

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 : Matériaux & Structures

# Thème

**ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE DE  
BLINDAGE D'UNE FOUILLE URBAINE, CAS DU  
PUIT DE VENTILATION 05 DE L'EXTENSION DU  
METRO D'ALGER EL-HERRACH AEROPORT**

Présenté par :

HAFID Yasser  
NEDJARI Karam Abdellah

Encadré par :

M. CHERCHALI Mohamed Abderraouf

Promotion 2025/2026

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions avant tout الله, le Tout-Puissant, sans qui rien n'est possible, de nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur Cherchali, notre encadrant, pour son accompagnement, sa disponibilité ainsi que ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses orientations, et son soutien ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants ainsi qu'à tout le personnel de l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics, en particulier aux membres du département DMS, pour leur disponibilité, leur accompagnement et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre formation.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre enseignant Monsieur Hebib pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien lors de la réalisation de ce travail. Ses remarques pertinentes ont été d'une aide précieuse et ont grandement enrichi notre expérience.

Nous exprimons également notre sincère gratitude à l'ensemble du personnel de l'EMA pour nous avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet dans les meilleures conditions. Nous leur sommes particulièrement reconnaissants pour leur accueil tout au long de cette expérience.

Nous n'oublions pas nos amis et camarades qui ont contribué à rendre notre parcours universitaire plus agréable et enrichissant. Leurs encouragements et leur soutien moral nous ont accompagnés tout au long de ces années, et nous leur en sommes profondément reconnaissants.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien constant. Nous exprimons toute notre reconnaissance à nos parents qui nous ont encouragés et accompagnés avec dévouement durant toutes ces années. Leur confiance et leur soutien indéfectible ont été essentiels à notre réussite.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères.

## **DÉDICACES 1 :**

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma très chère mère, ma source de tendresse et de force, pour son amour inconditionnel et ses sacrifices sans fin.*

*À mon cher père, mon repère et mon modèle, pour ses encouragements et son soutien indéfectible tout au long de mon parcours.*

*À mon petit frère Houssein, et à ma petite sœur Nada, que j'accompagnais chaque matin à l'université.*

*À ma sœur établie en France, malgré la distance qui nous sépare.*

*À ma grand-mère maternelle et à mon grand-père paternel, pour leurs prières et leur bienveillance.*

*À mon ami et binôme Hafid Yasser, avec qui j'ai réalisé ce travail et partagé toutes ces années passées ensemble à l'ENSTP.*

*À mon ami Khalil, et à tous les amis qui ont marqué ce chemin.*

*À la mémoire de nos amis et proches, qui ne sont malheureusement plus parmi nous pour partager ce moment.*

*Et enfin, le meilleur pour la fin, à celle qui occupe une place unique dans mon cœur, ma chère fiancée Naila. Tu as été ma source d'espoir et d'amour, ma lumière dans les ténèbres, celle vers qui je me suis tourné dans les moments les plus sombres comme dans les plus heureux. Tu m'as relevé quand je doutais, tu m'as porté quand mes forces me manquaient, et tu as partagé avec moi chaque instant de joie comme chaque épreuve de ces années. Si je suis devenu la personne que je suis aujourd'hui, c'est à toi que je le dois. Pour ta patience, ta tendresse et ta présence indéfectible, ce travail est aussi le tien. Et au-delà de ces pages, je le dédie aux promesses qui nous réunissent et nous lient, à cet avenir que nous avons juré de bâtir ensemble, main dans la main, et à tous les chemins qu'il nous reste à parcourir côte à côte.*

**K. NEDJARI**

## **DÉDICACES 2 :**

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents, à qui je dois la vie, l'éducation, le soutien indéfectible et les nombreux sacrifices consentis tout au long de mon parcours. Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde reconnaissance et mon amour pour eux.*

*À mes chers frères Abdelbasset et Anis, ainsi qu'à ma chère sœur Aroua, à qui je souhaite une vie remplie de bonheur et de réussite.*

*À ma chère grand-mère, pour son affection, ses prières et son soutien précieux.*

*À mes oncles et tantes, tant du côté paternel que maternel, pour leur bienveillance, leurs encouragements et leur présence à mes côtés.*

*À tous mes cousins et cousines, ainsi qu'à l'ensemble de ma famille, pour leur soutien et leur affection.*

*À mes chers amis : Ayoub « Louz », Raïf, Sido, Chemsou, Khalil, Fikou, Zizou, Billel et Salim, en témoignage de notre amitié sincère et des précieux moments partagés ensemble.*

*À mon binôme Karam, avec qui j'ai partagé les efforts, les défis et les réussites de ce parcours universitaire.*

*J'adresse également une pensée particulière à la mémoire de mes grands-parents paternels ainsi que de mon grand-père maternel. Qu'Allah leur accorde Sa miséricorde, leur pardonne leurs péchés et les accueille dans Son vaste Paradis.*

*Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Qu'Allah le Tout-Puissant vous préserve et vous accorde santé.*

**Y. HAFID**



## RÉSUMÉ

Ce projet de fin d'études présente une étude technico-économique du blindage de la fouille profonde du puits de ventilation N°05 (PV5), réalisé dans le cadre de l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger (El Harrach Centre – Aéroport International Houari Boumediene). À partir d'une investigation géotechnique révélant une stratigraphie à dominante marneuse, organisée en cinq unités géotechniques, des remblais (Re), des sables (Qs), des argiles (Qa), des marnes gonflantes (Qm) et des marnes sablo-gréseuses (Qmsg), et une excavation atteignant 22,53 m, trois variantes de soutènement reposant sur un rideau de pieux forés Ø800 mm ont été conçues et comparées : la solution du projet à trois niveaux de butons métalliques, une variante à cinq niveaux de tirants d'ancrage précontraints, et une solution mixte associant butons et tirant. Chaque variante a fait l'objet d'une modélisation numérique sous GEO5 (module Sheet Pile Check), en conditions statique et sismique, conformément aux Eurocodes. Une analyse multicritère intégrant les critères structuraux, le coût et le délai a désigné la solution mixte comme le meilleur compromis technico-économique, conjuguant un coût maîtrisé, le délai d'exécution le plus court et un niveau de sécurité satisfaisant, sous réserve d'un suivi attentif de ses déplacements.

### Mots-clés

Puits de ventilation, métro d'Alger, blindage de fouille profonde, rideau de pieux forés, butons et tirants d'ancrage, solution mixte, modélisation numérique GEO5, analyse statique et sismique, analyse multicritère, étude technico-économique.

### ملخص

يقدم مشروع نهاية الدراسة هذا دراسة تقنية واقتصادية لتدعيم الحفر العميق لبئر التهوية رقم 05، المنجز في إطار توسعة الخط الأول لمетро الجزائر (الحراش المركز – المطار الدولي هواري بومدين). انطلاقاً من تحقيق جيوتقني كشف عن تكوين طبقي ذي غلبة مارنية، منظم في خمس وحدات جيوتقنية، ردم، ورمال، وطين، ومارن انتفاخي، ومارن رملي، وحفر يبلغ عمقه 22.53 م، صُممت وفُورنت ثلاثة بدائل للتدعيم تعتمد جميعها على ستار من الأوتاد المحفورة بقطر 800 مم: حلّ المشروع بثلاثة مستويات من الدعائم المعدنية، وبديل بخمسة مستويات من المراتب المسبقة الإجهاد، وحلّ مختلط يجمع بين الدعائم والمرابط. خضع كل بديل لنمذجة عددية باستعمال برنامج جيو 5 (وحدة شيتينغ تشيك) في الحالتين الساكنة والزلزالية، وفقاً للقوانين الأوروبية (اليوروكود). وقد بين تحليل متعدد المعايير يدمج الجوانب الإنشائية والتكلفة والمدة أنّ الحلّ المختلط يمثل أفضل تسوية تقنية واقتصادية، إذ يجمع بين تكلفة متحكم فيها وأقصر مدة إنجاز ومستوى أمان مرضٍ، شريطة المتابعة الدقيقة لإزاحاته.

### الكلمات المفتاحية

بئر التهوية، مترو الجزائر، تدعيم الحفر العميق، ستار الأوتاد المحفورة، الدعائم والمرابط، الحل المختلط، النمذجة العددية جيو 5، التحليل الساكن والزلائي، التحليل متعدد المعايير، الدراسة التقنية والاقتصادية.

## ABSTRACT

This final-year project presents a technical and economic study of the deep excavation support for ventilation shaft No. 05 (PV5), carried out as part of the Line 1 extension of the Algiers metro (El Harrach Centre – Houari Boumediene International Airport). Based on a geotechnical investigation revealing a predominantly marly stratigraphy organised into five geotechnical units, fill (Re), sands (Qs), clays (Qa), swelling marls (Qm) and sandy marls (Qmsg), and an excavation reaching 22.53 m in depth, three retaining solutions, all relying on a Ø800 mm bored-pile wall, were designed and compared: the project solution with three levels of steel struts, a variant with five levels of prestressed ground anchors, and a mixed solution combining struts and an anchor. Each variant was numerically modelled in GEO5 (Sheet Pile Check module) under both static and seismic conditions, in accordance with the Eurocodes. A multi-criteria analysis integrating structural performance, cost and schedule identified the mixed solution as the best technical-economic compromise, combining a controlled cost, the shortest construction time and a satisfactory safety level, provided that its displacements are carefully monitored.

### Keywords

ventilation shaft, Algiers metro, deep excavation support, bored-pile wall, struts and ground anchors, mixed solution, GEO5 numerical modelling, static and seismic analysis, multi-criteria analysis, technical-economic study.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement urbain rapide des grandes métropoles a conduit à exploiter de plus en plus le sous-sol comme espace fonctionnel et stratégique. Les infrastructures souterraines, notamment les réseaux de transport en commun, occupent aujourd'hui une place centrale dans les politiques de mobilité urbaine.

L'Algérie s'inscrit dans cette dynamique à travers ses grands projets d'infrastructure. L'extension de la ligne de métro d'Alger reliant El-Harrach à l'Aéroport vise à désengorger la capitale et à améliorer les conditions de déplacement de ses habitants. Toutefois, la réalisation de tels ouvrages en milieu urbain dense soulève des défis techniques majeurs, particulièrement en matière de soutènement des fouilles profondes.

Creuser en profondeur au cœur d'une ville implique de gérer simultanément la stabilité des parois, la protection des constructions avoisinantes et la sécurité des personnes, tout en respectant des contraintes économiques et des délais stricts. Le choix d'une solution de blindage optimale devient alors une décision d'ingénierie déterminante.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, qui traite de l'étude technico-économique du blindage de la fouille du puits de ventilation N°05 de l'extension du métro d'Alger. L'objectif est de proposer et de comparer différentes variantes de soutènement en tenant compte des conditions géotechniques du site, des contraintes urbaines et des exigences économiques du projet.

Le travail est organisé de la manière suivante :

On commence par un état de l'art sur les techniques de blindage et de soutènement des fouilles profondes, ce qui permet d'établir une base théorique solide pour la suite. À partir de là, une présentation générale du projet d'extension du métro d'Alger est développée, situant le puits de ventilation N°05 dans son contexte global.

Une fois le projet bien cerné, les investigations géotechniques menées sur le site sont exposées, afin de caractériser les sols en place et d'identifier les contraintes du terrain. Sur la base de ces résultats, différentes variantes de soutènement sont proposées et décrites, en tenant compte des spécificités géotechniques et urbaines relevées.

Ces variantes sont ensuite soumises à une modélisation numérique permettant d'évaluer leur comportement mécanique et leur niveau de sécurité. En dernier lieu, une étude comparative des coûts et des délais d'exécution est réalisée pour chaque variante, afin d'orienter le choix vers la solution la plus adaptée sur le plan technico-économique.

Une conclusion générale viendra synthétiser l'ensemble des résultats et formuler une recommandation claire quant à la solution de blindage la mieux appropriée pour ce projet.

## Table des matières

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....                            | 1  |
| I.1 INTRODUCTION : .....                                            | 1  |
| I.2 BLINDAGE DES FOUILLES : .....                                   | 1  |
| I.3 LES PRINCIPAUX SYSTEMES DE BLINDAGE .....                       | 2  |
| I.3.1 Paroi berlinoise .....                                        | 2  |
| I.3.1.1 Définition et principe : .....                              | 2  |
| I.3.1.2 Procédé d'exécution : .....                                 | 3  |
| I.3.1.4 Domaine d'application : .....                               | 4  |
| I.3.2 Paroi en palplanches .....                                    | 4  |
| I.3.2.1 Définition et principe : .....                              | 4  |
| I.3.2.2 Composition d'une paroi en palplanches : .....              | 5  |
| I.3.2.3 Procédé d'exécution : .....                                 | 5  |
| I.3.2.4 Domaine d'application : .....                               | 6  |
| I.3.2.5 Avantages et inconvénients : .....                          | 6  |
| I.3.3 Paroi clouée (clouage + béton projeté) .....                  | 7  |
| I.3.3.1 Définition : .....                                          | 7  |
| I.3.3.2 Composition d'une paroi clouée : .....                      | 8  |
| I.3.3.3 Procédé d'exécution : .....                                 | 8  |
| I.3.3.5 Avantages et inconvénients .....                            | 9  |
| I.3.4 Parois en pieux (jointifs – sécants – disjoints).....         | 10 |
| I.3.4.1 Définition : .....                                          | 10 |
| I.3.4.2 Parois en pieux disjoints (contigu) : .....                 | 11 |
| I.3.4.3 Parois en pieux jointifs : .....                            | 11 |
| I.3.4.4 Parois en pieux sécants : .....                             | 12 |
| I.3.4.5 Procédé d'exécution : .....                                 | 13 |
| I.3.4.6 Comparaison des types de parois en pieux : .....            | 13 |
| I.3.4.7 Avantages/inconvénient généraux des parois en pieux : ..... | 14 |
| I.3.5 Paroi moulée .....                                            | 14 |
| I.3.5.1 Définition : .....                                          | 14 |
| I.3.5.2 Principe de fonctionnement : .....                          | 15 |
| I.3.5.3 Procédé d'exécution : .....                                 | 15 |
| I.3.5.4 Caractéristiques techniques : .....                         | 16 |
| I.3.5.5 Domaine d'application : .....                               | 17 |
| I.3.5.6 Avantages et inconvénients : .....                          | 17 |
| I.4 LES PRINCIPAUX SYSTEMES SYSTEMES D'ETAIEMENT .....              | 17 |
| I.4.1 Butons .....                                                  | 17 |
| I.4.1.1 Définition : .....                                          | 17 |
| I.4.1.2 Principe de fonctionnement : .....                          | 18 |
| I.4.1.3 Types de butons : .....                                     | 18 |
| I.4.1.3 Procédé d'exécution : .....                                 | 19 |
| I.4.1.5 Domaine d'application : .....                               | 19 |
| I.4.1.6 Avantages et inconvénients : .....                          | 20 |
| I.4.2 Tirants d'ancrage .....                                       | 20 |
| I.4.2.1 Définition : .....                                          | 20 |
| I.4.2.2 Principe de fonctionnement : .....                          | 21 |
| I.4.2.3 Composition d'un tirant d'ancrage : .....                   | 21 |
| I.4.2.4 Types de tirants : .....                                    | 21 |
| I.4.2.5 Procédé d'exécution : .....                                 | 22 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.4.2.6 Domaine d'application :                                                                  | 23 |
| I.4.2.7 Avantages et inconvénients :                                                             | 23 |
| I.5 MÉTHODES DE CALCUL DU BLINDAGE                                                               | 23 |
| I.5.1 Généralités :                                                                              | 23 |
| I.5.2 Méthodes analytiques :                                                                     | 23 |
| I.5.2.1 Théorie de Rankine :                                                                     | 23 |
| I.5.2.2 Théorie de Coulomb :                                                                     | 24 |
| I.5.3 Méthodes empiriques :                                                                      | 24 |
| I.5.4 Méthodes semi-empiriques :                                                                 | 24 |
| I.5.4.1 Méthode de Blum :                                                                        | 24 |
| I.5.4.2 Diagrammes de pression apparente (Peck) :                                                | 24 |
| I.5.5 Méthodes numériques :                                                                      | 25 |
| I.5.6 Conclusion :                                                                               | 25 |
| CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET                                                             | 26 |
| II.1 PRESENTATION DU PROJET                                                                      | 26 |
| II.1.1 Introduction :                                                                            | 26 |
| II.1.2 Historique du projet :                                                                    | 26 |
| II.1.3 Présentation de l'Entreprise Métro d'Alger :                                              | 26 |
| II.2 DESCRIPTION DU PROJET EXTENSION DU MÉTRO D'ALGER                                            | 27 |
| II.2.1 L'importance du projet :                                                                  | 27 |
| II.2.2 État d'avancement des extensions :                                                        | 27 |
| II.2.2.1 Extensions en phase d'exploitation :                                                    | 27 |
| II.2.2.2 Extensions en phase d'étude achevée (APS – APD) :                                       | 28 |
| II.2.2.3 Extensions en cours de réalisation :                                                    | 29 |
| II.2.2.4 Organigramme des différents acteurs du projet El Harrach - Aéroport Houari Boumediene : | 30 |
| II.3 LES Puits DE VENTILATION DE L'EXTENSION LOT 01 :                                            | 31 |
| II.4 PRÉSENTATION DU Puits DE VENTILATION PV05 :                                                 | 32 |
| II.4.1 Localisation du puits de ventilation 05 :                                                 | 32 |
| II.4.2 Description de la conception du PV5 :                                                     | 34 |
| II.4.2.1 Caractéristiques géométriques du puits :                                                | 34 |
| II.4.2.2 Représentations graphiques du PV5 :                                                     | 34 |
| II.4.3 Description de la conception du rameau de connexion :                                     | 40 |
| II.4.1 Caractéristiques géométriques du rameau :                                                 | 40 |
| II.4.2 Représentations graphiques :                                                              | 40 |
| II.5 CONTEXTE GÉOLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET SISMIQUE DU PROJET :                                | 43 |
| II.5.1 Généralités sur la géologie de la wilaya d'Alger :                                        | 43 |
| II.5.1.1 Description lithologique de la plaine de Mitidja :                                      | 43 |
| II.5.1.2 Géologie locale du site d'étude et les zones limitrophes :                              | 44 |
| II.5.1.3 Contexte hydrogéologique de la région du projet :                                       | 44 |
| II.5.1.4 Contexte climatique du projet :                                                         | 46 |
| II.5.1.4.1 Température et pluviométrie moyenne :                                                 | 46 |
| II.5.1.5 Contexte sismique :                                                                     | 47 |
| I.5.1.5.1 Sismicité de la région d'étude :                                                       | 48 |
| CHAPITRE III : INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE                                                        | 49 |
| III.1 INTRODUCTION :                                                                             | 49 |
| III.2 DESCRIPTIFS DE L'ACCOMPAGNE D'INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE :                                 | 49 |
| III.2.1.1 Étude lithologique par sondage :                                                       | 57 |
| III.2.1.2 Logs de sondages et interprétation de la lithologie :                                  | 57 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| III.2.1.3 Profil lithologique :                                       | 58 |
| III.2.2 Essais in situ.....                                           | 60 |
| III.2.2.1 Généralités sur les essais in situ :                        | 60 |
| III.2.2.2 Essai au pénétromètre dynamique :                           | 61 |
| III.2.2.2.1 Principe de l'essai :                                     | 61 |
| III.2.2.2.2 Présentation des résultats :                              | 62 |
| III.2.2.2.3 Interprétation des résultats :                            | 63 |
| III.2.2.3 Essai pressiométrique Ménard :                              | 63 |
| III.2.2.3.1 Principe de l'essai pressiométrique :                     | 64 |
| III.2.2.3.2 Présentation des résultats :                              | 65 |
| III.2.2.3.3 Interprétation des résultats :                            | 65 |
| III.2.2.4 Essai piézométrique :                                       | 66 |
| III.2.2.4.1 Principe de l'essai :                                     | 67 |
| III.2.2.4.2 Présentation des résultats :                              | 69 |
| III.2.2.4.3 Interprétation des résultats :                            | 69 |
| III.3 ESSAIS DE LABORATOIRES .....                                    | 69 |
| III.3.1 Essais physiques.....                                         | 69 |
| III.3.1.1 Description des essais :                                    | 69 |
| III.3.1.2 Présentation des résultats :                                | 70 |
| III.3.1.3 Interprétation des résultats :                              | 73 |
| III.3.2 Essais mécanique .....                                        | 74 |
| III.3.2.1 Description des essais .....                                | 74 |
| III.3.2.2 Présentation des résultats :                                | 74 |
| III.3.2.3 Interprétation des résultats :                              | 75 |
| III.3.3 Essais chimiques .....                                        | 76 |
| III.3.3.1 Description des essais :                                    | 76 |
| III.3.3.2 Présentation des résultats :                                | 76 |
| III.3.3.3 Interprétation des résultats .....                          | 77 |
| III.4 SYNTHÈSE DE L'INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE.....                   | 77 |
| III.4.1 Tableau récapitulatif des caractéristiques géotechniques..... | 77 |
| III.4.3 Conclusion :                                                  | 79 |
| CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DES VARIANTES DE SOUTÈNEMENT .....         | 80 |
| IV.1 INTRODUCTION :                                                   | 80 |
| IV.2 IDENTIFICATION DE L'ÉCRAN LE PLUS SOLlicitÉ.....                 | 80 |
| IV.2.1 Justification du choix de la coupe A-A :                       | 80 |
| IV.2.2 Caractéristiques géométriques de l'écran .....                 | 83 |
| IV.3 VARIANTE DU PROJET PIEUX + BUTONS (SOLUTION BET).....            | 84 |
| IV.3.1 Description générale.....                                      | 84 |
| IV.3.2 Les pieux forés en béton armé.....                             | 85 |
| IV.3.2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques :                | 85 |
| IV.3.2.2 Ferrailage des pieux .....                                   | 86 |
| IV.3.3.1 Niveau N1 et N2 Système SB1 .....                            | 87 |
| IV.3.3.2 Niveau N3 (Système SB6) :                                    | 89 |
| IV.4 VARIANTE 1 PROPOSÉE PIEUX + 5 NIVEAUX DE TIRANTS D'ANCRAGE ..... | 90 |
| IV.4.1 Description générale.....                                      | 90 |
| IV.4.2 Les pieux forés en béton armé.....                             | 91 |
| IV.4.3 Les tirants d'ancrage .....                                    | 91 |
| IV.4.3.1 Caractéristiques générales .....                             | 91 |
| IV.4.3.2 Niveaux de tirants et précontrainte appliquée .....          | 93 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.5 VARIANTE 2 PROPOSÉE SOLUTION MIXTE (2 BUTONS + 1 TIRANT D'ANCRAGE).....                          | 95  |
| IV.5.1 Description générale.....                                                                      | 95  |
| IV.5.2 Les pieux forés en béton armé.....                                                             | 96  |
| IV.5.3 Récapitulatif général du système d'étalement .....                                             | 96  |
| IV.5.4 Le système de butonnage .....                                                                  | 97  |
| IV.5.4.1 Niveau N1 Profilé HEB 200 (cote +15,25 m).....                                               | 97  |
| IV.5.4.2 Niveau N2 Système SB1 HEB 500 (cote +7,25 m) .....                                           | 98  |
| IV.5.5 Le tirant d'ancrage (niveau N3).....                                                           | 98  |
| CHAPITRE V : MODÉLISATION NUMÉRIQUE .....                                                             | 100 |
| V.1 DONNÉES PRINCIPALES DE MODÉLISATION .....                                                         | 100 |
| V.1.1 Présentation générale du logiciel et hypothèses de calcul :.....                                | 100 |
| V.1.2 Paramètres de calcul et coefficients de sécurité : .....                                        | 100 |
| V.1.3 Géométrie et caractéristiques de la structure de soutènement :.....                             | 101 |
| V.1.4 Caractéristiques mécaniques des matériaux : .....                                               | 101 |
| V.1.5 Paramètres géotechniques du terrain : .....                                                     | 102 |
| V.1.6 Profil lithologique :.....                                                                      | 102 |
| V.1.7 Conditions de terrain et d'excavation : .....                                                   | 102 |
| V.1.8 Charges et surcharges appliquées : .....                                                        | 103 |
| V.1.9 Élément particulier de soutènement : .....                                                      | 103 |
| V.2 VARIANTE PROJET : SYSTÈME DE BUTONNAGE (SOLUTION DU PROJET) .....                                 | 104 |
| V.2.1 Hypothèses et phasage de modélisation : .....                                                   | 104 |
| V.2.2 Résultats en situation statique.....                                                            | 107 |
| V.2.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :.....                  | 107 |
| V.2.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure : .....                                    | 107 |
| V.2.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées : .....                                      | 108 |
| V.2.2.4 Tassements du sol : .....                                                                     | 109 |
| V.2.2.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop situation<br>statique : .....   | 110 |
| V.2.3 Résultats en situation sismique.....                                                            | 111 |
| V.2.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :.....                  | 111 |
| V.2.3.2 Sollicitations et efforts internes de la structure : .....                                    | 112 |
| V.2.3.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées : .....                                      | 113 |
| V.2.3.4 Tassements du sol : .....                                                                     | 114 |
| V.2.3.5 Vérification de la stabilité des talus par la méthode de Bishop situation<br>sismique : ..... | 115 |
| V.2.3 Vérification de ferrailage des pieux de l'écran de soutènement : .....                          | 116 |
| V.2.3.1 Vérification à la flexion : .....                                                             | 116 |
| V.2.3.2 Vérification à l'effort tranchant : .....                                                     | 117 |
| V.2.3.3 Conclusion du dimensionnement : .....                                                         | 117 |
| V.2.3 Interprétation des résultats (Solution avec système de butonnage).....                          | 118 |
| V.2.3.1 Interprétation de la situation statique : .....                                               | 118 |
| V.2.3.2 Interprétation de la situation sismique : .....                                               | 119 |
| V.2.3.3 Conclusion d'interprétation : .....                                                           | 120 |
| V.3 VARIANTE 1 : SOLUTION AVEC TIRANTS D'ANCRAGE .....                                                | 121 |
| V.3.1 Hypothèses et phasage de modélisation : .....                                                   | 121 |
| V.3.2 Résultats en situation statique.....                                                            | 124 |
| V.3.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :.....                  | 124 |
| V.3.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure : .....                                    | 125 |
| V.3.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées : .....                                      | 126 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V.3.2.4 Tassements du sol :                                                                      | 127 |
| V.3.2.5 Vérification de la stabilité des talus par la méthode de Bishop situation statique :     | 128 |
| V.3.3 Résultats en situation sismique                                                            | 129 |
| V.3.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :                  | 129 |
| V.3.3.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :                                     | 130 |
| V.3.3.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :                                       | 131 |
| V.3.3.4 Tassements du sol :                                                                      | 132 |
| V.3.3.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique :    | 133 |
| V.3.4 Ferrailage des pieux de l'écran de soutènement :                                           | 135 |
| V.3.4.1 Vérification à la flexion :                                                              | 135 |
| V.3.4.2 Vérification à l'effort tranchant :                                                      | 136 |
| V.3.4.3 Conclusion du dimensionnement :                                                          | 136 |
| V.3.5 Interprétation générale des résultats (solution avec tirants d'ancrage)                    | 137 |
| V.3.5.1 Interprétation de la situation statique :                                                | 137 |
| V.3.5.2 Interprétation de la situation sismique :                                                | 138 |
| V.3.5.3 Conclusion de l'interprétation :                                                         | 139 |
| V.4 VARIANTE 3 : SOLUTION MIXTE BUTONS + TIRANT D'ANCRAGE                                        | 140 |
| V.4.1 Hypothèses et phasage de modélisation :                                                    | 140 |
| V.4.2 Résultats en situation statique                                                            | 142 |
| V.4.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :                  | 142 |
| V.4.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :                                     | 143 |
| V.4.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :                                       | 144 |
| V.4.2.4 Tassements du sol :                                                                      | 145 |
| V.4.2.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique :    | 146 |
| V.4.3 Résultats en situation sismique                                                            | 147 |
| V.4.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :                  | 147 |
| V.4.3.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :                                     | 148 |
| V.4.3.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :                                       | 150 |
| V.4.3.4 Tassements du sol :                                                                      | 151 |
| V.4.3.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en Situation sismique :    | 151 |
| V.4.4 Ferrailage des pieux de l'écran de soutènement, Solution mixte bouton + tirant d'ancrage : | 153 |
| V.4.4.1 Vérification à la flexion :                                                              | 153 |
| V.4.4.2 Vérification à l'effort tranchant :                                                      | 154 |
| V.4.4.3 Conclusion du dimensionnement :                                                          | 154 |
| V.4.5 Interprétation générale des résultats (solution mixte boutons + tirant d'ancrage) :        | 155 |
| V.4.5.1 Interprétation de la situation statique :                                                | 155 |
| V.4.5.2 Interprétation de la situation sismique :                                                | 156 |
| V.4.5.3 Conclusion de l'interprétation :                                                         | 158 |
| CHAPITRES VI : ÉTUDE DES COÛTS ET DÉLAIS                                                         | 159 |
| VI.1 INTRODUCTION :                                                                              | 159 |
| VI.2 ANALYSE DES COÛTS                                                                           | 159 |
| VI.2.1 Méthodologie et hypothèses de calcul :                                                    | 159 |
| VI.2.2 Coûts Variante du projet (Pieux + Butons)                                                 | 161 |
| VI.2.2.1 Coût des pieux :                                                                        | 161 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| VI.2.2.2 Coût du système de butonnage et des massifs d'appui :        | 162 |
| VI.2.2.3 Coût total — Variante projet :                               | 162 |
| VI.2.3 Coûts Variante 1 proposée (Pieux + 5 niveaux de tirants) :     | 163 |
| VI.2.3.1 Coût des pieux :                                             | 163 |
| VI.2.3.2 Coût des tirants d'ancrage :                                 | 163 |
| VI.2.3.3 Coût total Variante 1 :                                      | 164 |
| VI.2.4 Coûts Variante 2 proposée (Solution mixte) :                   | 164 |
| VI.2.4.1 Coût des pieux :                                             | 164 |
| VI.2.4.2 Coût du butonnage :                                          | 165 |
| VI.2.4.3 Coût des tirants d'ancrage :                                 | 165 |
| VI.2.4.4 Coût total Variante 2 :                                      | 165 |
| VI.3 ANALYSE DES DÉLAIS D'EXÉCUTION :                                 | 166 |
| VI.3.1 Méthodologie et hypothèses de planning :                       | 166 |
| VI.3.2 Délais Variante projet :                                       | 166 |
| VI.3.2.1 Planning des pieux :                                         | 166 |
| VI.3.2.2 Planning du butonnage :                                      | 167 |
| VI.3.2.3 Délai total Variante projet :                                | 167 |
| VI.3.3 Délais Variante 1 :                                            | 167 |
| VI.3.3.1 Planning des pieux :                                         | 167 |
| VI.3.3.2 Planning des tirants :                                       | 167 |
| VI.3.3.3 Délai total Variante 1 :                                     | 168 |
| VI.3.4 Délais Variante 2 :                                            | 168 |
| VI.3.4.1 Planning des pieux :                                         | 168 |
| VI.3.4.2 Planning butonnage + tirants :                               | 168 |
| VI.3.4.3 Délai total Variante 2 :                                     | 168 |
| VI.3.5 Synthèse comparative des délais :                              | 168 |
| VI.4 COMPARAISON COÛT + DÉLAI :                                       | 169 |
| VI.4.1 Tableau comparatif global (coût + délai) :                     | 169 |
| VI.4.2 Diagramme des coûts par variante (barres empilées par poste) : | 169 |
| VI.4.3 Diagramme des délais par variante (Gantt simplifié) :          | 170 |
| VI.4.4 Diagramme comparatif des coûts seuls d'étalement :             | 170 |
| VI.4.6 Diagramme comparatif des délais seuls :                        | 171 |
| VI.5 ANALYSE MULTICRITÈRE DÉTAILLÉE MATRICES DE NOTATION :            | 172 |
| VI.5.1 Barèmes et règles de notation :                                | 172 |
| VI.5.2 Matrice de notation Pieux :                                    | 172 |
| VI.5.3 Matrice de notation Butons :                                   | 173 |
| VI.5.4 Matrice de notation Tirants d'ancrage :                        | 174 |
| VI.5.5 Matrice de notation Coûts :                                    | 176 |
| VI.5.6 Matrice de notation Délais :                                   | 176 |
| VI.5.7 Tableau de synthèse Cumul des points (/100) :                  | 176 |
| CHAPITRES VII : CONCLUSION GÉNÉRALE :                                 | 179 |



## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients des parois berlinoises .....                                                                                | 4  |
| Tableau I. 2 : Composants d'une paroi en palplanches .....                                                                                            | 5  |
| Tableau I. 3 Avantages et inconvénients des parois en palplanches .....                                                                               | 6  |
| Tableau I. 4 : Éléments constitutifs d'une paroi clouée .....                                                                                         | 8  |
| Tableau I. 5 : Avantages et inconvénients des parois clouées .....                                                                                    | 9  |
| Tableau I. 6 : Comparaison des parois en pieux .....                                                                                                  | 13 |
| Tableau I. 7 : Caractéristiques des parois moulées .....                                                                                              | 16 |
| Tableau I. 8 : Avantages et inconvénients des parois moulées .....                                                                                    | 17 |
| Tableau I. 9 : Types de butons .....                                                                                                                  | 18 |
| Tableau I. 10 : Matériaux des butons .....                                                                                                            | 19 |
| Tableau I. 11 : Avantages et inconvénients des butons .....                                                                                           | 20 |
| Tableau I. 12 : Éléments constitutifs d'un tirant d'ancrage .....                                                                                     | 21 |
| Tableau I. 13 : Tirants actifs et passifs .....                                                                                                       | 21 |
| Tableau I. 14 : Tirants provisoires et définitifs .....                                                                                               | 22 |
| Tableau I. 15 : Types d'armatures de tirants .....                                                                                                    | 22 |
| Tableau I. 16 : Avantages et inconvénients des tirants d'ancrage .....                                                                                | 23 |
| Tableau I. 17 : Comparaison tirants vs butons .....                                                                                                   | 23 |
|                                                                                                                                                       |    |
| Tableau III. 1 : Résumé des travaux de prospection et essais réalisés dans plusieurs études ..                                                        | 50 |
| Tableau III. 2 : Les différents types d'essais effectués lors des investigations géotechniques<br>du site .....                                       | 50 |
| Tableau III. 3 Localisation des sondages .....                                                                                                        | 51 |
| Tableau III. 4 : Description lithologique des différentes unités du sol en fonction de la<br>profondeur .....                                         | 58 |
| Tableau III. 5 : Facteurs de correction dans les sables en fonction de la longueur des tiges ...                                                      | 62 |
| Tableau III. 6 : Classification de Terzaghi et Peck (1967) .....                                                                                      | 63 |
| Tableau III. 7 : Localisation des différents piézomètres selon les sondages effectués .....                                                           | 67 |
| Tableau III. 8 : Résultats des teneurs en eau et masses volumiques (Sondage S21 , Campagne<br>APD) .....                                              | 70 |
| Tableau III. 9 : Résultats des Limites d'Atterberg (Sondage S21 , Campagne APD) .....                                                                 | 71 |
| Tableau III. 10 : Résultats de granulométrie (Sondages S21, SC44, SC45 , 2013 & 2015) ....                                                            | 72 |
| Tableau III. 11 : Résultats de l'essai au Bleu de Méthylène (Sondage SC45) .....                                                                      | 72 |
| Tableau III. 12 : Tableau de synthèse des essais d'identification et des caractéristiques<br>géotechniques des sols (Phases APD et Prospection) ..... | 73 |
| Tableau III. 13 : Tableau de synthèse des essais d'identification et des caractéristiques<br>géotechniques des sols (Phases APD et Prospection) ..... | 75 |
| Tableau III. 14 : résultats des analyses chimiques, issus de la campagne de prospection<br>complémentaire .....                                       | 77 |
| Tableau III. 15 : Paramètres géotechniques de calcul - sols .....                                                                                     | 78 |
| Tableau III. 16 : différentes couches de sol selon la réponse drainé ou non drainé .....                                                              | 78 |
|                                                                                                                                                       |    |
| Tableau IV. 1 : Comparaison des coupes transversales du PV5 .....                                                                                     | 81 |
| Tableau IV. 2 : Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'écran (coupe A-A) .....                                                              | 83 |
| Tableau IV. 3 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux forés .....                                                                     | 86 |
| Tableau IV. 4 : Récapitulatif des niveaux de butonnage .....                                                                                          | 86 |
| Tableau IV. 5 : Caractéristiques détaillées du système de butonnage SB1 (niveaux N1 et N2)<br>.....                                                   | 88 |
| Tableau IV. 6 : Caractéristiques détaillées du système de butonnage SB6 (niveau N3) .....                                                             | 89 |
| Tableau IV. 7 : Caractéristiques des pieux forés (Variante 1 proposée) .....                                                                          | 91 |

