 | 0,6739 | 46,43  | 0,1378 | 1,88 | 0,7671 | 84,19  | 0,2195 |
| 0,30 | 0,4428 | 11,73  | 0,0530 | 1,10 | 0,6772 | 47,36  | 0,1399 | 1,90 | 0,7687 | 85,15  | 0,2215 |
| 0,32 | 0,4538 | 12,57  | 0,0554 | 1,12 | 0,6804 | 48,28  | 0,1419 | 1,92 | 0,7703 | 86,11  | 0,2236 |
| 0,34 | 0,4642 | 13,41  | 0,0578 | 1,14 | 0,6835 | 49,21  | 0,1440 | 1,94 | 0,7719 | 87,07  | 0,2256 |
| 0,36 | 0,4742 | 14,25  | 0,0601 | 1,16 | 0,6866 | 50,14  | 0,1461 | 1,96 | 0,7735 | 88,03  | 0,2276 |
| 0,38 | 0,4837 | 15,10  | 0,0624 | 1,18 | 0,6896 | 51,07  | 0,1481 | 1,98 | 0,7750 | 88,99  | 0,2296 |
| 0,40 | 0,4927 | 15,95  | 0,0648 | 1,20 | 0,6926 | 52,01  | 0,1502 | 2,00 | 0,7765 | 89,95  | 0,2317 |
| 0,42 | 0,5014 | 16,81  | 0,0670 | 1,22 | 0,6955 | 52,94  | 0,1522 | 2,02 | 0,7780 | 90,91  | 0,2337 |
| 0,44 | 0,5098 | 17,67  | 0,0693 | 1,24 | 0,6983 | 53,87  | 0,1543 | 2,04 | 0,7795 | 91,87  | 0,2357 |
| 0,46 | 0,5178 | 18,53  | 0,0716 | 1,26 | 0,7011 | 54,81  | 0,1564 | 2,06 | 0,7810 | 92,83  | 0,2377 |
| 0,48 | 0,5255 | 19,40  | 0,0738 | 1,28 | 0,7038 | 55,74  | 0,1584 | 2,08 | 0,7824 | 93,80  | 0,2398 |
| 0,50 | 0,5329 | 20,27  | 0,0761 | 1,30 | 0,7065 | 56,68  | 0,1605 | 2,10 | 0,7839 | 94,76  | 0,2418 |
| 0,52 | 0,5401 | 21,14  | 0,0783 | 1,32 | 0,7091 | 57,62  | 0,1625 | 2,12 | 0,7853 | 95,72  | 0,2438 |
| 0,54 | 0,5470 | 22,01  | 0,0805 | 1,34 | 0,7117 | 58,56  | 0,1646 | 2,14 | 0,7867 | 96,69  | 0,2458 |
| 0,56 | 0,5536 | 22,89  | 0,0827 | 1,36 | 0,7142 | 59,50  | 0,1666 | 2,16 | 0,7880 | 97,65  | 0,2478 |
| 0,58 | 0,5601 | 23,77  | 0,0849 | 1,38 | 0,7167 | 60,44  | 0,1687 | 2,18 | 0,7894 | 98,61  | 0,2499 |
| 0,60 | 0,5663 | 24,65  | 0,0871 | 1,40 | 0,7191 | 61,38  | 0,1707 | 2,20 | 0,7907 | 99,58  | 0,2519 |
| 0,62 | 0,5724 | 25,54  | 0,0892 | 1,42 | 0,7215 | 62,32  | 0,1727 | 2,22 | 0,7920 | 100,5  | 0,2539 |
| 0,64 | 0,5782 | 26,43  | 0,0914 | 1,44 | 0,7239 | 63,27  | 0,1748 | 2,24 | 0,7933 | 101,5  | 0,2559 |
| 0,66 | 0,5839 | 27,32  | 0,0936 | 1,46 | 0,7262 | 64,21  | 0,1768 | 2,26 | 0,7946 | 102,5  | 0,2579 |
| 0,68 | 0,5894 | 28,21  | 0,0957 | 1,48 | 0,7285 | 65,15  | 0,1789 | 2,28 | 0,7959 | 103,4  | 0,2599 |
| 0,70 | 0,5948 | 29,10  | 0,0979 | 1,50 | 0,7307 | 66,10  | 0,1809 | 2,30 | 0,7971 | 104,4  | 0,2620 |
| 0,72 | 0,6000 | 30,00  | 0,1000 | 1,52 | 0,7329 | 67,05  | 0,1830 | 2,32 | 0,7984 | 105,4  | 0,2640 |
| 0,74 | 0,6051 | 30,90  | 0,1021 | 1,54 | 0,7351 | 67,99  | 0,1850 | 2,34 | 0,7996 | 106,3  | 0,2660 |
| 0,76 | 0,6100 | 31,80  | 0,1043 | 1,56 | 0,7372 | 68,94  | 0,1870 | 2,36 | 0,8008 | 107,3  | 0,2680 |
| 0,78 | 0,6148 | 32,70  | 0,1064 | 1,58 | 0,7393 | 69,89  | 0,1891 | 2,38 | 0,8020 | 108,3  | 0,2700 |
| 0,80 | 0,6194 | 33,61  | 0,1085 | 1,60 | 0,7414 | 70,84  | 0,1911 | 2,40 | 0,8032 | 109,2  | 0,2720 |

# **Annexe E – Compagne géotechnique du produit de dragage**

## Annexe F – Engins de dragage



|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Désignation:  | TIAN QI HAO                    |
| Type du bateau  | Drague suceuse à désagregateur |
| IMO NO or ID NO( Numero de l'omi ou numero d'identification du navire ) | -                              |
| Poète du registre   | TIAN JIN                       |
| Date de fabrication   | 2009                           |
| Longueur  | 120m                           |
| Largeur   | 20.3m                          |
| Profondeur  | 6.6m                           |
| Tonnage brut  | 4950t                          |
| Matière de la coque   | Acier                          |
| Puissance nominale  | 17200KW                        |



|   |                         |
|---|-------------------------|
| <b>Désignation:</b>   | <b>JIN HANG TING 39</b> |
| <b>Type du bateau</b>   | Bateau à ancre          |
| <b>IMO NO or ID NO ( Numero de l'omi ou numero d'identification du navire )</b> | 412017780               |
| <b>Poète du registre</b>  | TIAN JIN                |
| <b>Date de fabrication</b>  | 2009                    |
| <b>Longueur</b>   | 30.52m                  |
| <b>Largeur</b>  | 10m                     |
| <b>Profondeur</b>   | 3.4m                    |
| <b>Tonnage brut</b>   | 284t                    |
| <b>Matière de la coque</b>  | En acier                |
| <b>Puissance nominale</b>   | 1089KW                  |



|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Désignation:</b>   | <b>DA RUN 36</b> |
| <b>Type du bateau</b>   | Drague           |
| <b>IMO NO or ID NO ( Numero de l'omi ou numero d'identification du navire )</b> | 8785527          |
| <b>Poète du registre</b>  | MALARAL HARBOR   |
| <b>Date de fabrication</b>  | 2012             |
| <b>Longueur</b>   | 56.2m            |
| <b>Largeur</b>  | 22.5m            |
| <b>Profondeur</b>   | 4.6m             |
| <b>Tonnage brut</b>   | 2185t            |
| <b>Matière de la coque</b>  | En acier         |
| <b>Puissance nominale</b>   | 912KW            |



|  |                  |
|--|------------------|
| <b>Désignation:</b>  | <b>DA RUN 38</b> |
| <b>Type du bateau</b>  | Barge à boue     |
| <b>IMO NO or ID NO( Numero de l'omi ou numero d'identification du navire )</b> | 8785503          |
| <b>Poète du registre</b>   | MALARAL HARBOR   |
| <b>Date de fabrication</b>   | 2011             |
| <b>Longueur</b>  | 63.5m            |
| <b>Largeur</b>   | 14m              |
| <b>Profondeur</b>  | 4.8m             |
| <b>Tonnage brut</b>  | 1396t            |
| <b>Matière de la coque</b>   | En acier         |
| <b>Puissance nominale</b>  | 1202KW           |



|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Désignation:</b>   | <b>DA RUN 39</b> |
| <b>Type du bateau</b>   | Barge à boue     |
| <b>IMO NO or ID NO (Numero de l'omi ou numero d'identification du navire)</b> | 8785498          |
| <b>Poète du registre</b>  | MALARAL HARBOR   |
| <b>Date de fabrication</b>  | 2011             |
| <b>Longueur</b>   | 63.5m            |
| <b>Largeur</b>  | 14m              |
| <b>Profondeur</b>   | 4.8m             |
| <b>Tonnage brut</b>   | 1396t            |
| <b>Matière de la coque</b>  | En acier         |
| <b>Puissance nominale</b>   | 1202KW           |



|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Désignation:</b>   | <b>DA RUN 77</b> |
| <b>Type du bateau</b>   | Bateau à ancre   |
| <b>IMO NO or ID NO (Numero de l'omi ou numero d'identification du navire)</b> | A0000244         |
| <b>Poet of Registry Poète du registre</b>                                     | MALARAL HARBOR   |
| <b>Date de fabrication</b>  | 2017             |
| <b>Longueur</b>   | 15.5m            |
| <b>Largeur</b>  | 5.8m             |
| <b>Profondeur</b>   | 2.25m            |
| <b>Tonnage brut</b>   | ???-t            |
| <b>Matière de la coque</b>  | En acier         |
| <b>Puissance nominale</b>   | 515KW            |

## Annexe G – Méthodologie d'exécution des caissons

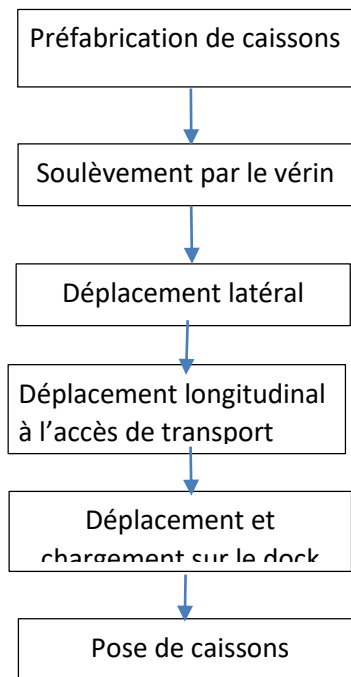
Le caisson est soulevé hors de la fouille par des vérins hydrauliques, il est chargé sur la barge par le boudin gonflable combiné au système de traction et le dock flottant est combinée au poton-grue pour la pose.