|                                                                                             |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tableau IV. 8 : Caractéristiques générales des tirants d'ancrage (Variante 1 proposée)..... | 92      |
| Tableau IV. 9 : Récapitulatif des niveaux de tirants d'ancrage (Variante 1 proposée) .....  | 93      |
| Tableau IV. 10 : Précontrainte appliquée par niveau de tirants (Variante 1 proposée) .....  | 93      |
| Tableau IV. 11 : Récapitulatif du système d'étalement mixte (Variante 2 proposée) .....     | 96      |
| Tableau IV. 12 : Caractéristiques du bouton N1 HEB 200 (Variante 2 proposée) .....          | 98      |
| Tableau IV. 13 : Caractéristiques du bouton N2 SB1 HEB 500 (Variante 2 proposée) .....      | 98      |
| Tableau IV. 14 : Caractéristiques du tirant d'ancrage N3 (Variante 2 proposée).....         | 99      |
| Tableau IV. 15 : Barèmes de notation des sous-critères (notes de 1 à 10) .....              | 172     |
| Tableau IV. 16 : Données de vérification des pieux par variante .....                       | 173     |
| Tableau IV. 17 : Matrice de notation Pieux (notes /10).....                                 | 173     |
| Tableau IV. 18 : Données de vérification des boutons par niveau et par variante .....       | 174     |
| Tableau IV. 19 : Matrice de notation Boutons (notes /10) .....                              | 174     |
| Tableau IV. 20 : Données de vérification des tirants d'ancrage.....                         | 175     |
| Tableau IV. 21 : Matrice de notation — Tirants d'ancrage (notes /10).....                   | 175     |
| <br>Tableau V. 1 : Les différents coefficients de sécurité dans le logiciel.....            | <br>101 |
| Tableau V. 2 : Les paramètres géotechniques.....                                            | 102     |
| Tableau V. 3 : Profil géologique .....                                                      | 102     |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I. 1 : d'une paroi berlinoise avec Principe profilés métalliques et éléments de blindage ..... | 3  |
| Figure I. 2 : Schéma du procédé d'exécution d'une paroi berlinoise.....                               | 3  |
| Figure I. 3 : Rideau de soutènement réalisé en palplanches métalliques cas d'une fouille .....        | 5  |
| Figure I. 4 : Étapes de réalisation d'un rideau de palplanches.....                                   | 6  |
| Figure I. 5 : Principe du soutènement par paroi clouée avec béton projeté .....                       | 7  |
| Figure I. 6 : Phases de réalisation d'une paroi clouée.....                                           | 8  |
| Figure I. 7 : Principe des différents types de parois en pieux (disjoints, jointifs et sécants) ...   | 10 |
| Figure I. 8 : Mur Pieu Contigu .....                                                                  | 11 |
| Figure I. 9 : Parois en pieux jointifs.....                                                           | 12 |
| Figure I. 10 : Paroi en pieux sécants (alternance pieux primaires et secondaires).....                | 12 |
| Figure I. 11 : Étapes de réalisation d'une paroi en pieux forés.....                                  | 13 |
| Figure I. 12 : Principe du bétonnage d'une paroi moulée par tube plongeur.....                        | 15 |
| Figure I. 13 : Étapes de réalisation d'une paroi moulée.....                                          | 16 |
| Figure I. 14 : Système de soutènement par butons dans une fouille .....                               | 18 |
| Figure I. 15 : Phases d'installation des butons dans une fouille profonde .....                       | 19 |
| Figure I. 16 : Schéma d'un tirant d'ancrage.....                                                      | 20 |
| Figure I. 17 : Tirant d'ancrage avec différents mode de rupture du sol .....                          | 21 |
| Figure I. 18 : Phases de réalisation d'un tirant d'ancrage .....                                      | 22 |
| <br>                                                                                                  |    |
| Figure II. 1 : Les extensions de la ligne 1 du métro d'Alger .....                                    | 27 |
| Figure II. 2 : Les extensions du métro en phase exploitation.....                                     | 28 |
| Figure II. 3 : Extension El Harrach aéroport.....                                                     | 30 |
| Figure II. 4 : Vue d'ensemble, Localisation .....                                                     | 33 |
| Figure II. 5 : Localisation de PV5 dans photo Google earth.....                                       | 33 |
| Figure II. 6 : vue en plan niveau de dalle de couverture .....                                        | 35 |
| Figure II. 7 : Vue en plan niveau +5.88.....                                                          | 35 |
| Figure II. 8 : vue en plan niveau -5.23 .....                                                         | 36 |
| Figure II. 9 : Coupe B-B .....                                                                        | 36 |
| Figure II. 10 : Coupe E-E.....                                                                        | 37 |
| Figure II. 11 : Coupe A-A .....                                                                       | 37 |
| Figure II. 12 : Coupe C-C .....                                                                       | 38 |
| Figure II. 13 : Coupe F-F .....                                                                       | 38 |
| Figure II. 14 : Schéma des escaliers du PV 05 .....                                                   | 39 |
| Figure II. 15 : Schéma 3D du PV 05 .....                                                              | 40 |
| Figure II. 16 : Vue en plan du rameau.....                                                            | 41 |
| Figure II. 17 : Vue longitudinale du rameau .....                                                     | 41 |
| Figure II. 18 : Vue transversale du rameau .....                                                      | 42 |
| Figure II. 19 : Carte morphogéologique du bassin de la Mitidja et ses environs.....                   | 43 |
| Figure II. 20 : Répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est.....                    | 45 |
| Figure II. 21 : Réseau hydrographique de la région d'étude.....                                       | 45 |
| Figure II. 22 : Histogramme pluviométrie et courbe de variation de température de la I.3 Ville .....  | 46 |
| Figure II. 23 : Relevé météorologique d'Alger .....                                                   | 47 |
| Figure II. 24 : Carte du zonage sismique du territoire national RPA99 / APRES ADDENDA .....           | 48 |
| <br>                                                                                                  |    |
| Figure III. 1 : Plan d'implantation des sondages du puits de ventilation 05.....                      | 51 |
| Figure III. 2 : Profil transversale du PV5 .....                                                      | 59 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure III. 3 : Profil longitudinale du PV5 .....                                                                                                        | 60  |
| Figure III. 4 : Schéma de principe d'un pénétromètre dynamique .....                                                                                     | 62  |
| Figure III. 5 : schéma de sonde pressiométrique.....                                                                                                     | 65  |
| Figure III. 6 : Principe du pressiomètre .....                                                                                                           | 65  |
| Figure III. 7 : Schéma du principe du piézomètre à tube ouvert.....                                                                                      | 68  |
| Figure III. 8 : Schéma du principe du piézomètre à corde vibrante .....                                                                                  | 69  |
| Figure III. 9 : Log de sondage S21 (0–35 m).....                                                                                                         | 70  |
| Figure III. 10 : Photos des caisses à carottes S21 (caisse 1/5 - 5/5) état visuel des sols<br>Tableau.....                                               | 71  |
|                                                                                                                                                          |     |
| Figure IV. 1 : Plan d'implantation général des coupes transversales du puits de ventilation<br>PV5 (identification des coupes A-A, B-B, C-C et D-D)..... | 81  |
| Figure IV. 2 : Vue transversale de l'écran le plus sollicité du PV5 (coupe de référence, Éch.<br>1:200).....                                             | 82  |
| Figure IV. 3 : coupe longitudinale système de butonnage du PV5 Variante projet.....                                                                      | 84  |
| Figure IV. 4 : l'écran concernait par l'étude de la variante projet.....                                                                                 | 85  |
| Figure IV. 5 : Plan du système de butonnage aux trois niveaux d'étaieimen .....                                                                          | 87  |
| Figure IV. 6 : Plan du système de butonnage SB +15.25 .....                                                                                              | 87  |
| Figure IV. 7 : Plan du système de butonnage SB cote +10.20 .....                                                                                         | 88  |
| Figure IV. 8 : Plan du système de butonnage SB cote +3.10 .....                                                                                          | 89  |
| Figure IV. 9 : Coupe longitudinale du système la variante 1 proposée.....                                                                                | 90  |
| Figure IV. 10 : Schéma de principe de la variante 1 proposée .....                                                                                       | 92  |
| Figure IV. 11 : coupe longitudinale de la variante 2 proposée .....                                                                                      | 95  |
| Figure IV. 12 : Schéma de principe de la variante 2 proposée .....                                                                                       | 97  |
|                                                                                                                                                          |     |
| Figure V. 1 : les données principales de modélisation .....                                                                                              | 103 |
| Figure V. 2 : Modélisation du butonnage : phasage de la solution.....                                                                                    | 106 |
| Figure V. 3 : Distribution du module de réaction du sol K h en fonction de la profondeur ...                                                             | 107 |
| Figure V. 4 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) .....                                                               | 108 |
| Figure V. 5 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation statique solution avec<br>butonnage.....                                                  | 109 |
| Figure V. 6 : Tassements du sol en surface en situation statique solution avec butonnage ....                                                            | 110 |
| Figure V. 7 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique<br>solution avec butonnage.....                        | 111 |
| Figure V. 8 : Distribution du module de réaction K h et pressions sur l'écran en situation<br>sismique solution avec butonnage .....                     | 112 |
| Figure V. 9 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en<br>situation sismique solution avec butonnage.....               | 113 |
| Figure V. 10 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation sismique solution avec<br>butonnage.....                                                 | 114 |
| Figure V. 11 : Tassements du sol en surface en situation sismique solution avec butonnage                                                                | 115 |
| Figure V. 12 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation<br>sismique solution avec butonnage .....                      | 116 |
| Figure V. 13 : diagramme du dimensionnement solution avec butonnage.....                                                                                 | 118 |
| Figure V. 14 : Phasage de la solution avec tirants d'ancrage.....                                                                                        | 124 |
|                                                                                                                                                          |     |
| Figure VI. 1 : Décomposition des coûts par poste pour chaque variante.....                                                                               | 169 |
| Figure VI. 2 : Diagramme de Gantt simplifié des délais d'étaieiment .....                                                                                | 170 |
| Figure VI. 3 : Comparaison des coûts d'étaieiment seuls (hors pieux) des trois variantes .....                                                           | 170 |
| Figure VI. 4 : Comparaison des délais d'étaieiment des trois variantes.....                                                                              | 171 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure VI. 5 : Comparaison combinée des coûts d'étalement et des délais des trois variantes ..... | 171 |
| Figures VI. 6 : Décomposition du score cumulé des trois variantes (/100) .....                    | 177 |
| Figure VI. 7 : Profil multicritère des trois variantes (notes /10 par critère) .....              | 178 |

## ABREVIATIONS, NOTATIONS ET SYMBOLES

### Abréviations générales et organismes

|                     |                                                                  |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>PFE</b>          | Projet de Fin d'Études                                           |
| <b>ENSTP-FJ</b>     | École Nationale Supérieure des Travaux Publics – Francis Jeanson |
| <b>DMS</b>          | Département Matériaux & Structures                               |
| <b>EMA</b>          | Entreprise Métro d'Alger (maître d'ouvrage)                      |
| <b>TPF GETINSA</b>  | Bureau de maîtrise d'œuvre (Espagne)                             |
| <b>DMEC</b>         | Dong Myeong Engineering and Architecture (Corée du Sud)          |
| <b>GEICA</b>        | Groupe d'entreprises d'études d'infrastructures                  |
| <b>COSIDER TP</b>   | Entreprise de réalisation (gros œuvre)                           |
| <b>INGEO</b>        | Laboratoire géotechnique (campagne APD)                          |
| <b>LHCC</b>         | Laboratoire de l'Habitat et de la Construction (Oued Smar)       |
| <b>MATE</b>         | ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement   |
| <b>ONM</b>          | Office National de Météorologie                                  |
| <b>PV0 ... PV10</b> | Puits de Ventilation N°0 à N°10                                  |
| <b>PV5 / PV05</b>   | Puits de Ventilation N°05 (objet de l'étude)                     |
| <b>LOT 01</b>       | Lot 1 de l'extension du métro d'Alger                            |
| <b>PK</b>           | Point Kilométrique                                               |
| <b>TN</b>           | Terrain Naturel                                                  |
| <b>BET / BE</b>     | Bureau d'Études                                                  |

### Phases d'étude et investigation

|                              |                                         |
|------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>APS</b>                   | Avant-Projet Sommaire                   |
| <b>APD</b>                   | Avant-Projet Définitif                  |
| <b>CPC</b>                   | Campagne de procepection complémentaire |
| <b>S21, SC44, SC45, SP30</b> | Références des sondages                 |
| <b>TPO</b>                   | Tube Ouvert (piézomètre)                |
| <b>PZ</b>                    | Piézomètre                              |

### Essais géotechniques

|                  |                                                         |
|------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>SPT</b>       | Standard Penetration Test (essai au carottier standard) |
| <b>PDA / PDB</b> | Pénétromètre Dynamique type A / type B                  |
| <b>RC</b>        | Résistance à la Compression simple                      |
| <b>UU</b>        | Essai non-consolidé non-drainé                          |
| <b>CU / CD</b>   | Essai consolidé non-drainé / consolidé drainé           |
| <b>VBS</b>       | Valeur au Bleu de Sol (essai au Bleu de Méthylène)      |
| <b>LPC</b>       | Laboratoire des Ponts et Chaussées (classification)     |
| <b>USCS</b>      | Unified Soil Classification System                      |
| <b>OCR</b>       | Over-Consolidation Ratio (rapport de surconsolidation)  |
| <b>DTU</b>       | Document Technique Unifié (DTU 13.12)                   |

### Unités géotechniques (couches de sol)

|                        |                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>R / Re</b>          | Remblais                                          |
| <b>QA</b>              | Argile limoneuse (quaternaire argileux)           |
| <b>QS</b>              | Sables limoneux-argileux (quaternaire sableux)    |
| <b>QM</b>              | Argiles marneuses                                 |
| <b>QM<sub>sg</sub></b> | Sable limoneux-argileux avec présence de cailloux |

### **Matériaux, profilés et normes**

|                        |                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>EC2 / EC3 / EC7</b> | Eurocode 2 / 3 / 7                                       |
| <b>EN 1992-1-1</b>     | Eurocode 2 (béton armé)                                  |
| <b>EN 1993-1-1</b>     | Eurocode 3 (construction métallique)                     |
| <b>RPA</b>             | Règlement Parasismique Algérien                          |
| <b>NF / NFP / XP P</b> | Normes françaises (AFNOR)                                |
| <b>C30/37</b>          | Classe de résistance du béton                            |
| <b>XC2</b>             | Classe d'exposition (corrosion, milieu humide)           |
| <b>A500 NR</b>         | Acier d'armature (limite élastique 500 MPa)              |
| <b>B500A</b>           | Nuance d'acier d'armature                                |
| <b>S235 / S275</b>     | Nuances d'acier de construction                          |
| <b>HA</b>              | Haute Adhérence (barre d'armature)                       |
| <b>HEB</b>             | Profilé métallique européen à larges ailes (poutrelle H) |
| <b>CL 8.8</b>          | Classe de résistance de la boulonnerie                   |
| <b>CRS</b>             | Ciment Résistant aux Sulfates                            |
| <b>DYWIDAG</b>         | Système de tirant d'ancrage précontraint                 |
| <b>SB1 / SB6 / SB7</b> | Systèmes de butonnage (références du bureau d'études)    |
| <b>PM</b>              | Profilé Métallique (référence de plan)                   |

### **Logiciels et méthodes de calcul**

|                       |                                                              |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>GEO5</b>           | Logiciel de calcul géotechnique                              |
| <b>Sheeting Check</b> | Module de vérification du soutènement (GEO5)                 |
| <b>Design Check</b>   | Module d'analyse des déplacements (GEO5)                     |
| <b>PLAXIS</b>         | Logiciel d'éléments finis (perspective)                      |
| <b>FEM</b>            | Finite Element Method (méthode des éléments finis)           |
| <b>ASD</b>            | Allowable Stress Design (calcul aux contraintes admissibles) |

### **Notations paramètres physiques du sol**

|                           |                                                         |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| $\gamma$                  | Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )                    |
| $\gamma_h / \gamma_d$     | Poids volumique humide / sec (kN/m <sup>3</sup> )       |
| $\gamma_s$                | Poids volumique des grains solides (kN/m <sup>3</sup> ) |
| <b>W</b>                  | Teneur en eau naturelle (%)                             |
| <b>W<sub>p</sub> / WL</b> | Limite de plasticité / de liquidité (%)                 |
| <b>I<sub>p</sub></b>      | Indice de plasticité (%)                                |
| <b>S<sub>r</sub></b>      | Degré de saturation (%)                                 |
| <b>e<sub>o</sub></b>      | Indice des vides initial                                |

## Notations paramètres mécaniques du sol

|                       |                                                   |
|-----------------------|---------------------------------------------------|
| $\phi / \phi'$        | Angle de frottement interne / effectif (°)        |
| $\phi_u$              | Angle de frottement non drainé (°)                |
| $\delta$              | Angle de frottement sol-paroi (°)                 |
| $C / C'$              | Cohésion / cohésion effective (kPa)               |
| $C_u$                 | Cohésion non drainée (kPa)                        |
| $s_u$                 | Résistance au cisaillement non drainée (kPa)      |
| $\nu$                 | Coefficient de Poisson                            |
| $E' / E_u$            | Module de déformation drainé / non drainé (MPa)   |
| $E_{def}$             | Module de déformation utilisé sous GEO5 (MPa)     |
| $E_m$                 | Module pressiométrique Ménard (MPa)               |
| $P_l / P_f$           | Pression limite / de fluage pressiométrique (MPa) |
| $P_c$                 | Pression de préconsolidation (kPa)                |
| $C_c / C_g$           | Indice de compression / de gonflement             |
| $N_{spt}$             | Nombre de coups SPT                               |
| $N_{60} / (N_1)_{60}$ | Valeurs SPT corrigées                             |
| $CE, \lambda, CN$     | Facteurs de correction de l'essai SPT             |

## Notations poussées et conditions hydrauliques

|                     |                                                              |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| $K_a / K_p$         | Coefficient de poussée active / passive                      |
| $\sigma_h$          | Pression horizontale des terres (kPa)                        |
| $\sigma_z$          | Contrainte verticale (kPa)                                   |
| $\sigma'_v$         | Contrainte verticale effective (kPa)                         |
| $\sigma_a \min$     | Pression active minimale (kPa)                               |
| $z$                 | Profondeur (m)                                               |
| $NP$                | Niveau de la nappe phréatique (m)                            |
| $K_h \text{ (sol)}$ | Module de réaction horizontal (méthode de Schmitt / Winkler) |

## Notations éléments de structure

|                     |                                                                  |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\emptyset$         | Diamètre (pieu, barre, toron) (mm)                               |
| $A$                 | Aire de la section ramenée au mètre linéaire (m <sup>2</sup> /m) |
| $I$                 | Moment d'inertie ramené au mètre linéaire (m <sup>4</sup> /m)    |
| $f_{ck}$            | Résistance caractéristique du béton en compression (MPa)         |
| $f_{ctm}$           | Résistance moyenne du béton en traction (MPa)                    |
| $f_{yk}$            | Limite d'élasticité de l'acier (MPa)                             |
| $E_s$               | Module d'élasticité de l'acier (MPa)                             |
| $G$                 | Module de cisaillement (MPa)                                     |
| $\rho / \rho_{min}$ | Taux d'armature / taux d'armature minimal (%)                    |
| $A_{sw}$            | Section d'armatures transversales (mm <sup>2</sup> )             |
| $b_w$               | Largeur efficace de la section (m)                               |
| $d$                 | Hauteur utile / diamètre du pieu (m)                             |
| $c$                 | Enrobage des armatures (mm)                                      |



**a**                                      Espacement (entraxe) des pieux (m)

**Notations efforts internes et vérifications**

|                                  |                                                         |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>M / MEd</b>                   | Moment fléchissant / moment de calcul sollicitant (kNm) |
| <b>MRd</b>                       | Moment résistant (kNm)                                  |
| <b>V / VEd</b>                   | Effort tranchant / effort tranchant de calcul (kN)      |
| <b>VRd</b>                       | Effort tranchant résistant (kN)                         |
| <b><math>\Delta_{max}</math></b> | Déplacement ou tassement maximal (mm)                   |
| <b>Rt</b>                        | Résistance à la traction du tirant (kN)                 |
| <b>Re</b>                        | Résistance à l'arrachement dans le sol (kN)             |
| <b>Rc</b>                        | Résistance à l'arrachement dans le coulis (kN)          |
| <b>Rmax / Rmob</b>               | Pression passive maximale / mobilisée (kN/m)            |
| <b>Fa / Fp</b>                   | Forces actives / passives, méthode de Bishop (kN/m)     |
| <b>Ma / Mp</b>                   | Moment de glissement / moment résistant, Bishop (kNm/m) |
| <b>Li / Ls</b>                   | Longueur libre / longueur scellée du tirant (m)         |
| <b><math>\tau</math></b>         | Taux de travail (rapport sollicitation/résistance) (%)  |

**Notations sécurité et action sismique**

|                        |                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>SF</b>              | Facteur de sécurité (Safety Factor)                                |
| <b>SFo / SFs / SFb</b> | FS au renversement / glissement / capacité portante                |
| <b>SFp / SFf / SFv</b> | FS pression passive / frottement / vertical                        |
| <b>A</b>               | Coefficient d'accélération sismique (= 0,40 g en phase définitive) |
| <b>Kh / Kv</b>         | Coefficient d'accélération sismique horizontal / vertical          |

**Unités**

|                                          |                                  |
|------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>DA</b>                                | Dinar Algérien                   |
| <b>ml</b>                                | Mètre linéaire                   |
| <b>m / m<sup>2</sup> / m<sup>3</sup></b> | Mètre / mètre carré / mètre cube |
| <b>mm / cm</b>                           | Millimètre / centimètre          |
| <b>kN / kNm</b>                          | Kilonewton / kilonewton-mètre    |
| <b>kPa / MPa</b>                         | Kilopascal / mégapascal          |
| <b>bar</b>                               | Bar (1 bar $\approx$ 100 kPa)    |
| <b>kg / T</b>                            | Kilogramme / tonne               |
| <b>g</b>                                 | Accélération de la pesanteur     |

## CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 INTRODUCTION :

Les fouilles urbaines correspondent aux excavations réalisées pour la construction d'ouvrages souterrains tels que les stations de métro, les parkings ou les puits de ventilation. Dans les zones urbaines, ces fouilles doivent être réalisées en tenant compte de nombreuses contraintes telles que la proximité des bâtiments existants, les réseaux souterrains et la présence éventuelle de la nappe phréatique.

La réalisation d'une fouille profonde nécessite donc la mise en place d'un système de soutènement permettant d'assurer la stabilité des parois et de limiter les déplacements du sol. Ces systèmes peuvent être temporaires ou permanents et leur choix dépend principalement des conditions géotechniques, de la profondeur de la fouille et de l'environnement urbain.

### I.2 BLINDAGE DES FOUILLES :

Le blindage des fouilles constitue une technique de soutènement temporaire ou permanent utilisée lors de la réalisation d'excavations, notamment en milieu urbain. Son rôle principal est d'assurer la stabilité des parois de la fouille en empêchant les éboulements ou les déplacements excessifs du sol pendant les différentes phases de construction. En effet, lors d'une excavation, l'équilibre naturel du terrain est modifié, ce qui entraîne une redistribution des contraintes dans le massif environnant. Sans dispositif de soutènement adapté, cette modification peut provoquer des instabilités pouvant compromettre la sécurité des travailleurs, des ouvrages avoisinants et de l'infrastructure en cours de construction.

Le blindage permet ainsi de maintenir les terres en place, de limiter les déformations du terrain et de protéger les structures voisines contre les tassements ou les déplacements horizontaux. Dans les zones urbaines denses, où les constructions existantes, les réseaux souterrains et les infrastructures de transport sont souvent très proches des zones d'excavation, la mise en place d'un système de blindage efficace devient une étape essentielle du projet.

Les systèmes de blindage sont généralement constitués de plusieurs éléments structuraux qui travaillent conjointement pour reprendre les pressions exercées par le sol et éventuellement par l'eau. On distingue principalement :

- Les éléments verticaux de soutènement, tels que les parois moulées, les pieux, les palplanches ou encore les parois berlinoises. Ces éléments constituent la structure principale du système de soutènement et assurent la retenue du terrain.
- Les éléments de soutien horizontaux, notamment les butons ou les tirants d'ancrage, qui permettent de stabiliser la paroi en reprenant les efforts horizontaux exercés par le sol. Les butons sont généralement installés à l'intérieur de la fouille entre deux parois opposées, tandis que les tirants d'ancrage sont ancrés dans le terrain derrière la paroi afin de mobiliser la résistance du sol en profondeur.
- Les revêtements ou panneaux de retenue, tels que le béton projeté, les planches en bois ou les plaques métalliques, qui assurent le confinement du sol entre les éléments porteurs et contribuent à la stabilité globale de la paroi.

Le choix du système de blindage dépend de plusieurs paramètres techniques et économiques. Parmi les facteurs les plus déterminants, on peut citer :

- La profondeur de la fouille, qui influence directement les efforts exercés sur les parois de soutènement et la rigidité requise du système.

- La nature et les caractéristiques géotechniques du sol, telles que la cohésion, l'angle de frottement interne ou la compressibilité du terrain.
- La présence éventuelle de la nappe phréatique, qui peut générer des pressions hydrostatiques importantes et nécessiter des solutions de soutènement étanches.
- La proximité des structures existantes, comme les bâtiments, les routes ou les réseaux souterrains, qui impose souvent de limiter les déplacements du terrain afin d'éviter tout dommage aux ouvrages voisins.
- Les considérations économiques et les délais de réalisation, qui influencent le choix de la technique la plus adaptée en fonction du coût de mise en œuvre, de la disponibilité des équipements et de la durée des travaux.

### I.3 LES PRINCIPAUX SYSTEMES DE BLINDAGE

#### I.3.1 Paroi berlinoise

##### I.3.1.1 Définition et principe :

La paroi berlinoise est une technique de soutènement provisoire largement utilisée dans les travaux de fouilles urbaines. Elle consiste à mettre en place une série de profilés métalliques verticaux espacés régulièrement, entre lesquels sont insérés des éléments de blindage destinés à retenir les terres au fur et à mesure de l'excavation.

Cette technique est particulièrement adaptée aux chantiers urbains nécessitant des excavations de profondeur modérée, notamment pour la construction de sous-sols, de parkings souterrains, de stations de métro ou de puits d'accès pour les tunnels.

Le système de paroi berlinoise se compose principalement de trois éléments structuraux :

- les éléments porteurs verticaux, généralement constitués de profilés métalliques .
- les éléments de blindage, qui assurent la retenue des terres entre les profilés .
- les systèmes de stabilisation, tels que les tirants d'ancrage ou les butons, permettant de limiter les déplacements de la paroi.

Les profilés verticaux les plus utilisés sont les profilés métalliques en H ou en I . Ces éléments sont implantés dans le sol avant le début de l'excavation par battage, forage ou vibrofonçage.

L'espacement entre les profilés est généralement compris entre 1 et 3 mètres, selon la nature du sol et les charges à reprendre. Une fois les profilés installés, l'excavation est réalisée progressivement et les éléments de blindage sont placés entre les profilés afin de retenir les terres.

Ces éléments peuvent être constitués de :

- madriers en bois, plaques métalliques, panneaux en béton préfabriqué, béton projeté (gunité)

La paroi berlinoise a pour fonction principale d'assurer le soutènement temporaire des terres pendant la phase de construction. Elle ne possède généralement ni fonction structurelle permanente ni fonction d'étanchéité, ce qui limite son utilisation dans les terrains saturés en eau.

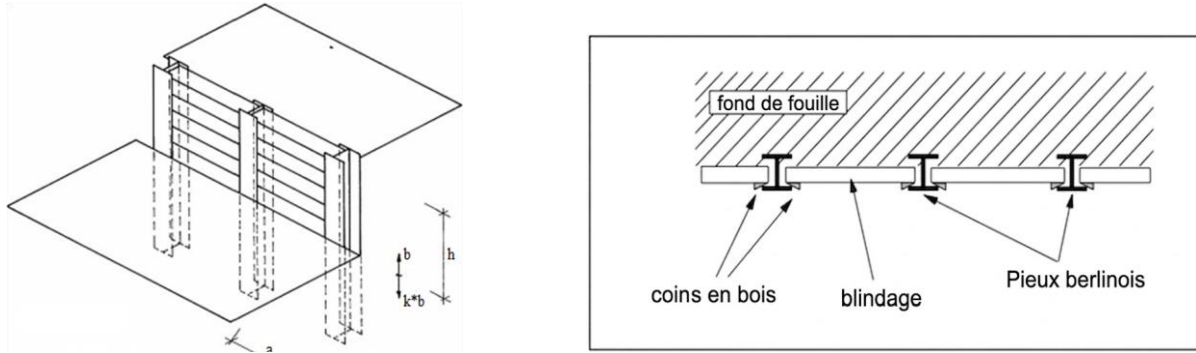


Figure I. 1 : d'une paroi berlinoise avec Principe profilés métalliques et éléments de blindage

## I.3.1.2 Procédé d'exécution :

La réalisation d'une paroi berlinoise suit généralement une procédure d'exécution progressive permettant d'assurer la stabilité du terrain pendant les travaux. Les principales étapes sont les suivantes :

1. Mise en place des profilés verticaux : dans un premier temps, les profilés métalliques sont installés dans le sol à l'aide de techniques de battage, de forage ou de vibrofonçage. Leur profondeur dépend de la hauteur de la fouille et des caractéristiques géotechniques du terrain.
2. Première phase de terrassement : une première phase d'excavation est réalisée sur une hauteur généralement comprise entre 1 et 2 mètres.
3. Mise en place du blindage : après cette excavation, les éléments de blindage sont installés entre les profilés afin de retenir les terres.
4. Mise en place des systèmes de stabilisation : lorsque la profondeur de la fouille augmente, des tirants d'ancrage ou des butons peuvent être installés pour reprendre les efforts horizontaux exercés par le sol.
5. Poursuite progressive de l'excavation : les opérations de terrassement et de mise en place du blindage sont répétées jusqu'à atteindre la profondeur finale de la fouille.

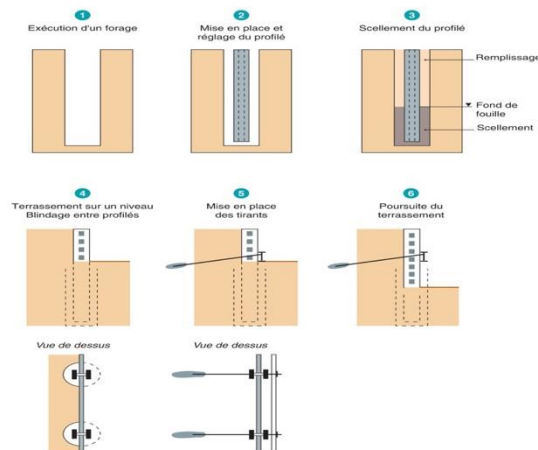


Figure I. 2 : Schéma du procédé d'exécution d'une paroi berlinoise

# CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les parois berlinoises étant perméables, il est souvent nécessaire de mettre en place un système de drainage afin d'éviter l'accumulation d'eau derrière la paroi.

Les solutions les plus couramment utilisées sont :

- les barbacanes : permettant l'évacuation de l'eau vers l'intérieur de la fouille ;
- les géosynthétiques drainants : disposés verticalement derrière le blindage ;
- les drains subhorizontaux : permettant de capter l'eau dans le massif.

## I.3.1.4 Domaine d'application :

Les parois berlinoises sont utilisées dans de nombreux projets de génie civil, notamment :

- fouilles pour bâtiments urbains, réalisation de parkings souterrains, construction de stations de métro, excavation de puits d'accès pour tunnels .

Elles sont particulièrement adaptées aux chantiers où :

- la profondeur de la fouille est modérée ( $\leq 8$  à  $10$  m), la nappe phréatique est absente ou faible, l'espace disponible est restreint

## I.3.1.5 Avantages et inconvénients :

Malgré ses nombreux avantages, la paroi berlinoise présente certaines limitations :

- elle ne convient pas aux terrains très meubles ou instables ;
- elle est difficile à utiliser en présence d'une nappe phréatique importante ;
- sa rigidité est inférieure à celle des parois moulées ou des parois en pieux sécants.

Pour ces raisons, le choix de cette technique doit toujours être précédé d'une étude géotechnique approfondie.

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients des parois berlinoises

| Avantages                          | Inconvénients           |
|------------------------------------|-------------------------|
| Technique économique               | Non étanche             |
| Mise en œuvre rapide               | Profondeur limitée      |
| Adaptée aux sites urbains          | Nécessite des ancrages  |
| Peu de vibrations                  | Déformations possibles  |
| Adaptable à différentes géométries | Sensible à la corrosion |

## I.3.2 Paroi en palplanches

### I.3.2.1 Définition et principe :

Les parois en palplanches constituent une technique de soutènement largement utilisée dans les travaux de génie civil et les excavations profondes. Elles sont constituées de profilés verticaux, généralement métalliques, qui s'emboîtent les uns dans les autres grâce à des dispositifs de jonction appelés serrures, formant ainsi un rideau continu capable de retenir les terres et parfois de limiter les infiltrations d'eau.

Les palplanches sont enfoncées dans le sol par battage, vibrofonçage ou vérinage hydraulique, jusqu'à atteindre une profondeur suffisante pour assurer la stabilité de la paroi. Une fois assemblées, elles forment une structure de soutènement verticale capable de résister aux poussées latérales du sol et aux pressions de l'eau.

Ce système peut être utilisé comme ouvrage provisoire ou permanent, notamment pour la réalisation de fouilles, de batardeaux, de quais portuaires ou de travaux souterrains. Dans certains cas, des tirants d'ancrage ou des butons sont ajoutés afin d'augmenter la capacité de résistance de la paroi lorsque la profondeur d'excavation est importante.



Figure I. 3 : Rideau de soutènement réalisé en palplanches métalliques cas d'une fouille

### I.3.2.2 Composition d'une paroi en palplanches :

Tableau I. 2 : Composants d'une paroi en palplanches

| Élément           | Description                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| Palplanches       | Profilés métalliques verticaux s'emboîtant entre eux         |
| Serrures          | Systèmes d'emboîtement assurant la continuité de la paroi    |
| Lierne            | Poutre horizontale répartissant les efforts                  |
| Tirants d'ancrage | Barres ou câbles ancrés dans le sol pour stabiliser la paroi |
| Butons            | Éléments de compression utilisés dans les fouilles étroites  |

### I.3.2.3 Procédé d'exécution :

La mise en œuvre d'une paroi en palplanches se déroule généralement selon les étapes suivantes :

#### 1. Implantation de l'ouvrage

La première étape consiste à déterminer l'alignement exact de la paroi et à préparer la zone d'installation.

#### 2. Mise en place des palplanches

Les palplanches sont ensuite enfoncées dans le sol à l'aide de :

- Vibrofonçage, battage mécanique, vérinage hydraulique

Ces techniques permettent d'atteindre la profondeur nécessaire pour garantir la stabilité de l'ouvrage.

#### 3. Assemblage des palplanches

Chaque élément est installé de manière à s'emboîter avec les palplanches voisines grâce aux serrures latérales, formant ainsi une paroi continue.

#### 4. Excavation progressive

Une fois la paroi installée, l'excavation peut être réalisée progressivement à l'intérieur du rideau de palplanches.

#### 5. Mise en place des systèmes de stabilisation

Lorsque la profondeur de la fouille augmente, des tirants d'ancrage ou des butons peuvent être installés pour renforcer la stabilité de la structure.



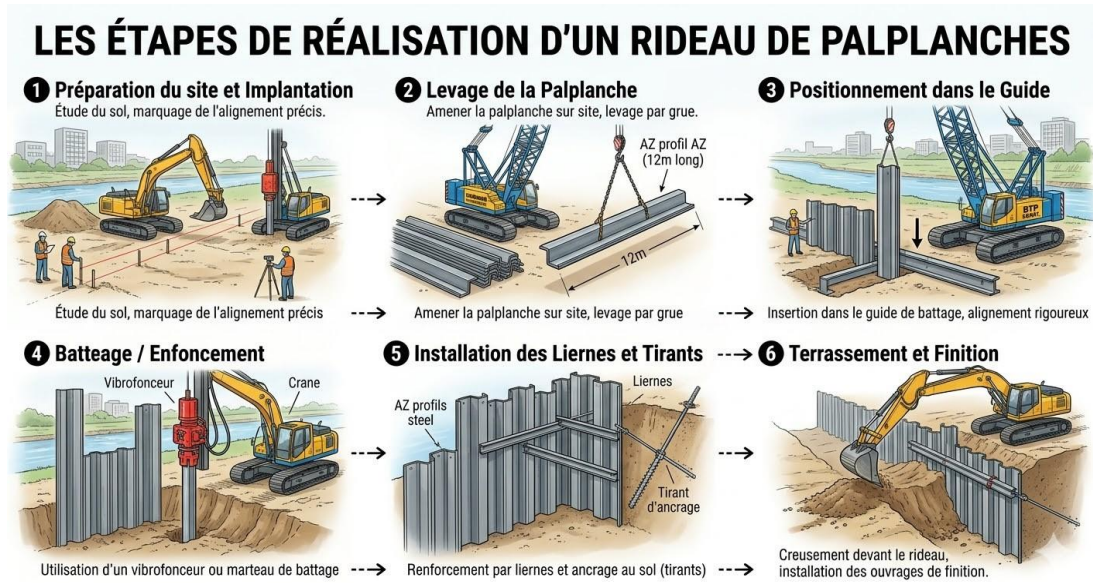


Figure I. 4 : Étapes de réalisation d'un rideau de palplanches

### I.3.2.4 Domaine d'application :

Les parois en palplanches sont utilisées dans de nombreux domaines du génie civil, notamment : soutènement des fouilles profondes, réalisation de parkings souterrains, construction de stations de métro, travaux portuaires et fluviaux, réalisation de batardeaux

Elles sont particulièrement adaptées aux projets où il est nécessaire de limiter les infiltrations d'eau et de stabiliser les terrains meubles.

### I.3.2.5 Avantages et inconvénients :

Tableau I. 3 Avantages et inconvénients des parois en palplanches

| Avantages                              | Inconvénients                       |
|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Mise en œuvre rapide                   | Vibrations lors du battage          |
| Bonne étanchéité                       | Difficulté dans les sols rocheux    |
| Réutilisation possible des palplanches | Bruit lors de l'installation        |
| Adaptées aux terrains saturés en eau   | Risque de corrosion                 |
| Bonne résistance mécanique             | Coût élevé pour grandes profondeurs |

Malgré leurs nombreux avantages, les parois en palplanches présentent certaines limites :

- Difficulté d'installation dans les sols très durs ou rocheux.
- Vibrations importantes pouvant affecter les structures voisines.
- Nécessité de protection contre la corrosion pour les ouvrages permanents.

Ainsi, le choix de ce type de soutènement doit être réalisé après une analyse géotechnique détaillée du site et des contraintes environnementales.

### I.3.3 Paroi clouée (clouage + béton projeté)

#### I.3.3.1 Définition :

La paroi clouée, également appelée soutènement par clouage du sol, est une technique de stabilisation des talus et des parois de fouilles consistant à renforcer le massif de sol en place par l'installation d'éléments résistants appelés clous, associés à un revêtement en béton projeté. Cette méthode permet d'améliorer la résistance mécanique du sol en créant un système composite capable de reprendre les efforts de traction et de cisaillement.

Le principe du clouage repose sur l'introduction de barres métalliques passives dans le terrain, généralement inclinées légèrement vers le bas, afin de mobiliser la résistance du sol par frottement et adhérence. Ces clous travaillent principalement en traction et contribuent à stabiliser le massif en limitant les déplacements du terrain.

Afin d'assurer la protection de la surface excavée et de répartir les efforts entre les clous, un parement en béton projeté est appliqué sur la paroi. Ce revêtement permet également d'éviter l'érosion du sol et de maintenir la cohésion du massif pendant les travaux.

Cette technique est aujourd'hui largement utilisée dans les projets de génie civil, notamment pour la stabilisation des fouilles urbaines, des talus routiers, des tranchées et des excavations profondes, en raison de sa flexibilité et de son coût relativement modéré.

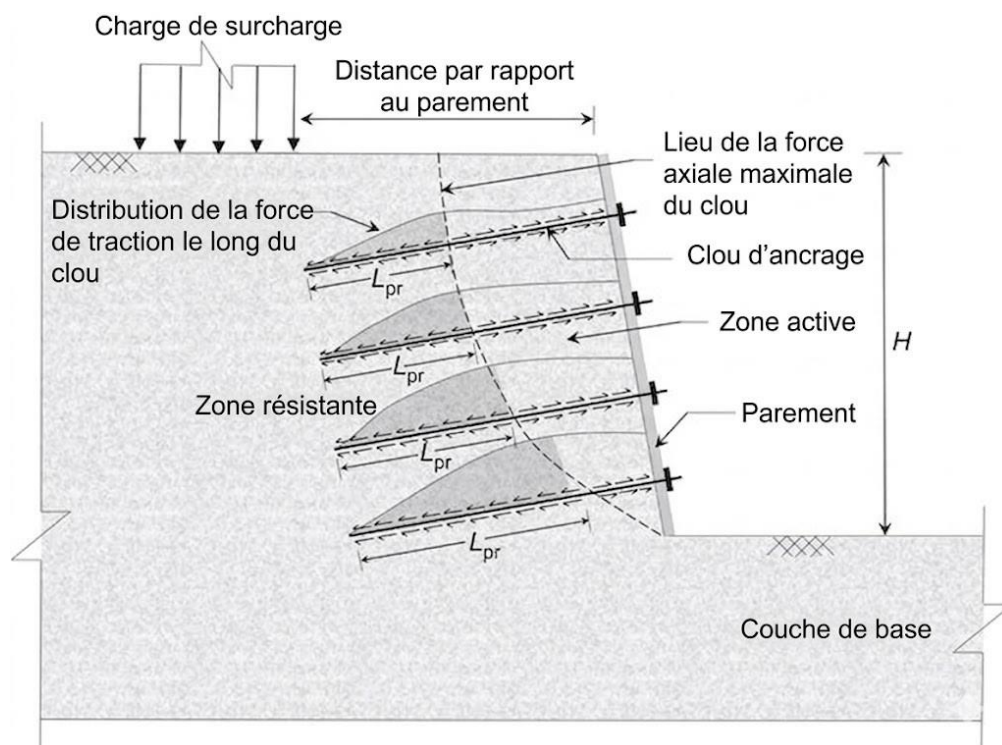


Figure I. 5 : Principe du soutènement par paroi clouée avec béton projeté



## I.3.3.2 Composition d'une paroi clouée :

Une paroi clouée se compose de plusieurs éléments travaillant ensemble pour assurer la stabilité de l'excavation.