### 1- Manutention de caisson

#### Procédure d'exécution

Le caisson est soulevé par le vérin et le boudin gonflable est combiné au treuil pour terminer l'opération du déplacement latéral, de celui longitudinal et du chargement sur la barge.

Procédure d'exécution est comme suit :



*Schéma de la procédure de transport et de pose de caisson*

#### Méthodologie d'exécution

##### 1. Disposition de vérin hydraulique

Le nombre total de caissons préfabriqués dans ce projet est de 61 pièces et le poids de chaque caisson est d'environ 2600 T. Huit vérins de 500 tonnes sont disposés pour répondre aux besoins de levage du caisson hors de la fouille.

##### 2. Soulèvement de caissons

Une fois les vérins installés, l'opération du soulèvement des caissons entamera. Au cours de l'opération, il est important d'observer si les levages de chaque vérin s'ils sont cohérents pour

traiter toute anomalie à temps. Après que le dessus du caisson ait été soulevé à une certaine hauteur par le vérin hydraulique, les traverses du patin de support sont placées.



*Schéma de procédure du soulèvement de caissons*

**Déplacement latéral et longitudinal de caissons**

Le caisson est transporté par boudin gonflable combiné à un système de traction. La manutention des caissons de ce projet adopte des boudins gonflable à ultra haute pression d'un diamètre de 1,0 mètre. Ses paramètres techniques sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| catégorie      | diamètre ( m ) | Pression de fonctionnement ( MPa ) | Pression de test (MPa) | Capacité portante du boudin par mètre ( KN/m ) |                         |                         |
|----------------|----------------|------------------------------------|------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
|                |                |                                    |                        | Hauteur de travail 0.5M                        | Hauteur de travail 0.4M | Hauteur de travail 0.3M |
| Hyper pression | 1.0            | 0.3                                | 0.39                   | 236  | 283                     | 330                     |

Étant donné que les dimensions verticales et horizontales du radier du caisson sont respectivement de 18,0 m et 15,0 m, le boudin d'air d'une longueur de 16,74 m (la longueur utile est de 15 m) est sélectionné pour le mouvement longitudinal du caisson, et le boudin d'air d'une longueur de 18,74 m (avec une longueur utile de 17m) est choisie pour le déplacement latéral du caisson hors de la fouille.



*Schéma du boudin d'air à déplacement longitudinal du caisson*



*Schéma du boudin d'air à déplacement latéral du caisson*

### 3. Embarquement des caissons sur le dock flottant

Une fois le caisson remorqué jusqu'à l'avant du quai de transport, les travaux d'embarquement sur le dock flottant sont transférés au treuil de traction attaché au dock flottant pour terminer l'opération de chargement du caisson.



*L'opération d'embarquement de caissons*

### 2- Pose des caissons

Pour ce projet, il y aura 61 pièces de caissons carrés au total, d'un poids maximum de 2600T par pièce. Il est prévu d'investir dans un ponton-grue de 200 tonnes, un dock flottant de 5000 tonnes et un remorqueur de 3000P. l'efficacité valable est de 6 pièces par mois. Le délai de tâche est de 10,5 mois.

L'installation de caissons préfabriqués dans ce projet, les engins flottants seront introduits à savoir: un dock flottant de 5000T, qui est remorquée par un remorqueur pour transporter les caissons au chantier par la voie maritime à l'aide d'un remorqueur de 3000HP pour l'ancrage et le positionnement du groupe d'engins d'installation, et à l'aide d'un ponton-grue de 200 t pour le positionnement et la pose de caissons.

Calcul du tirant d'eau lors du flottement de caisson dans l'eau

Après le calcul, les tirants d'eau de caisson et de dock flottant chargé dans l'eau sont illustrés dans le tableau suivant :

*Tirant d'eau de caisson et de dock flottant lors du flottement dans l'eau*

| Type de caisson | Tirant d'eau de caisson lors du flottement dans l'eau | Tirant d'eau de dock flottant lors du flottement dans l'eau | Exigence de profondeur de l'emplacement d'immersion |
|-----------------|---|---|---|
| 2600T           | 11.51m  | 16.01m  | 17.0m   |

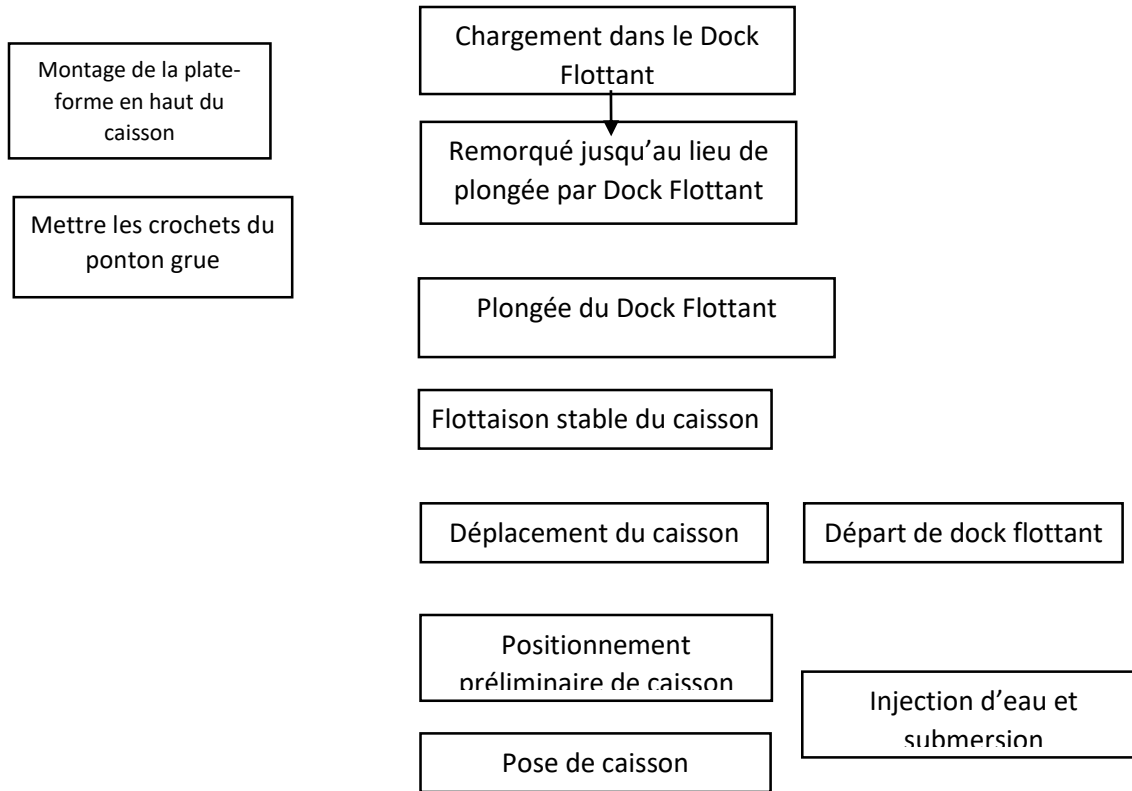
Selon le tableau ci-dessus, l'exigence de la profondeur de mouillage est de 17m pour le dock flottant. La procédure de calcul est mentionnée dans le tableau annexé.

#### Choix de l'emplacement d'immersion du dock flottant

Selon la structure du caisson dans ce projet et la stabilité flottante du caisson, le tirant d'eau du caisson est de 11,51m, la profondeur de dock flottant est de 4,5m, donc, la profondeur d'eau du emplacement immergé est de 16,01m, et la profondeur d'eau du secteur d'eau de projet et du bassin portuaire existant est d'environ -14 m ~ -15 m, incapable de répondre aux besoins de la plongée du dock flottant, compte tenu de la disposition du système d'ancrage submergé du dock flottant et de la position de stationnement du ponton-grue, il est proposé de sélectionner une zone de taille 100 × 80 m comme l'emplacement d'immersion dans le bassin du port du côté est du terminal à conteneurs nouvellement construit. La profondeur moyenne de l'eau de ce bassin est de -15 m, le niveau d'eau normal est de + 0,00 m ~ + 0,5 m et la zone de l'emplacement d'immersion doit être draguée jusqu' à la cote de niveau de -17 m .