Tableau I. 4 : Éléments constitutifs d'une paroi clouée

| Élément                    | Fonction                                         |
|----------------------------|--------------------------------------------------|
| Clous (barres métalliques) | Renforcement du massif de sol                    |
| Béton projeté              | Protection et rigidification de la surface       |
| Treillis soudé             | Renforcement du béton projeté                    |
| Plaques d'ancrage          | Transmission des efforts entre clous et parement |
| Drainage                   | Évacuation de l'eau derrière la paroi            |

Les clous sont généralement constitués de barres d'acier haute résistance, dont le diamètre varie généralement entre 20 mm et 40 mm, et dont la longueur dépend de la hauteur de la fouille et des caractéristiques du sol.

## I.3.3.3 Procédé d'exécution :

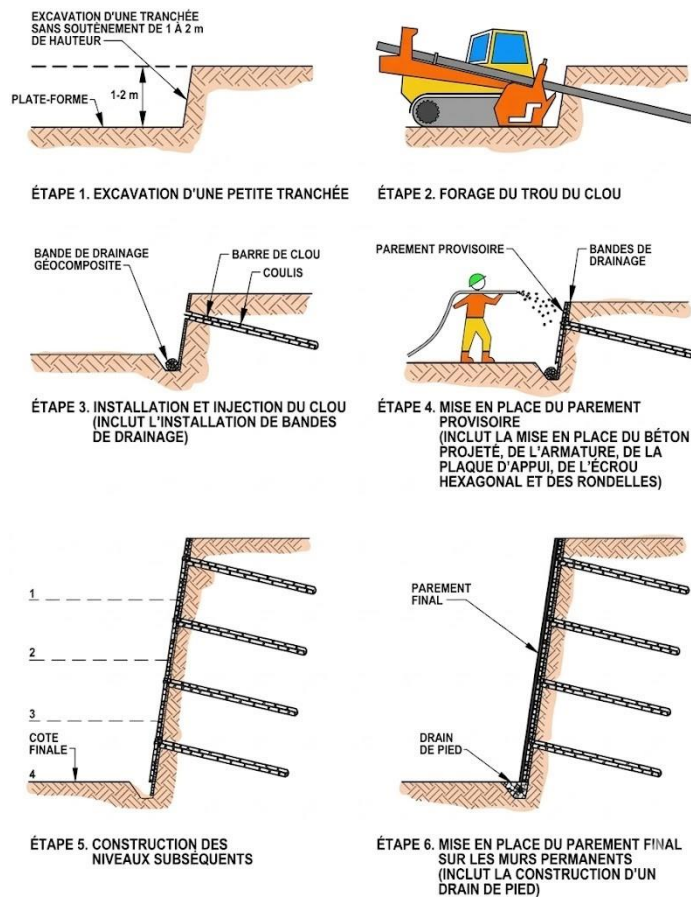


Figure I. 6 : Phases de réalisation d'une paroi clouée

La réalisation d'une paroi clouée se fait de manière progressive, en suivant l'avancement du terrassement. Les principales étapes sont les suivantes :

**1. Excavation par passes successives**

Le terrassement est réalisé par phases successives, généralement de 1 à 2 mètres de hauteur, afin de maintenir la stabilité du terrain.

**2. Forage des trous pour les clous**

Des forages inclinés sont réalisés dans le massif de sol pour installer les clous. L'inclinaison est généralement comprise entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$  vers le bas.

**3. Mise en place des barres d'acier**

Les barres d'acier sont introduites dans les forages, puis scellées au moyen d'un coulis de ciment afin d'assurer l'adhérence entre le clou et le sol.

**4. Pose du treillis métallique**

Un treillis soudé est installé sur la surface du terrain pour renforcer le futur parement.

**5. Projection du béton**

Une couche de béton projeté (gunite) est appliquée sur la surface excavée afin de former le parement de la paroi.

**6. Répétition du processus**

Les opérations sont répétées jusqu'à atteindre la profondeur finale de la fouille.

### I.3.3.4 Domaine d'application

La technique du clouage du sol est utilisée dans plusieurs domaines du génie civil, notamment

stabilisation des talus routiers et ferroviaires, soutènement des fouilles urbaines, renforcement des parois rocheuses, stabilisation des glissements de terrain.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux terrains cohérents ou légèrement cohérents, tels que : les argiles, les limons, les sables légèrement cimentés

En revanche, son utilisation est plus difficile dans les sols très meubles ou saturés en eau, où la stabilité de la paroi peut être compromise.

### I.3.3.5 Avantages et inconvénients

Tableau I. 5 : Avantages et inconvénients des parois clouées

| Avantages                        | Inconvénients                         |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Technique économique             | Sensible aux sols saturés             |
| Mise en œuvre progressive        | Nécessite une surveillance            |
| Adaptée aux géométries complexes | Déformations possibles                |
| Peu de vibrations                | Difficulté dans les sols très meubles |
| Matériel relativement simple     | Nécessite un drainage efficace        |

Les parois clouées présentent une grande flexibilité structurale, ce qui leur permet de s'adapter aux déformations du sol sans rupture brutale. Cette caractéristique est particulièrement intéressante dans les zones urbaines où les conditions géotechniques peuvent varier.

Cependant, la stabilité de ce type de soutènement dépend fortement : de la qualité du sol, de la longueur des clous, de la résistance du coulis de ciment, du drainage du massif

Une étude géotechnique approfondie est donc indispensable pour déterminer les dimensions optimales du système de clouage.

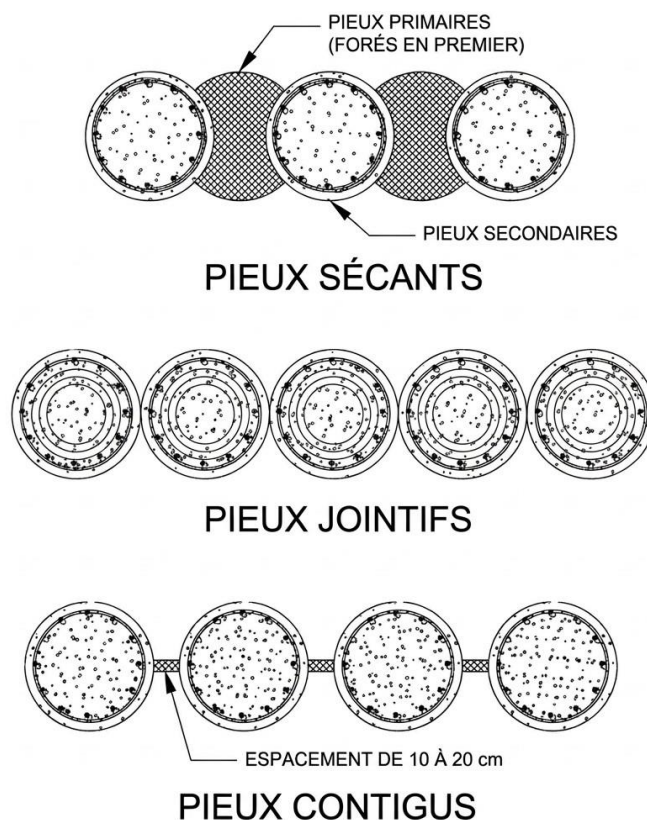
### I.3.4 Parois en pieux (jointifs – sécants – disjoints)

#### I.3.4.1 Définition :

Les parois en pieux constituent une technique de soutènement des fouilles profondes reposant sur la réalisation d'une série de pieux verticaux alignés, forés dans le sol, formant ainsi une barrière capable de retenir les terres.

Ces pieux sont généralement réalisés en béton armé et peuvent être exécutés in situ à l'aide de techniques de forage adaptées aux conditions géotechniques du site.

Le principe de ce type de soutènement consiste à mobiliser la résistance du sol autour des pieux et la rigidité des éléments structuraux pour s'opposer aux poussées latérales du terrain. Selon la disposition et l'interaction entre les pieux, on distingue trois principaux types de parois : parois en pieux disjoints, parois en pieux jointifs, parois en pieux sécants .



**Figure I. 7 : Principe des différents types de parois en pieux (disjoints, jointifs et sécants)**

### I.3.4.2 Parois en pieux disjoints (contigu) :

Les pieux disjoints sont des pieux espacés les uns des autres, laissant des intervalles vides entre eux. Ces espaces peuvent être laissés ouverts ou comblés par un blindage secondaire (bois, béton projeté).

Caractéristiques : espacement entre pieux généralement important, absence de continuité structurelle, système non étanche.

Domaine d'utilisation : sols cohérents (argiles, limons), absence de nappe phréatique, fouilles de profondeur modérée

Avantages : solution économique, rapidité d'exécution

Inconvénients : faible rigidité, infiltration d'eau possible, déformations plus importantes



Figure I. 8 : Mur Pieu Contigu

### I.3.4.3 Parois en pieux jointifs :

Les pieux jointifs (ou pieux tangents) sont disposés de manière à être en contact les uns avec les autres, sans chevauchement.

Caractéristiques : pieux tangents, meilleure continuité que les pieux disjoints, rigidité intermédiaire

Domaine d'utilisation : sols moyennement cohérents, fouilles urbaines de profondeur moyenne, conditions hydrauliques modérées

Avantages : meilleure stabilité que les pieux disjoints, limitation des déplacements, mise en œuvre relativement simple

Inconvénients : étanchéité limitée, nécessité d'un bon contrôle d'exécution



Figure I. 9 : Parois en pieux jointifs

### I.3.4.4 Parois en pieux sécants :

Les pieux sécants sont réalisés de manière à se recouvrir partiellement, formant une paroi continue et pratiquement étanche.

On distingue généralement : pieux primaires (béton non armé), pieux secondaires (béton armé)

Caractéristiques : recouvrement entre pieux, paroi continue, forte rigidité

Domaine d'utilisation : sols meubles ou instables, présence de nappe phréatique, fouilles profondes (métro, ouvrages souterrains)

Avantages : excellente étanchéité, forte résistance, limitation des déformations

Inconvénients : coût élevé, exécution plus complexe, nécessité d'un matériel spécialisé

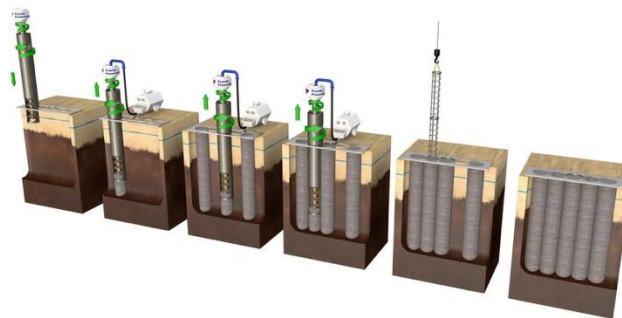


Figure I. 10 : Paroi en pieux sécants (alternance pieux primaires et secondaires)



## I.3.4.5 Procédé d'exécution :

La réalisation des parois en pieux suit généralement les étapes suivantes :

1. Implantation

Repérage précis de l'alignement des pieux.

2. Forage

Réalisation des forages à l'aide de tarières ou d'outils rotatifs.

3. Mise en place du béton

Coulage du béton dans les forages.

4. Mise en place des armatures

Insertion de cages d'armatures (selon le type de pieux).

5. Réalisation séquentielle

- Pieux disjoints : réalisation simple
- Pieux jointifs : pieux en contact
- Pieux sécants : alternance primaire / secondaire

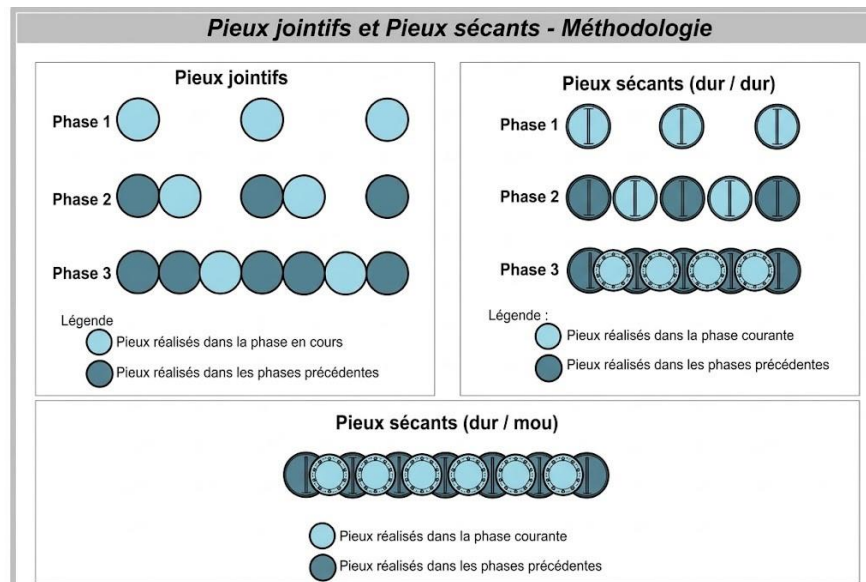


Figure I. 11 : Étapes de réalisation d'une paroi en pieux forés

## I.3.4.6 Comparaison des types de parois en pieux :

Tableau I. 6 : Comparaison des parois en pieux

| Type            | Étanchéité | Rigidité | Coût   | Domaine d'utilisation     |
|-----------------|------------|----------|--------|---------------------------|
| Pieux disjoints | Faible     | Faible   | Faible | Sols cohérents secs       |
| Pieux jointifs  | Moyenne    | Moyenne  | Moyen  | Fouilles urbaines         |
| Pieux sécants   | Élevée     | Élevée   | Élevé  | Fouilles profondes, nappe |



## I.3.5.2 Principe de fonctionnement :

Le principe de la paroi moulée repose sur la réalisation successive de panneaux verticaux en béton armé, appelés panneaux primaires et secondaires, qui s'assemblent pour former une paroi continue.

La stabilité des parois de la tranchée est assurée pendant l'excavation par une boue bentonitique, qui exerce une pression latérale sur le sol et empêche l'effondrement des parois.

Une fois la tranchée réalisée, le béton est coulé par la méthode du tube plongeur (tremie), qui permet de remplacer progressivement la boue par du béton sans mélange.

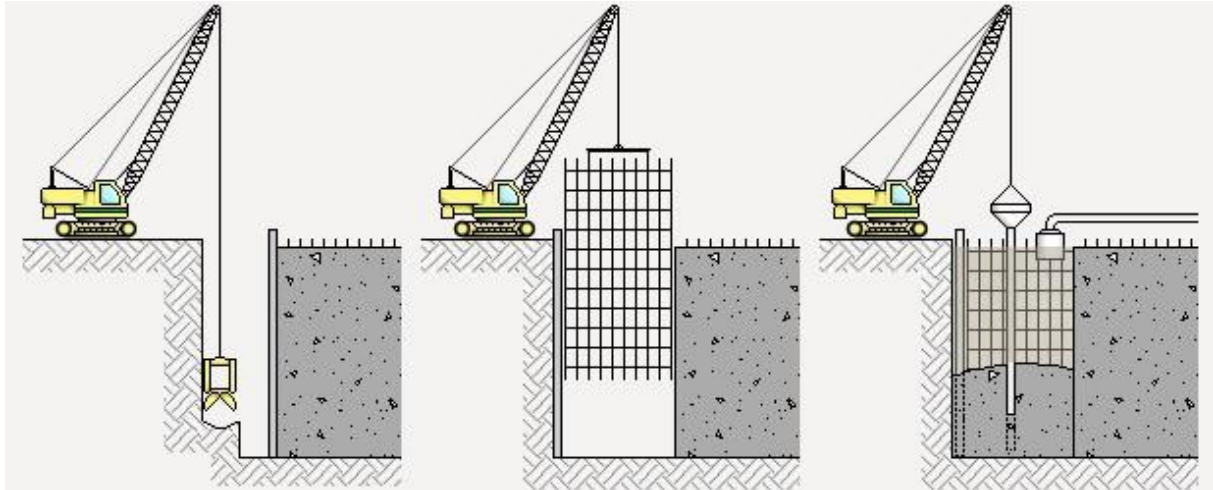
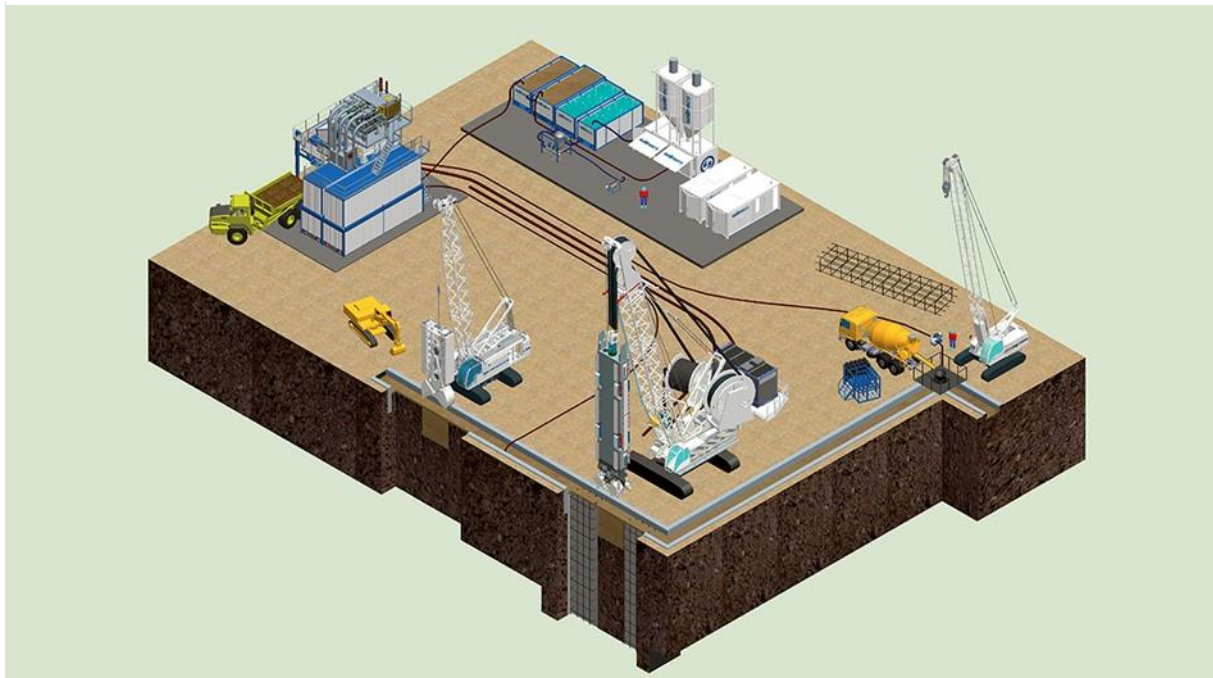


Figure I. 12 : Principe du bétonnage d'une paroi moulée par tube plongeur



## I.3.5.3 Procédé d'exécution :

La réalisation d'une paroi moulée suit plusieurs étapes successives :

### 1. Construction des murettes guides

Des murettes en béton sont construites en surface pour guider les outils d'excavation et assurer l'alignement de la paroi.

HAFID, NEDJARI



## 2. Excavation de la tranchée

La tranchée est creusée à l'aide d'un hydrofraise ou d'une benne preneuse, tout en étant remplie de boue bentonitique pour assurer sa stabilité.

## 3. Mise en place des armatures

Une cage d'armature en acier est introduite dans la tranchée excavée.

## 4. Bétonnage

Le béton est coulé par tube plongeur, en remplaçant progressivement la boue bentonitique.

## 5. Réalisation des panneaux successifs

Les panneaux sont réalisés de manière alternée (panneaux primaires puis secondaires) afin d'assurer la continuité de la paroi.

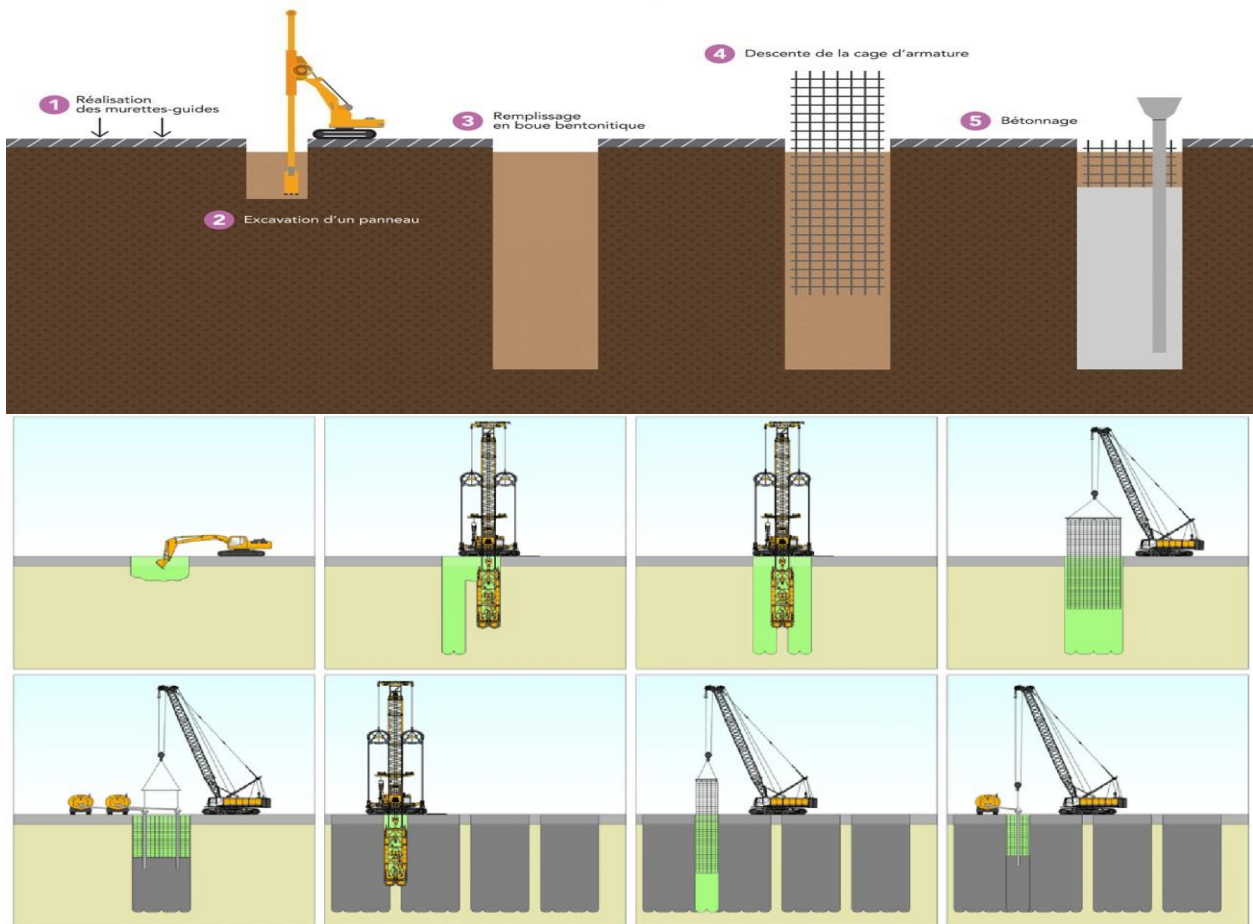


Figure I. 13 : Étapes de réalisation d'une paroi moulée

### I.3.5.4 Caractéristiques techniques :

Les parois moulées présentent des caractéristiques techniques élevées :

Tableau I. 7 : Caractéristiques des parois moulées

| Paramètre  | Valeur typique       |
|------------|----------------------|
| Épaisseur  | 0,6 à 1,5 m          |
| Profondeur | jusqu'à 50 m ou plus |
| Matériau   | béton armé           |
| Étanchéité | très élevée          |
| Rigidité   | très élevée          |

## I.3.5.5 Domaine d'application :

Les parois moulées sont utilisées dans des projets nécessitant une grande stabilité et une excellente étanchéité, notamment : stations de métro, tunnels urbains, parkings souterrains, ouvrages hydrauliques, fondations profondes

Elles sont particulièrement adaptées : aux sols meubles ou hétérogènes, aux zones avec nappe phréatique élevée, aux environnements urbains sensibles

Dans les projets de métro, les parois moulées sont souvent privilégiées pour : assurer la stabilité des excavations profondes, limiter les déformations du terrain, protéger les ouvrages voisins, garantir une étanchéité optimale

Elles constituent une solution de référence pour la réalisation de puits de ventilation et stations souterraines.

## I.3.5.6 Avantages et inconvénients :

Tableau I. 8 : Avantages et inconvénients des parois moulées

| Avantages                       | Inconvénients                   |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Très grande rigidité            | Coût élevé                      |
| Excellente étanchéité           | Mise en œuvre complexe          |
| Adaptée aux grandes profondeurs | Nécessite matériel spécialisé   |
| Faibles déformations            | Temps d'exécution long          |
| Peut servir d'ouvrage définitif | Gestion des boues bentonitiques |

## I.4 LES PRINCIPAUX SYSTEMES SYSTEMES D'ETAIEMENT

### I.4.1 Butons

#### I.4.1.1 Définition :

Les butons, également appelés éléments d'étalement, sont des dispositifs structuraux utilisés dans les fouilles pour assurer le soutènement interne des parois en reprenant les efforts horizontaux exercés par le sol. Ils fonctionnent principalement en compression et sont disposés entre deux parois opposées ou entre une paroi et un élément rigide.

Dans les fouilles profondes, notamment en milieu urbain, les butons constituent une solution efficace lorsque l'utilisation de tirants d'ancrage est impossible, par exemple en raison de la présence de bâtiments voisins, de réseaux souterrains ou de contraintes foncières.

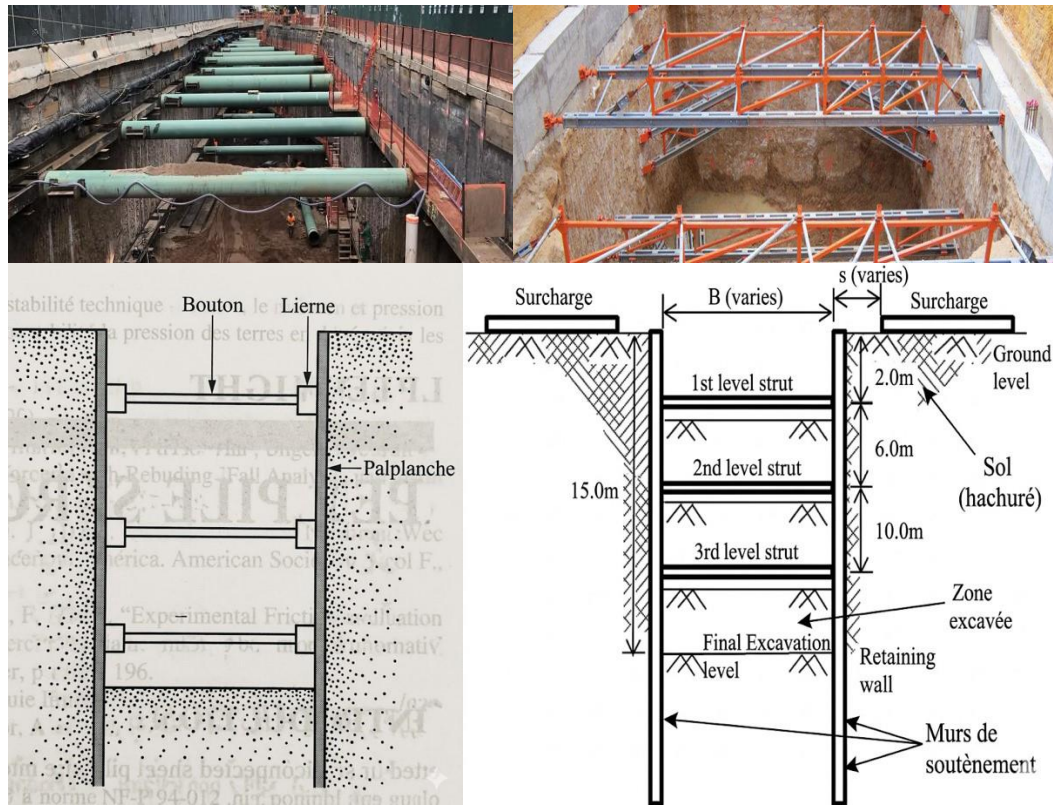


Figure I. 14 : Système de soutènement par butons dans une fouille

## I.4.1.2 Principe de fonctionnement :

Le principe des butons repose sur la reprise des poussées latérales du terrain par des éléments horizontaux travaillant en compression. Ces efforts sont transmis : des parois de soutènement (paroi moulée, palplanches, pieux, etc.), vers les butons, puis redistribués vers les points d'appui opposés

Les butons permettent ainsi de limiter les déplacements horizontaux des parois et d'assurer la stabilité globale de la fouille.

Dans la plupart des cas, les butons sont associés à des lisses ou liernes, qui permettent de répartir uniformément les efforts sur la paroi.

## I.4.1.3 Types de butons :

Les systèmes de butonnage peuvent être classés selon leur configuration et leur matériau.

Tableau I. 9 : Types de butons

| Type de bouton   | Description                                 | Domaine d'utilisation  |
|------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| Butons simples   | Élément horizontal unique entre deux parois | Fouilles peu profondes |
| Butons multiples | Plusieurs niveaux de butons                 | Fouilles profondes     |
| Butons croisés   | Disposés en croix pour plus de stabilité    | Grandes excavations    |
| Butons inclinés  | Position inclinée                           | Cas particuliers       |

Tableau I. 10 : Matériaux des butons

| Matériau             | Caractéristiques                    |
|----------------------|-------------------------------------|
| Acier tubulaire      | Très résistant, largement utilisé   |
| Profilés métalliques | Bonne rigidité                      |
| Béton armé           | Utilisation permanente              |
| Bois                 | Usage temporaire (rare aujourd'hui) |

## 1.4.1.3 Procédé d'exécution :

La mise en place des butons se fait généralement de manière progressive, en parallèle avec l'excavation. Étapes principales :

### 1. Réalisation de la paroi de soutènement

Avant la mise en place des butons, les parois (moulées, palplanches, pieux...) doivent être exécutées.

### 2. Excavation par phases

Le terrassement est réalisé par passes successives.

### 3. Installation des liernes

Des poutres horizontales (liernes) sont installées pour répartir les efforts sur la paroi.

### 4. Mise en place des butons

Les butons sont installés entre les parois opposées.

### 5. Mise en précontrainte (si nécessaire)

Dans certains cas, les butons sont légèrement précontraints pour améliorer leur efficacité.

### 6. Répétition du processus

Le processus est répété à différents niveaux en fonction de la profondeur de la fouille.

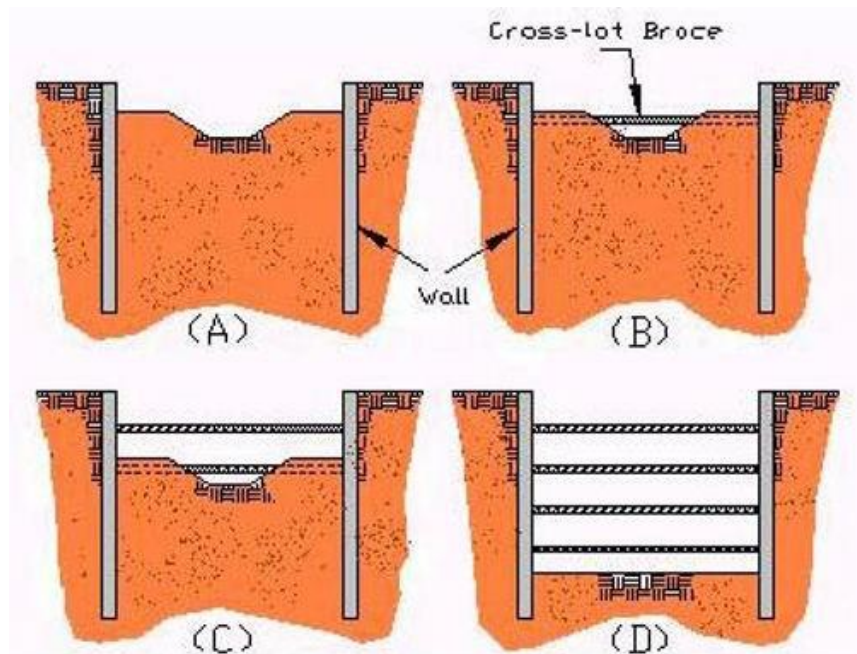


Figure I. 15 : Phases d'installation des butons dans une fouille profonde

## 1.4.1.5 Domaine d'application :

Les systèmes de butonnage sont utilisés dans plusieurs types d'ouvrages : fouilles profondes en milieu urbain, stations de métro, puits de ventilation, tranchées techniques, ouvrages souterrains

Ils sont particulièrement adaptés lorsque : L'utilisation des tirants d'ancrage est impossible, les terrains environnants ne permettent pas l'ancrage, la fouille est réalisée dans un espace restreint

## I.4.1.6 Avantages et inconvénients :

Tableau I. 11 : Avantages et inconvénients des butons

| Avantages                                          | Inconvénients                       |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Utilisable pour tous types des terrains extérieurs | Encombrement dans la fouille        |
| Pose rapide                                        | Gêne pour les travaux               |
| Adapté aux zones urbaines                          | Coût élevé pour grandes profondeurs |
| Réduction des déplacements                         | Complexité logistique               |

Malgré leurs avantages, les butons présentent certaines contraintes : ils occupent un volume important dans la fouille, ce qui peut gêner les travaux, leur mise en place nécessite une logistique importante, ils peuvent compliquer la circulation des engins et l'organisation du chantier

## I.4.2 Tirants d'ancrage

### I.4.2.1 Définition :

Les tirants d'ancrage sont des éléments structuraux travaillant en traction, utilisés pour stabiliser les parois de soutènement des fouilles en transmettant les efforts horizontaux vers un massif de sol stable situé en profondeur. Ils constituent une solution efficace pour limiter les déplacements des parois tout en libérant l'espace intérieur de la fouille, contrairement aux systèmes de butonnage.

Un tirant d'ancrage est généralement composé d'une tête d'ancrage, d'une longueur libre et d'une longueur d'ancrage (ou bulbe), cette dernière assurant le transfert des efforts au sol par adhérence.

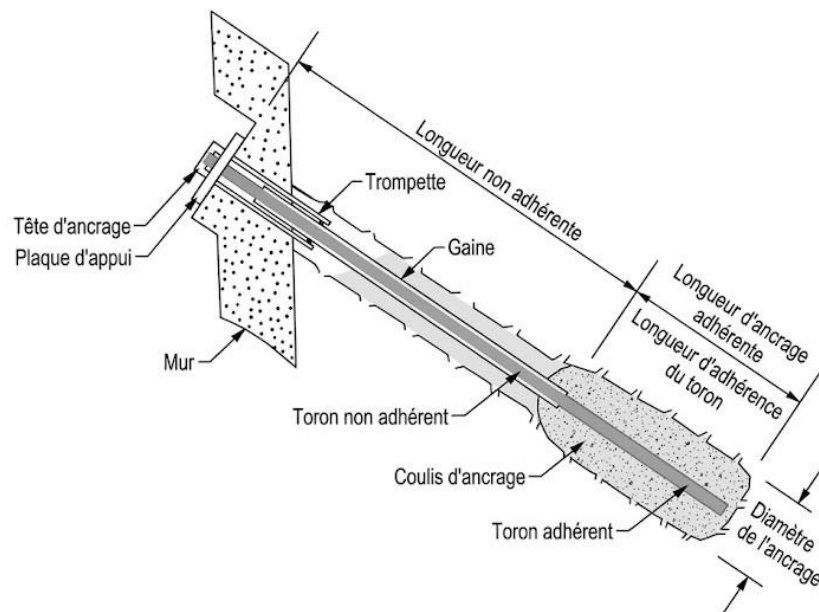


Figure I. 16 : Schéma d'un tirant d'ancrage



## I.4.2.2 Principe de fonctionnement :

Le principe des tirants d'ancrage repose sur la mobilisation de la résistance du sol en profondeur. Les efforts exercés par la poussée des terres sur la paroi sont transmis : de la paroi de soutènement, vers la tête du tirant, le long du câble ou de la barre, jusqu'au bulbe d'ancrage

Le bulbe d'ancrage transmet ensuite ces efforts au sol par adhérence et frottement, assurant ainsi la stabilité de l'ensemble.

Ce système permet de réduire considérablement les déplacements horizontaux et d'améliorer la rigidité globale du soutènement.

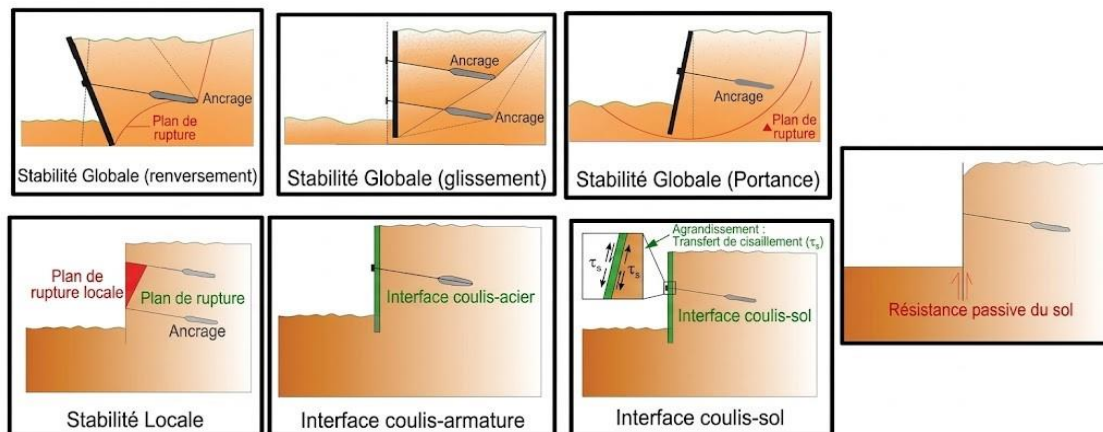


Figure I. 17 : Tirant d'ancrage avec différents mode de rupture du sol

## 1.4.2.3 Composition d'un tirant d'ancrage :

Tableau I. 12 : Éléments constitutifs d'un tirant d'ancrage

| Élément                     | Fonction                                         |
|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| Tête d'ancrage              | Transmission des efforts à la paroi              |
| Longueur libre              | Partie non scellée permettant la mise en tension |
| Bulbe d'ancrage             | Zone scellée assurant l'ancrage dans le sol      |
| Armature (câbles ou barres) | Élément résistant en traction                    |
| Coulis de ciment            | Assure l'adhérence avec le sol                   |

## I.4.2.4 Types de tirants :

Les tirants d'ancrage peuvent être classés selon plusieurs critères.

### 1. Selon le mode de fonctionnement

Tableau I. 13 : Tirants actifs et passifs

| Type            | Description                                              |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Tirants actifs  | Mis en tension (précontraints) lors de leur installation |
| Tirants passifs | Ne travaillent qu'en cas de déplacement de la paroi      |

## 2. Selon la durée d'utilisation

Tableau I. 14 : Tirants provisoires et définitifs

| Type                | Caractéristiques                                            |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| Tirants provisoires | Utilisés pendant la phase de construction                   |
| Tirants définitifs  | Intégrés dans l'ouvrage final, protégés contre la corrosion |

## 3. Selon le type d'armature

Tableau I. 15 : Types d'armatures de tirants

| Type                 | Caractéristiques                  |
|----------------------|-----------------------------------|
| Câbles précontraints | Haute résistance, flexibles       |
| Barres d'acier       | Plus rigides, installation simple |

### I.4.2.5 Procédé d'exécution :

La mise en place des tirants d'ancrage se fait généralement selon les étapes suivantes :

#### 1. Forage

Réalisation d'un forage incliné dans le sol (généralement entre 10° et 30°).

#### 2. Mise en place de l'armature

Insertion des câbles ou des barres dans le forage.

#### 3. Injection du coulis

Injection d'un coulis de ciment pour former le bulbe d'ancrage.

#### 4. Mise en tension (tirants actifs)

Application d'une précontrainte à l'aide de vérins hydrauliques.

#### 5. Blocage de la tête d'ancrage

Fixation du tirant sur la paroi à l'aide d'une plaque d'ancrage.

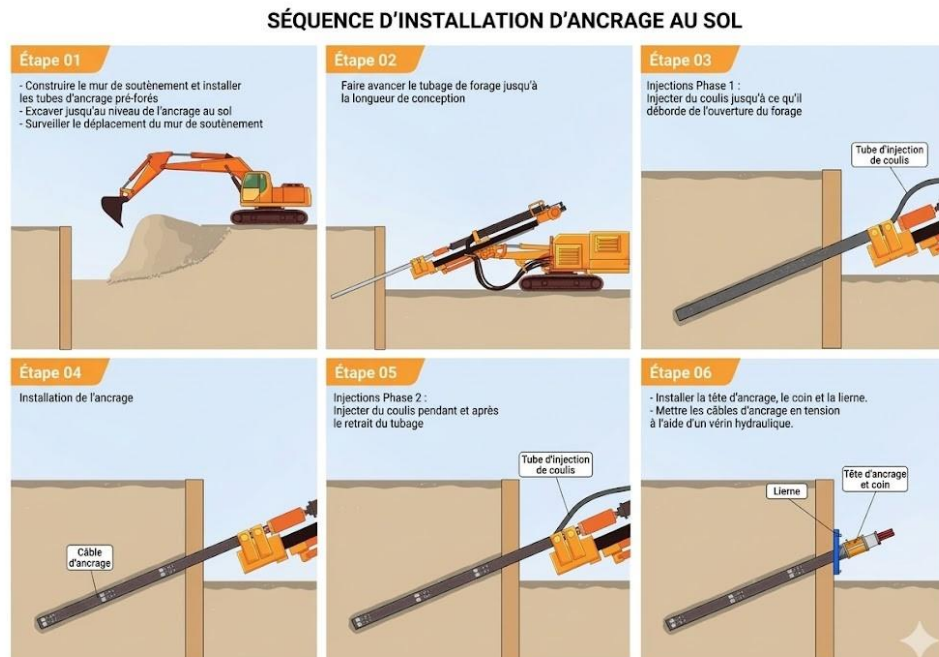


Figure I. 18 : Phases de réalisation d'un tirant d'ancrage

## I.4.2.6 Domaine d'application :

Les tirants d'ancrage sont largement utilisés dans : les fouilles profondes urbaines, les stations de métro, les puits de ventilation, les murs de soutènement, les ouvrages portuaires

Ils sont particulièrement adaptés lorsque : L'espace intérieur doit rester libre, le terrain permet un ancrage en profondeur, les déformations doivent être fortement limitées

## I.4.2.7 Avantages et inconvénients :

Tableau I. 16 : Avantages et inconvénients des tirants d'ancrage

| Avantages                                      | Inconvénients                               |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Libère l'espace de la fouille                  | Nécessite un terrain adapté                 |
| Limitation des déformations                    | Risque d'interférence avec ouvrages voisins |
| Transmission des efforts vers le sol résistant | Procédé plus complexe                       |
| Adapté aux grandes profondeurs                 | Coût élevé                                  |
| Possibilité de précontrainte                   | Problèmes de corrosion pour les définitifs  |

Les tirants d'ancrage présentent certaines contraintes : impossibilité d'utilisation en cas de limite foncière proche, nécessité d'un sol suffisamment résistant pour l'ancrage, risques liés à la corrosion pour les tirants définitifs, nécessité de contrôles rigoureux (essais de traction)

Tableau I. 17 : Comparaison tirants vs butons

| Critère        | Tirants d'ancrage          | Butons                 |
|----------------|----------------------------|------------------------|
| Fonctionnement | Traction                   | Compression            |
| Encombrement   | Faible                     | Important              |
| Domaine urbain | Limité (propriété voisine) | Très adapté            |
| Mise en œuvre  | Complexe                   | Moyennement simple     |
| Coût           | Élevé (peu maîtrisé)       | Variable (maîtrisable) |

## I.5 Méthodes de calcul du blindage

### I.5.1 Généralités :

La conception des systèmes de blindage des fouilles repose sur l'évaluation des efforts exercés par le sol et éventuellement par l'eau sur les parois de soutènement. Ces efforts dépendent principalement des caractéristiques géotechniques du terrain, de la profondeur de l'excavation et des conditions hydrauliques.

Le dimensionnement du blindage vise à : assurer la stabilité globale de la fouille, limiter les déplacements horizontaux, garantir la sécurité des ouvrages voisins

### I.5.2 Méthodes analytiques :

Les méthodes analytiques reposent sur les théories classiques de la mécanique des sols, notamment celles de Rankine et de Coulomb, permettant de déterminer les pressions exercées par le sol sur les parois

#### I.5.2.1 Théorie de Rankine :

La théorie de Rankine considère un sol homogène, isotrope et sans frottement entre le sol et la paroi.



Coefficient de poussée active/passive :  $K_a$ ,  $K_p$ , avec  $\varphi$  = angle de frottement interne du sol

Pression des terres :  $\sigma_h = K_a \gamma z$ , avec  $\gamma$  = poids volumique et  $z$  = la profondeur

### **I.5.2.2 Théorie de Coulomb :**

La théorie de Coulomb prend en compte : le frottement sol-paroi, L'inclinaison du terrain, la géométrie de la paroi

Elle est donc plus réaliste que Rankine.

Le coefficient de poussée dépend de plusieurs paramètres :

- Angle de frottement interne  $\varphi$
- Angle de frottement sol-paroi  $\delta$
- Inclinaison du remblai

### **I.5.3 Méthodes empiriques :**

Les méthodes empiriques sont basées sur l'expérience et les observations de chantiers réels. Elles permettent d'estimer rapidement les efforts sans passer par des calculs complexes.

Elles sont souvent utilisées pour :

- Les prédimensionnements, les projets similaires déjà étudiés

Cependant, leur précision dépend fortement :

- Du type de sol, des conditions du chantier

### **I.5.4 Méthodes semi-empiriques :**

Les méthodes semi-empiriques combinent :

- Les résultats des théories analytiques, des coefficients correctifs issus de l'expérience

#### **I.5.4.1 Méthode de Blum :**

La méthode de Blum est utilisée pour le calcul des parois encastrées, notamment :

- Palplanches, parois moulées, pieux sécants

Elle repose sur :

- L'équilibre des moments, l'équilibre des forces

Elle permet de déterminer :

- La profondeur d'encastrement, les moments fléchissants maximaux, les réactions du sol

#### **I.5.4.2 Diagrammes de pression apparente (Peck) :**

Pour les fouilles étayées (avec butons ou tirants), on utilise souvent les diagrammes de pression apparente proposés par Peck.

Ces diagrammes tiennent compte : du type de sol, du mode de soutènement, de l'expérience des chantiers

## **I.5.5 Méthodes numériques :**

Avec l'évolution des outils informatiques, les méthodes numériques sont devenues indispensables dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques.

Elles reposent sur des modèles de calcul avancés tels que : la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des équilibres limites

Les logiciels les plus utilisés sont : PLAXIS, GEO5

Ces méthodes permettent : de modéliser des comportements complexes du sol, de prendre en compte les phases de construction, D'obtenir des résultats précis (déplacements, contraintes)

## **I.5.6 Conclusion :**

La méthode de l'équilibre limite constitue une approche de référence pour l'évaluation de la stabilité globale du système. Basée sur l'équilibre des forces et des moments agissant sur l'ouvrage, elle permet de déterminer les efforts mobilisés dans les éléments de soutènement ainsi que les conditions de sécurité vis-à-vis des états limites ultimes. Cette méthode, intégrée au logiciel Geo5, offre une démarche de calcul fiable et largement utilisée dans la pratique géotechnique.

Le module Sheeting Check a été adopté pour la vérification du soutènement, puisqu'il permet de contrôler la stabilité de l'ouvrage, les efforts internes développés dans les éléments structuraux ainsi que les conditions de sécurité vis-à-vis des états limites. En complément, le module Design Check a été privilégié pour l'analyse des déplacements et la vérification de la flèche du système de soutènement. Il constitue également un outil pertinent pour comparer plusieurs solutions de blindage et orienter le choix vers la variante offrant le meilleur compromis entre sécurité, performance technique et économie.

Par conséquent, les analyses qui seront développées dans les chapitres suivants s'appuieront principalement sur les résultats obtenus à partir de module Sheeting check. Cette approche permettra non seulement de vérifier la conformité du soutènement vis-à-vis des exigences de stabilité, mais également d'évaluer son comportement en service afin de sélectionner la variante la plus adaptée aux contraintes géotechniques et constructives du projet.

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET

### II.1 PRESENTATION DU PROJET

#### II.1.1 Introduction :

L'augmentation de la population à Alger a généré des besoins de transport très importants, alors que les moyens existants ne permettent pas de répondre à la demande. Ce qui crée des embouteillages considérables notamment pendant les heures de pointe, la nécessité de développer les infrastructures de transport se pose. C'est pourquoi le recours à une nouvelle ligne de métro justement permettrait une amélioration de la mobilité urbaine et un désengorgement du réseau de transport.

#### II.1.2 Historique du projet :

La conception d'un métro à Alger remonte à l'époque coloniale. Puis après l'indépendance, lorsque la population augmentait et que les routes devenaient progressivement saturées, la nécessité d'un moyen de transport moderne s'est faite de plus en plus pressante.

En 1982, l'Entreprise Métro d'Alger a été créée, les travaux étaient donc lancés.

Puis au milieu des années 90, la situation économique et sécuritaire a conduit à un coup d'arrêt général. L'arrivée dans les années 2000-2001 du chantier a été en revanche marquée par de nouveaux moyens, des technologies plus modernes, en s'appuyant sur des expertises extérieures.

Inaugurée en 2011, la première ligne du métro d'Alger n'est aujourd'hui plus seulement un moyen de transport. Elle est devenue un maillon indispensable de la vie urbaine, interrogeant les déplacements tout en contribuant à structurer le développement de la capitale.

#### II.1.3 Présentation de l'Entreprise Métro d'Alger :

L'Entreprise Métro d'Alger (EMA), créée sous la tutelle du ministère des Transports, est aujourd'hui rattachée au ministère des Travaux Publics et des Infrastructures de Base. Elle a pour mission principale la supervision des études et la réalisation des projets en tant que maître d'ouvrage délégué pour le compte de ce ministère. Par la suite, elle a évolué vers une entreprise publique économique sous forme de société par actions, ce qui lui a permis d'élargir ses activités aux études et à l'ingénierie des transports.

Dans le cadre du développement des transports urbains, l'EMA prend également en charge des projets stratégiques, notamment la réalisation des réseaux de tramways ainsi que la modernisation et la gestion des téléphériques et des télécabines à l'échelle nationale.



### II.2 Description du projet extension du Métro d'Alger

#### II.2.1 L'importance du projet :

Répondre efficacement à la demande en transport représente l'une des priorités majeures sur les plans social et économique d'un pays. En Algérie, le secteur des transports traverse une transformation significative. De nombreux projets ont déjà été achevés ou sont en cours de réalisation, dans le but d'améliorer la performance et l'efficacité de ce domaine, contribuant ainsi davantage au développement économique national.

#### II.2.2 État d'avancement des extensions :

Dans le but d'améliorer les conditions de déplacement des citoyens et de proposer un moyen de transport à la fois confortable et sécurisé, le développement du métro d'Alger s'est imposé comme une solution nécessaire. En effet, face à la forte densité de population dans plusieurs zones de la capitale, les besoins en mobilité ne cessent d'augmenter.

Dans ce contexte, l'Entreprise Métro d'Alger a lancé plusieurs projets d'extension de la ligne 1 afin de desservir les quartiers les plus peuplés tels que Baraki, Bab Ezzouar, Bab El Oued, Chéraga, Draria, El Harrach ou encore la Place des Martyrs. Ces extensions visent à améliorer l'accessibilité, réduire la congestion routière et renforcer le réseau de transport urbain.

Actuellement, ces projets se répartissent en plusieurs phases : certaines extensions sont déjà mises en exploitation, d'autres sont en cours de réalisation, tandis que certaines sont encore en phase d'étude. Cette organisation permet une mise en œuvre progressive du réseau en fonction des priorités et des besoins de la ville.

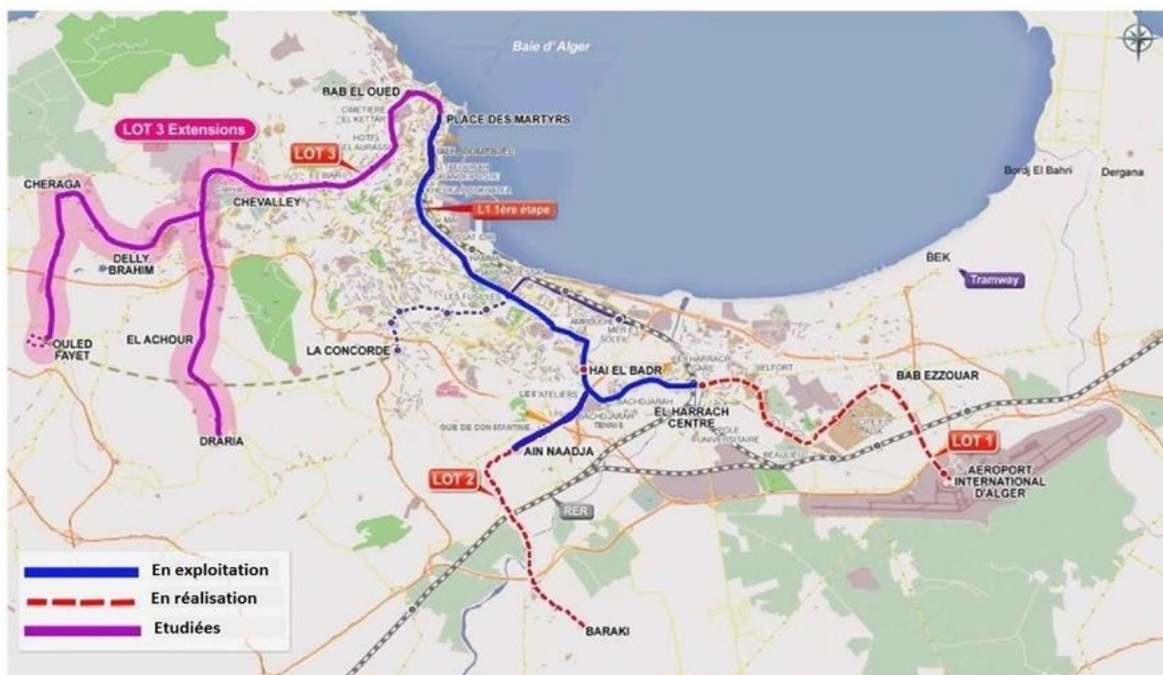


Figure II. 1 : Les extensions de la ligne 1 du métro d'Alger

#### II.2.2.1 Extensions en phase d'exploitation :

Plusieurs tronçons de la ligne 1 sont déjà en service et contribuent à améliorer la mobilité urbaine :

- ✓ **Haï El Badr – El Harrach Centre :**  
Mis en service en 2015, ce tronçon d'environ 4 km dessert plusieurs communes à travers 4 stations, notamment Bachdjarah et El Harrach.
- ✓ **Haï El Badr – Aïn Naâdja :**  
Inauguré en 2018, ce tronçon de 3,6 km comprend 3 stations et dessert les zones de Gué de Constantine et ses environs.
- ✓ **Grande Poste – Place des Martyrs :**  
Mis en service en 2018, ce prolongement de 1,7 km permet de relier le centre historique d'Alger à travers deux stations importantes.



Figure II. 2 : Les extensions du métro en phase exploitation

### II.2.2.2 Extensions en phase d'étude achevée (APS – APD) :

Certaines extensions ont déjà fait l'objet d'études avancées :

- ✓ **Place des Martyrs – Chevalley LOT 03 :**  
Ce tronçon de 8 km traverse Bab El Oued et comprend 8 stations, dont une partie est en cours de réalisation.
- ✓ **Bifurcation vers l'ouest LOT 04 (Chéraga – Draria) :**  
Cette extension globale de 14 km comprend deux branches :
  - Une vers Draria (8 km et 8 stations)
  - Une vers Chéraga et Ouled Fayet (6 km et 6 stations)



### II.2.2.3 Extensions en cours de réalisation :

Parmi les projets en cours, certaines extensions jouent un rôle stratégique dans le développement du réseau :

✓ **Aïn Naâdja – Baraki :**

Cette extension de 6 km comprend 6 stations ainsi qu'un viaduc important. Elle permet de desservir le centre de Baraki et d'assurer une connexion avec le réseau ferroviaire et les futures infrastructures de transport.

✓ **Place des Martyrs – Chevalley (partiel) LOT 03 :**

Une partie de ce tronçon est en cours de réalisation, concernant 3 stations.

✓ **El Harrach – Aéroport Houari Boumediene :**

L'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant El Harrach à l'aéroport international Houari Boumediene constitue l'un des projets les plus importants du développement du réseau, notamment parce qu'elle concerne directement la zone d'étude de notre projet. Les travaux de réalisation des gros œuvres ont été confiés à l'entreprise Cosider TP et ont été entamés dans le cadre du programme de modernisation des transports urbains.

Cette extension s'étend sur un linéaire d'environ 9,5 km et comprend un total de 10 stations. Elle vise à renforcer la desserte de la partie Est de la capitale, en reliant plusieurs zones à forte densité de population et à vocation économique et universitaire. On trouve ces nouvelles stations : El Harrach Centre, Hacène Badi, Pôle Universitaire, Beaulieu, Oued Smar, Université Houari Boumediene, Rabia Tahar, Smail Yefsah, Centre des Affaires et Aéroport Houari Boumediene.

En plus de son rôle dans l'amélioration de la mobilité urbaine, cette extension présente un intérêt stratégique important grâce à la connexion qu'elle assure avec d'autres moyens de transport.

En effet, une correspondance avec le tramway est prévue au niveau du carrefour de l'Université Houari Boumediene, permettant ainsi une multimodalité et facilitant les déplacements des usagers.

Dans ce contexte, notre étude s'inscrit dans cette extension, plus précisément au niveau du lot 01, qui comprend plusieurs ouvrages de ventilation, dont le puits de ventilation PV5 faisant l'objet de ce projet.

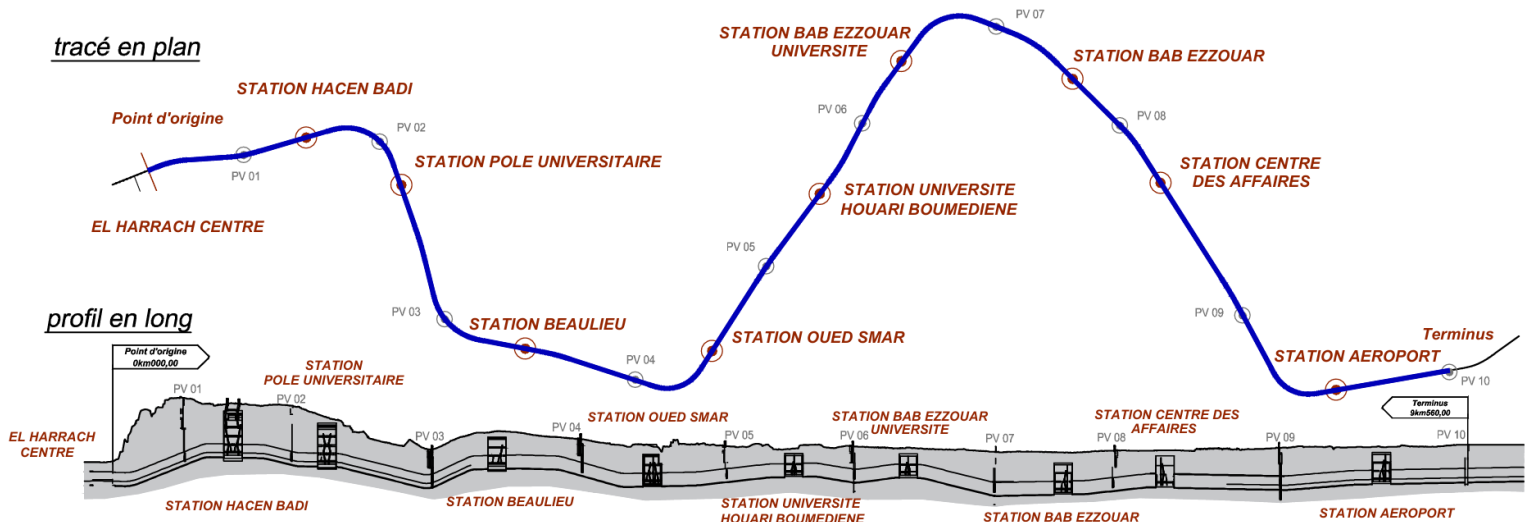
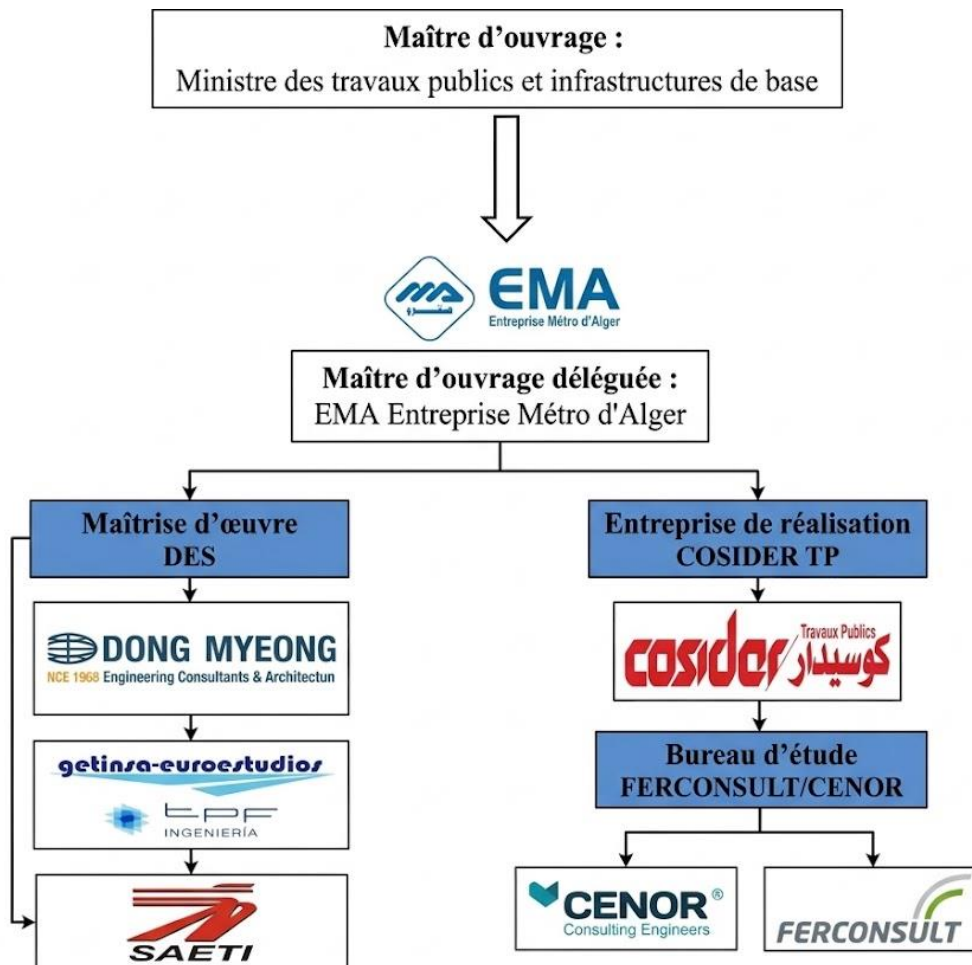


Figure II. 3 : Extension El Harrach aéroport

### II.2.2.4 Organigramme des différents acteurs du projet El Harrach - Aéroport Houari Boumediene :



### Bureaux d'étude :



C'est une entreprise multidisciplinaire et spécialisée en conseil, études et projets d'ingénierie des transports, qui opère sur les marchés national et international depuis 1991, ces services incluent toutes rubriques des études et des projets, la topographie et la géologie, mais aussi la sécurité et l'environnement.



Bureau d'étude portugais.

### Maitrise d'œuvre :



TPF GETINSA EUROESTUDIOS est l'une des plus grandes sociétés d'ingénierie en Espagne, leader sur le marché dans des secteurs clés tels que le transport l'environnement, l'eau, le bâtiment et les aménagements urbains.



DONG MYEONG Engineering and Architecture (DMEC): - Fondée en 1960, DMEC dont le siège social est à Séoul en Corée du Sud, est un des principaux acteurs en matière de développement et d'exploitation des infrastructures qui proposent des services de consulting stratégiques, de planification, d'ingénierie et de gestion de la construction notamment dans les domaines d'assainissement, géotechnique, port et industries maritimes, architecture, voies ferrées, transports, paysagisme et au métro.



Société algérienne d'étude d'infrastructures filiale du groupe d'Entreprises GEICA depuis 2016, sous tutelle du ministère des Travaux publics et des transports, développe un savoir-faire de niveau national et international dans le domaine d'études, de contrôle, de suivi, d'assistance et d'expertise d'infrastructures routières, autoroutières, ouvrages d'art, aéroports et ferroviaires.



Est une entreprise de réalisation des grands travaux dans les différents domaines (autoroutes, barrages et ouvrages maritimes et souterrains...). Elle s'est imposée comme leader incontesté du BTPH sur le marché Algérien en capitalisant une expérience de plus de 35 années.

Avant d'entamer la présentation des puits de ventilation, il est important de préciser que notre projet porte spécifiquement sur la réalisation du puits de ventilation PV5. Ce dernier s'inscrit dans le cadre de l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant El Harrach à l'aéroport international Houari Boumediene, dans le lot 01.

Ce lot comprend un ensemble de 11 puits de ventilation, numérotés de PV0 à PV10, répartis tout au long du tracé afin d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité du tunnel. Le puits étudié dans ce projet représente donc un élément parmi ces ouvrages essentiels au système de ventilation du métro.

### II.3 Les puits de ventilation de l'extension LOT 01 :

Ils injectent et extraient une quantité suffisante d'air pour maîtriser la combustion, limitant ainsi la propagation du feu et garantissant l'évacuation des voyageurs en toute sécurité.

Chaque puits de ventilation est construit en béton armé et intègre des issues de secours qui facilitent l'accès des pompiers et permettent une évacuation rapide en cas d'urgence.

Généralement, ces puits sont placés au milieu des deux stations. Toutefois, si les contraintes environnementales rendent cette implantation impossible, ils sont positionnés



à l'endroit le plus approprié pour répondre aux besoins opérationnels. Les puits de ventilation sont reliés au tunnel principal par des rameaux.

À noter que, lors de la construction des tunnels reliant les différentes stations, on commence essentiellement par réaliser ces puits, appelés puits de ventilation ou puits d'attaque. Une fois les tunnels achevés, ces mêmes puits sont utilisés à des fins de ventilation.

- **PV0** : Puits d'extraction du tunnelier.
- **PV1** : Situé entre la station El Harrach Centre et la station Hacène Badi.
- **PV2** : Situé entre la station Hacène Badi et la station Pôle Universitaire.
- **PV3** : Situé entre la station Pôle Universitaire et la station Beaulieu.
- **PV4** : Situé entre la station Beaulieu et la station Oued Smar.
- **PV5** : Situé entre la station Oued Smar et la station Université Houari Boumediene.
- **PV6** : Situé entre la station Université Houari Boumediene et la station Rabia Tahar.
- **PV7** : Situé entre la station Rabia Tahar et la station Smail Yefsah.
- **PV8** : Situé entre la station Smail Yefsah et la station Centre des Affaires.
- **PV9** : Situé entre la station Centre des Affaires et la station Aéroport Houari Boumediene.
- **PV10** : Prévu pour l'extraction du tunnelier en fin de creusement.

### II.4 Présentation du puits de ventilation PV05 :

Le puits de ventilation PV5 fait partie d'une série de onze puits réalisés dans le cadre du projet d'extension du métro d'Alger, lot 1. Cet ouvrage intègre une gaine de ventilation, un local technique ainsi que des sorties de secours, visant à limiter la propagation d'un incendie et à assurer l'évacuation des voyageurs en toute sécurité. Il est relié au tunnel principal par un rameau de connexion (tunnel transversal) d'une longueur de 43 mètres.

#### II.4.1 Localisation du puits de ventilation 05 :

Le Puits de Ventilation 5 est inséré dans le Projet de l'Extension El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International Houari Boumediene, et se situe entre la station Oued Smar et la station Université Houari Boumediene, au point Kilométrique PK4+331.00. Le puits de ventilation PV5 se trouve sur un terrain nu, près de la Route de Bab Ezzouar. Il est situé à une distance de 18,7 mètres du pylône. Ce puits est constitué de trois éléments principaux : un local technique situé au-dessus du sol, qui abrite un ventilateur ainsi que des locaux électriques, un tunnel horizontal relié au tunnel à bouclier, et un puits vertical circulaire qui fait le lien entre le local technique et le tunnel horizontal.

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET



Figure II. 5 : Localisation de PV5 dans photo Google earth

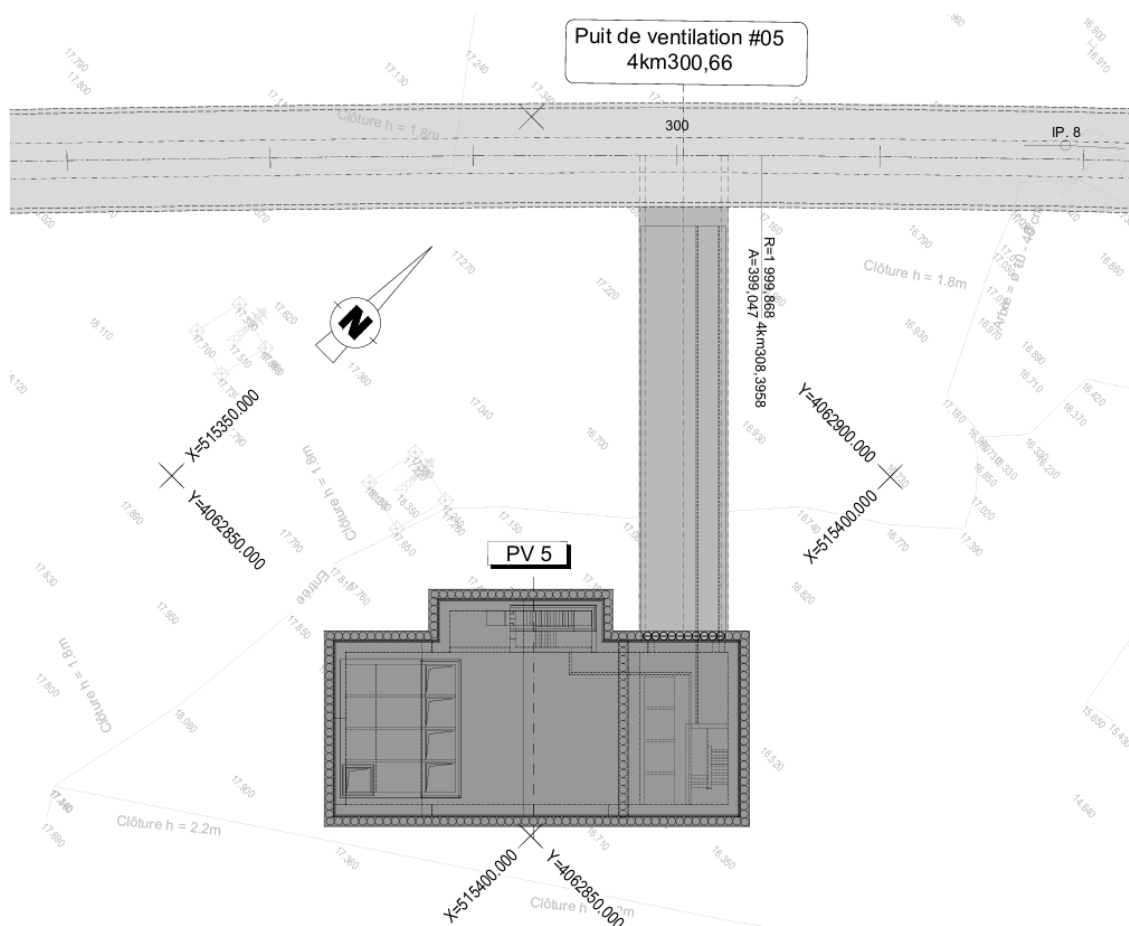


Figure II. 4 : Vue d'ensemble, Localisation

### II.4.2 Description de la conception du PV5 :

#### II.4.2.1 Caractéristiques géométriques du puits :

Le puits de ventilation PV5 présente des caractéristiques géométriques définies en fonction des contraintes fonctionnelles et structurelles de l'ouvrage. Il est constitué de plusieurs éléments principaux, notamment le local technique, le puits vertical, les différents niveaux de radiers, ainsi que 4 gaines de ventilation assurant la circulation et l'évacuation de l'air au sein de l'ouvrage.

**Le local technique** : situé au niveau intermédiaire, présente une longueur de 37,6 m, une largeur de 15,0 m et une hauteur de 8,6 m. Il constitue un espace essentiel pour l'installation des équipements de ventilation et des installations électriques.

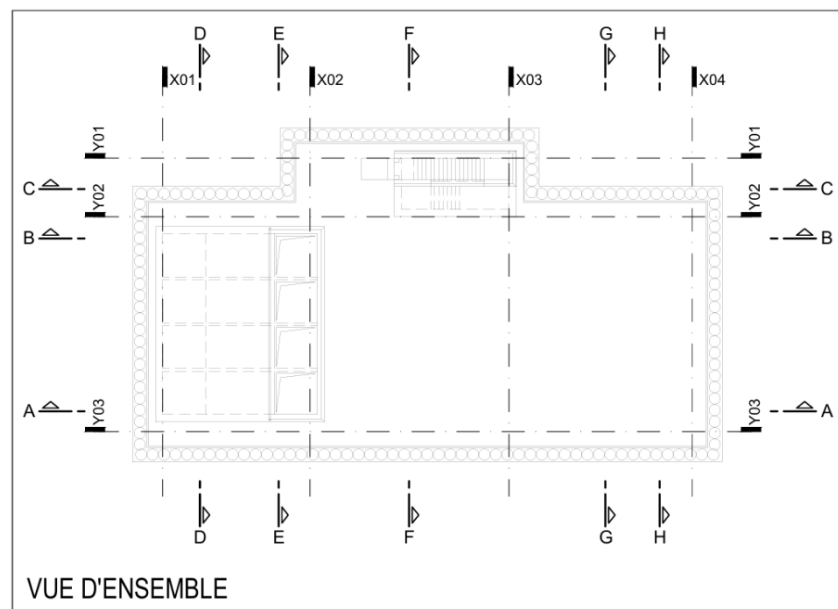
**Le puits vertical** : de forme rectangulaire, possède une largeur de 15,0 m, une longueur de 8,7 m et une profondeur d'environ 11,11 m. Il assure la liaison entre le local technique et le rameau de connexion.

**La dalle de couverture (niveau R0)** : présente une longueur de 38,8 m, une largeur de 19,3 m et une épaisseur de 1,20 m. Elle intègre plusieurs ouvertures destinées aux gaines de ventilation ainsi qu'à l'accès du matériel.

Le puits est également composé de deux niveaux de radiers :

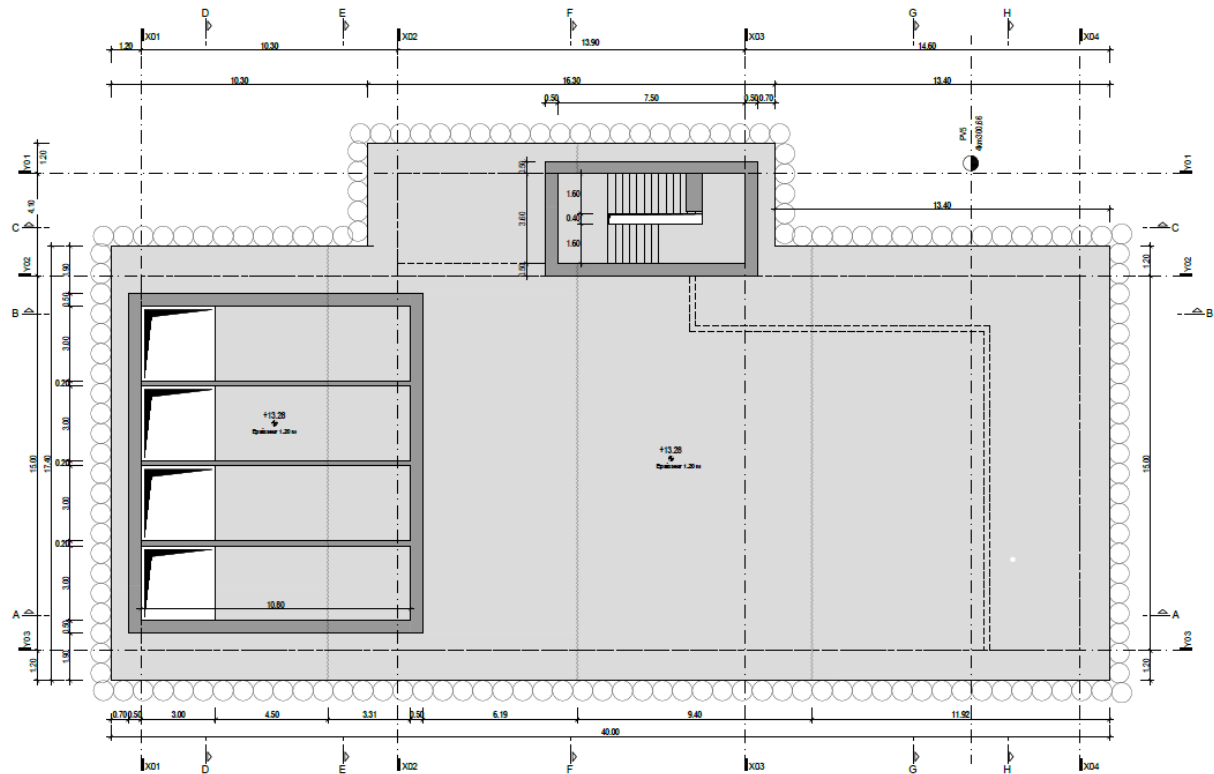
- **Radier supérieur (R-1)** : situé à la cote +5,88 m, avec une épaisseur de 1,20 m, il assure la transmission des charges vers le sol et comporte des ouvertures pour les escaliers et les équipements.
- **Radier inférieur (R-2)** : situé à la cote -5,23 m, il constitue le fond du puits et comprend un puisard destiné à la collecte et à l'évacuation des eaux.