## Processus technologique

Le processus de la pose des caissons se divise en étapes suivantes : chargement du caisson sur le dock flottant, transport par voie maritime jusqu'à l'emplacement désigné, submersion du dock flottant, accrochage, déchargement de caissons , inondation et<sup>15</sup> naufrage de caissons, positionnement et pose de caissons, etc. L'organigramme du processus est le suivant :



## Processus technologique de la pose de caisson

### 1. Transport par voie maritime et positionnement

Une fois que l'opération du chargement de caisson sur le dock flottant est terminée, le dock sera remorqué par le remorqueur jusqu'à l'emplacement d'immersion, et faire le mouillage et le positionnement.

### 2. Submersion de dock flottant et déchargement de caisson

Une fois le positionnement terminé, le dock flottant est injectée dans l'eau et plongée, et l'opération d'accrochage est terminée pendant la plongée. Étant donné que la paroi avant du caisson est équipée de trous dissipant les ondes, la paroi avant est plus lourde que la paroi arrière et le caisson peut être équilibré à l'avant et à l'arrière en chargeant de l'eau de ballast. Lorsque le dock flottant plonge au tirant d'eau du caisson, le caisson sera dans un état flottant sous l'action de la flottabilité de l'eau. À l'aide du ponton-grue de 100-150T, qui est utilisé pour le déplacement de caisson, et le sortir du dock flottant.

### 3. Pose sur le lit

Une fois le caisson déchargé du dock flottant, il est levé jusqu'à la position de pose avec l'aide du ponton-grue, l'entrée d'eau du caisson est ouverte et de l'eau est injectée dans le caisson pour que le caisson continue de couler. Lorsque le caisson s'enfonce à environ 50 cm de la surface supérieure du lit de fondation, fermer l'arrivée d'eau du caisson et commencer les travaux de positionnement d'implantation du caisson. Le positionnement fin de l'implantation du caisson est effectué par GPS, et la position et l'angle du caisson sont ajustés grâce au mouvement du ponton-grue et à la traction

des deux câbles en acier suspendus au caisson jusqu'à ce que le caisson soit implanté avec précision. Pendant le processus de pose des caissons, les caissons lourds sont tous à l'état flottant et le ponton-grue ne fournit qu'une traction auxiliaire en position.



Transport par voie maritime



Submersion et déchargement



Plongée de caisson



Positionnement et pose de caisson

*Schéma de processus de la pose de caissons*

**Contrôle topographique**

Durant le processus de la pose du caisson, le contrôle topographique adopte la méthode de GPS-RTK, et la précision de mesure peut atteindre le niveau centimétrique. Une fois la pose du caisson terminée, la station totale est utilisée pour vérifier l'exactitude de la pose et l'observation du déplacement du tassement est effectuée régulièrement.

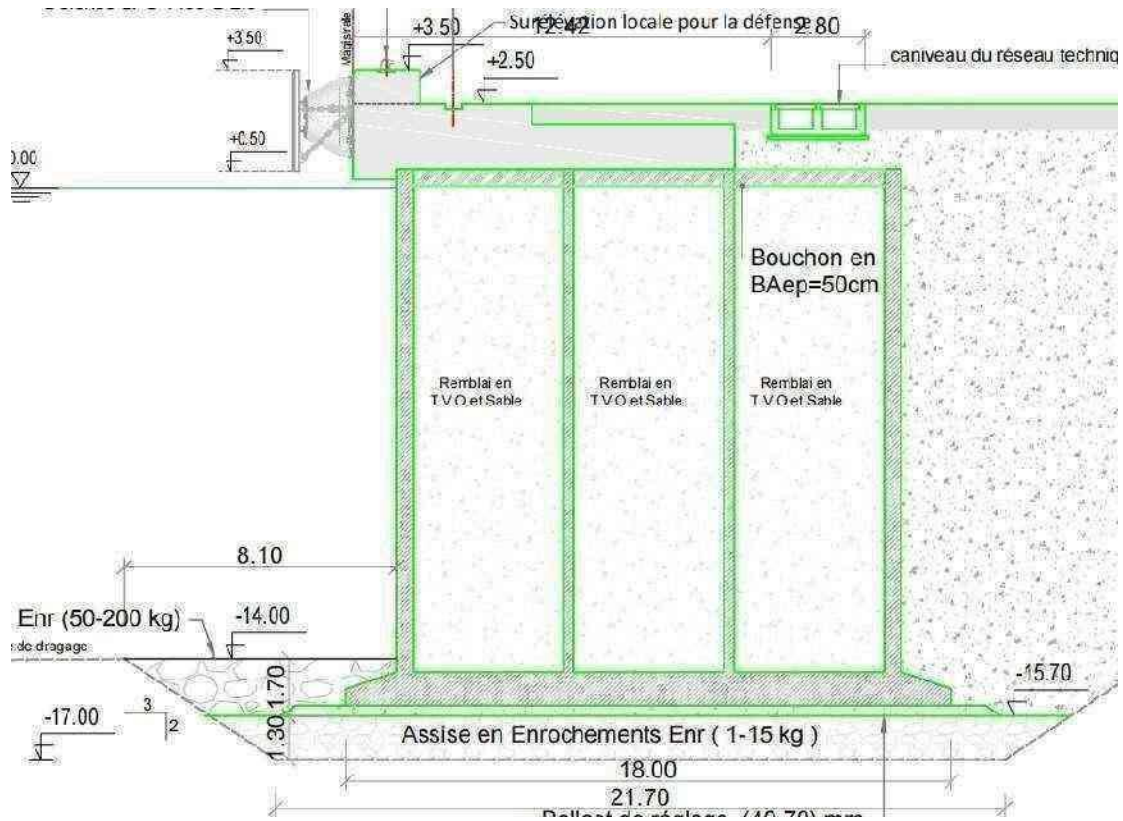
*Engins et matériels prévus à introduire*

| N° | Désignation d'engins         | Quantité | Paramètre technique |
|----|------------------------------|----------|---------------------|
| 1  | Dock flottant                | 1        | 5000t               |
| 2  | Ponton-grue                  | 1        | 200t                |
| 3  | Remorqueur                   | 1        | 3000P               |
| 4  | Embarcation de servitude     | 1        |                     |
| 5  | Grue automobile              | 1        | 50t                 |
| 6  | Pelle hydraulique            | 1        | 1.76m <sup>3</sup>  |
| 7  | Chargeur                     | 1        | m <sup>3</sup>      |
| 8  | Vérin hydraulique            | 10       | 2400t               |
| 9  | Boudin d'air d'hyperpression | 20       | 0.3Mpa              |
| 10 | Treuil                       | 8        |                     |
| 11 | Compresseur d'air            | 1        |                     |
| 12 | Palan                        | 10       | 60t                 |
| 13 | Pompe plongé                 | 18       | 5.5kw               |

**Remplissage de caisson**

Il y a 61 pièces de caisson au total dans ce projet, et les caissons sont remplis par TVO et sable. Le volume de remplissage pour un seul caisson est d'environ 5 738 tonnes et le volume total de remplissage est d'environ 350 000 tonnes. L'exécution du remplissage de caisson est effectuée en suivant la pose du caisson, et le remblayage est effectué à temps après l'achèvement de la pose de caisson, et l'ordre du remblayage suit celui de la pose du caisson. Le remplissage du caisson est effectué par une combinaison de deux procédés : par voie maritime et terrestre. Tout d'abord, 30 %

du remplissage de caisson est complété avec une pelle hydraulique sur le ponton, puis les 70 % restants sont effectués à l'aide de la pelle hydraulique et du camion à benne, du côté terrestre vers la mer.



*Plan de disposition de remplissage de caisson*

# **Annexe H – Analyse Multicritère**



# Méthode mathématique d'analyse multicritère

Les **méthodes mathématiques d'analyse multicritère** ont pour but la résolution des problèmes d'Aide à la décision multicritère<sup>1</sup>. Elles constituent une étape importante du processus de décision, qui suit celle d'identification et de définition du problème, et aboutissent au choix d'une ou plusieurs solutions optimale(s), au sens de Pareto, parmi un ensemble discret de solutions, via une procédure de sélection. Elles permettent également de répondre aux problématiques de tri et de rangement, par l'intermédiaire d'une procédure d'affectation et de classement respectivement.

Ces méthodes sont issues principalement des travaux de Thomas L. Saaty et du chercheur Bernard Roy, créateur du LAMSADE (Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision).

Elles sont confrontées à deux limites : l'une liée au manque de données fiables sur une durée suffisante, ce qui peut empêcher la construction ou la validation de la méthode ; l'autre liée à la technicité inhérente à de telles méthodes puisque ces dernières nécessitent l'usage de concepts délicats qui peuvent déboucher sur des résultats erronés ou une analyse confuse. Ces méthodes héritent également des problèmes informatiques, notamment celui de l'explosion combinatoire.