#### II.4.2.2 Représentations graphiques du PV5 :



- Vues en plan :

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET



PLAN DE LA COUVERTURE  
Ech. 1 : 100

Figure II. 6 : vue en plan niveau de dalle de couverture

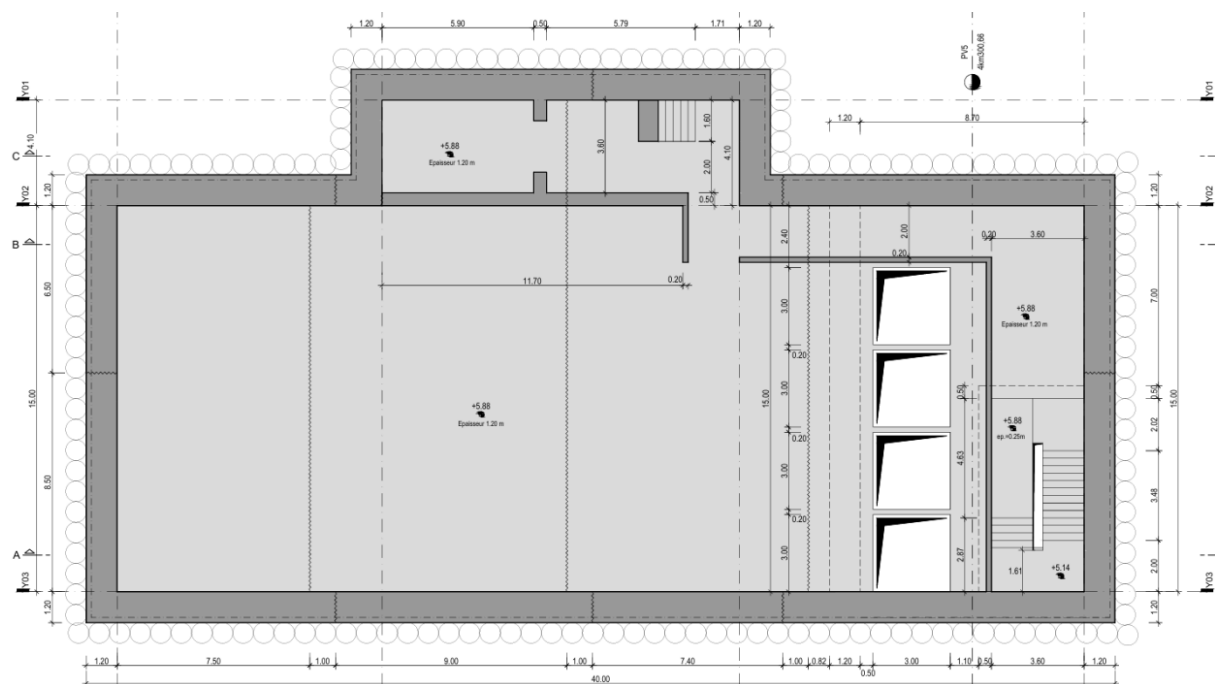
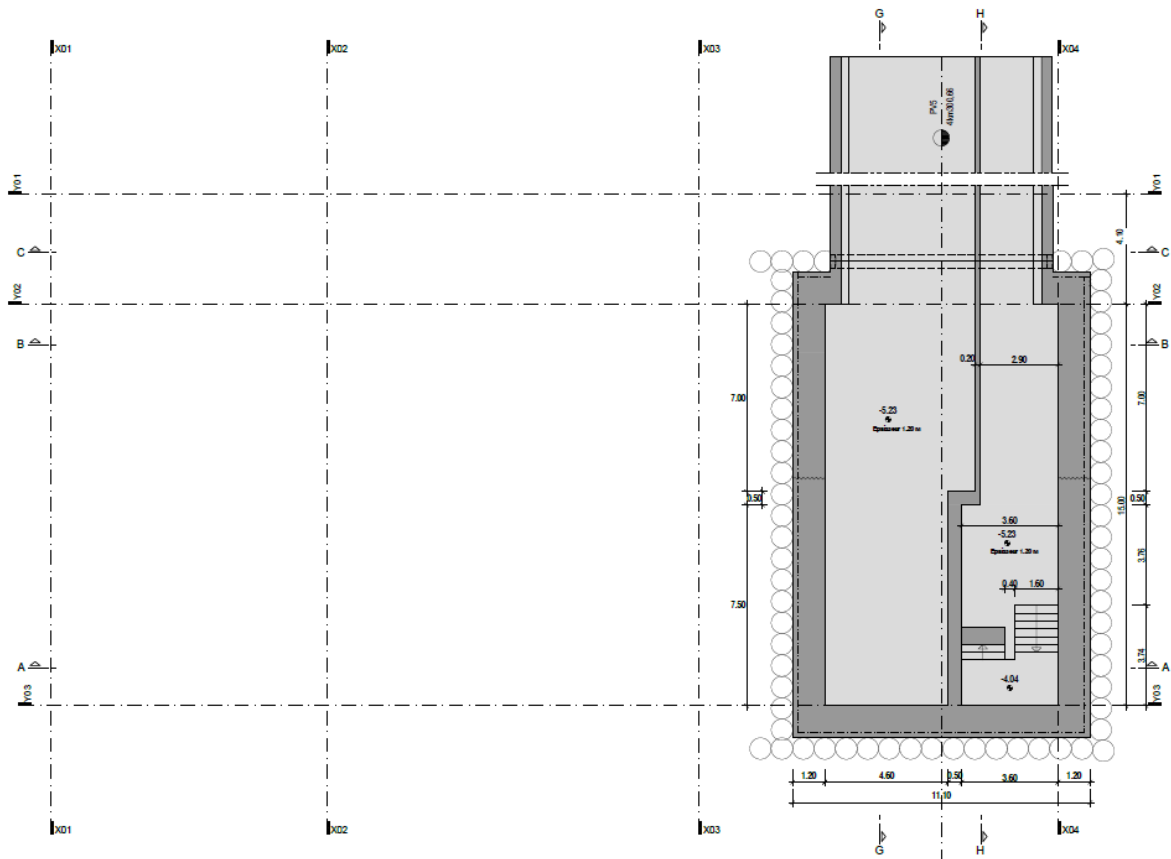


Figure II. 7 : Vue en plan niveau +5.88



PLAN NIVEAU -5.23  
Ech. 1 : 100

Figure II. 8 : vue en plan niveau -5.23

## - Schéma longitudinale :

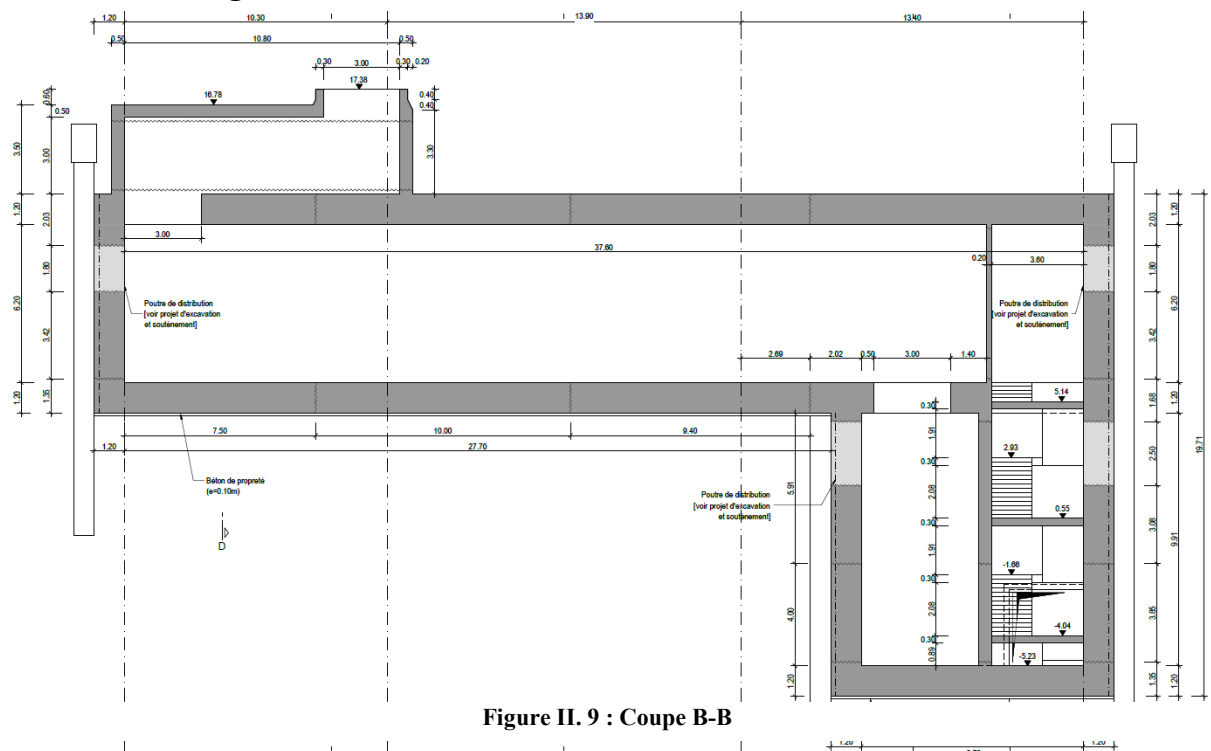
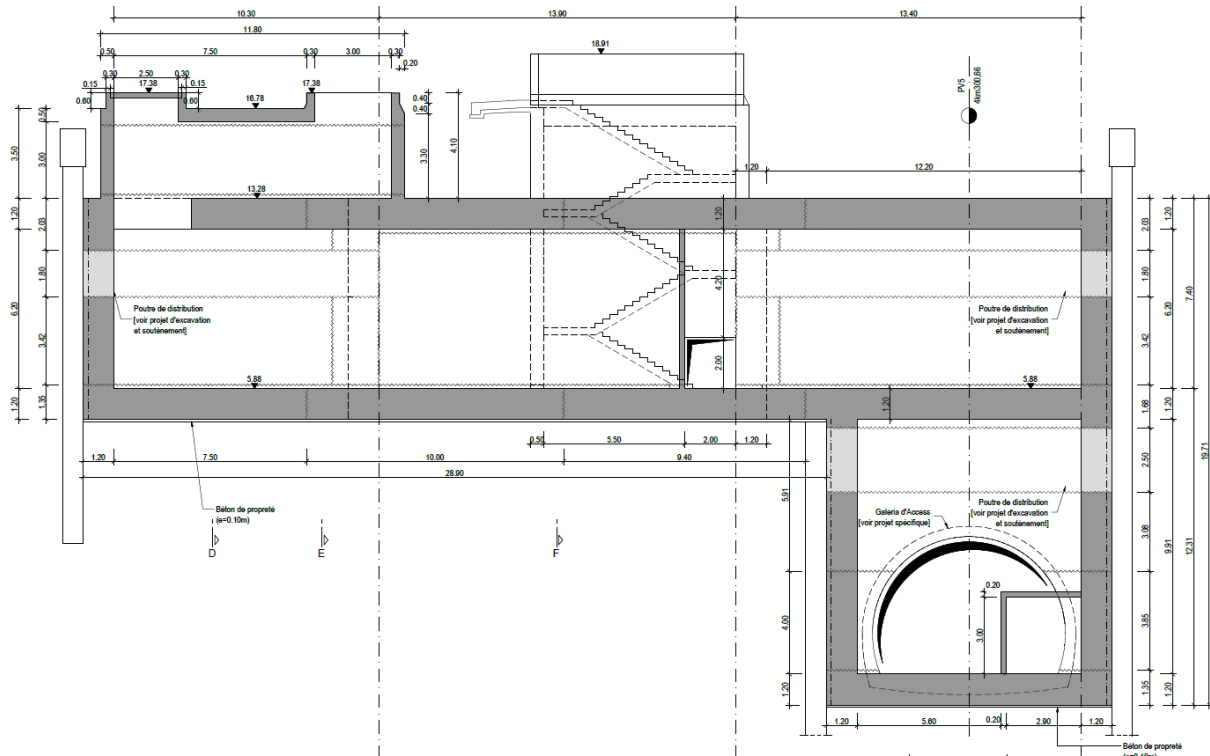
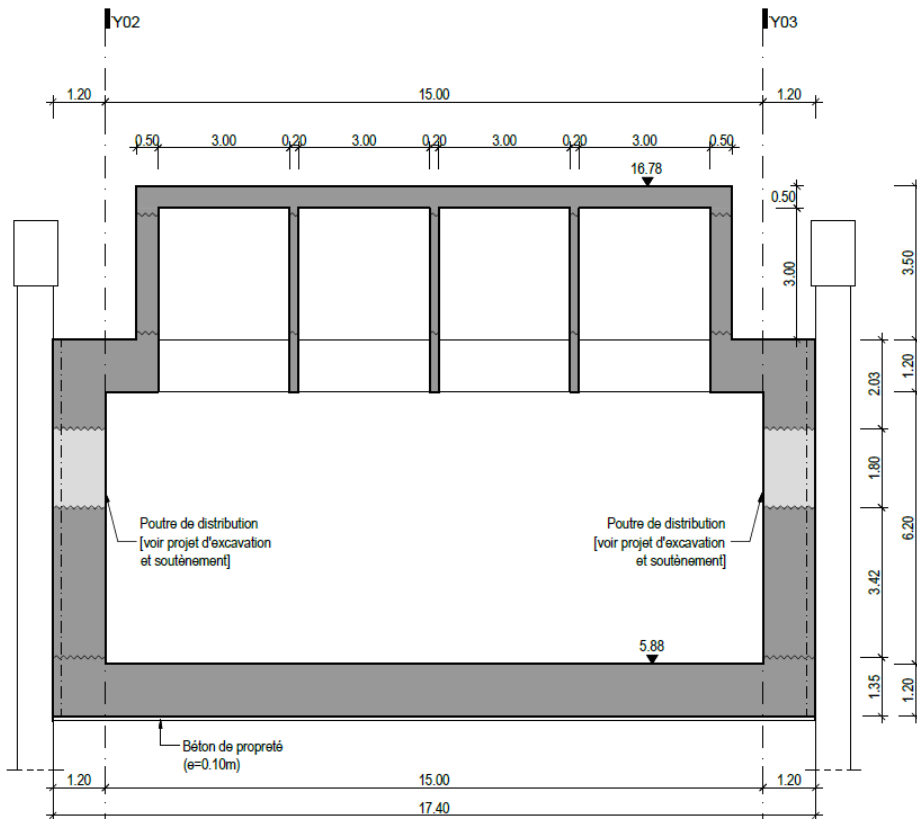


Figure II. 9 : Coupe B-B

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET



**Figure II. 11 : Coupe A-A**



**Figure II. 10 : Coupe E-E**

## - Schéma transversale :

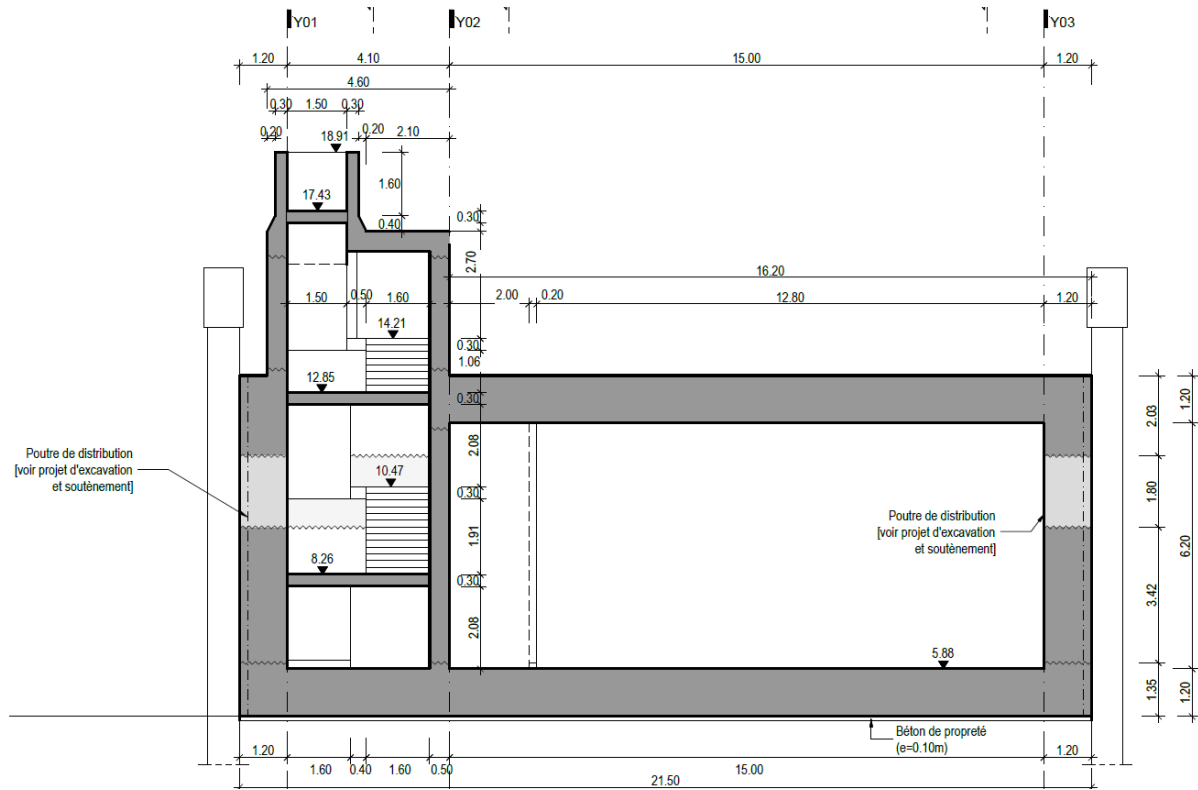


Figure II. 13 : Coupe F-F

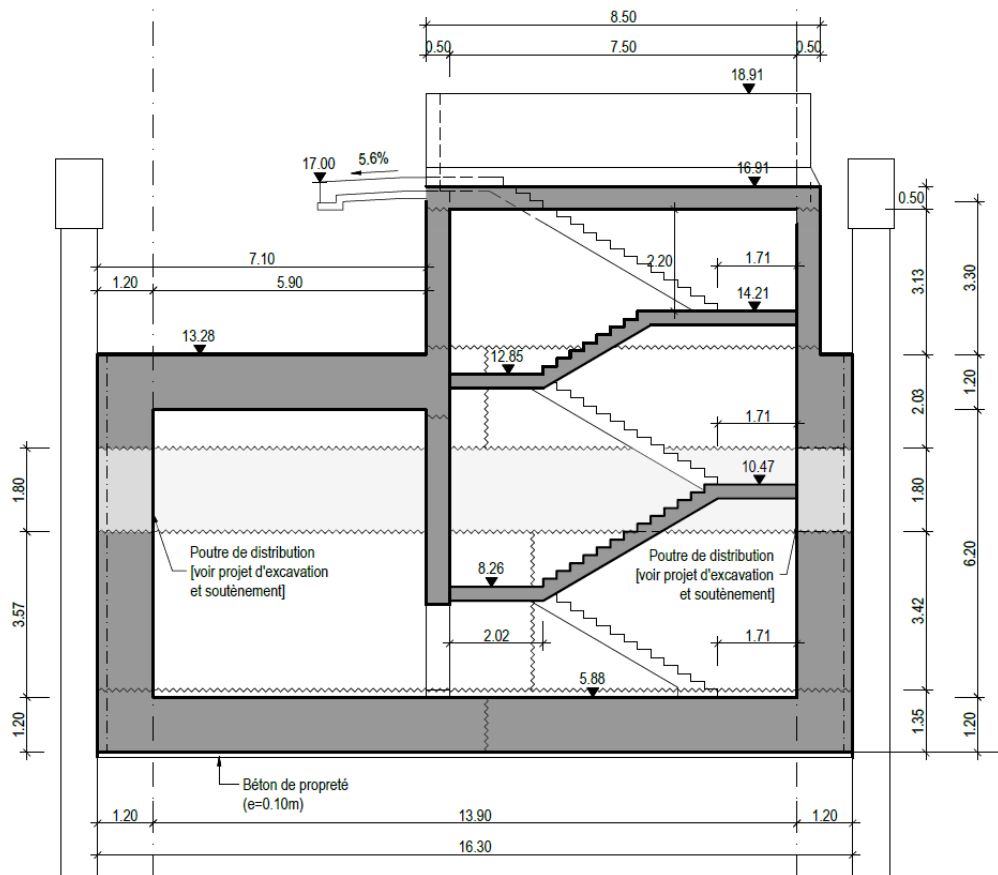


Figure II. 12 : Coupe C-C



## - Escaliers d'accès :

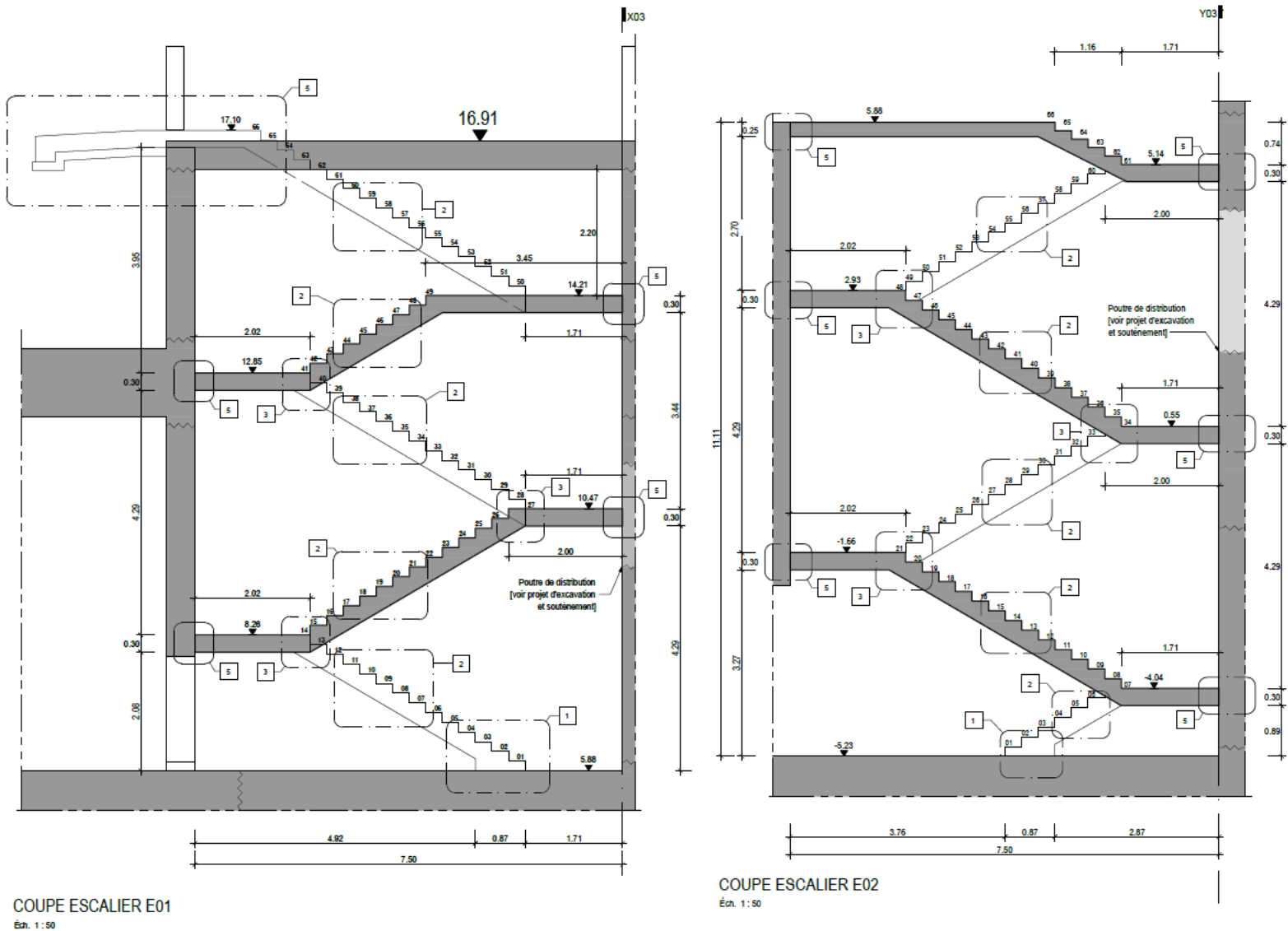


Figure II. 14 : Schéma des escaliers du PV 05

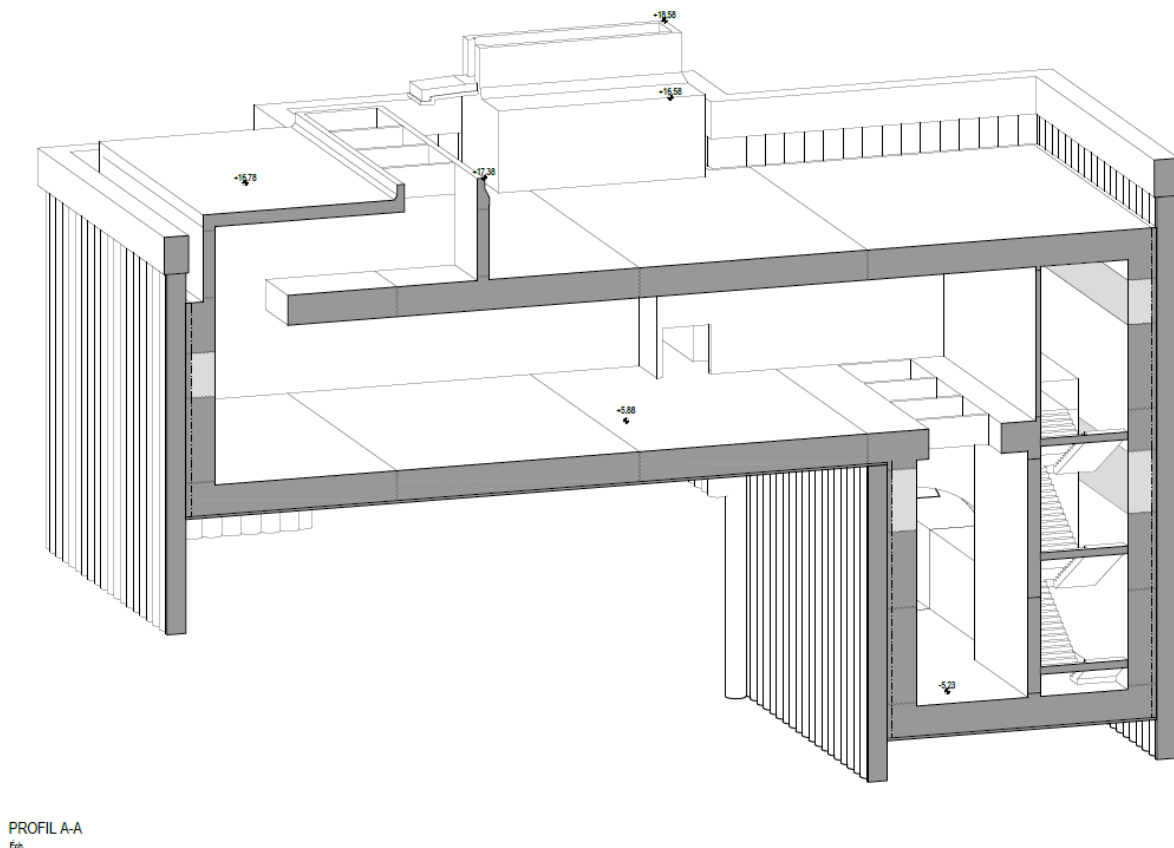


Figure II. 15 : Schéma 3D du PV 05

### II.4.3 Description de la conception du rameau de connexion :

#### II.4.1 Caractéristiques géométriques du rameau :

Le rameau de connexion est un tunnel horizontal assurant la liaison entre le tunnel de voie et le puits de ventilation PV5.

Il constitue un élément essentiel pour le fonctionnement du système de ventilation, en permettant le passage de l'air entre le tunnel principal et le puits.

Le tunnel présente une longueur d'environ 42 m et est creusé sous la protection d'une voûte-parapluie constituée d'enfilages en tubes métalliques.

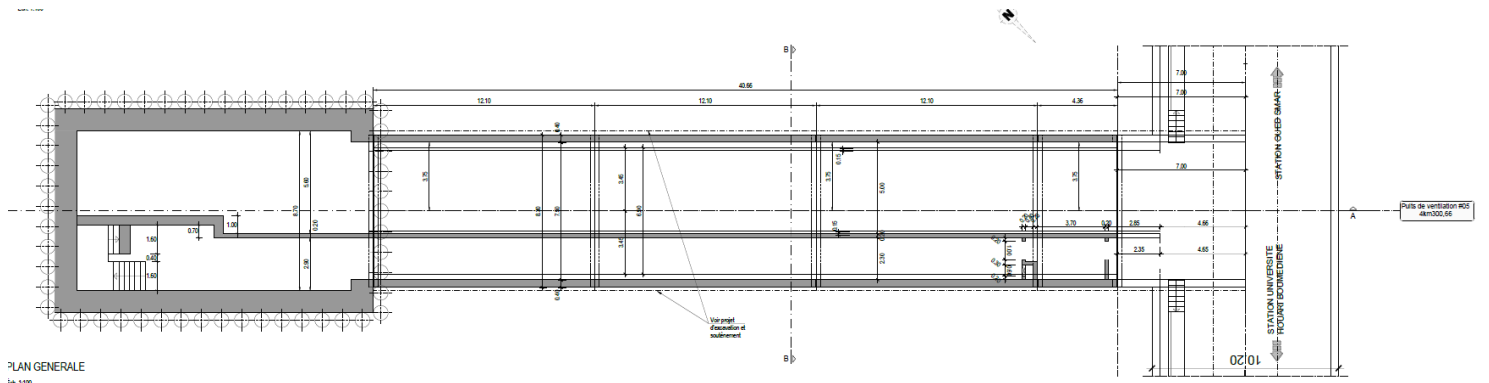
Ces derniers sont mis en place à intervalles réguliers, généralement tous les 9,0 m, au niveau du front d'excavation, afin d'assurer la stabilité du terrain pendant les travaux.

La section d'excavation du rameau est de forme adaptée aux contraintes du site et varie le long du tracé. Elle présente une largeur comprise entre 9,0 m et 10,5 m, ainsi qu'une hauteur variante entre 7,0 m et 8,0 m. Cette variation permet d'optimiser les conditions de creusement tout en garantissant la sécurité et la stabilité de l'ouvrage.

#### II.4.2 Représentations graphiques :

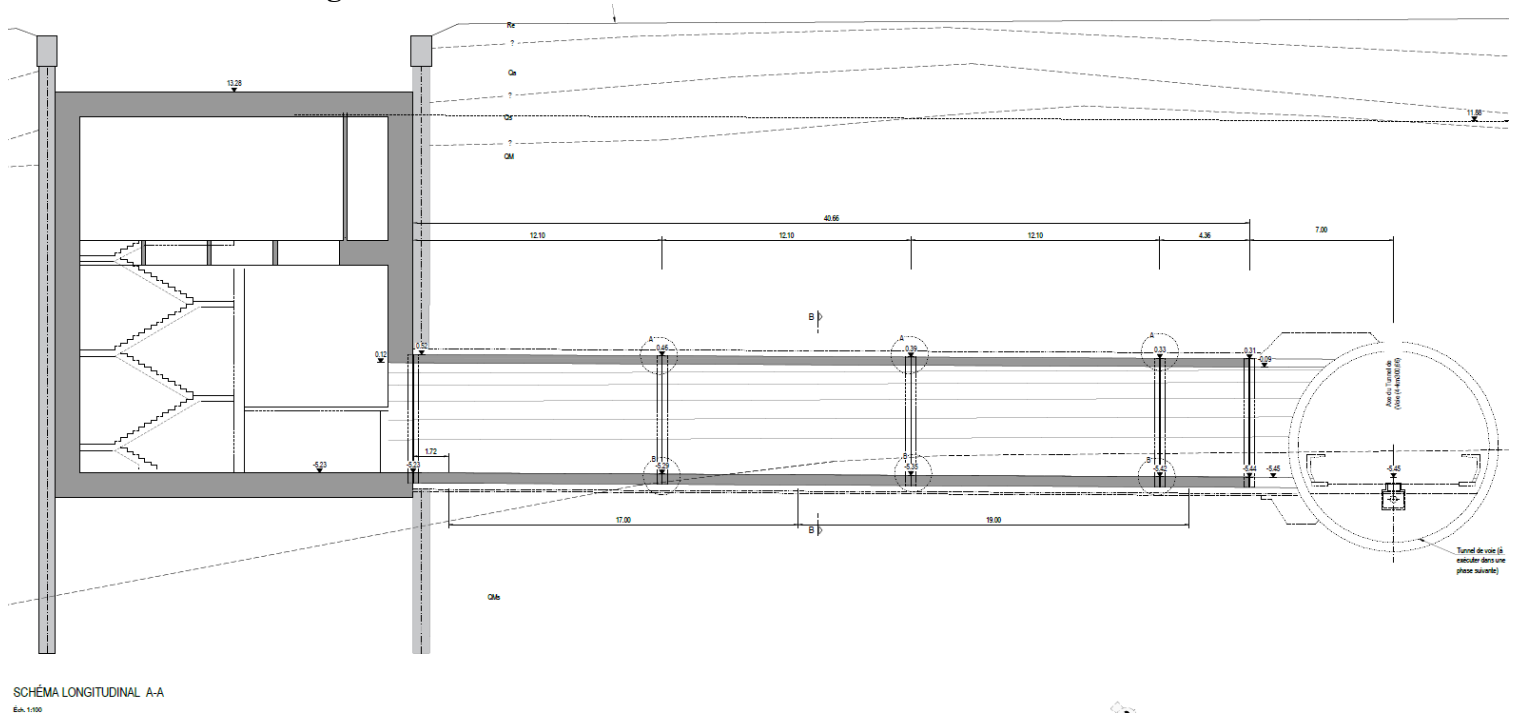
- vue en plan :

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET



**Figure II. 16 : Vue en plan du rameau**

**- Schéma longitudinale :**



**Figure II. 17 : Vue longitudinale du rameau**

## - Schema transversale :

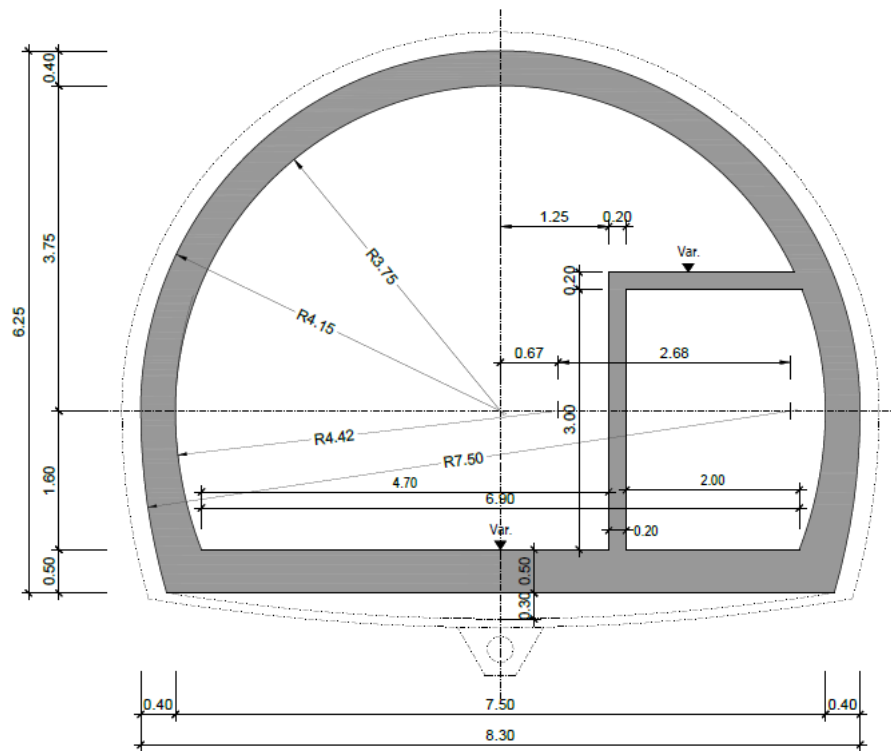


SCHÉMA TRANSVERSAL B-B

Éch. 1:50

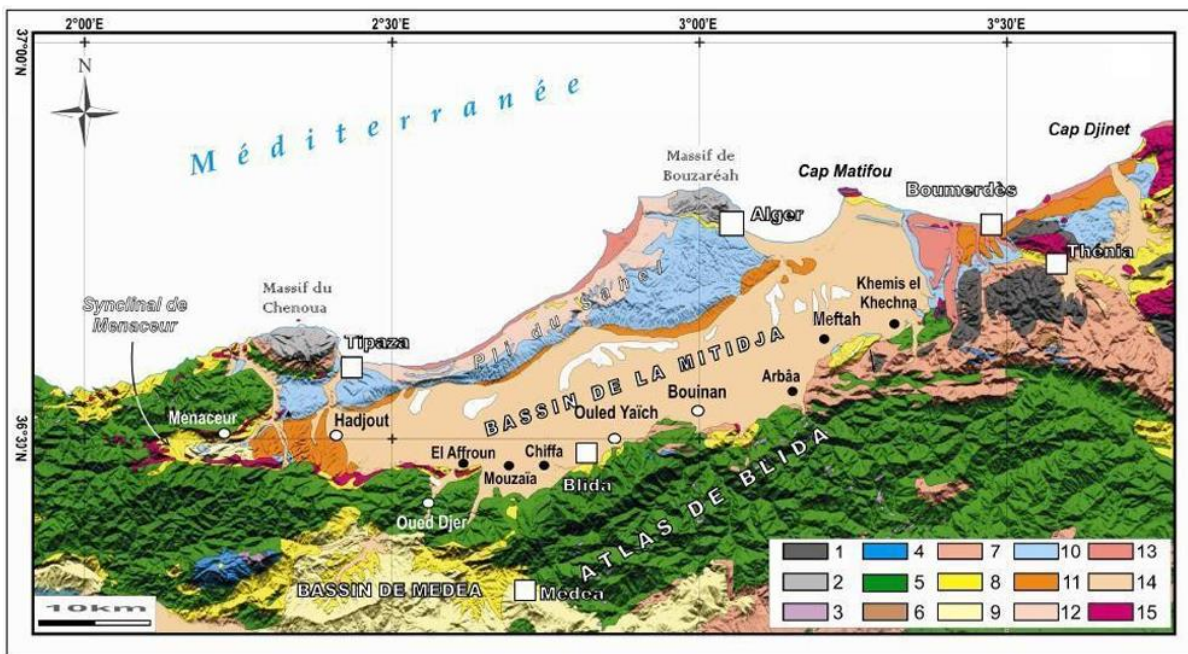
Figure II. 18 : Vue transversale du rameau

## II<sup>1.5</sup> Contexte géologique, hydrogéologique et sismique du projet :

### II.5.1 Généralités sur la géologie de la wilaya d'Alger :

#### II.5.1.1 Description lithologique de la plaine de Mitidja :

Dans son contexte régional, le site d'étude est localisé à Bab Ezzouar, au nord-est de la plaine de la Mitidja. Cette dernière se distingue par ses formations géologiques majoritairement alluvionnaires, composées de matériaux grossiers tels que les graviers et les galets, combinés à des fractions variables de limons et d'argiles. Ces dépôts, qui recouvrent une grande partie du bassin oriental, présentent une épaisseur décroissante à mesure qu'on s'éloigne vers les marges de l'Atlas tellien et les abords de la baie d'Alger. La répartition spatiale des diverses formations géologiques au sein de cette plaine est synthétisée et représentée dans la colonne lithologique correspondante.



|                            |                        |                              |
|----------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1. Terrains métamorphiques | 6. Éocène              | 11. Villafranchien           |
| 2. Socle primaire          | 7. Oligocène           | 12. Calabrien                |
| 3. Trias                   | 8. Miocène anti-nappes | 13. Quaternaire marin        |
| 4. Jurassique              | 9. Miocène post-nappes | 14. Quaternaire continental  |
| 5. Crétacé                 | 10. Pliocène           | 15. Magmatisme indifférencié |

Figure II. 19 : Carte morphogéologique du bassin de la Mitidja et ses environs [ 6 ]

<sup>1</sup> Hamai, L. (2011). *Carte morphogéologique du bassin de la Mitidja et ses environs* [Figure]. In *Étude gravimétrique de la Mitidja occidentale*. ResearchGate.

[https://www.researchgate.net/figure/Carte-morphogeologique-du-bassin-de-la-Mitidja-et-ses-environs-donnees-topographiques\\_fig8\\_333669610](https://www.researchgate.net/figure/Carte-morphogeologique-du-bassin-de-la-Mitidja-et-ses-environs-donnees-topographiques_fig8_333669610)

### II.5.1.2 Géologie locale du site d'étude et les zones limitrophes :

Selon la carte géologique d'Alger à l'échelle 1/50 000, la région se distingue par la présence d'un socle métamorphique correspondant au massif d'Alger. Ce massif est encerclé par des formations sédimentaires datant du Plio-Quaternaire, lesquelles sont délimitées au sud par le bassin Mio-Plio-Quaternaire de la Mitidja. Les principales formations visibles dans cette région, décrites par Aymé en 1964, se présentent ainsi :

#### ➤ **Le socle métamorphique :**

Ce socle est constitué de roches pélitiques et carbonatées ayant subi un processus de métamorphisme. On y observe également, localement, des intrusions ou manifestations magmatiques, attestant d'une ancienne activité tectonique dans la région.

#### ➤ **Les lacunes stratigraphiques :** La région d'Alger présente des lacunes stratigraphiques notables, en particulier dans les formations du Secondaire et à la base du Tertiaire (Éocène et Oligocène). Ces interruptions témoignent de phases d'érosion ou d'absence de sédimentation. Les formations tertiaires : Les formations tertiaires reposent de manière discordante sur le socle métamorphique. Elles se composent de divers dépôts sédimentaires qui retracent l'évolution géologique de la région au cours de cette période.

#### ➤ **Les formations quaternaires :** Les formations quaternaires se manifestent avant tout par des marnes et des cailloutis, contribuant au remplissage de la plaine de la Mitidja. Ces dépôts présentent une grande variété de faciès, allant des matériaux fins aux fragments grossiers. Dans la région d'Alger, le Quaternaire regroupe plusieurs types lithologiques comme les sables, les grès dunaires, les alluvions, les éboulis, les limons, les argiles vaseuses et les tourbes argileuses.

### II.5.1.3 Contexte hydrogéologique de la région du projet :

#### ➤ **La nappe phréatique de la Mitidja :**<sup>2</sup> La plaine de la Mitidja représente l'un des principaux réservoirs hydrogéologiques situés au nord de l'Algérie. Localisée au sud de la capitale, Alger, elle s'étend sur une superficie d'environ 1 400 km<sup>2</sup>, avec une configuration allongée allant d'est en ouest sur près de 100 km. Sa largeur varie entre 5 et 20 km selon les zones. Elle est bordée par des reliefs marqués : au nord, par les collines du Sahel algérois, et au sud, par l'Atlas blidéen. D'un point de vue administratif, cette plaine couvre plusieurs wilayas, notamment celles de Tipaza, Blida, Alger et Boumerdès. Les eaux souterraines de la nappe de la Mitidja sont principalement alimentées par deux sources majeures : les précipitations et l'infiltration des eaux des oueds qui sillonnent la plaine. Cette nappe évolue sous l'influence d'un climat subhumide à proximité du littoral, caractéristique des plaines côtières. Cependant, à mesure que l'on s'éloigne vers l'intérieur des terres, le climat

---

<sup>2</sup> DJOUDAR, D., KHELFI, M. E. A., & ZAHOUANI, S. (2017). *Répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est*. In *Approche géostatistique de l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja Orientale : Application de trois modèles DRASTIC, PRAST et GALDIT*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Repartition-des-points-deau-dans-la-plaine-de-la-Mitidja-EstZahouani-2017-Les\\_fig3\\_339487695](https://www.researchgate.net/figure/Repartition-des-points-deau-dans-la-plaine-de-la-Mitidja-EstZahouani-2017-Les_fig3_339487695)



devient progressivement plus continental, accompagné par une baisse significative des températures.

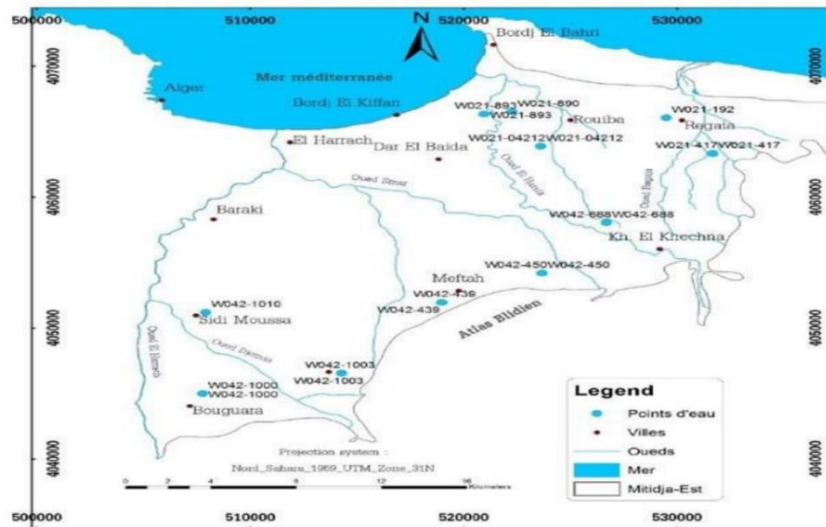


Figure II. 20 : Répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est [7]

## ➤ Hydrologie de la région :<sup>3</sup>

Le régime hydrologique de la région d'Alger se caractérise par une forte dépendance à l'irrégularité des précipitations. En été, les oueds sont le plus souvent asséchés, tandis qu'en hiver, période marquée par des pluies plus abondantes, on observe des écoulements pouvant être significatifs, accompagnés d'un transport substantiel de sédiments.

Le réseau hydrographique local s'articule principalement autour des oueds suivants :

- Oued El Harrach - Oued El Hamiz - Oued Semmar - Oued Réghaïa - Oued Mazafran

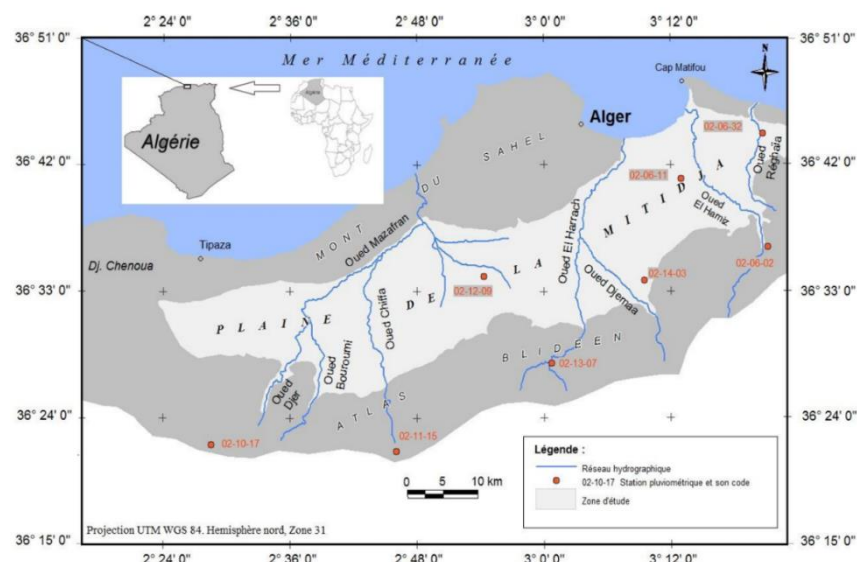


Figure II. 21 : Réseau hydrographique de la région d'étude [8]

<sup>3</sup> Drouiche, A., Nezzal, F., & Djema, M. (2019). Variabilité interannuelle des précipitations dans la plaine de la Mitidja en Algérie du Nord. *Revue des sciences de l'eau*, 32(2), 119–134. <https://doi.org/10.7202/1065205ar>



- **Le régime hydrographique :** Le réseau hydrographique de la région est principalement alimenté par des oueds prenant leur source dans l'Atlas tellien. Les principaux cours d'eau sillonnant la zone d'Alger, d'ouest en est, sont l'oued Mazafran, l'oued Isser et l'oued Sébaou. Parmi ces trois rivières, l'oued Isser se distingue par l'étendue de son bassin versant, sa longueur notable et la quantité importante de sédiments qu'il transporte. Cependant, selon le rapport du MATE de 2003, ces cours d'eau se caractérisent par un régime hydrologique marqué par une grande irrégularité. Durant la période estivale, les embouchures de ces oueds se retrouvent fréquemment obstruées en raison des faibles débits. Elles ne sont généralement dégagées qu'à l'approche de l'hiver, lorsque les premières pluies abondantes provoquent des crues qui génèrent un effet de chasse hydraulique. Les relevés effectués au niveau des embouchures révèlent que l'oued Sébaou affiche le débit le plus élevé. En revanche, les oueds Isser et Mazafran présentent des débits relativement similaires mais inférieurs à celui du Sébaou.

### II.5.1.4 Contexte climatique du projet :

#### II.5.1.4.1 Température et pluviométrie moyenne :<sup>4</sup>

- **La pluviométrie :** Les précipitations enregistrées au cours de la période sont caractérisées par leur irrégularité et, à l'occasion, leur extrême intensité. Sur la base des données collectées par l'Office National de Météorologie (ONM2) pour la période de référence 1986-1994, il ressort que les zones côtières situées à proximité d'Alger bénéficient d'une pluviométrie annuelle moyenne évaluée à environ 707 mm. Au mois de juillet, les précipitations atteignent leur niveau le plus bas avec une moyenne de seulement 3 mm, marquant ainsi le mois le plus aride de l'année. En revanche, c'est durant le mois de décembre que les précipitations sont les plus abondantes, avec une moyenne de 121 mm, constituant le sommet du régime pluviométrique annuel.

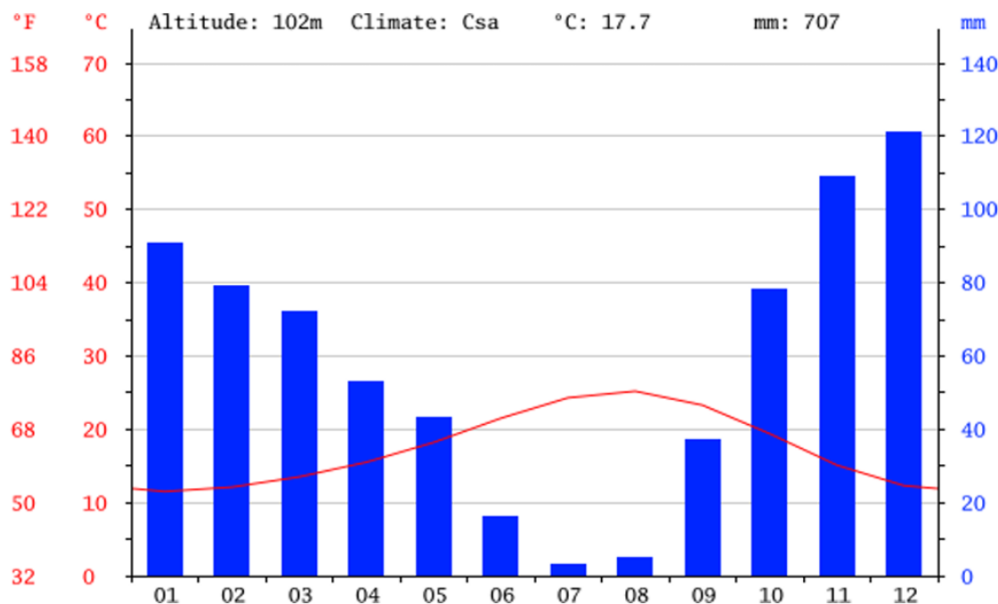


Figure II. 22 : Histogramme pluviométrique et courbe de variation de température de la I.3 Ville

<sup>4</sup> Climate-Data.org. (S. d.). *Climat Alger (Algérie)*. Récupéré le 12 juin 2026, sur <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/alger/alger-3485/>

- **Les températures :**<sup>5</sup> La région d'Alger profite d'un climat méditerranéen, marqué par des étés longs, chauds et secs. Les hivers y sont plutôt doux et humides, accompagnés de précipitations parfois importantes. La neige y est rare, mais peut survenir de manière exceptionnelle. Dans l'ensemble, le climat algérien est majoritairement chaud et aride. Cependant, la zone côtière méditerranéenne se distingue par des conditions plus tempérées. Dans les villes du nord situées près du littoral, les températures hivernales oscillent généralement entre 8 et 15°C. Avec l'arrivée du printemps, elles augmentent progressivement pour avoisiner 25°C en mai, avant de se stabiliser entre 28 et 30°C pendant juillet et août.

| Température moyenne mensuelle à Alger |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |             |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Moyenne                               | janv. | févr. | mars  | avr.  | mai   | juin  | juil. | août  | sept. | oct.  | nov. déc.   |
| Haute                                 | 15 °C | 16 °C | 18 °C | 20 °C | 22 °C | 26 °C | 29 °C | 30 °C | 28 °C | 24 °C | 20 °C 16 °C |
| Temp.                                 | 10 °C | 11 °C | 12 °C | 14 °C | 17 °C | 21 °C | 24 °C | 25 °C | 23 °C | 19 °C | 15 °C 11 °C |
| Basse                                 | 6 °C  | 6 °C  | 7 °C  | 9 °C  | 12 °C | 16 °C | 19 °C | 20 °C | 18 °C | 14 °C | 10 °C 7 °C  |

Figure II. 23 : Relevé météorologique d'Alger

### II.5.1.5 Contexte sismique :

La région d'Alger se distingue par une activité sismique significative, étroitement liée à la présence de nombreuses failles actives, parmi lesquelles figurent celles de Kheir Eddine, Zemmouri, Sahel, Chenoua, Blida et Thénia. Ces structures tectoniques possèdent des potentiels sismogènes variés et sont à l'origine de séismes d'intensités diverses pouvant affecter la région. Sur le plan historique, Alger a été le théâtre de plusieurs séismes destructeurs. Parmi eux, celui du 3 février 1716 reste notable par son intensité et son impact dévastateur. De façon plus récente, le tremblement de terre de Boumerdès survenu en 2003, en lien direct avec l'activité de la faille de Zemmouri, a touché plusieurs secteurs de la capitale. Globalement, le nord de l'Algérie est reconnu comme une région à forte sismicité, englobant tant les zones terrestres que marines. Cette caractéristique est confirmée par les nombreux séismes enregistrés au cours de la fin du XXe siècle et du début du XXIe siècle. Par conséquent, l'aléa sismique dans cette région est qualifié d'élever en raison de magnitudes allant de modérées à fortes. Cette situation engendre un risque accru, particulièrement pour les espaces urbains fortement densifiés.

<sup>5</sup> WeatherSpark. (2026). *Météo moyenne à Alger, Algérie, tout au long de l'année*. Consulté le 22 juin 2026, à l'adresse <https://fr.weatherspark.com/y/48929/Météo-moyenne-à-Alger-Algérie-tout-au-long-de-l'année>

## I.5.1.5.1 Sismicité de la région d'étude :<sup>6</sup>

La zone géographique accueillant le projet, notamment celle dédiée à l'implantation du PV5, est classée comme zone sismique de niveau III, ce qui correspond à une sismicité très élevée. En conséquence, les infrastructures prévues dans ce cadre revêtent une importance stratégique et sont classées dans le groupe 1 des ouvrages. Dans ces conditions, le coefficient d'accélération sismique à considérer lors du dimensionnement des structures est fixé à  $A = 0,40$  g pour la phase définitive des constructions. Cependant, durant la phase provisoire, une valeur réduite de  $0,10$  g est adoptée conformément aux recommandations établies par l'EMA.

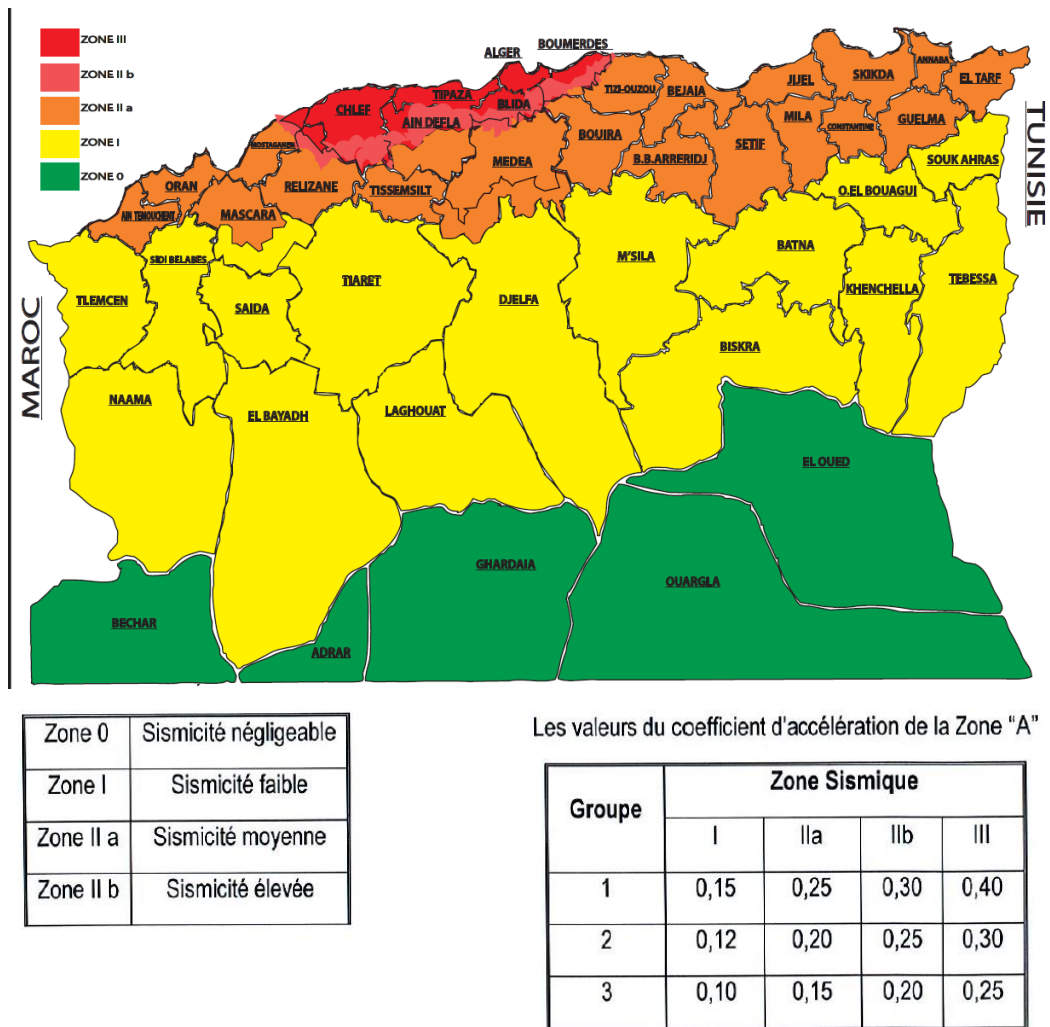


Figure II. 24 : Carte du zonage sismique du territoire national [9]

<sup>6</sup> Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (2008). *Carte de zonage sismique de l'Algérie*. In *Règles parasismiques pour les ouvrages d'art* (RPOA 2008).

### CHAPITRE III : INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE

#### III.1 Introduction :

L'étude géotechnique constitue une étape essentielle dans tout projet de construction, car elle permet de mieux connaître la nature et le comportement du sol support. Cette connaissance est indispensable pour assurer la stabilité des ouvrages et adapter les solutions de fondation aux conditions réelles du terrain.

Dans ce cadre, une campagne d'investigation a été réalisée sur le site, comprenant plusieurs essais in situ, laboratoires ainsi que des mesures piézométriques.

Le présent chapitre a pour objectif de présenter les méthodes utilisées ainsi que les principaux résultats obtenus, afin de disposer d'une base fiable pour l'analyse géotechnique du site.

#### III.2 Descriptifs de l'accompagnement d'investigation géotechnique :

Le programme d'étude géotechnique relatif au puits de ventilation 05 (PV05) vise à déterminer la nature et la stratigraphie des sols, ainsi que leurs caractéristiques physico-mécaniques et chimiques.

Il a également pour objectif de définir les paramètres géomécaniques du site, d'optimiser les solutions de structures de soutènement (blindage) et de garantir la sécurité des travaux d'excavation.

- 1. Sondages in situ :** des sondages carottés et destructifs (S21, SC44-SP30 et SC45) ont été réalisés pour permettre l'observation visuelle des différentes couches géologiques. Les sondages destructifs ont également été entrepris afin d'introduire différents appareillages nécessaires à l'analyse des sols.
- 2. Essais in situ :** des essais de pénétration dynamique au carottier standard (23 essais SPT) et des essais pressiométriques selon la méthode Ménard (45 essais au total) ont permis d'évaluer les caractéristiques de résistance et de déformabilité des sols.
- 3. Mesures hydrogéologiques :** des dispositifs numériques et manuels, tels que des piézomètres à tube ouvert et des piézomètres à corde vibrante, ont été installés pour analyser les conditions de la nappe phréatique.
- 4. Essais en laboratoire :** des analyses approfondies des propriétés physiques et mécaniques des échantillons prélevés ont été effectuées, englobant 10 essais d'identification (granulométrie, densité, limites d'Atterberg), ainsi que 5 essais de compression simple, 7 essais de résistance mécanique (cisaillement à la boîte et essais triaxiaux), 4 essais de gonflement libre et 2 analyses chimiques.

En associant ces différentes méthodes, on obtient une base technique solide pour concevoir et réaliser le puits, tout en réduisant les risques liés aux conditions géologiques et hydrologiques du terrain.

## CHAPITRE III : INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE

**Tableau III. 2 : Les différents types d'essais effectués lors des investigations géotechniques du site**

| Nature des essais                  | Sous-catégorie                                           | Liste des essais                    |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Essais mécaniques (In-situ)</b> | /                                                        | Essai pressiométrique               |
|                                    |                                                          | Essai SPT                           |
|                                    |                                                          | Essai piézométrique                 |
| <b>Essais au laboratoire</b>       | Détermination des caractéristiques mécaniques du sol     | Essai de cisaillement à la boîte UU |
|                                    |                                                          | Essai de cisaillement à la boîte CD |
|                                    |                                                          | Essai triaxiale                     |
|                                    |                                                          | Essai œdométrique                   |
|                                    | Essai d'identification physique et classification du sol | Teneur en eau                       |
|                                    |                                                          | Degrés de saturation                |
|                                    |                                                          | Analyse granulométrique             |
|                                    |                                                          | Les limites d'Atterberg             |

| Phase | APD | Campagne de prospection complémentaire | Analyses chimiques (quantités) | Gonflement libre (quantités) | Essais Triaxiaux (quantités) | Cisaillement à la boîte (quantités) | Résistance à la compression simple (quantités) | Identification (I) (quantités) | Essais pressiométriques (quantités) | Essai SPT (quantités) | Sondage   |
|-------|-----|----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------|
|       |     |                                        | -                              | -                            | 1                            | 2                                   | 2                                              | 3                              | 33                                  | 14                    | S21       |
|       |     |                                        | 1                              | 2                            | 1                            | 1                                   | 2                                              | 4                              | 7                                   | 23                    | SC44-SP30 |
|       |     |                                        | 1                              | 2                            | 1                            | 1                                   | 3                                              | 5                              | -                                   | 23                    | SC45      |

**Tableau III. 1 : Résumé des travaux de prospection et essais réalisés dans plusieurs études**

Avant la conduite des essais spécifiques, une phase de reconnaissance préliminaire du site a été réalisée dans le but d'établir le cadre général du projet.

**Localisation et topographie :** La zone d'étude correspond à l'emplacement prévu pour le puits de ventilation 05 (PV05).

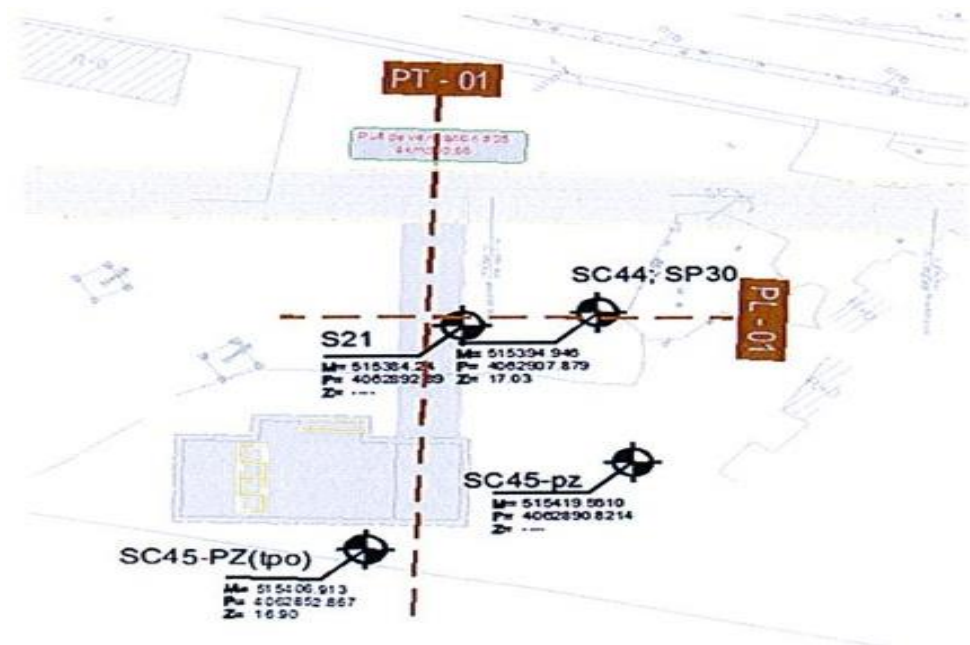


Figure III. 1 : Plan d'implantation des sondages du puits de ventilation 05

Tableau III. 3 Localisation des sondages

| Phase                   | Sondage   | Coordonnée M | Coordonnée P | Profondeur (m) |
|-------------------------|-----------|--------------|--------------|----------------|
| APD                     | S21       | 515384,24    | 4062892,89   | 35             |
| Campagne complémentaire | SC44-SP30 | 515394,95    | 4062907,88   | 34             |
|                         | SC45      | 515419,56    | 4062890,82   | 34             |

**Cadre géologique général :** Le site se situe dans un contexte géologique caractérisé par une couverture de dépôts quaternaires comprenant principalement des argiles limoneuses et des sables. Ces dépôts reposent sur des formations plus anciennes, attribuées au Pliocène supérieur et au Quaternaire ancien. Dans les environs immédiats de la zone destinée à accueillir l'ouvrage, les formations prédominantes sont constituées de marnes et d'argiles marneuses typiques de la région d'El Harrach.



| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>Travaux Publics</b><br/><b>کوسیدار</b></p> </div> <div style="text-align: right;"> <h1>RAPPORT DE FORAGE</h1> <p>Sondage : SC 44</p> </div> </div> |               |                |                                                              |               |                                                                         |        |                                                                                                                                                               |      |                        |              |          |                                                              |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|--------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------|--------------|----------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <b>Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE - AEROPORT</b><br/> <b>Endroit : PV 5</b> </div> <div style="text-align: right;"> <b>Dossier N° :</b><br/> <b>Client : COSIDER M28</b> </div> </div>                                                                                          |               |                |                                                              |               |                                                                         |        |                                                                                                                                                               |      |                        |              |          |                                                              |                       |
| Date début : 20-05-2015<br>Date fin : 25-05-2015<br>Profondeur forée (m) : 34<br>Niveau d'eau (m) : 7,50                                                                                                                                                                                                                                                       |               |                | Coordonnées GPS:<br>X : 515394.946<br>Y : 4062907.879<br>Z : |               | Boue de forage : EAU CLAIRE<br>Type forage : CAROTTE<br>Foreuse : SM 8G |        | Etat des échantillons :<br>Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/> |      |                        |              |          |                                                              |                       |
| Echelle (m)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Élévation (m) | Profondeur (m) | Récupération                                                 | SPT (N1 + N2) | RQD                                                                     | Tubage | Carottier                                                                                                                                                     | État | Profondeur Echantillon | Niveau d'eau | Symboles | DESCRIPTION                                                  | ESSAIS DE LABORATOIRE |
| 1,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | -1,50         | 1,50           | 80 %                                                         | 22            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 1,48                   |              |          | Remblai                                                      |                       |
| 3,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |                |                                                              | 18            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 2,50                   |              |          | Argile limoneuse sableuse de couleur noirâtre à marron foncé |                       |
| 4,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |                | 100 %                                                        | 40            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 3,25                   |              |          |                                                              |                       |
| 6,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | -6,00         | 6,00           |                                                              | 37            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 5,50                   |              |          |                                                              |                       |
| 7,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | -7,70         | 7,70           | 80 %                                                         | 36            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 7,00                   |              |          | Sable caillouteux jaunâtre avec présence de crêpe            |                       |
| 9,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |               |                | 100 %                                                        | 23            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 8,50                   |              |          | Marne peu sableuse                                           |                       |
| 10,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -10,50        | 10,50          | 100 %                                                        | 32            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 9,50                   |              |          | Sable jaunâtre                                               |                       |
| 12,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -12,50        | 12,50          | 100 %                                                        | 40            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 11,50                  |              |          | Marne peu sableuse de couleur grise à verdâtre               |                       |
| 13,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                | 100 %                                                        | 30            |                                                                         |        | CR                                                                                                                                                            |      | 13,00                  |              |          | Marne grisâtre plastique                                     |                       |
| 15,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -15,00        | 15,00          |                                                              | 26            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 14,50                  |              |          |                                                              |                       |
| 16,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -17,50        | 17,50          | 90 %                                                         | 56            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 16,00                  |              |          | Argile limoneuse caillouteuse                                |                       |
| 18,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                | 100 %                                                        | 27            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 17,50                  |              |          | Marne grisâtre                                               |                       |
| 19,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -19,50        | 19,50          |                                                              | 14            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 19,00                  |              |          |                                                              |                       |
| 21,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                | 90 %                                                         | 14            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 20,50                  |              |          | Marne plastique peu sableuse peu graveleuse                  |                       |
| 22,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -23,00        | 23,00          |                                                              | 9             |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 22,00                  |              |          |                                                              |                       |
| 24,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                | 85 %                                                         | 26            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 23,25                  |              |          | Sable avec trace de limons                                   |                       |
| 25,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -25,50        | 25,50          |                                                              | 33            |                                                                         |        | SPT                                                                                                                                                           |      | 25,00                  |              |          |                                                              |                       |
| Fin du forage à une profondeur de 34 m.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                              |               |                                                                         |        |                                                                                                                                                               |      |                        |              |          |                                                              |                       |

**REMARQUES :**

- \* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm
- \* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**

CF : Carottier fendu  
 TM : Tube à paroi mince  
 PS : Tube à position fixe  
 CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**

AG : Analyse granulométrique  
 S : Sédimentométrie  
 L : Limites d'Atterberg (WL, IP)  
 W : Teneur en eau  
 PV : Poids volumique (Gd, Gh)  
 AD : Analyse chimique

**COIS :**

COIS : Cisaillement rectiligne  
 TR : Cisaillement Triaxial  
 Rc : Résistance à la compression  
 OED : Essai oedométrique  
 GL : Gonflement libre  
 R : Refus à l'enfoncement

Préparé par : Mr BENDIMAM

Vérifié par :

13/07/2015

Page : 1 de 2

© SolTests 2013



|                                                                                                          |  |                                                                                                                                                                          |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Travaux Publics</b><br><b>کوسیدار</b>                                                                 |  | <b>RAPPORT DE FORAGE</b><br>Sondage : SC 44                                                                                                                              |  |
| Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE - AEROPORT<br>Endroit : PV 5                                  |  | Dossier N° :<br>Client : COSIDER M28                                                                                                                                     |  |
| Date début : 20-05-2015<br>Date fin : 25-05-2015<br>Profondeur forée (m) : 34<br>Niveau d'eau (m) : 7,50 |  | Coordonnées GPS:<br>X : 515394.946<br>Y : 4052907.879<br>Z :                                                                                                             |  |
| Boue de forage : EAU CLAIRE<br>Type forage : CAROTTE<br>Foreuse : SM 8G                                  |  | Etat des échantillons :<br>Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input checked="" type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/> |  |

| Échelle (m) | Élévation (m) | Profondeur (m) | Récupération | SPT (N1 + N2) | RQD | Tubage | Carottier | État | Profondeur Échantillon | Niveau d'eau | Symboles | DESCRIPTION                             | ESSAIS DE LABORATOIRE |
|-------------|---------------|----------------|--------------|---------------|-----|--------|-----------|------|------------------------|--------------|----------|-----------------------------------------|-----------------------|
|             | -26,15        |                | 85 %         |               |     |        |           |      |                        |              |          | Sable avec trace de limons              |                       |
| 27,0        | 26,15         |                |              | 49            |     |        | SPT       |      | 26,50                  |              |          |                                         |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 26,95                  |              |          |                                         |                       |
| 28,5        |               |                |              | 36            |     |        | SPT       |      | 28,00                  |              |          |                                         |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 28,45                  |              |          |                                         |                       |
| 30,0        |               |                | 90 %         | 35            |     |        | SPT       |      | 29,15                  |              |          | Argile limoneuse caillouteuse           |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 29,55                  |              |          |                                         |                       |
| 31,5        |               |                |              | 47            |     |        | SPT       |      | 31,00                  |              |          |                                         |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 31,45                  |              |          |                                         |                       |
| 33,0        |               |                |              | 60            |     |        | SPT       |      | 32,50                  |              |          |                                         |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 32,95                  |              |          |                                         |                       |
| 34,5        | -34,00        | 34,00          |              | 31            |     |        | SPT       |      | 34,00                  |              |          | Fin du forage à une profondeur de 34 m. |                       |
|             |               |                |              |               |     |        |           |      | 34,45                  |              |          |                                         |                       |
| 36,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 37,5        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 39,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 40,5        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 42,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 43,5        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 45,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 46,5        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 48,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 49,5        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 51,0        |               |                |              |               |     |        |           |      |                        |              |          |                                         |                       |

**REMARQUES :**

\* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm

\* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**

CF : Carottier fendu  
 TM : Tube à paroi mince  
 PS : Tube à position fixe  
 CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**

AG : Analyse granulométrique  
 S : Sédimentométrie  
 L : Limites d'Atterberg (WL, IP)  
 W : Teneur en eau  
 PV : Poids volumique (Gd, Gh)  
 AC : Analyse chimique

**13/07/2015**

Préparé par : Mr BENDIMA.M

Vérifié par :

Page : 2 de 2

|  <b>RAPPORT DE FORAGE</b><br>Sondage : SC 45                                |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |               |                                           |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|--------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE - AEROPORT<br>Endroit : PV 5                                                                                      |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |               |                                           |                       |
| Dossier N° :<br>Client : COSIDER M28                                                                                                                         |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |               |                                           |                       |
| Date début : 23-05-2015<br>Date fin : 24-05-2015<br>Profondeur forée (m) : 34<br>Niveau d'eau (m) : 5,00                                                     |               |                | Coordonnées GPS:<br>X : 515405.228<br>Y : 4062875.886<br>Z : |               | Boue de forage : EAU CLAIRE<br>Type forage : CAROTTE<br>Foreuse : SM 8G |                                                                                                                                | Etat des échantillons :<br>Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/> |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |               |                                           |                       |
| Échelle (m)                                                                                                                                                  | Élévation (m) | Profondeur (m) | Récupération                                                 | SPT (N1 + N2) | RQD                                                                     | Tubage                                                                                                                         | Carottier                                                                                                                                                     | État | Profondeur Échantillon                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Niveau d'eau | Symboles      | DESCRIPTION                               | ESSAIS DE LABORATOIRE |
| 1.5                                                                                                                                                          | -2.50         | 2.50           | 100 %                                                        | 18            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 1.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Remblai                                   |                       |
| 3.0                                                                                                                                                          | 2.50          | 5.00           | 100 %                                                        | 15            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 2.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Argile créreuse avec trace de marne       |                       |
| 4.5                                                                                                                                                          | -5.00         | 5.00           | 100 %                                                        | 24            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 4.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Marne argileuse                           |                       |
| 6.0                                                                                                                                                          | -6.00         | 6.00           | 100 %                                                        | 22            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 5.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Sable limoneux brunâtre                   |                       |
| 7.5                                                                                                                                                          | -7.70         | 7.70           | 100 %                                                        | 26            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 7.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Marne argileuse caillouteuse peu sableuse |                       |
| 9.0                                                                                                                                                          | -10.50        | 10.50          | 80 %                                                         | 54            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 8.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |               | Marne argileuse peu sableuse              |                       |
| 10.5                                                                                                                                                         | -10.50        | 10.50          | 100 %                                                        | 44            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 10.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Marne argileuse peu sableuse              |                       |
| 12.0                                                                                                                                                         | -13.50        | 13.50          | 100 %                                                        | 27            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 11.20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Marne plastique grisâtre                  |                       |
| 13.5                                                                                                                                                         | -13.50        | 13.50          | 100 %                                                        | 37            |                                                                         |                                                                                                                                | CR                                                                                                                                                            |      | 11.48                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Limons sableux peu graveleux              |                       |
| 15.0                                                                                                                                                         | -16.30        | 16.30          | 100 %                                                        | 14            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 12.30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Marne grisâtre peu sableuse               |                       |
| 16.5                                                                                                                                                         | -18.00        | 18.00          | 100 %                                                        | 34            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 13.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Marne plastique grisâtre à verdâtre       |                       |
| 18.0                                                                                                                                                         | -21.00        | 21.00          | 100 %                                                        | 28            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 13.46                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               | Limons sableux                            |                       |
| 19.5                                                                                                                                                         | -23.70        | 23.70          | 100 %                                                        | 38            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 14.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
| 21.0                                                                                                                                                         | -25.50        | 25.50          | 100 %                                                        | 42            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 16.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
| 22.5                                                                                                                                                         |               |                | 100 %                                                        | 36            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 16.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
| 24.0                                                                                                                                                         |               |                | 100 %                                                        | 37            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 17.30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
| 25.5                                                                                                                                                         |               |                | 100 %                                                        | 35            |                                                                         |                                                                                                                                | SPT                                                                                                                                                           |      | 17.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 18.66                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 19.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 20.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 20.99                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 21.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 22.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 22.46                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 23.60                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 23.80                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 24.70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 25.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
|                                                                                                                                                              |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      | 25.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |               |                                           |                       |
| Fin du forage à une profondeur de 34 m.                                                                                                                      |               |                |                                                              |               |                                                                         |                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |              |               |                                           |                       |
| <b>REMARQUES :</b><br>* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieur à 45cm<br>* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage |               |                |                                                              |               |                                                                         | <b>TYPE CAROTTIER :</b><br>CF : Carottier fendu<br>TM : Tube à paroi mince<br>PS : Tube à position fixe<br>CR : Tube carottier |                                                                                                                                                               |      | <b>ABREVIATIONS :</b><br>AG : Analyse granulométrique<br>S : Sédimentométrie<br>L : Limites d'Atterberg (WL, IP)<br>W : Teneur en eau<br>PV : Poids volumique (Gd, Gh)<br>AG : Analyse chimique<br>CIS : Cisaillement rectiligne<br>TR : Cisaillement Triaxial<br>Rc : Résistance à la compression<br>OED : Essai oedométrique<br>GL : Gonflement libre<br>R : Refus à l'enfoncement |              |               |                                           |                       |
| Préparé par : Mr BENDIMAM                                                                                                                                    |               |                |                                                              |               |                                                                         | Vérifié par :                                                                                                                  |                                                                                                                                                               |      | 13/07/2015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              | Page : 1 de 2 |                                           |                       |







Renvoi au contenu :

la section II.5.1.1 relative à la description lithologique de la plaine de la Mitidja ainsi que la Figure II.8 illustrant la carte morphogéologique du bassin de la Mitidja et ses environs.