Il existe de nombreuses méthodes mathématiques d'analyse multicritère, mais celles-ci peuvent être regroupées en deux approches<sup>2</sup> :

- agrégation a priori de critères en un critère unique ;
- approche fondée sur le surclassement<sup>3</sup>.

## Définitions

### Action

L'Aide à la décision multicritère s'intéresse au choix parmi un nombre fini d'actions possibles (projet, investissement, décision, solution, plan, variante, candidat...) pour atteindre un objectif.

### Critère

Un critère est une fonction définie sur l'ensemble des actions représentant les préférences de l'utilisateur selon son point de vue.

### Poids

Le poids mesure l'importance d'un critère par rapport aux autres du point de vue du décideur<sup>4</sup>.

## Agrégation a priori de critères en un critère unique

### Somme pondérée

La méthode de la somme pondérée est connue de par son accessibilité mathématique.

### Formulation mathématique

#### Données de départ

- m actions  $A_1, A_2, A_3 \dots A_m$
- n critères  $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$
- Vecteur poids  $(W_1, W_2, \dots, W_n)$  et  $W_j > 0$
- $a_{ij} = U_j(A_i)$ , fonction d'utilité cardinale quotient, c'est-à-dire que cette fonction représente les écarts en plus de respecter l'ordre et pour laquelle il existe un zéro véritable. Ces données représentent les performances de chaque action sur chacun des critères.

#### Transformation des données

1. Normalisation de tous les  $a_{ij}$  afin de conserver la proportionnalité entre les valeurs.

2. Normalisation des poids (la somme des poids = 1).
3. Mise en œuvre de la méthode Somme pondérée.

**Donc un critère unique pour toute action  $i$**

$$R(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad \forall i \in [1, m]$$

### Exemple d'utilisation de cette méthode

On propose d'appliquer cette méthode au choix de sélection d'une ville ou d'un territoire en fonction de son attractivité à développer les déplacements doux et/ou ayant adopté une démarche de développement durable et notamment avec la réduction des gaz à effet de serre. Il s'agit de trouver la ville ou les villes qui sont les plus attractives sur les 5 villes, puis de les classer de la plus pertinente à la moins pertinente.

### Objet de la décision : Mobilité responsable et développement d'infrastructures pour le développement durable

On considère les six critères suivants :

1. *Attractivité climatique* : C1 : Si un territoire présente un climat doux avec une pluviométrie acceptable, il favorise les déplacements pédestres et des transports doux (vélo,...). Il est évalué à partir de la température moyenne annuelle, du nombre d'heures d'ensoleillement et de la hauteur des précipitations. Ce critère est à **maximiser**.
2. *Accessibilité piéton/vélo* : C2 : Si les différents secteurs de la ville sont accessibles facilement à pied ou à vélo ; si le relief est faiblement pentu : il favorise l'usage de la marche ou la bicyclette. Son indicateur est le % de marche utilisé + % d'usage du vélo. Ce critère est à **maximiser**.
3. *Transports en commun* : C3 : L'usage des transports en commun est lié à la politique locale de l'agglomération qui a favorisé son développement : il s'agit en fait d'un indicateur de l'adhésion des populations à ces transports. Ce critère est à **maximiser**.
4. *Automobile* : C4 : L'usage des véhicules personnels est un indicateur de la ville concernant d'une part son accessibilité, et du comportement urbain des habitants lié à différents facteurs : il est caractérisé par le % d'usage de la voiture dans la mobilité. Ce critère est à **minimiser**.
5. *Mobilité* : C5 : Nombre de déplacement par jour et par habitant. Il exprime soit une nécessité ou un intérêt à se déplacer pour les habitants du territoire. Ce critère est à **minimiser**.
6. *Profil de la population* : C6 : L'indicateur donné est le pourcentage de la population ayant plus de 60 ans. Ce critère est à **maximiser**.

Les valeurs des poids sont données dans le tableau ci-dessous (choix du décideur) :

| Critère | Description               | Poids |
|---------|---------------------------|-------|
| 1       | Attractivité climatique   | 16    |
| 2       | Accessibilité piéton/vélo | 18    |
| 3       | Transports en commun      | 18    |
| 4       | Automobile                | 18    |
| 5       | Mobilité                  | 24    |
| 6       | Profil de la population   | 6     |

Voici la matrice des décisions (tableau des performances) :

| N° Ville | Attractivité climatique | Accessibilité piéton/vélo | Transports en commun | Automobile | Mobilité | profil de la population |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------|----------|-------------------------|
| 1        | 3                       | 32                        | 11                   | 42         | 3,54     | 21,85                   |
| 2        | 2                       | 32                        | 14                   | 41         | 3,63     | 18,6                    |
| 3        | 2                       | 31                        | 7                    | 45         | 3,99     | 12,9                    |
| 4        | 2                       | 32                        | 6                    | 43         | 3,75     | 27,3                    |
| 5        | 2                       | 25                        | 10                   | 49         | 3,52     | 16,5                    |

Afin d'avoir une somme pondérée cohérente, il est nécessaire de ne considérer que des critères à maximiser. Toutefois, les critères *Automobile* et *Mobilité* sont à minimiser. Une transformation de ces données s'impose alors afin d'obtenir deux critères à maximiser. La transformation adéquate est la suivante :

$$\forall j \in [1, n], \quad U_j(A_i) = \max_i(a_{ij}) - a_{ij}$$

Cette transformation maintient les écarts et permet de conserver un zéro véritable, et échange l'ordre afin de considérer alors un critère à maximiser. On les notera  $C_4'$  et  $C_5'$ .

Voici la matrice des décisions sur laquelle la méthode Somme pondérée peut alors s'appliquer :

| N° Ville | Attractivité climatique | Accessibilité piéton/vélo | Transports en commun | Automobile C4' | Mobilité C5' | Profil de la population |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 1        | 3                       | 32                        | 11                   | 7              | 0,45         | 21,85                   |
| 2        | 2                       | 32                        | 14                   | 8              | 0,36         | 18,6                    |
| 3        | 2                       | 31                        | 7                    | 4              | 0            | 12,9                    |
| 4        | 2                       | 32                        | 6                    | 6              | 0,24         | 27,3                    |
| 5        | 2                       | 25                        | 10                   | 0              | 0,47         | 16,5                    |

On applique alors la méthode des Sommes pondérées et on choisit comme procédure de normalisation :

$$v_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}}, \forall i \in [1, m] \quad \forall j \in [1, n]$$

- Normalisation des  $a_{ij}$

Considérons l'exemple de la première ligne :

| N° Ville | Attractivité climatique | Accessibilité piéton/vélo | Transports en commun | Automobile C4' | Mobilité C5' | Profil de la population | Somme de la ligne |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| 1        | 3                       | 32                        | 11                   | 7              | 0,45         | 21,85                   | 75,3              |

On réalise alors l'opération suivante :  $\frac{a_{1j}}{75,3}$ ,  $\forall j \in [1, n]$ . Voici le critère la première ligne normalisée :

| N° Ville | Attractivité climatique | Accessibilité piéton/vélo | Transports en commun | Automobile C4' | Mobilité C5' | Profil de la population |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 1        | 0,0398                  | 0,4250                    | 0,1461               | 0,0930         | 0,0060       | 0,2902                  |

- Normalisation des poids

| Critère | Description               | Poids        |
|---------|---------------------------|--------------|
| 1       | Attractivité climatique   | $w_1 = 0,16$ |
| 2       | Accessibilité piéton/vélo | $w_2 = 0,18$ |
| 3       | Transports en commun      | $w_3 = 0,18$ |
| 4       | Automobile                | $w_4 = 0,18$ |
| 5       | Mobilité                  | $w_5 = 0,24$ |
| 6       | Profil de la population   | $w_6 = 0,06$ |

- Somme pondérée

On effectue finalement l'opération suivante  $R(a_i) = \sum_j^n w_j a_{ij}$ ,  $\forall i \in [1, m]$

Par exemple, pour la ligne 1, on effectue cette opération :

$$\begin{aligned} R(a_1) &= w_1 \times a_{11} + w_2 \times a_{12} + w_3 \times a_{13} + w_4 \times a_{14} + w_5 \times a_{15} + w_6 \times a_{16} \\ &= 0,16 \times 0,0398 + 0,18 \times 0,4250 + 0,18 \times 0,1461 + 0,18 \times 0,0930 + 0,24 \times 0,0060 + 0,06 \times 0,2902 \\ &= 0,1447 \end{aligned}$$

On effectue alors cette opération pour chacune des lignes.

### Interprétation de la méthode de la somme pondérée

Une fois ce travail réalisé, l'interprétation des résultats s'impose. On trie alors les sommes pondérées résultantes dans l'ordre décroissant, ce qui permet la réalisation d'un classement des villes.

Voici les trois premières villes du classement :

| Préférence | N° Ville   | Somme pondérée |
|------------|------------|----------------|
| 1          | Ville n° 3 | 0,1521         |
| 2          | Ville n° 2 | 0,1500         |
| 3          | Ville n°1  | 0,1447         |

*Attention* : Le classement obtenu dépend de la procédure de normalisation.

Le décideur peut alors soit se fier à cette analyse et choisir la ville n°3, soit demander que soient mises en œuvre d'autres méthodes de Somme pondérée avec d'autres procédures de normalisation et obtenir ainsi une position moyenne des différentes villes et choisir celle qui a la meilleure position moyenne.

Il est important de noter que la pondération a été fournie par le décideur et que celle-ci répond à ses préférences personnelles. D'autres pondérations donneraient des résultats tout à fait différents.

### Limites et désavantages de cette méthode

La méthode de la somme pondérée possède deux avantages principaux :

1. Il s'agit d'un modèle simple
2. La solution optimale d'une somme pondérée est efficace

Cependant de nombreuses limites existent vis-à-vis de cette méthode, notamment due à l'interprétation des poids qui prennent en compte<sup>5</sup> :

1. L'importance relative des critères
2. Un facteur de normalisation des échelles des critères

La méthode de la somme pondérée nécessite donc d'avoir des critères comparables et d'intégrer l'influence de la normalisation préalable.

### Analyse multicritères hiérarchique (AMCH)

Il s'agit de la méthode dont Thomas L. Saaty est l'inventeur, l'architecte et le premier théoricien (1980). Elle repose sur trois concepts :

- **La structuration hiérarchique** : décomposition du problème en sous problèmes.
- **La structuration des priorités** : classement des éléments selon leur importance relative.
- **La cohérence logique** : les éléments sont regroupés et classés de façon logique.

Cette méthode présente plusieurs intérêts notables et permet de :

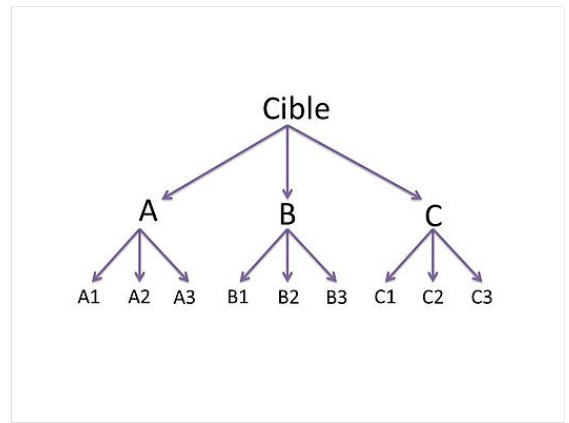
- élaborer un compromis représentatif des divers avis mais pas nécessairement le consensus ;
- affiner la définition d'un problème par la décomposition ;
- établir des priorités ;
- prendre en compte l'interdépendance des éléments ;
- évaluer la cohérence logique des avis utilisés.

### Formulation mathématique

Pour trouver la ou les solutions idéale(s) il faut appliquer au problème l'algorithme suivant :

1. **Construire la hiérarchie** : Il faut déterminer les différents niveaux hiérarchiques et choisir les critères à chaque niveau. La comparaison s'effectue selon les critères de niveau équivalent. Par exemple à l'achat d'une voiture, l'utilisateur peut décomposer son objectif final "*acheter la voiture la plus attrayante*" en trois éléments comme les performances moteur, l'équipement et le prix. De plus ces critères peuvent être décomposés en sous-critères. Ainsi l'utilisateur peut décomposer le critère *performances moteur* en critères de niveau inférieur comme la consommation, l'accélération ou le couple.
2. **Établir le poids des critères et sous-critères** : Le décideur définit les priorités en comparant de manière binaire les éléments de la hiérarchie. Pour chaque niveau du sommet à la base, il doit comparer les éléments deux à deux par rapport au critère supérieur. Par exemple, il doit se demander comment l'élément A1 satisfait-il mieux le critère A que l'élément A2. Pour formuler ses priorités il peut utiliser une échelle de comparaison binaire ci-dessous.

| Appréciation  | Degré d'importance |
|---|--------------------|
| Importance égale de deux éléments                       | 1                  |
| Faible importance d'un élément par rapport à un autre   | 3                  |
| Importance moyenne d'un élément par rapport à un autre  | 4                  |
| Importance forte d'un élément par rapport à un autre    | 5                  |
| Importance attestée d'un élément par rapport à un autre | 7                  |
| Importance absolue d'un élément par rapport à un autre  | 9                  |



La structuration hiérarchique

**3. Écrire les matrices de comparaison binaire pour chaque niveau:** Cette matrice est la représentation du résultat de l'étape précédente. En voici un exemple :

| Critères | A1 | A2   | A3   |
|----------|----|------|------|
| A1       | 1  | 0.25 | 0.2  |
| A2       | 4  | 1    | 0.33 |
| A3       | 5  | 3    | 1    |

On compare l'élément de la colonne de gauche par rapport à celui de la ligne du haut. Ainsi A3 est 5 fois plus important que A1, A3 est 3 fois plus important que A2.

**4. Déterminer les poids des critères :** Pour réaliser cette étape, normaliser les colonnes de la matrice de comparaison. La somme des éléments de chaque colonne vaut 1. Ensuite sommer les éléments de chaque ligne. Le poids du critère nous est donné par la formule :

$$\text{Poids du critère} = \frac{\text{Somme ligne}}{\text{Nombre de critères}}$$

**5. Évaluer la cohérence des jugements** Nous pouvons évaluer la cohérence des poids des critères. Si nous choisissons A1 trois fois plus important que A2 lui-même deux fois plus important que A3 et que dans un même temps A3 cinq fois plus important que A1 alors les indicateurs *indice de cohérence* et *ratio de cohérence* nous avertiront que les solutions risquent d'être quelque peu aléatoires. Si le *ratio de cohérence* est inférieur ou égal à 10 %, l'appréciation est jugée cohérente.

$$\text{Indice de cohérence} = \frac{\text{Cohérence moyenne} - \text{Nombre d'éléments}}{\text{Nombre d'éléments} - 1}$$

Pour obtenir la cohérence moyenne on multiplie chaque colonne de la matrice de comparaison binaire non normalisée par le poids du critère associé. On calcule alors pour chaque ligne la somme des éléments. La cohérence de chaque critère est donnée par la somme précédente divisée par le poids du critère de la ligne. En sommant la cohérence de chaque critère et en divisant par le nombre des critères, on obtient la cohérence moyenne.

$$\text{Ratio de cohérence} = \frac{\text{Indice de cohérence}}{\text{Cohérence aléatoire}}$$

La cohérence aléatoire est donnée par le tableau suivant :

| Nombre de critères  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cohérence aléatoire | 0.00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

Si les ratios de cohérence sont bons alors on peut passer à l'étape suivante, sinon il est préférable de recommencer la comparaison binaire.

**6. Évaluer les poids de chaque critère par rapport au critère supérieur** On pondère le poids des sous-critères par le poids des critères supérieurs. Mathématiquement, pour tous les sous-critères, on calcule le poids du couple A1/A comme le poids du sous-critère A1 multiplié par le poids du critère supérieur A. Nous disposons donc d'un poids pondéré pour chaque sous-critère.

**7. Sélectionner uniquement les sous-critères de poids pondérés préférentiels** Pour chaque critère, il ne faut retenir qu'un seul sous-critère. Il faut donc choisir ceux dont le poids pondéré est le meilleur vis-à-vis des autres sous-critères. Il reste ensuite à normaliser les poids pondérés des critères choisis.

**8. Évaluer les actions/projets** Il s'agit d'établir le poids des projets par rapport aux sous-critères. Pour tous les critères préférés sélectionnés à l'étape 6, écrire une matrice de comparaison. Effectuer les calculs des étapes 3, 4 et 5 pour toutes ces matrices et évaluer les indices de cohérence ainsi que les poids pour chaque action.

| Pour A1/A | Projet1 | Projet2 | Projet3 | Poids de l'action pour le sous-critère A1/A |
|-----------|---------|---------|---------|---|
| Projet1   | 1       | 2       | 3.33    | 0.551                                       |
| Projet2   | 0.5     | 1       | 2       | 0.293                                       |
| Projet3   | 0.3     | 0.5     | 1       | 0.156                                       |

**9. Décider de l'action à choisir** Pour chaque action calculer :

$$\text{Note finale} = \sum_{\text{Sous-critères pondérés } i} \text{Poids de l'action pour le sous-critère } i \times \text{poids du sous-chemin de préférence}$$

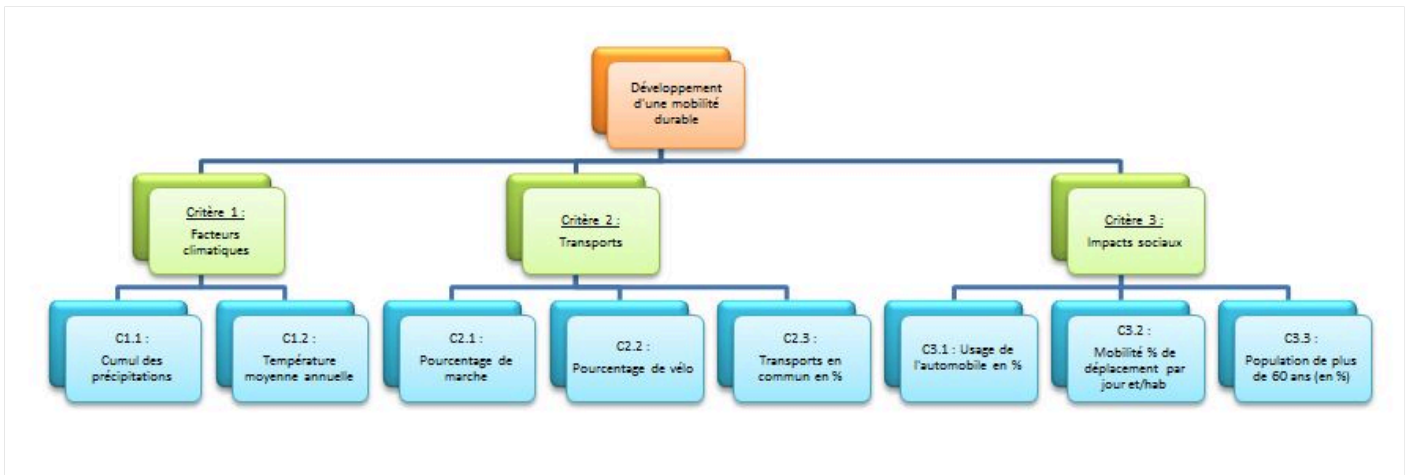
À partir des sommes obtenues pour chaque action nous pouvons établir un classement préférentiel. Une action ayant une somme importante est une action à privilégier.