La section II.5.1.2 concernant la géologie locale du site d'étude et des zones limitrophes.

**Conditions hydrogéologiques :** Les investigations menées au cours des relevés piézométriques réalisés dans le cadre des études préliminaires (APD) et des campagnes complémentaires (CPC) ont permis d'identifier deux horizons aquifères distincts. Le premier correspond à une poche d'eau localisée à une profondeur voisine de 5,0 mètres, tandis que le second est une nappe phréatique principale située à environ 15,5 mètres en-dessous de la surface.

Renvoi au contenu :

la section II.5.1.3 relatives au contexte hydrogéologique de la région du projet. Les éléments illustratifs correspondants sont présentés dans la Figure II.9 montrant la répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est ainsi que dans la Figure II.10 représentant le réseau hydrographique de la région d'étude.

### III.2.1.1 Étude lithologique par sondage :

L'étude lithologique a été effectuée par le biais de sondages permettant d'identifier la succession des différentes couches du sol.

La démarche consiste à forer le sous-sol afin d'extraire des échantillons ou d'analyser les terrains traversés. Au total, quatre sondages ont servi de base à cette investigation : un réalisé lors de la phase APD (Avant-Projet Définitif) et trois lors de la phase CPC (Conception Projet Construction), avec des profondeurs atteignant jusqu'à 35 mètres. Deux techniques de sondage distinctes ont été employées :

- **Sondage carotté :** Cette méthode permet de pénétrer dans le sol pour en extraire des échantillons, appelés carottes, souvent peu ou non altérés. Réalisé par rotation ou poinçonnage, ce type de sondage est essentiel pour examiner la lithologie naturelle, détecter la présence éventuelle d'eau et fournir des échantillons intacts destinés aux essais en laboratoire. - **Sondage destructif (pressiométrique) :** Ce procédé, utilisant un diamètre maximal de 64 mm, consiste à désagréger le sol lors du forage afin de préparer l'insertion de la sonde pressiométrique.

### III.2.1.2 Logs de sondages et interprétation de la lithologie :

L'analyse conjointe des logs de sondages, des observations visuelles sur carottes, ainsi que des résultats des essais in situ (SPT et pressiométriques) réalisés dans le cadre des campagnes géotechniques (APD et CPC) a permis de dresser une représentation lithologique précise au niveau du puits de ventilation 05. Cette étude révèle une stratigraphie organisée en cinq horizons principaux, caractérisés par une augmentation progressive de la compacité avec la profondeur. La géologie locale se compose principalement d'une couverture de dépôts quaternaires, incluant des argiles limoneuses et marneuses, des sables limono-argileux parfois mélangés à des cailloux, du grès et des conglomérats. Ces couches reposent sur les formations du Pliocène supérieur et du Quaternaire ancien. À une plus grande profondeur, les terrains encaissants sont dominés par les marnes et argiles marneuses propres à la formation d'El Harrach.

Les données combinées issues de cette investigation géotechnique et lithologique sont synthétisées dans un tableau récapitulatif, qui précise les caractéristiques de chacun des cinq horizons identifiés :

Tableau III. 4 : Description lithologique des différentes unités du sol en fonction de la profondeur

| Localisation (PK) | Profondeur atteinte par les sondages (m) | Horizon géotechnique                                | Symboles utilisés dans les dessins | Profondeurs moyennes (m) |
|-------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 4+331,00          | 0,0 – 35,0                               | Remblais                                            | R                                  | 0,0 – 2,5                |
|                   |                                          | Argile limoneuse                                    | QA                                 | 2,5 – 6,00               |
|                   |                                          | Sables limoneux-argileux                            | Qs                                 | 6,00 – 7,50              |
|                   |                                          | Argiles marneuses                                   | QM                                 | 7,50 – 21,50             |
|                   |                                          | Sable limoneux – argileux avec présence de cailloux | QMsg                               | 21,50 – 35,00            |

## III.2.1.3 Profil lithologique :

Le profil lithologique résume les données obtenues des sondages, offrant une représentation de la structure du sol à travers des coupes géotechniques longitudinales et transversales, situées au niveau du puits de ventilation.

Ce profil met en évidence les éléments suivants :

- Une couche superficielle composée de formations quaternaires (argiles et sables) d'une épaisseur approximative de 7,5 mètres.
- Un substratum marneux continu et prédominant, constitué par des argiles marneuses (QM) s'étendant sur plus de 14 mètres.
- Une transition vers un horizon plus complexe à partir de 21,5 mètres de profondeur, où apparaissent des blocs rocheux intégrés à la couche QMsg.



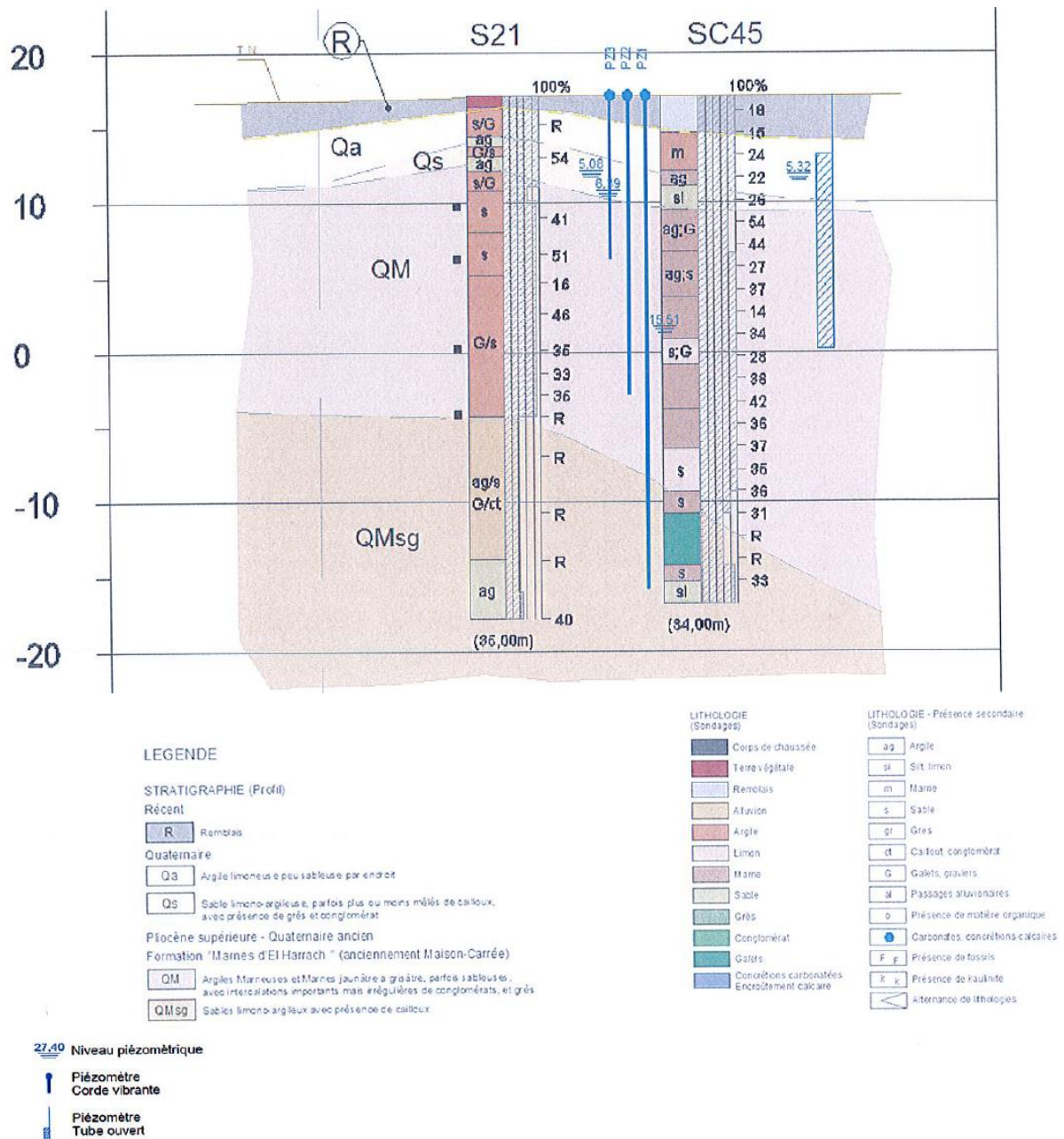


Figure III. 2 : Profil transversale du PV5





### III.2.2.1 Généralités sur les essais in situ :

60

concrètes du site, comme l'hétérogénéité des matériaux, leur degré de compacité ou encore leur teneur en eau. Un autre atout majeur est la possibilité d'explorer le sol en profondeur, ce qui aide à mieux saisir la stratigraphie du terrain.

Cependant, certains de ces essais reposent encore sur des méthodes empiriques ou indirectes. De ce fait, l'interprétation des résultats passe souvent par des corrélations, ce qui peut introduire des incertitudes dans l'estimation des paramètres géotechniques.

Dans la pratique de l'ingénierie géotechnique, les essais in situ jouent un rôle central. Ils donnent accès au comportement réel du sol dans son environnement, contrairement aux essais en laboratoire qui recréent des conditions maîtrisées mais parfois éloignées de la réalité. Réalisés directement sur place, ils offrent une vision plus juste des interactions entre le sol, son milieu et les sollicitations induites par les ouvrages.

En somme, les essais in situ restent un outil incontournable pour recueillir des données fiables, essentielles à l'analyse, au dimensionnement et à la vérification de la stabilité des projets géotechniques.

### III.2.2.2 Essai au pénétromètre dynamique :

Le pénétromètre dynamique est un appareil de reconnaissance géotechnique utilisé pour évaluer la résistance des sols en place par battage. Il est constitué d'un train de tiges surmonté d'un mouton de battage, et muni à son extrémité inférieure d'une pointe conique dont le diamètre est supérieur à celui des tiges.

Le principe de l'essai consiste à enfoncer cette pointe dans le sol sous l'effet de chocs répétés générés par la chute libre d'une masse depuis une hauteur constante. L'opérateur enregistre le nombre de coups nécessaires pour provoquer un enfoncement donné, généralement de 10 cm. Ces mesures permettent d'établir un profil de résistance du sol en fonction de la profondeur. Cet essai est particulièrement apprécié pour sa simplicité de mise en œuvre, son coût relativement faible et sa rapidité d'exécution. Il est largement utilisé dans les reconnaissances préliminaires afin d'obtenir une première estimation de la nature et de la compacité des terrains.

#### III.2.2.2.1 Principe de l'essai :

L'essai au pénétromètre dynamique consiste à enfoncer progressivement un dispositif dans le sol par battage. La pointe conique, fixée à l'extrémité des tiges, pénètre dans le terrain sous l'effet des chocs appliqués en tête du dispositif.

À chaque intervalle de profondeur fixé (souvent 10 cm), le nombre de coups nécessaires est relevé. Ces données permettent de tracer un diagramme représentant la variation de la résistance du sol avec la profondeur.

Deux types de pénétromètres dynamiques sont généralement distingués :

- **Les pénétromètres dynamiques de type A (PDA)** : ils sont équipés d'un système d'injection de boue bentonitique dans l'espace annulaire entre les tiges et le sol. Cette injection limite les frottements latéraux parasites et permet une meilleure transmission de l'énergie de battage à la pointe, améliorant ainsi la fiabilité des résultats.
- **Les pénétromètres dynamiques de type B (PDB)** : ils ne disposent pas de ce système d'injection. Par conséquent, les frottements latéraux peuvent perturber les mesures, notamment dans les sols cohérents ou instables, ce qui peut réduire la précision des résultats et limiter la profondeur d'investigation.

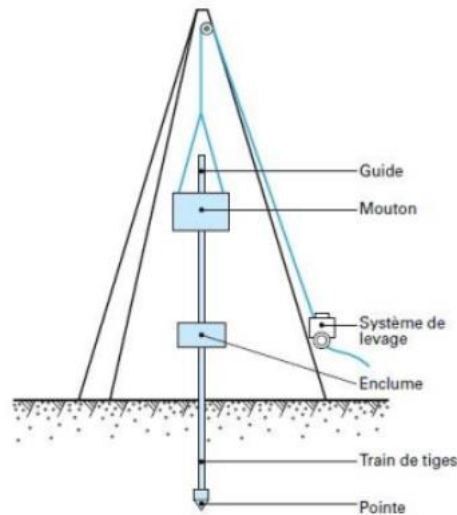


Figure III. 4 : Schéma de principe d'un pénétromètre dynamique

## III.2.2.2.2 Présentation des résultats :

Les valeurs de  $N_{spt}$  ont été corrigées afin de compenser les pertes d'énergie au cours de l'essai, conformément aux recommandations de la norme française NF EN ISO 22476-3. Selon cette norme, trois corrections doivent être prises en compte :

- La correction liée aux pertes d'énergie transmises aux tiges de battage, dues au frottement et à d'autres phénomènes parasites – ( $CE$ )
- La correction liée aux pertes d'énergie en fonction de la longueur des tiges – ( $\lambda$ )
- La correction liée à l'effet de la contrainte verticale due au poids des terres (dans les sables) – ( $CN$ )

La correction ( $CE$ ) est déterminée à partir de la relation suivante :

$$CE = Er / 60$$

Où  $Er$  représente le rapport d'énergie de l'appareillage utilisé lors de l'essai. Une valeur de  $Er = 55 \%$  a été adoptée.

La correction liée à la longueur des tiges ( $\lambda$ ) est appliquée uniquement jusqu'à 10 m de profondeur. Au-delà, elle n'est pas prise en compte ( $\lambda = 1$ ). Les valeurs correspondantes sont les suivantes :

Tableau III. 5 : Facteurs de correction dans les sables en fonction de la longueur des tiges

| Longueur des tiges sous l'enclume (m) | Facteur de correction ( $\lambda$ ) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| >10                                   | 1                                   |
| 6 à 10                                | 0,95                                |
| 4 à 6                                 | 0,85                                |
| 3 à 4                                 | 0,75                                |

Le facteur de correction à utiliser pour tenir en compte l'effet de la contrainte due au poids des terres dans les sables ( $CN$ ) peut être obtenu selon l'équation :  $CN = \sqrt[2]{98/\sigma'v}$  où  $\sigma'v$  (kPa)

est la contrainte verticale effective. Selon la norme NF EN ISO 22476-3, il n'est pas recommandé d'utiliser des facteurs correctifs de CN plus grands que 1,5.

En tenant compte de ces corrections, les valeurs corrigées de  $N_{spt}$ , notées  $N_{60}$  et  $(N1)_{60}$ , sont données par :

$$N_{60} = CE \cdot \lambda \cdot N_{spt} \text{ (pour les argiles)}$$

$$(N1)_{60} = CE \cdot \lambda \cdot CN \cdot N_{spt} \text{ (pour les sables)}$$

### III.2.2.2.3 Interprétation des résultats :

Selon la classification de Terzaghi et Peck (1967) (Voir tableau III.5), la compacité du sol pour chaque unité est définie comme suit :

- Sous-unité : la présence de refus dans un sondage indique une nature lithologique composée de fragments rocheux (graviers, cailloux, galets, grès).
- Unité de remblai : les valeurs de  $N_{spt}$  varient entre 12 et 15 avec présence de refus. La formation est considérée comme moyennement dense, correspondant à des dépôts de sols sans cohésion de densité moyenne.
- Unité du quaternaire argileux QA (argile limoneuse peu sableuse) : les valeurs de  $N_{spt}$  varient entre 12 et 29 coups, avec une tendance moyenne entre 17 et 29 coups et une faible présence de refus. Cette formation est moyennement dense.
- Unité du quaternaire sableux QS (sables limoneux-argileux) : les valeurs de  $N_{spt}$  varient entre 19 et 37 coups, sans refus. Cette formation est classée comme moyennement dense à dense.
- Unité de marne et argile marneuse QM : les valeurs de  $N_{spt}$  varient entre 8 et 47 coups, avec une tendance moyenne de 30 à 51 coups et sans refus. Cette formation est considérée comme dense à très dense, ce qui confirme la compacité de la marne.
- Unité de sable limoneux – argileux avec présence de cailloux (QMsg) : les valeurs de  $N_{spt}$  varient entre 13 et 40 coups, avec une tendance moyenne de 13 à 24 coups et une forte présence de refus. Cette formation est moyennement dense.

**Tableau III. 6 : Classification de Terzaghi et Peck (1967)**

| États du sol      | Nombre de coups (N) |
|-------------------|---------------------|
| Très lâche        | < 4                 |
| Lâche             | 4 à 10              |
| Moyennement dense | 10 à 30             |
| Dense             | 30 à 50             |
| Très dense        | > 50                |

### III.2.2.3 Essai pressiométrique Ménard :

L'essai pressiométrique Ménard est un essai in situ largement utilisé en géotechnique pour caractériser le comportement mécanique des sols en place. Il consiste à dilater radialement une sonde cylindrique introduite dans un forage préalable, et à mesurer la relation entre la pression appliquée et la déformation correspondante du sol.

Cet essai permet d'obtenir une courbe pression–déformation représentant la variation du volume de la sonde en fonction de la pression exercée. Cette relation est essentielle pour

définir le comportement du sol sous chargement, notamment dans l'hypothèse d'une déformation plane.

Les résultats de l'essai pressiométrique sont particulièrement utilisés pour le dimensionnement des fondations, aussi bien superficielles que profondes, ainsi que pour l'estimation des tassements.

Trois paramètres géotechniques fondamentaux peuvent être déduits de cet essai :

- Le module pressiométrique  $E_m$ , qui caractérise le comportement pseudo-élastique du sol.
- La pression limite  $P_l$ , correspondant à la résistance à la rupture du sol.
- La pression de fluage  $P_f$ , qui marque la transition entre le domaine pseudo-élastique et le domaine plastique.

### III.2.2.3.1 Principe de l'essai pressiométrique :

L'essai pressiométrique repose sur l'expansion contrôlée d'une sonde cylindrique dans le sol, à l'aide d'un dispositif permettant d'injecter un fluide sous pression. La sonde est placée dans un forage, puis soumise à des incréments de pression successifs, tout en mesurant les variations de volume correspondantes.

Le pressiomètre se compose de trois éléments principaux :

- ✓ **Un contrôleur pression-volume (CPV) :**  
placé en surface, il permet de réguler la pression appliquée et de mesurer les volumes injectés. Il est équipé d'un réservoir de gaz sous pression (air ou azote), d'un manomètre pour la mesure de la pression, et d'un volumètre pour la mesure des variations de volume.
- ✓ **Une sonde pressiométrique :**  
introduite dans le forage, elle est constituée de trois cellules indépendantes : une cellule centrale de mesure remplie d'eau, et deux cellules de garde remplies de gaz. Les cellules de garde assurent une déformation uniforme de la sonde, garantissant une expansion essentiellement radiale.
- ✓ **Des tubulures de liaison :**  
elles assurent la connexion entre le contrôleur et la sonde, permettant le transfert du gaz et du liquide nécessaires à la mise en pression.

Au cours de l'essai, la pression est augmentée progressivement, et les variations de volume de la cellule centrale sont enregistrées. Les données obtenues permettent de tracer la courbe pressiométrique, à partir de laquelle sont déterminés les paramètres caractéristiques du sol.



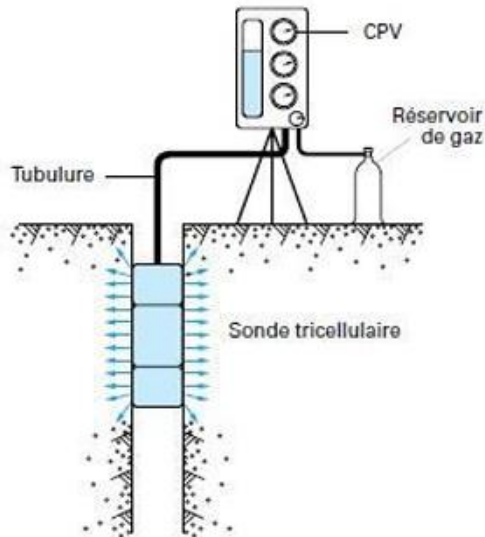


Figure III. 6 : Principe du pressiomètre

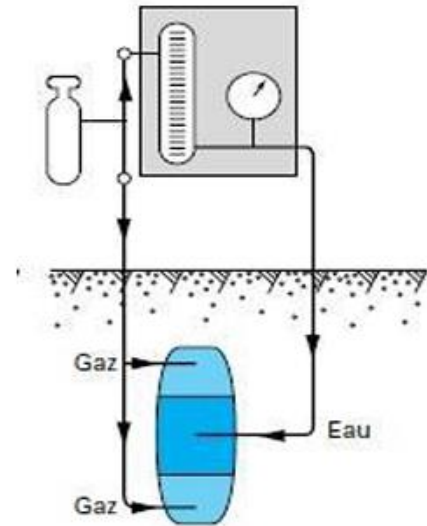


Figure III. 5 : schéma de sonde pressiométrique

### III.2.2.3.2 Présentation des résultats :

Les graphiques montrés dans l'annexe B (Figure 5 jusqu'à 8) présente le résumé des résultats des essais Pressiométriques développés par le sondage S21 SP30 et leur correspondance avec l'unité géotechnique.

### III.2.2.3.3 Interprétation des résultats :

L'analyse des courbes issues des sondages pressiométriques SP21 et SP30 (présentées en annexe B, figures 5 à 8) met en évidence la présence de quatre unités géotechniques distinctes. Leur caractérisation repose sur les classifications DTU 13.12 et Ménard, en tenant compte des paramètres pressiométriques  $P_l$  et du rapport  $E_m/P_l$ .

#### ➤ Unité QA (de 2,5 m à 6 m de profondeur)

Dans cet intervalle, les valeurs de la pression limite  $P_l$  varient entre 0,29 et 1,59 MPa. Selon la classification du DTU 13.12, cette couche correspond à une argile molle à ferme.

Le rapport  $E_m/P_l$  est égal à 43, ce qui indique, d'après la classification de Ménard, un sol surconsolidé.

Cela signifie que cette formation a subi dans le passé des contraintes supérieures à celles actuellement exercées (érosion, excavation ou variation du niveau de la nappe). Ainsi, sous l'effet d'une surcharge :

- Si la surcharge reste inférieure à la contrainte historique, le tassement sera faible,
- Si elle la dépasse, le tassement comprendra une phase faible suivie d'un tassement plus important.

#### ➤ Unité QS (de 6 m à 7,5 m de profondeur)

Les résultats montrent une augmentation progressive de la pression limite et du module pressiométrique avec la profondeur. Les valeurs de  $P_l$  sont comprises entre 0,55 et 1,59 MPa. Selon le DTU 13.12, il s'agit d'un sable moyennement compact. Le rapport  $E_m/P_l$ , compris entre 15 et 20, traduit également un état surconsolidé selon Ménard.



Comme pour l'unité précédente, cette couche a été soumise à des contraintes antérieures plus élevées. Le comportement vis-à-vis d'une surcharge reste donc similaire :

- Tassement limité si la surcharge est inférieure à la contrainte passée,
- Tassement progressif plus marqué dans le cas contraire.

### ➤ Unité QM (de 7,5 m à 21,5 m de profondeur)

Dans cette zone, les valeurs de  $P_l$  varient entre 0,921 et 5,21 MPa, avec une prédominance de valeurs supérieures à 2,5 MPa.

D'après le DTU 13.12, cette unité correspond à une marne compacte. Le rapport  $E_m/P_l$ , compris entre 11 et 13, indique un sol normalement consolidé selon la classification de Ménard.

Cette formation présente une homogénéité lithologique et n'a subi qu'une consolidation liée à son poids propre actuel. Son comportement est donc plus prévisible, avec des tassements généralement modérés et réguliers sous chargement.

### ➤ Unité QMsg (de 21,5 m à 35 m de profondeur)

Les valeurs de la pression limite  $P_l$  sont comprises entre 2,80 et 5,22 MPa, traduisant une résistance élevée du sol.

Selon le DTU 13.12, il s'agit d'un sable compact. Le rapport  $E_m/P_l$ , variant de 12 à 28, indique un sol surconsolidé d'après Ménard.

Cette couche profonde se caractérise par une bonne capacité portante et une faible compressibilité, ce qui en fait un horizon favorable pour l'ancrage des fondations, notamment profondes.

### III.2.2.4 Essai piézométrique :

L'essai piézométrique a pour objectif de mesurer la pression interstitielle de l'eau dans le sol, ainsi que de déterminer le niveau de la nappe phréatique. Ces informations sont essentielles pour l'analyse du comportement hydraulique des sols et pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques, notamment en présence d'eau.

Dans le cadre du présent projet, deux types de piézomètres ont été utilisés : le piézomètre à tube ouvert et le piézomètre à corde vibrante.

Initialement, lors de la première version des hypothèses géotechniques (décembre 2015), une poche d'eau a été supposée à une profondeur de 5,0 m, sur la base des données de l'APD. Par la suite, une campagne de reconnaissance complémentaire a permis d'affiner ces hypothèses grâce à l'installation de dispositifs piézométriques au niveau du point PV5. Un piézomètre à tube ouvert (SC45TPO) et un piézomètre à corde vibrante (SC45\_PZ), voir le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 7 : Localisation des différents piézomètres selon les sondages effectués**

| Phase                                         | N°          | Type           | Coordonnée M | Coordonnée P  | Coordonnée Z | Prof. Installation | Unité    |
|-----------------------------------------------|-------------|----------------|--------------|---------------|--------------|--------------------|----------|
| <b>Campagne de Prospection complémentaire</b> | SC45-PZ TPO | Tube Ouvert    | 515.406.913  | 4.062.852.867 | 16.900       | (4-17) percée      | QA/QS/QM |
|                                               | SC45PZ 1    | Corde Vibrante | 515418.012   | 4062863.839   | 16.907       | 33                 | QMsg     |
|                                               | SC45PZ 2    | Corde Vibrante | 515419.154   | 4062862.660   | 16.903       | 20                 | QM       |
|                                               | SC45PZ 3    | Corde Vibrante | 515420.215   | 4062861.590   | 17.004       | 11                 | QM       |

Au total, quatre forages d'investigation ont été réalisés, dont trois sont équipés par un piézomètre à corde vibrante (SC45 PZ) et un équipé par un piézomètre à tube ouvert (SC45\_PZ (Tpo)). Les résultats obtenus ont permis de mieux caractériser le régime hydraulique du site.

Les premiers seront placés à la fin du forage lors du retrait du tubage provisoire. Il est prévu l'installation de trois capteurs de pression dans chaque sondage piézométrique. Le capteur de pression est constitué d'un diaphragme élastique auquel est accrochée sous vide une corde tendu en acier. Le diaphragme se déforme sous l'effet de la pression de l'eau modifiant ainsi la tension de la corde. La fréquence de vibration de la corde, excite par un électroaimant, est liée à la pression hydraulique. Tandis que le deuxième (Le piézomètre à tube ouvert) permet la détermination du niveau d'eau dans un tube ouvert placé dans un horizon dont la perméabilité globale estimée est supérieure à  $1 \times 10^{-7}$  m/s et mis à la pression atmosphérique.

### III.2.2.4.1 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai piézométrique repose sur la mesure de la pression de l'eau dans les pores du sol, à l'aide de dispositifs installés dans des forages.

- **Le piézomètre à tube ouvert :**

Il consiste en un tube installé dans le sol, muni à sa base d'un filtre (crépine) permettant l'entrée de l'eau. Ce dispositif est utilisé dans les formations perméables, dont la perméabilité est généralement supérieure à  $1 \times 10^{-7}$  m/s.

Le niveau de l'eau mesuré dans le tube correspond directement à la charge hydraulique de la formation traversée. Ce type de piézomètre est simple à mettre en œuvre et permet une mesure directe du niveau piézométrique.

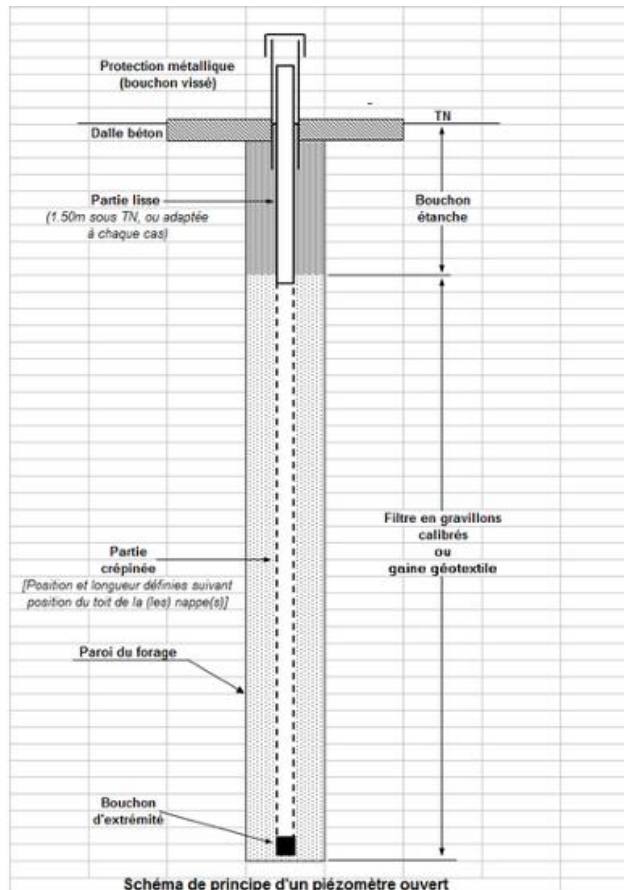


Figure III. 7 : Schéma du principe du piézomètre à tube ouvert

- **Le piézomètre à corde vibrante :**

Il est constitué d'un capteur de pression comprenant un diaphragme déformable auquel est reliée une corde métallique tendue. Sous l'effet de la pression de l'eau interstitielle, le diaphragme se déforme, ce qui modifie la tension de la corde. Cette variation de tension entraîne un changement de la fréquence de vibration de la corde, mesurée à l'aide d'un dispositif électromagnétique. La fréquence enregistrée est directement liée à la pression hydraulique.

Dans le cadre du projet, les piézomètres à corde vibrante ont été installés à la fin du forage, lors du retrait du tubage provisoire, avec trois capteurs de pression par sondage afin de mesurer les variations de pression à différentes profondeurs.

Ainsi, ces dispositifs permettent de suivre l'évolution du niveau piézométrique et des pressions interstitielles, fournissant des données indispensables pour l'analyse hydrogéologique et la conception des ouvrages.

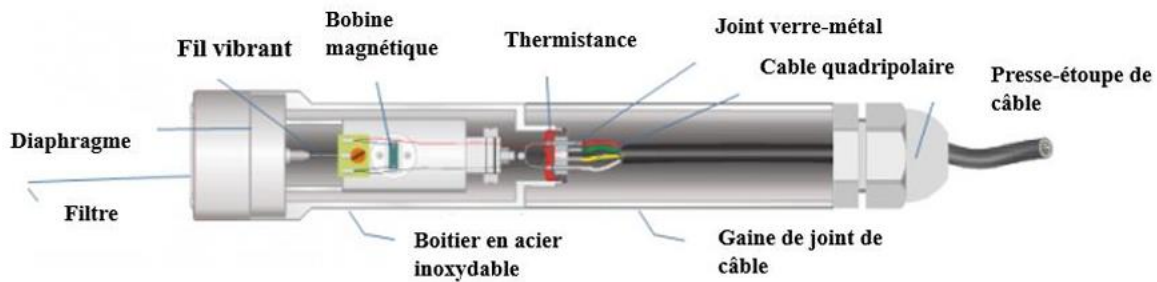


Figure III. 8 : Schéma du principe du piézomètre à corde vibrante

### III.2.2.4.2 Présentation des résultats :

Les résultats et mesures obtenues par le piézomètre à tube ouvert sont présentés dans le Tableau 08 et celles obtenues par le piézomètre à corde vibrante ainsi que les profondeurs piézométriques.

### III.2.2.4.3 Interprétation des résultats :

L'analyse des mesures enregistrées par les piézomètres à corde vibrante et à tube ouvert, installés au niveau du puits de ventilation PV05, met en évidence la présence de deux niveaux piézométriques distincts.

Les résultats indiquent, d'une part, l'existence d'une poche d'eau localisée à environ 5 m de profondeur, confirmant les hypothèses initiales issues de l'APD. D'autre part, ils révèlent la présence d'une nappe phréatique principale située à une profondeur d'environ 15,5 m. Cette configuration traduit un régime hydrogéologique caractérisé par une circulation d'eau à deux niveaux : une accumulation superficielle temporaire ou localisée, et une nappe plus profonde, continue et structurée. Ces informations sont essentielles pour l'analyse des conditions d'écoulement, ainsi que pour le dimensionnement et la stabilité des ouvrages en interaction avec le sol.

## III.3 Essais de laboratoires

### III.3.1 Essais physiques

#### III.3.1.1 Description des essais :

Les essais physiques réalisés dans le cadre de cette étude géotechnique du Puits de Ventilation 05 comprennent cinq catégories d'essais, menés par deux laboratoires :

INGEO International (campagne APD, 2013) et le Laboratoire LHCC / Oued Smar (campagne complémentaire, 2015) :

- a) Teneur en eau naturelle (W), NF P 94-050 Mesure par étuvage à 110°C. Elle caractérise l'état hydrique in situ de l'échantillon au moment du prélèvement.
- b) Masse volumique humide et sèche ( $\gamma_h$ ,  $\gamma_d$ ), NF P 94-053 Détermination par immersion dans l'eau (méthode à la paraffine), qui permet de calculer le degré de saturation  $S_r$  et l'indice des vides  $e_o$ .

- c) Limites d'Atterberg (WL, Wp, Ip) — NF P 94-051 Limite de liquidité par la coupelle de Casagrande et limite de plasticité par roulage. Permettent la classification des sols fins (classification LPC).
- d) Analyse granulométrique — NFP 94-056 / NFP 94-057 Tamisage (fraction grossière) combiné à la sédimentométrie (fraction fine < 80 µm). Fournit la courbe granulométrique complète.
- e) Essai au Bleu de Méthylène (VBS) — NF EN 933-9 / NF P 94-068 Mesure de l'activité argileuse et de la capacité d'adsorption des argiles. Permet d'évaluer le potentiel de gonflement.