**Exemple d'utilisation de cette méthode**

La problématique de l'exemple traité avec la méthode *Somme pondérée* est reprise et la résolution se réalise désormais grâce à la méthode de Saaty. Les six critères qui étaient proposés ont été légèrement modifiés en huit sous-critères afin de pouvoir répondre à l'arborescence inhérente à cette méthode<sup>6</sup>.

**1. Construire la hiérarchie :**

En voici une représentation graphique, sous forme d'arbre :



La structure hiérarchique de notre problème

Ci-dessous la matrice des décisions avec comme objectif de trouver une ville pertinente. Comme expliquée dans la méthode *Somme pondérée* les critères à minimiser ont été modifiés de sorte que chaque critère ci-dessous soit à maximiser.

| N° ville | Cumul des précipitations C11 | Température moyenne annuelle C12 | Pourcentage de marche C2.1 | Pourcentage de vélo C2.2 | Transports en commun en % C2.3 | Usage de l'automobile en % C3.1' | Mobilité % de déplacement par jour et/hab. C3.2' | population de plus de 60 ans (en %) C3.3 |
|----------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 1        | 0,5                          | 1                                | 32                         | 0                        | 11                             | 7                                | 0,65   | 21,85                                    |
| 2        | 0                            | 0,5                              | 31                         | 1                        | 14                             | 8                                | 0,56   | 18,6                                     |
| 3        | 0                            | 0                                | 29                         | 2                        | 7                              | 4                                | 0,2  | 12,9                                     |
| 4        | 0                            | 0,5                              | 31                         | 1                        | 6                              | 6                                | 0,44   | 27,3                                     |
| 5        | 0,5                          | 0,5                              | 22                         | 3                        | 10                             | 0                                | 0,67   | 16,5                                     |

**2. Établir le poids des critères et sous-critères :** Dans cet exemple nous avons supposé que les transports ont une importance forte comparés aux facteurs climatiques pour répondre à une problématique de développement de mobilité durable. C2 vaut donc 7 fois C1. On compare ainsi tous les critères entre eux et tous les sous critères entre eux.

**3. Écrire les matrices de comparaison binaire pour chaque niveau:**

| Critères | C1 | C2     | C3   |
|----------|----|--------|------|
| C1       | 1  | 0,1429 | 0,25 |
| C2       | 7  | 1      | 4    |
| C3       | 4  | 0,25   | 1    |
| Somme    | 12 | 1,3929 | 5,25 |

Afin de normaliser, on calcule la somme de chaque colonne. On normalise les éléments en les divisant par la somme de leur colonne. On obtient la matrice de comparaison normalisée.

| Critères | C1            | C2     | C3     | Somme ligne |
|----------|---------------|--------|--------|-------------|
| C1       | $1/12=0,0833$ | 0,1026 | 0,0476 | 0,2335      |
| C2       | 0,5833        | 0,7179 | 0,7619 | 2,0632      |
| C3       | 0,3333        | 0,1795 | 0,1905 | 0,7033      |

**4. Déterminer les poids des critères :** En divisant la somme des éléments d'une ligne par le nombre de critères on obtient le poids de chaque critère.

| Critères | Poids des critères |
|----------|--------------------|
| C1       | $0,2335/3=0,0778$  |
| C2       | 0,6877             |
| C3       | 0,2344             |

**5. Évaluer la cohérence des jugements :** On multiplie chaque colonne de la matrice de comparaison non normalisée par le poids du critère associé.

| Critères | C1                | C2      | C3     | Somme ligne |
|----------|-------------------|---------|--------|-------------|
| C1       | $1*0,0778=0,0778$ | 0,09821 | 0,0586 | 0,2346      |
| C2       | $7*0,0778=0,5448$ | 0,6877  | 0,9377 | 2,1702      |
| C3       | 0,3113            | 0,17193 | 0,2344 | 0,7177      |

On évalue ensuite la cohérence en divisant la somme des lignes obtenue par le poids du critère de la ligne :

| Critères          | Cohérence              |
|-------------------|------------------------|
| C1                | $0,2346/0,0778=3,0151$ |
| C2                | 3,1558                 |
| C3                | 3,0615                 |
| Cohérence moyenne | 3,0775                 |

En appliquant les formules mathématiques on détermine les ratios de cohérences.

Indice de cohérence : 0,0387

Ratio de cohérence :  $0,0668 < 0,1$  donc la matrice de comparaison choisie arbitrairement est sensée.

**Il faut effectuer toutes ces opérations pour l'ensemble des sous-critères.** Si l'ensemble des jugements de cohérence sont corrects, on peut passer à l'étape suivante.

**6. Évaluer les poids de chaque critère par rapport au critère supérieur :**

Voici les résultats obtenus pour les sous-critères de C2. Ils ont été obtenus de manière analogue aux critères.

| Critère C2 | C2.1 | C2.2   | C2.3   | Poids des sous-critères |
|------------|------|--------|--------|-------------------------|
| C2.1       | 1    | 0,3333 | 0,1667 | 0,0915                  |
| C2.2       | 3    | 1      | 0,2    | 0,2014                  |
| C2.3       | 6    | 5      | 1      | 0,7071                  |
| Somme      | 10   | 6,3333 | 1,3667 |                         |

**7. Sélectionner que les sous-critères de poids pondérés préférentiels :**

Pour chaque sous-critère on calcule le poids du sous critère \* le poids du critère supérieur. Pour chaque critère on sélectionne le sous-critère ayant obtenu la meilleure valeur. Dans notre cas, pour le critère C2 le sous-critère C2.3 s'avère le meilleur. C'est donc sur lui que nous allons travailler. Nous sélectionnons aussi C1.2 et C3.2.

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| C1.2  | 0,0519                     |
| C2.3  | $0,7071 * 0,6877 = 0,4863$ |
| C3.2  | 0,1381                     |
| Somme | 0,6762                     |

Nous normalisons ensuite les poids pondérés :

|         |        |
|---------|--------|
| C1.2/C1 | 0,0767 |
| C2.3/C2 | 0,7191 |
| C3.2/C3 | 0,2042 |

### 8. Évaluer les actions/projets :

Nous nous plaçons pour évaluer la matrice de comparaison pour le sous-critère pondéré C2.3/C2. Nous calculons donc les rapports entre les différentes villes pour le critère C2.3. Cette étape est à faire pour tous les sous-critères sélectionnés.

| C2.3/C2 | 1                | 2      | 3      | 4      | 5   |
|---------|------------------|--------|--------|--------|-----|
| 1       | 1                | 0,7857 | 1,5714 | 1,8333 | 1,1 |
| 2       | $14/11 = 1,2727$ | 1      | 2      | 2,3333 | 1,4 |
| 3       | $7/11 = 0,6364$  | 0,5    | 1      | 1,1667 | 0,7 |
| 4       | 0,5455           | 0,4286 | 0,8571 | 1      | 0,6 |
| 5       | 0,9091           | 0,7143 | 1,4286 | 1,6667 | 1   |
| Somme   | 4,3636           | 3,4286 | 6,8571 | 8      | 4,8 |

Nous calculons ensuite les poids de chaque action. La méthode est identique à celle du début : somme des colonnes, normalisation du tableau précédent puis somme des lignes et division par le nombre de critères.

| Ville | Poids de la ville pour C2.3/C2 |
|-------|--------------------------------|
| 1     | 0,0572                         |
| 2     | 0,0729                         |
| 3     | 0,0364                         |
| 4     | 0,0312                         |
| 5     | 0,0520                         |

### 9. Décider de l'action à choisir :

Nous appliquons la formule suivante :

$$\text{Note finale} = \sum_{\text{Sous critères pondérés } i} \text{Poids de l'action pour le sous critère } i * \text{poids du sous - chemin de préférence}$$

|   | C1,2/C1 | C2.3/C2                    | C3,2/C3 | Somme ligne |
|---|---------|----------------------------|---------|-------------|
| 1 | 0,0066  | $0,0572 * 0,7191 = 0,0412$ | 0,0098  | 0,0576      |
| 2 | 0,0049  | 0,0524                     | 0,0101  | 0,0674      |
| 3 | 0,0014  | 0,0262                     | 0,0110  | 0,0387      |
| 4 | 0,0043  | 0,0225                     | 0,0104  | 0,0371      |
| 5 | 0,0020  | 0,0375                     | 0,0097  | 0,0492      |

Il ne reste plus qu'à interpréter la somme des lignes.

### Interprétation de la méthode AMCH

À l'instar de la méthode Somme pondérée, le tableau des préférences est obtenu.

Ci-dessous le tableau susnommé :

| Préférences | N° des villes | Evaluation finale |
|-------------|---------------|-------------------|
| 1           | Ville n°2     | 0,0674            |
| 2           | Ville n°1     | 0,0576            |
| 3           | Ville n°5     | 0,0492            |

Le classement est différent de celui que fournit la méthode la Somme pondérée ; ceci s'explique par les différences notables entre les deux méthodes, notamment quant à l'utilisation d'une matrice de comparaison binaire / critère.

D'après cette méthode, la ville la plus attractive est la ville n°2. Cette dernière arrivant deuxième dans l'ordre de préférence pour la méthode de la Somme pondérée, elle constitue un choix logique pour le décideur.

### Limites et désavantages de cette méthode

D'après Bernard Roy, les principaux avantages de la méthode de Saaty sont :

1. la représentation et décomposition hiérarchique d'un problème complexe en éléments séparés
2. le tri des éléments d'un système en différents niveaux selon leur importance relative
3. le regroupement de ces éléments de façon logique et leur classement de façon cohérente selon des critères logiques

Toutefois, celle-ci présente tout de même quelques limites<sup>5</sup> :

1. elle peut être délicate à mettre en œuvre dans une problématique multi-acteurs ou lorsque les critères sont trop nombreux, le risque d'incohérence des jugements étant alors trop élevé.
2. cette méthode demande au décideur de considérer toutes les comparaisons possibles, faisant implicitement l'hypothèse que tous les critères considérés sont parfaitement comparables

## Approche fondée sur le surclassement

C'est dans ce cadre que s'insère la méthode ELECTRE. ELECTRE est une famille de méthodes mathématiques d'analyse multicritère, développée par Bernard Roy à partir des années 1960<sup>3</sup>. L'acronyme ELECTRE signifie **EL**imination **Et** **Ch**oix **Traduisant** la **RE**alité.

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un graphe orienté pour représenter les relations entre les différentes actions.

### Formulation mathématique

#### Définitions pratiques

- **Relation de préférence** entre 2 actions

Relation notée  $P$  :  $a P b$  si  $a$  est préférée à  $b$

- **Relation d'indifférence**

Relation notée  $I$  : indifférence entre 2 actions :  $a I b$

- **Relation d'incomparabilité**

Relation notée  $R$  : 2 actions incomparables :  $a R b$

Cela équivaut à :  $ni a P b, ni a I b, ni b P a$

- **Relation de surclassement**

Une relation de surclassement, appelée aussi relation de préférence au sens large, est la réunion d'une relation de préférence au sens strict (la relation  $P$ ) et d'une relation d'indifférence (relation  $I$ ).

$a S b$  signifie  $a$  surclasse  $b$ .

- **Le noyau du graphe**

Il est noté  $N$  et est composé de sommets tels que :

- tous les sommets qui n'appartiennent pas au noyau sont surclassés par un sommet du noyau au moins
- les sommets du noyau ne se surclassent pas entre eux

- **Indice de concordance** (d'après Maystre et al.94)

"Il est dit du critère  $j$  qu'il concorde avec l'hypothèse "l'action  $a_i$  surclasse l'action  $a_k$  " si l'action  $a_i$  est au moins aussi bonne que l'action  $a_k$  en ce qui concerne le critère  $j$  ; ce qui se traduit par :

$$g_j(a_i) \geq g_j(a_k)$$



Arc de surclassement

- **Indice de non-discordance**

" La condition de non-discordance permet de refuser le surclassement d'une action sur une autre, obtenue après application de la condition de concordance, lorsqu'il existe une opposition trop forte sur un critère au moins "

### Le déroulement de la méthode

Sur l'ensemble des actions possibles, on cherche au moyen d'une relation de surclassement  $S$  au préalable définie, une partition de l'ensemble des actions possibles entre le noyau  $N$  et son complémentaire.

1. **Affectation des poids  $P_j$  à chaque critère** : L'utilisateur définit ses préférences.

2. **Recalibration** : L'utilisateur doit recalibrer les valeurs des différentes actions en fonction des critères sur une plage de donnée. Par exemple la valeur d'une action associée à un critère doit appartenir à une échelle de note de 0 à 20. On obtient alors une nouvelle matrice actions/critères.

3. **Établir les relations entre les actions** : L'utilisateur définit ses préférences. On écrit une matrice dite de comparaison entre actions pour chaque critère. On compare l'action de la ligne  $i$  avec celle de la colonne  $j$ . Par exemple, à la ligne 2 et première colonne de notre matrice, on va comparer le projet 2 au projet 1 pour le critère  $i$  :

- Si la valeur du projet 2 est supérieure à celle du projet 1 ; on remplit la case du caractère  $J+$ .
- Si la valeur du projet 2 est inférieure à celle du projet 1 ; on remplit la case du caractère  $J-$ .
- Si la valeur du projet 2 est égale à celle du projet 1 ; on remplit la case du caractère  $J=$ .

On effectue cette opération pour tous les éléments à comparer et pour tous les critères.

4. **Définir les ensembles  $J^+$ ,  $J^-$ ,  $J^=$**  : On écrit une matrice dite " ensemble des  $J^+$  ". Dans cette matrice on récapitule les préférences entre les actions pour tous les critères. Pour à la ligne  $i$  et à la colonne  $j$  si l'action  $i$  est préférée à l'action  $j$  pour les critères 2 et 3 alors on écrit dans cette matrice l'ensemble  $\{2,3\}$  à la  $i$  et à la colonne  $j$ . De même on tabule les tableaux : " ensemble des  $J^-$  " et " ensemble des  $J^=$  ".

5. **Définir l'ensemble de concordance** : Il faut juste écrire la matrice  $J^+ \cup J^=$

6. **Calcul des coefficients de concordances entre les actions** : On effectue cette opération à partir du tableau précédent. A la ligne  $i$  et à la colonne  $j$ , on somme les poids des critères sélectionnés. Si l'on avait  $\{2,3\}$  dans l'ensemble de concordance, on aura  $Poids(C2)+Poids(C3)$  dans notre nouvelle matrice.

7. **Calcul des coefficients de discordances  $D_{ik}$  entre les actions** : Les  $a_i$  représentent les actions,

$g_j(a_i)$  représente la valeur de l'action  $i$  pour le critère  $j$ . Pour remplir la matrice suivante il faut suivre la méthode suivante pour la ligne  $i$  et la colonne  $k$

- $D_{ik} = 0$  si  $J^-(a_i, a_k) = 0$
- $D_{ik} = \frac{\max(g_j(a_i) - g_j(a_k))}{(\text{echelle de note})}$  avec  $j \in J^-$

8. **Filtrer les actions** : Placer sur un graphe les différentes actions. Fixer un seuil un seuil, par exemple 0.250. Pour toutes les lignes  $i$  et colonnes  $j$  si les coefficients de concordances sont supérieurs à 0.75 et si les coefficients de discordances sont inférieurs à 0.25. alors on peut tracer un arc de l'action  $i$  vers  $j$ .

9. **Déterminer le noyau** : À partir du graphe précédent, nous pouvons trouver le noyau et donc les actions à privilégier.

### Exemple d'utilisation de cette méthode

On reprend la matrice des décisions de la méthode Somme pondérée. Nous considérons ainsi cinq villes selon six critères, ainsi que les poids qui y sont définis.

#### 2. Recalibration :

Voici la matrice des décisions "recalibrée" sur une échelle de 0 à 10;

| N° ville | attractivité climatique C1'' | Vélo + piéton en % C2''      | Transports en commun en % C3'' | Usage de l'automobile en % C4'' | Mobilité % de déplacement par jour et/hab. C5'' | population de plus de 60 ans (en %) C6'' |
|----------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|--|
| 1        | 10                           | 10                           | 6,25                           | 8,75                            | 9,5745  | 6,2153                                   |
| 2        | 0                            | 10                           | 10                             | 10                              | 7,6596  | 3,9583                                   |
| 3        | 0                            | $(31-25)*10/(32-25)= 8,5714$ | 1,25                           | 5                               | 0   | 0  |
| 4        | 0                            | 10                           | 0                              | 7,5                             | 5,1064  | 10                                       |
| 5        | 0                            | 0                            | 5                              | 0                               | 10  | 2,4913                                   |

### 3. Établir les relations entre les actions :

Tableau de comparaison entre actions pour C1''

| N° ville | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|----------|----|----|----|----|----|
| 1        |    | J+ | J+ | J+ | J+ |
| 2        | J- |    | J= | J= | J= |
| 3        | J- | J= |    | J= | J= |
| 4        | J- | J= | J= |    | J= |
| 5        | J- | J= | J= | J= |    |

### 4. Définir les ensembles $J^+$ , $J^-$ , $J^=$ :

Ensemble des  $J^-$ . On écrit aussi l'ensemble  $J^+$  et  $J^=$ .

| N° ville | 1             | 2           | 3     | 4         | 5       |
|----------|---------------|-------------|-------|-----------|---------|
| 1        |               | {3,4}       | 0     | {6}       | {5}     |
| 2        | {1,5,6}       |             | 0     | {6}       | {5}     |
| 3        | {1,2,3,4,5,6} | {2,3,4,5,6} |       | {2,4,5,6} | {3,5,6} |
| 4        | {1,3,4,5}     | {3,4,5}     | {3}   |           | {3,5}   |
| 5        | {1,2,3,4,6}   | {2,3,4,6}   | {2,4} | {2,4,6}   |         |

### 5. Définir l'ensemble de concordance :

Ensemble des  $J = J^+ \cup J^=$

| N° ville | 1       | 2         | 3             | 4           | 5           |
|----------|---------|-----------|---------------|-------------|-------------|
| 1        |         | {1,2,5,6} | {1,2,3,4,5,6} | {1,2,3,4,5} | {1,2,3,4,6} |
| 2        | {2,3,4} |           | {1,2,3,4,5,6} | {1,2,3,4,5} | {1,2,3,4,6} |
| 3        | 0       | {1}       |               | {1,3}       | {1,2,4}     |
| 4        | {2,6}   | {1,2,6}   | {1,2,4,5,6}   |             | {1,2,4,6}   |
| 5        | {5}     | {1,5}     | {1,3,5,6}     | {1,3,5}     |             |

### 6. Calcul des coefficients de concordances entre les actions :

| N° ville | 1                       | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------|-------------------------|------|------|------|------|
| 1        |                         | 0,64 | 1    | 0,94 | 0,76 |
| 2        | $0.18+0.18+0.18 = 0,54$ |      | 1    | 0,94 | 0,76 |
| 3        | 0                       | 0,16 |      | 0,34 | 0,52 |
| 4        | 0,24                    | 0,4  | 0,82 |      | 0,58 |
| 5        | 0,24                    | 0,4  | 0,64 | 0,58 |      |

### 7. Calcul des coefficients de discordances $D_{ik}$ entre les actions :

| N° ville | 1 | 2                        | 3      | 4      | 5      |
|----------|---|--------------------------|--------|--------|--------|
| 1        |   | $(10-6.25) / 10 = 0,375$ | 0      | 0,3785 | 0,0426 |
| 2        | 1 |                          | 0      | 0,6042 | 0,1467 |
| 3        | 1 | 0,875                    |        | 1      | 1      |
| 4        | 1 | 1                        | 0,125  |        | 0,5    |
| 5        | 1 | 1                        | 0,8571 | 1      |        |

### 8. Filtrer les actions :

### 9. Déterminer le noyau

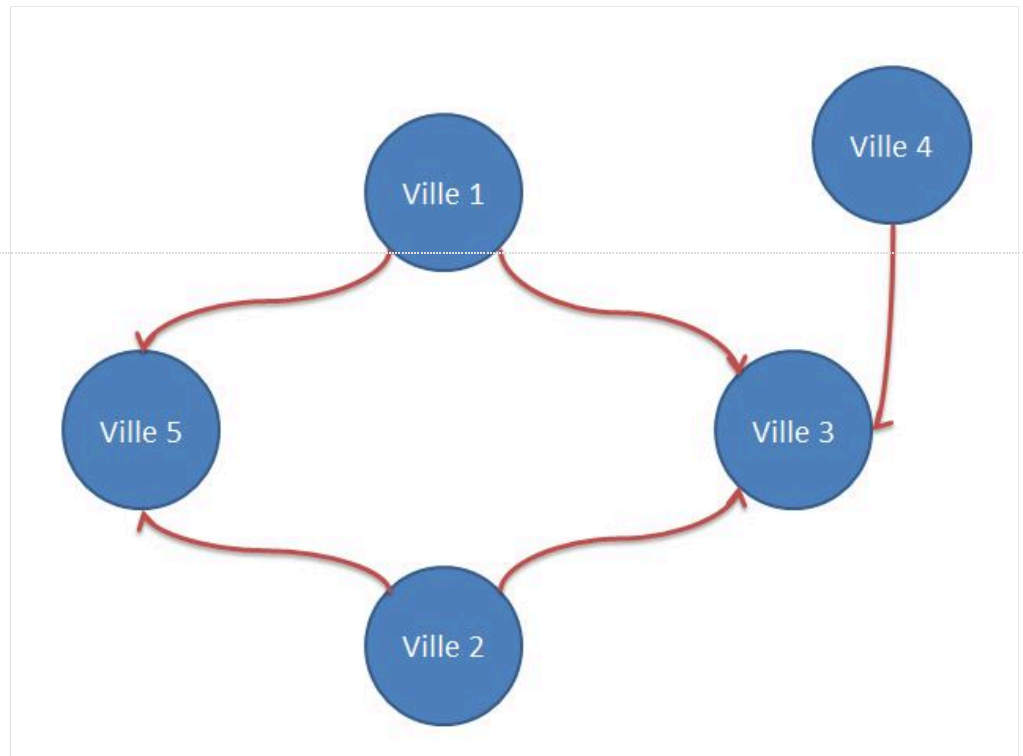
:

Le noyau est constitué des villes 1, 2 et 4.

### Interprétation de la méthode de la somme pondérée

Les différentes villes composant le noyau sont susceptibles d'être, chacune, la meilleure solution alors que les villes qui n'appartiennent pas à ce noyau sont, quant à elles, rejetées.

À ce stade, il est cependant très difficile de conseiller le décideur quant à la solution optimale, et seul le rapprochement avec les méthodes d'agrégations a priori de critères en un critère unique permet de conclure quant au choix de la ville n°2.



Le graphe de surclassement

Il est toutefois notable que la ville n°4, bien qu'appartenant au noyau, n'est pas une solution optimale, conformément aux méthodes précédentes.

*Attention* : la méthode développée ci-dessus, ELECTRE I, ne fonctionne pas s'il y a des circuits.

### Limites et désavantages de cette méthode

Les avantages d'une méthode de surclassement telle ELECTRE sont :

- Simplicité de la méthode car elles reposent sur des concepts naturels, tels « d'accord » ou « pas d'accord ».
- Analyse de la robustesse très poussée qui compense le caractère subjectif de certains paramètres.

Néanmoins, le désavantage majeur inhérent à cette méthode est que le noyau ne renferme pas les meilleures actions mais celles qui sont les plus difficiles à comparer entre elles<sup>5</sup>. Le résultat fourni, sans autre méthode mathématique d'analyse multicritères, ne permet pas d'accéder directement aux meilleures actions potentielles et des décisions erronées sont éventuellement possibles.

## Notes et références

---

- Roy B. (1985). Méthodologie multicritères d'aide à la décision. Paris : Economica, XXII + 423 p.
- Analyse multicritères Par Nadia Lehoux et Pascale Vallée ([https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/fileadmin/medias/documents/performance/controle-gestion/Qualite\\_et\\_controle\\_de\\_gestion/Analyse\\_multicriteres/1\\_Multi\\_criteres2004.pdf](https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/fileadmin/medias/documents/performance/controle-gestion/Qualite_et_controle_de_gestion/Analyse_multicriteres/1_Multi_criteres2004.pdf))
- Roy B., Skalka JM. (1985). E l e c t r e I s, aspects méthodologiques et guide d'utilisation. Document 30, Lamsade. Paris : Université de Paris Dauphine, 119p.
- [Comment déterminer les poids](http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/examples/too_cri_res_fr.pdf) ([http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/examples/too\\_cri\\_res\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/examples/too_cri_res_fr.pdf))
- [Limites de l'analyse multicritère](http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/tools/too_cri_whe_fr.htm#03_02) ([http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/tools/too\\_cri\\_whe\\_fr.htm#03\\_02](http://ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/tools/too_cri_whe_fr.htm#03_02))
- [Intégrer une dimension écologique dans la planification territorial avec des méthodes d'analyse multicritère](http://hal-ems.eccsd.cnrs.fr/docs/00/35/63/42/PDF/OPDE08_MBH_FP.pdf) ([http://hal-ems.eccsd.cnrs.fr/docs/00/35/63/42/PDF/OPDE08\\_MBH\\_FP.pdf](http://hal-ems.eccsd.cnrs.fr/docs/00/35/63/42/PDF/OPDE08_MBH_FP.pdf))

## Liens externes

---

- Mathieu Rouaud ; [Probabilités, statistiques et analyses multicritères](http://www.incertitudes.fr/proba-stat-acp/livre.pdf) (<http://www.incertitudes.fr/proba-stat-acp/livre.pdf>)  
Un livre qui traite des approches multicritères (les principes et de nombreux exemples).

---

Ce document provient de « [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Méthode\\_mathématique\\_d%27analyse\\_multicritère&oldid=211905009](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Méthode_mathématique_d%27analyse_multicritère&oldid=211905009) ».