## III.3.1.2 Présentation des résultats :

Tableau III. 8 : Résultats des teneurs en eau et masses volumiques (Sondage S21, Campagne APD)

| Sondage | Profondeur (m) | Unité | W (%) | Ws (%) | $\gamma_h$ (T/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> ) | Sr (%) |
|---------|----------------|-------|-------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| S21     | 7,20 – 7,70    | QM    | 21    | 21     | 2,079                          | 1,714                          | 100    |
| S21     | 10,60 – 11,00  | QM    | 22    | 20     | 2,088                          | 1,717                          | 100    |
| S21     | 21,20 – 21,50  | QMsc  | 13    | 14     | 2,208                          | 1,949                          | 98     |

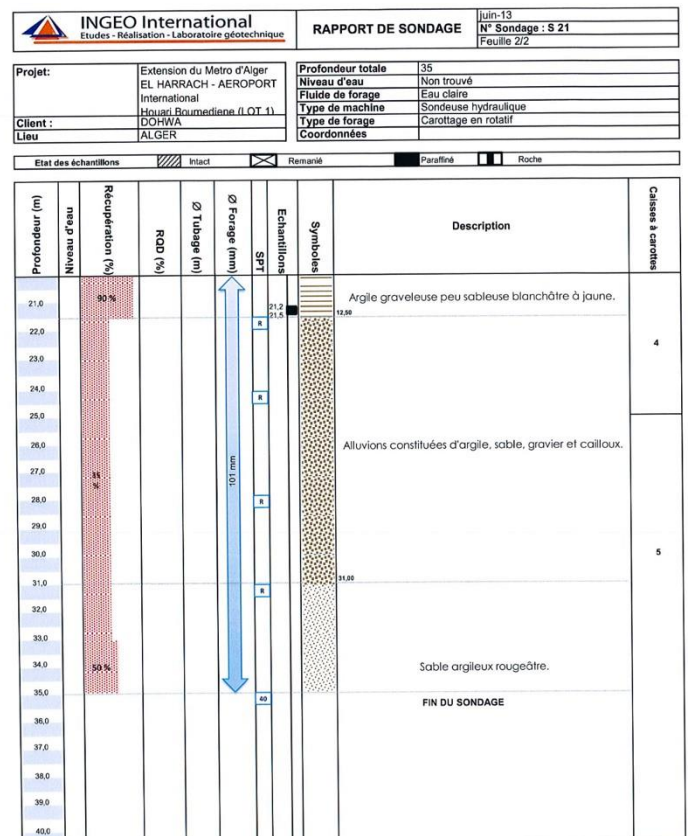
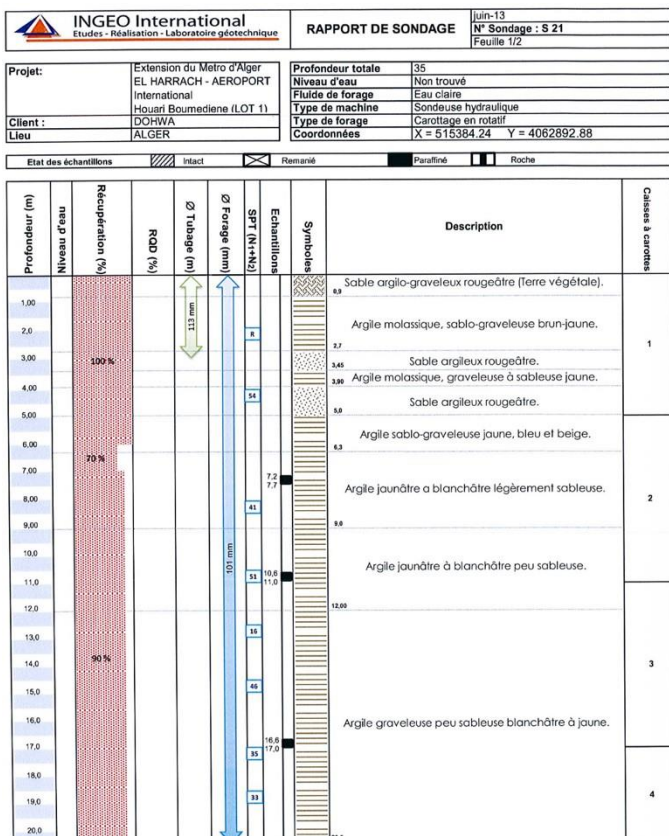


Figure III. 9 : Log de sondage S21 (0-35 m)





Figure III. 10 : Photos des caisses à carottes S21 (caisse 1/5 - 5/5) état visuel des sols Tableau

Tableau III. 9 : Résultats des Limites d'Atterberg (Sondage S21, Campagne APD)

| Sondage | Profondeur (m) | Unité       | WL (%) | Wp (%) | Ip (%) | Classification   |
|---------|----------------|-------------|--------|--------|--------|------------------|
| S21     | 7,20 – 7,70    | QM (Argile) | 64     | 29     | 35     | Argile plastique |
| S21     | 10,60 – 11,00  | QM (Argile) | 55     | 23     | 32     | Argile plastique |
| S21     | 21,20 – 21,50  | QMsc        | 37     | 21     | 16     | Limon argileux   |



## CHAPITRE III : INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE

**Tableau III. 10 : Résultats de granulométrie (Sondages S21, SC44, SC45, 2013 & 2015)**

| Sondage | Profondeur (m) | < 80 $\mu$ m (%) | WL (%) | Wp (%) | Ip (%) | Classification      |
|---------|----------------|------------------|--------|--------|--------|---------------------|
| S21     | 7,20/7,70      | 85,45 %          | %      | %      | 0      | Sable fin           |
| S21     | 10,60/11,00    | 98,55 %          | %      | %      | 0      | Sable très fin      |
| SC44    | 29,15/29,45    | 37,16 %          | 35 %   | 17 %   | 18 %   | Sable argileux (SA) |
| SC45    | 23,80/24,10    | 99,75 %          | 55 %   | 27 %   | 28 %   | Argile (At)         |

**Tableau III. 11 : Résultats de l'essai au Bleu de Méthylène (Sondage SC45)**

| Sondage | Profondeur (m) | C-Fraction 0/5 (%) | VBS <sub>0/5</sub> | VBS  |
|---------|----------------|--------------------|--------------------|------|
| SC45    | 3,50 – 4,05    | 89,51              | 2                  | 1,78 |
| SC45    | 11,20 – 11,47  | 100                | 2,50               | 2,50 |
| SC45    | 14,15 – 14,30  | 100                | 2,60               | 2,60 |
| SC45    | 20,50 – 20,80  | 99,95              | 3,10               | 3,06 |
| SC45    | 23,80 – 24,10  | 100                | 2,70               | 2,70 |

## III.3.1.3 Interprétation des résultats :

**Tableau III. 12 : Tableau de synthèse des essais d'identification et des caractéristiques géotechniques des sols (Phases APD et Prospection)**

| Phase                            | Sondage | Profondeur - Début | Profondeur - Fin | UNITÉ            | A. Granulométrie - < 5 mm | A. Granulométrie - < 2 mm | A. Granulométrie - < 0,08 | A. Granulométrie - < 20 µm | A. Granulométrie - < 2 µm | Limites d'Atterberg - WL (%) | Limites d'Atterberg - WP (%) | Limites d'Atterberg - IP (%) | Limites d'Atterberg - LR (%) | VBS  | γ <sub>s</sub> (KN/m <sup>3</sup> ) | γ <sub>h</sub> (KN/m <sup>3</sup> ) | γ <sub>d</sub> (KN/m <sup>3</sup> ) | w (%) | Sr (%) | Classification - USCS | Classification - NF11-300 |
|----------------------------------|---------|--------------------|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------------------|
| APD                              | S21     | 7,2                | 7,7              | QM               | 97                        | 94                        | 60                        | ...                        | ...                       | 64                           | 29                           | 35                           | ...                          | ...  | ...                                 | 20,79                               | 17,14                               | 21    | 100    | CH                    | A3                        |
| APD                              | S21     | 10,6               | 11               | QM               | 100                       | 99                        | 68                        | ...                        | ...                       | 55                           | 23                           | 32                           | ...                          | ...  | ...                                 | 20,88                               | 17,17                               | 22    | 100    | CH                    | A3                        |
| APD                              | S21     | 21,2               | 21,5             | QM <sub>sg</sub> | 88                        | 74                        | 33                        | ...                        | ...                       | 37                           | 21                           | 16                           | ...                          | ...  | ...                                 | 22,08                               | 19,49                               | 13    | 98     | SC                    | B6                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 3,5                | 4                | QA               | 90                        | 86                        | 70                        | 58                         | 26                        | 42                           | 21                           | 21                           | 16                           | 1,78 | 25,9                                | 21,2                                | 18,9                                | 12    | 76     | CL                    | A2                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 11,2               | 11,47            | QM               | 100                       | 100                       | 99                        | 86                         | 45                        | 57                           | 28                           | 29                           | 19                           | 2,5  | 26,2                                | 20,7                                | 18,2                                | 14    | 77     | CH                    | A3                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 14,15              | 14,3             | QM               | 100                       | 100                       | 100                       | 83                         | 44                        | 56                           | 28                           | 28                           | 18                           | 2,6  | 25,4                                | 19,8                                | 18,7                                | 6     | 34     | CH                    | A3                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 20,5               | 20,8             | QM               | 100                       | 100                       | 91                        | 76                         | 35                        | 50                           | 25                           | 25                           | 18                           | 3,06 | 25,6                                | 21,2                                | 18,7                                | 14    | 83     | CH                    | A2                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 23,8               | 24,1             | QM               | 100                       | 100                       | 100                       | 86                         | 42                        | 55                           | 27                           | 28                           | 19                           | 2,7  | 25,6                                | 21,7                                | 19,6                                | 11    | 77     | CH                    | A2                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 3,75               | 4,05             | QA               | 99                        | 97                        | 68                        | 52                         | 22                        | 42                           | 20                           | 22                           | 17                           | 4    | 26,4                                | 21,6                                | 18,9                                | 17    | 89     | CL                    | A2                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 9                  | 9,5              | QM               | 100                       | 100                       | 100                       | 86                         | 50                        | 56                           | 28                           | 28                           | 18                           | 2,4  | 26,3                                | 20,1                                | 18,8                                | 7     | 42     | CH                    | A3                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 14,5               | 15               | QM               | 99                        | 99                        | 91                        | 76                         | 35                        | 50                           | 25                           | 25                           | 18                           | 1,78 | 26,6                                | 19,3                                | 18,3                                | 5     | 29     | CH                    | A2                        |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 29,15              | 29,45            | QM <sub>sg</sub> | 86                        | 76                        | 37                        | 29                         | 12                        | 35                           | 17                           | 18                           | 19                           | 1,27 | 26,5                                | 22                                  | 19,6                                | 12    | 87     | SC                    | A2                        |

**Teneur en eau et état des sols :** Les teneurs en eau naturelles des argiles marneuses QM ( $W \approx 21-22\%$ ) sont très proches de la limite de plasticité ( $W_p \approx 21-29\%$ ), avec un degré de saturation  $S_r = 100\%$ , ce qui confirme que ces sols sont saturés et proches de l'état plastique. Les sols de l'unité QM<sub>sg</sub> sont plus denses ( $\gamma_d \approx 1,95 \text{ T/m}^3$ ) et moins saturés ( $S_r \approx 98\%$ ).

**Plasticité et classification :** Les argiles de l'unité QM (couche 7–21 m) présentent une **plasticité élevée** ( $WL = 55-64\%$ ,  $Ip = 32-35\%$ ), les classant comme argiles grasses ou très plastiques. Cette forte plasticité est cohérente avec la nature marneuse et gonflante de la formation d'El Harrach. À plus grande profondeur (QM<sub>sg</sub>), la plasticité diminue ( $Ip = 16-18\%$ ) vers un comportement de limon argileux.

**Granulométrie :** Les courbes granulométriques montrent deux comportements distincts : les niveaux QM et QM<sub>sg</sub> sont dominés par la fraction fine ( $> 85-99\%$  de fines), confirmant leur caractère argileux. Le niveau SC44 (29 m) présente une granulométrie plus ouverte avec seulement 37 % de fines, correspondant à l'unité sablo-graveleuse QM<sub>sg</sub>.

**Activité argileuse (Bleu de Méthylène) :** Les valeurs de VBS entre 1,78 et 3,10 pour les sols du sondage SC45 indiquent une activité argileuse modérée à élevée. Ces valeurs, combinées aux limites d'Atterberg élevées et aux résultats d'essais minéralogiques, confirment la présence de minéraux argileux gonflants (smectites probables) dans la formation QM, justifiant la pression de gonflement de 50 kPa retenue dans le paramétrage.

## III.3.2 Essais mécaniques

### III.3.2.1 Description des essais

Cinq types d'essais mécaniques ont été réalisés sur les échantillons prélevés dans les sondages S21, SC44, SC45 et SP30, par le laboratoire INGENIO International (campagne APD, 2013) et COSIDER TP (campagne complémentaire, 2015) :

**a) Résistance à la Compression Simple (RC) — NF P 94-077** Essai sur éprouvettes cylindriques ( $\varnothing$  5 cm  $\times$  H 10 cm), à vitesse de déformation imposée de 1 mm/min. Fournit la résistance non-drainée  $su = RC/2$  et la déformation à la rupture. La courbe contrainte-déformation est tracée et la forme de rupture est photographiée.

**b) Essai de Cisaillement Rectiligne à la Boîte — NF P 94-70-1** Essai UU (non-consolidé, non-drainé) réalisé à trois paliers de contrainte normale (1, 2 et 4 bars) à la vitesse de 1,5 mm/min. Fournit la courbe contrainte/déformation par palier, puis la courbe intrinsèque (enveloppe de Mohr-Coulomb) d'où sont tirés la cohésion  $C_u$  et l'angle de frottement  $\phi_u$ .

**c) Compressibilité à l'Œdomètre — XP P 94-090-1** Essai de consolidation par paliers de chargement. Trace la courbe  $e_0 = f(\log \sigma'_v)$  permettant d'extraire la pression de préconsolidation  $P_c$ , l'indice de compression  $C_c$  et l'indice de gonflement  $C_g$ . Permet de caractériser l'état de surconsolidation (OCR).

**d) Essais Triaxiaux CU+U — (référéncé dans tableaux du rapport)** Essais de cisaillement triaxial consolidé-non-drainé (CU) et non-consolidé-non-drainé (UU) réalisés sur les sondages SC44 et SC45 (campagne complémentaire), fournissant les paramètres effectifs  $c'$  et  $\phi'$  en condition drainée.

### III.3.2.2 Présentation des résultats :

Résistance à la Compression Simple (RC), Sondage S21

| Sondage | Profondeur (m) | Unité       | RC. S (bars) | Déformation à rupture (%) |
|---------|----------------|-------------|--------------|---------------------------|
| S21     | 7,2 – 7,7      | QM (Argile) | 5,01         | 3,66                      |
| S21     | 10,6 – 11,0    | QM (Argile) | 1,79         | 7,00                      |

Essai de Cisaillement à la Boîte UU, Sondage S21

| Sondage | Profondeur (m) | Unité | $C_u$ (kPa) | $\phi_u$ (°) |
|---------|----------------|-------|-------------|--------------|
| S21     | 7,20 – 7,70    | QM    | 140 kPa     | 19°          |
| S21     | 10,60 – 11,00  | QM    | 97 kPa      | 21°          |

## Compressibilité à l'Édomètre, Sondage S21

| Sondage | Profondeur (m) | Unité | Pc (bars) | Cc (%) |
|---------|----------------|-------|-----------|--------|
| S21     | 10,6 – 11,0    | QM    | 2,55      | 16,34  |

## Essais Triaxiaux, Sondages SC44 & SC45 (CPC 2015)

| Sondage | Profondeur (m) | Unité | Cu (kPa) | $\phi_u$ (°) | C'(kPa) | $\phi'$ (°) |
|---------|----------------|-------|----------|--------------|---------|-------------|
| SC45    | 11,2 – 11,47   | QM    | 446      | —            | —       | —           |
| SC45    | 23,8 – 24,1    | QM    | 409      | —            | 49      | 18          |
| SC44    | 9,0 – 9,5      | QM    | —        | —            | 58      | 15          |
| SC44    | 29,15 – 29,45  | QMsc  | 439      | —            | —       | —           |

### III.3.2.3 Interprétation des résultats :

**Tableau III. 13 : Tableau de synthèse des essais d'identification et des caractéristiques géotechniques des sols (Phases APD et Prospection)**

| Phase                            | Sondage | Profondeur - Début | Profondeur - Fin | UNITE            | RC - $\sigma_c$ (kPa) | Cisaillement à la boîte (UU) - Cu (kPa) | Cisaillement à la boîte (UU) - $\phi_u$ (°) | Cisaillement à la boîte (CD) - C' (kPa) | Cisaillement à la boîte (CD) - $\phi'$ (°) | Essais Triaxiaux - CU+U |
|----------------------------------|---------|--------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| APD                              | S21     | 7,2                | 7,7              | QM               | 501                   | 149                                     | 19                                          | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| APD                              | S21     | 10,6               | 11               | QM               | 179                   | 97                                      | 21                                          | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| APD                              | S21     | 21,2               | 21,5             | QM <sub>sg</sub> | ...                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 3,5                | 4                | QA               | ...                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 11,2               | 11,47            | QM               | 446                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 14,15              | 14,3             | QM               | ...                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | Imp.                    |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 20,5               | 20,8             | QM               | ...                   | ...                                     | ...                                         | 49                                      | 18                                         | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 23,8               | 24,1             | QM               | 409                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 3,75               | 4,05             | QA               | ...                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 9                  | 9,5              | QM               | ...                   | ...                                     | ...                                         | 58                                      | 15                                         | ...                     |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 14,5               | 15               | QM               | ...                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | Imp.                    |
| Campagne de Prospection en Cours | SC44    | 29,15              | 29,45            | QM <sub>sg</sub> | 439                   | ...                                     | ...                                         | ...                                     | ...                                        | ...                     |

**Résistance à la compression simple :** Les valeurs RC obtenues (1,79 à 5,01 bars) correspondent à des argiles de résistance modérée à ferme. La valeur RC = 5,01 bars à 7,7 m (QM) traduit un sol légèrement surconsolidé, cohérent avec un OCR > 1. La valeur bien plus faible de 1,79 bars à 11 m indique un sol plus mou à cette profondeur, probablement remanié lors du prélèvement.

**Cisaillement à la boîte (UU) :** Les courbes Contraintes/Déformations (p. 50 et 51) montrent un comportement peak-softening typique des argiles plastiques surconsolidées. Les enveloppes de Coulomb donnent Cu = 97–140 kPa et  $\phi_u$  = 19–21° pour la couche QM, valeurs cohérentes avec la résistance non-drainée su retenue dans le paramétrage (su = 150 kPa pour QM).

**Œdomètre** : La pression de préconsolidation  $P_c = 2,55$  bars à 10,6 m confirment un état surconsolidé pour les argiles marneuses QM. L'indice de compression  $C_c = 16,34$  % traduit une compressibilité modérée. Ces données justifient la prise en compte d'un  $OCR > 1$  dans les calculs de dimensionnement du blindage.

**Essais triaxiaux** : Les paramètres effectifs  $c' = 47\text{--}58$  kPa et  $\phi' = 15\text{--}18^\circ$  obtenus sur les argiles marneuses QM sont conformes aux valeurs retenues dans le paramétrage ( $c' = 47$  kPa,  $\phi' = 22^\circ$  pour QM). La légère surestimation de  $\phi'$  dans le paramétrage intègre une marge de sécurité.

### III.3.3 Essais chimiques

#### III.3.3.1 Description des essais :

Les analyses chimiques ont pour objectif de caractériser la composition minéralogique et chimique des sols rencontrés dans la zone du Puits de Ventilation PV5, notamment afin d'évaluer leur agressivité potentielle vis-à-vis des bétons et armatures, et de mieux comprendre leur comportement géomécanique (gonflement, résistance à long terme).

Les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans les sondages carottés SC44 et SC45, au sein de deux unités géotechniques distinctes (QMsg et QM). Les analyses portent sur la détermination des teneurs en :

- Silice ( $\text{SiO}_2$ ), constituant argileux ou sableux dominant
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), indicateur de la fraction argileuse
- Hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), oxydes de fer, indicateur de l'altération
- Chaux ( $\text{CaO}$ ), teneur en carbonates de calcium
- Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), potentiel d'agressivité chimique vis-à-vis du béton
- Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), potentiel de corrosion des armatures
- Carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ), fraction calcaire
- Insolubles, fraction minérale stable non réactive
- Perte au feu à  $1000^\circ\text{C}$ , matière organique et minéraux thermiquement instables

Les analyses ont été réalisées en laboratoire par voie humide et spectrométrie, conformément aux normes en vigueur.

#### III.3.3.2 Présentation des résultats :

Tableau III. 14 : résultats des analyses chimiques, issus de la campagne de prospection complémentaire

| Paramètre                                   | SC44 (29,15–29,45 m) QM <sub>sg</sub> | SC45 (23,80–24,10 m) QM |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Silice SiO <sub>2</sub> (%)                 | 45,80                                 | 46,06                   |
| Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)  | 11,09                                 | 10,03                   |
| Hématite Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 7,20                                  | 10,00                   |
| Chaux CaO (%)                               | 11,44                                 | 12,04                   |
| Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)  | Traces                                | 3,00                    |
| Chlorures Cl <sup>-</sup> (%)               | 0,0320                                | 0,0210                  |
| Carbonates CaCO <sub>3</sub> (%)            | 34,96                                 | 24,06                   |
| Insolubles (%)                              | 53,79                                 | 61,70                   |
| Perte au feu à 1000°C (%)                   | 17,41                                 | 15,09                   |

### III.3.3.3 Interprétation des résultats

**a) Composition minéralogique générale** Les deux échantillons présentent une matrice siliceuse dominante (~45–46% SiO<sub>2</sub>) avec une fraction argileuse notable (~10–11% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), confirmant la nature marno-argileuse des formations. La perte au feu (15–17%) et la forte fraction insoluble (54–62%) indiquent une matrice minérale stable en conditions normales.

**b) Agressivité chimique vis-à-vis du béton** L'unité QM<sub>sg</sub> est non agressive (traces de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). L'unité QM présente une teneur en sulfates de 3,00%, classant le sol en environnement chimiquement agressif selon NF EN 206, ce qui impose l'utilisation de ciments résistants aux sulfates (CRS) pour tous les ouvrages en contact avec cet horizon.

**c) Risque de corrosion des armatures** Les teneurs en chlorures sont très faibles (0,032% et 0,021%), bien en dessous du seuil critique de 0,40%. Le risque de corrosion des armatures est négligeable.

**d) Teneur en carbonates et gonflement** Les teneurs en CaCO<sub>3</sub> (25–35%), associées à une minéralogie argileuse gonflante (IP élevé dans QM), aggravent le potentiel de gonflement, confirmant la pression de 50 kPa retenue pour la dalle de fond.

## III.4 Synthèse de l'investigation géotechnique

### III.4.1 Tableau récapitulatif des caractéristiques géotechniques



## CHAPITRE III : INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE

**Tableau III. 15 : Paramètres géotechniques de calcul - sols**

| Horizon géotechnique                                   | Remblai (Re) | Argile limoneuse peu sableuse (QA) | Sables limoneux argileux (QS) | Argiles marneuses (QM) | Sable limoneux argileux avec présence de cailloux (QMsg) |
|--------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------|
| Profondeurs moyennes (m)                               | 0–2.5        | 2.5–6                              | 6–7.5                         | 7.5–21.5               | 21.5–35                                                  |
| Poids volumique humide $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 20           | 21                                 | 21                            | 21                     | 21                                                       |
| Poids volumique sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )    | 17           | 17                                 | 18                            | 18                     | 18                                                       |
| Cohésion non drainée $C_u$ (kPa)                       | 30           | 100                                | –                             | 150                    | 120                                                      |
| Module de déformabilité non-drainé $E_u$ (MPa)         | 12           | 30–40                              | –                             | 75                     | 92                                                       |
| Angle de frottement effectif $\phi'$                   | 20°          | 24°                                | 30°                           | 22°                    | 26°                                                      |
| Cohésion effective $C'$ (kPa)                          | 0            | 30                                 | 10                            | 47                     | 35                                                       |
| Module de déformabilité drainé $E'$ (MPa)              | 10           | 26–35                              | 50                            | 65                     | 80                                                       |

**Tableau III. 16 : différentes couches de sol selon la réponse drainé ou non drainé**

| Horizon géotechnique                              | Symboles utilisés dans les dessins | Profondeurs moyennes (m) | Réponse drainée ou non drainée |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Remblais                                          | R                                  | 0,0–2,5                  | Non-drainée                    |
| Argile limoneuse                                  | QA                                 | 2,5–6,00                 | Non-drainée                    |
| Sables limoneux-argileux                          | QS                                 | 6,00–7,50                | Non-drainée                    |
| Argiles marneuses                                 | QM                                 | 7,50–21,50               | Non-drainée                    |
| Sable limoneux-argileux avec présence de cailloux | QMsg                               | 21,50–35,00              | Drainée                        |

### III.4.3 Conclusion :

L'investigation menée au niveau du puits PV05 a combiné trois approches complémentaires, sondages, essais in situ et analyses en laboratoire pour caractériser le sous-sol sur les 35 premiers mètres. Cette démarche croisée a permis d'établir une stratigraphie nette en cinq horizons : remblais, argiles limoneuses (QA), sables limoneux-argileux (QS), épaisse formation des argiles marneuses d'El Harrach (QM, de 7,5 à 21,5 m) et sable limoneux-argileux profond (QMsg). C'est la marne QM, sur plus de 14 mètres d'épaisseur, qui constitue la couche déterminante pour le dimensionnement de l'ouvrage.

Les essais in situ ont mis en évidence une compacité croissante avec la profondeur et un état sur-consolidé pour les unités QA, QS et QMsg, la marne QM restant normalement consolidée. Les mesures piézométriques ont confirmé la présence de deux niveaux d'eau distincts : une poche superficielle vers 5,0 m et une nappe phréatique continue à 15,5 m, à intégrer impérativement dans la conception du rabattement. En laboratoire, la marne QM se révèle très plastique ( $I_p = 32 - 35 \%$ ), saturée et contenant des minéraux gonflants, ce qui justifie la pression de gonflement de 50 kPa retenue pour la dalle de fond. Les essais mécaniques fournissent des paramètres cohérents ( $C_u = 97 - 140$  kPa,  $c' = 47 - 58$  kPa,  $\phi' = 15 - 18^\circ$ ), et les analyses chimiques signalent une teneur en sulfates de 3 % imposant l'emploi de ciments CRS, sans risque notable de corrosion des armatures.

Les paramètres géotechniques synthétisés dans les tableaux III.7 et III.8 tirent leur fiabilité de la convergence de méthodes indépendantes

### CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DES VARIANTES DE SOUTÈNEMENT

#### IV.1 Introduction :

L'étude d'une fouille urbaine profonde requiert, au-delà de la caractérisation géotechnique du site, une analyse comparative rigoureuse des différentes solutions de soutènement envisageables. En effet, le choix du système d'étalement conditionne directement la stabilité de l'excavation, la sécurité des ouvrages avoisinants ainsi que le coût global du projet.

Dans le cadre du présent projet de fin d'études portant sur l'étude technico-économique de la fouille du puits de ventilation PV5, inscrit dans l'extension du métro d'Alger Lot 1 (El Harrach Centre – Aéroport International Houari Boumediene) trois variantes de soutènement ont été définies et étudiées pour l'écran le plus sollicité du projet, correspondant à la coupe A-A.

Les trois variantes étudiées reposent toutes sur un rideau de pieux forés en béton armé de diamètre Ø800 mm comme élément principal de soutènement. Elles se différencient uniquement par la nature et la disposition du système d'étalement adopté, ainsi que par le ferrailage longitudinal des pieux, adapté aux efforts repris dans chaque cas :

**Variante du projet (solution projet) :** pieux Ø800 mm ferrailés par 13 HA32, associés à trois niveaux de butons métalliques en profilés HEB, tels que conçus par le bureau d'études et retenus pour la réalisation.

**Variante 1 proposée :** pieux Ø800 mm ferrailés par 12 HA20, avec remplacement intégral des butons par cinq niveaux de tirants d'ancrage précontraints, solution permettant de libérer entièrement l'espace intérieur de la fouille.

**Variante 2 proposée (solution mixte) :** pieux Ø800 mm ferrailés par 18 HA25, combinés à deux niveaux de butons dans la partie supérieure de la fouille et un niveau de tirants d'ancrage dans la partie inférieure, constituant un compromis entre les deux solutions précédentes.

Le prédimensionnement et la vérification de ces trois variantes ont été réalisés à l'aide du logiciel GEO5, module Sheeting Check, en adoptant la méthode aux coefficients de réaction. La modélisation numérique approfondie, incluant l'analyse des déplacements, des moments fléchissants et des efforts dans les appuis, fera l'objet du chapitre suivant à l'aide du module Sheeting Check.

#### IV.2 Identification de l'écran le plus sollicité

##### IV.2.1 Justification du choix de la coupe A-A :

Le puits de ventilation PV5 est un ouvrage de géométrie complexe dont les parois de soutènement présentent des profondeurs d'excavation variables selon les sections transversales. Afin d'identifier l'écran le plus sollicité parmi les différentes coupes disponibles dans les plans d'exécution (coupes A-A, B-B, C-C et D-D), une analyse comparative des caractéristiques géométriques et des conditions géotechniques et hydrauliques propres à chacune a été effectuée.

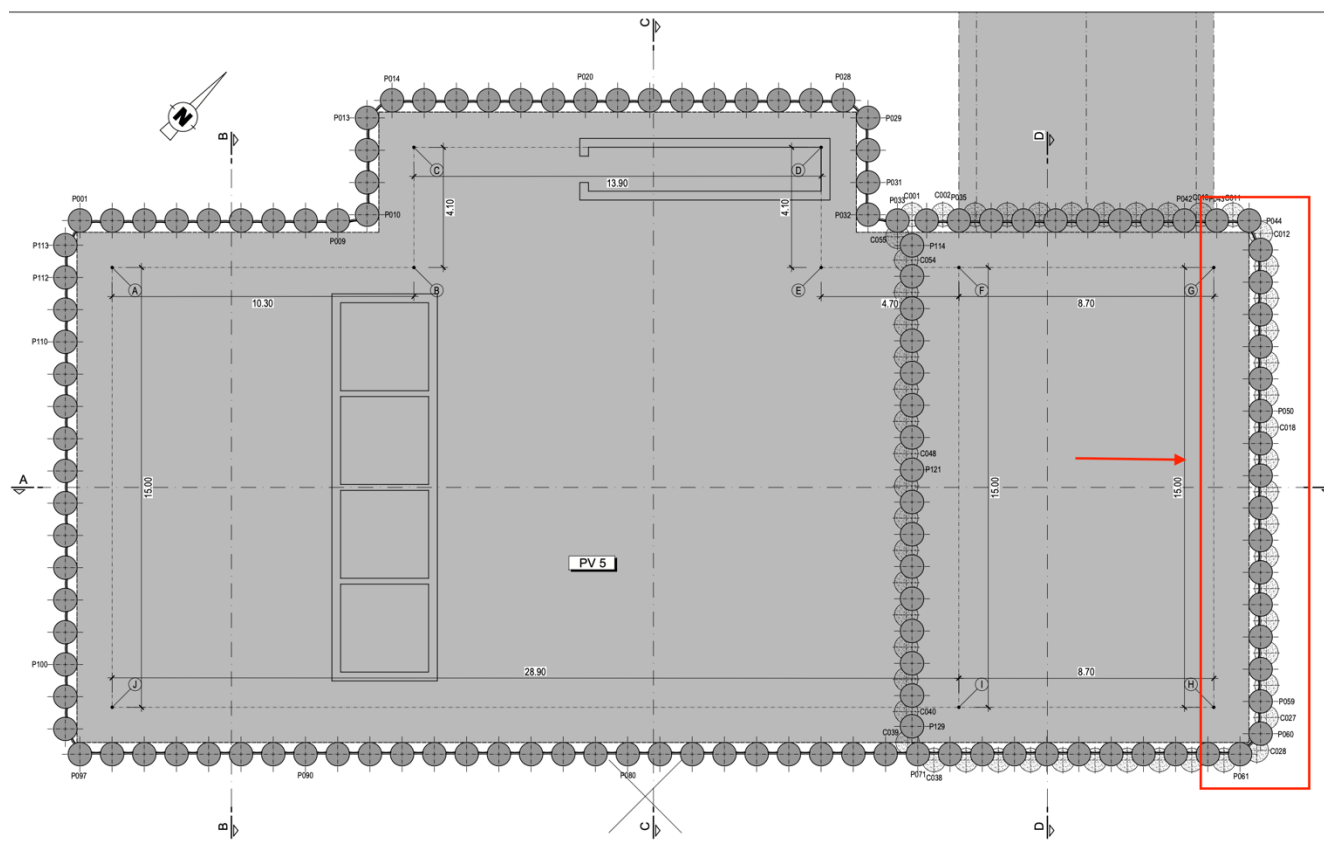


Figure IV. 1 : Plan d'implantation général des coupes transversales du puits de ventilation PV5 (identification des coupes A-A, B-B, C-C et D-D)

Le tableau suivant présente une synthèse des paramètres essentiels relevés pour chacune des coupes transversales :

Tableau IV. 1 : Comparaison des coupes transversales du PV5

| Coupe | Prof. d'excavation (m) | Longueur des pieux (m) | Conditions hydrauliques             | Système d'étalement           |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| A-A   | 22,53                  | 30                     | NP à 15,50 m + poche d'eau à 5,00 m | Pieux + butons                |
| B-B   | 14,20                  | —                      | NP à 5,00 m                         | Pieux + butons                |
| C-C   | 17,30                  | —                      | NP à 15,50 m + poche d'eau à 5,00 m | Pieux + butons                |
| D-D   | 22,53                  | 30                     | NP à 15,50 m + poche d'eau à 5,00 m | Pieux + butons + jet-grouting |

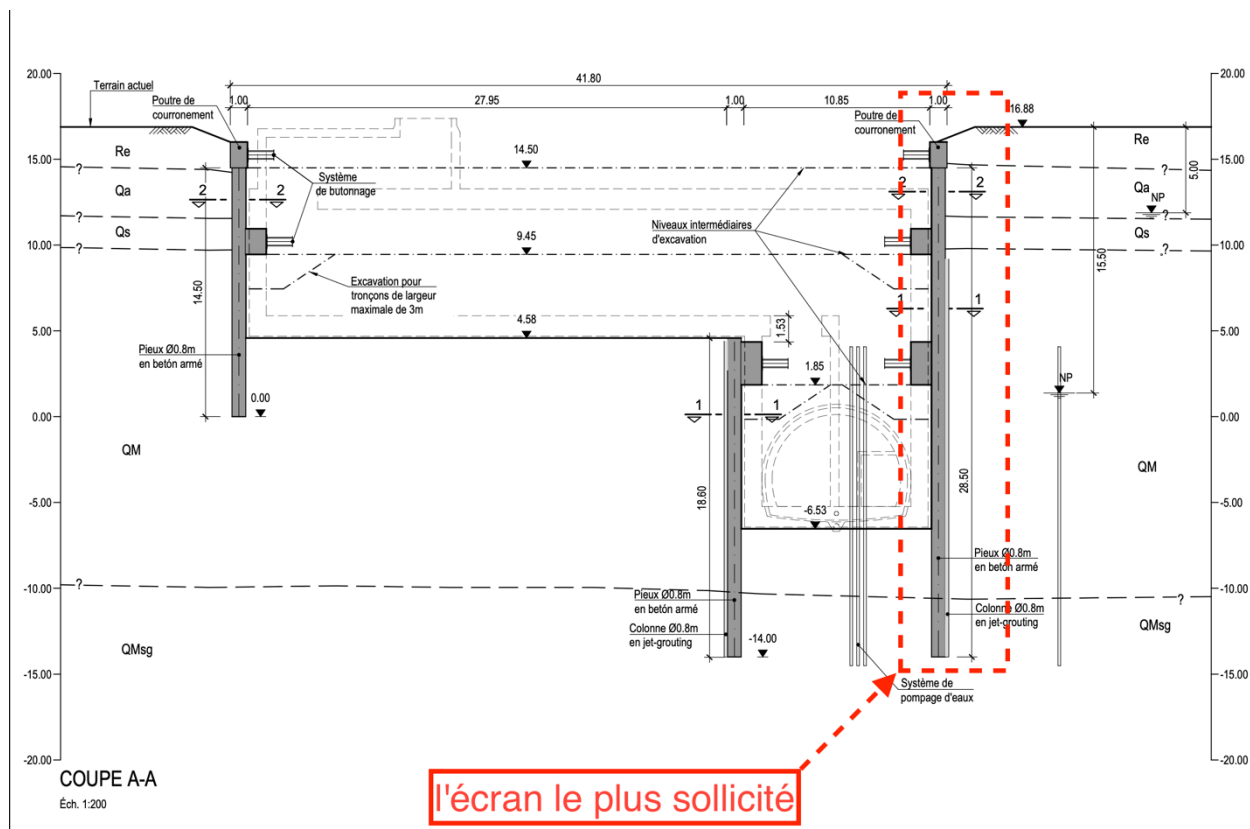


Figure IV. 2 : Vue transversale de l'écran le plus sollicité du PV5 (coupe de référence, Éch. 1:200)

L'examen de ce tableau permet de dégager clairement la coupe A-A comme l'écran le plus sollicité du projet. Cette désignation repose sur les arguments suivants :

- **Profondeur d'excavation maximale** : avec une hauteur d'excavation de 22,53 m, la coupe A-A présente les efforts de poussée des terres les plus importants sur l'écran de soutènement, engendrant des sollicitations en flexion et en déplacement particulièrement élevées.
- **Double présence de la nappe phréatique** : l'existence simultanée d'une poche d'eau localisée à 5,00 m de profondeur et d'une nappe phréatique principale à 15,50 m génère des pressions hydrostatiques additionnelles qui majorent considérablement les sollicitations sur la paroi.
- **Longueur d'encastrement des pieux** : les pieux atteignent une longueur de 30 m, témoignant de la nécessité d'une profondeur d'encastrement importante pour mobiliser la résistance passive du sol sous le niveau d'excavation final.
- **Stratigraphie défavorable** : la coupe A-A traverse la couche d'argile marneuse QM sur toute son épaisseur (7,50 m à 21,50 m), formation caractérisée par une plasticité élevée ( $I_p = 32$  à  $35$  %), un potentiel de gonflement non négligeable et une faible perméabilité imposant le recours à un système de pompage des eaux.

Par conséquent, c'est sur la base de ces quatre critères déterminants que la coupe A-A a été retenue comme écran de référence pour l'ensemble de l'étude comparative des trois variantes de soutènement développées dans ce chapitre.

## IV.2.2 Caractéristiques géométriques de l'écran

L'écran de soutènement correspondant à la coupe A-A présente les caractéristiques géométriques suivantes, telles qu'extraites des plans d'exécution du bureau d'études et de la modélisation réalisée sous GEO5 :

Tableau IV. 2 : Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'écran (coupe A-A)

| Paramètre                      | Valeur                                     |
|--------------------------------|--------------------------------------------|
| Type de l'écran                | Rideau de pieux forés en béton armé        |
| Diamètre des pieux             | Ø 800 mm                                   |
| Longueur totale des pieux      | 30,00 m                                    |
| Nombre de pieux (écran étudié) | 16 pieux                                   |
| Espacement entre pieux         | 1,10 m                                     |
| Longueur de l'écran            | 17,40 m                                    |
| Hauteur d'excavation modélisée | 22,53 m (depuis la tête des pieux)         |
| cote d'excavation finale       | -6,53                                      |
| Profondeur d'encastrement      | ≈ 7,47 m sous le niveau final d'excavation |
| Nappe phréatique principale    | 15,50 m de profondeur                      |
| Poche d'eau superficielle      | 5,00 m de profondeur                       |
| Surcharge en surface           | 15 kN/m <sup>2</sup>                       |
| Classe du béton des pieux      | C30/37 XC2                                 |
| Acier des armatures            | B500A                                      |

La profondeur d'encastrement des pieux, d'environ 7,47 m sous le niveau final d'excavation, assure la mobilisation de la résistance passive du sol nécessaire à la stabilité globale de l'écran. Le béton utilisé est de classe C30/37 XC2 conformément aux spécifications du plan d'exécution du bureau d'études, avec un enrobage minimal des armatures de 50 mm. Les armatures longitudinales et transversales sont en acier B500A.

Ces caractéristiques géométriques et mécaniques constituent les données d'entrée communes aux trois variantes étudiées dans ce chapitre, la distinction entre celles-ci résidant exclusivement dans la nature et la disposition du système d'étaieement associé.



## IV.3 Variante du projet Pieux + Butons (solution BET)

### IV.3.1 Description générale

La variante du projet constitue la solution de soutènement retenue par le bureau d'études et en cours de réalisation sur le chantier du puits de ventilation PV5. Elle repose sur un rideau de pieux forés en béton armé, soutenu intérieurement par trois niveaux de butonnage métallique disposés progressivement au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation.

Cette solution a été conçue pour répondre aux contraintes spécifiques du site, notamment la profondeur importante de l'excavation (16,88 m), la présence de deux horizons aquifères et la nécessité de limiter les déformations du terrain environnant afin de protéger les ouvrages et réseaux avoisinants. Le système de butonnage, travaillant en compression entre les deux parois opposées de la fouille, reprend les poussées latérales des terres transmises par les pieux et assure la stabilité globale de l'excavation à chaque phase de terrassement.

Il convient de noter que les plans d'exécution du bureau d'études préoyaient initialement la mise en œuvre de colonnes de jet-grouting au niveau de la coupe A-A, destinées à renforcer le fond de fouille et à limiter les infiltrations d'eau en provenance de la nappe phréatique principale. Toutefois, cette technique n'a finalement pas été appliquée sur le chantier lors de la réalisation effective des travaux d'excavation.

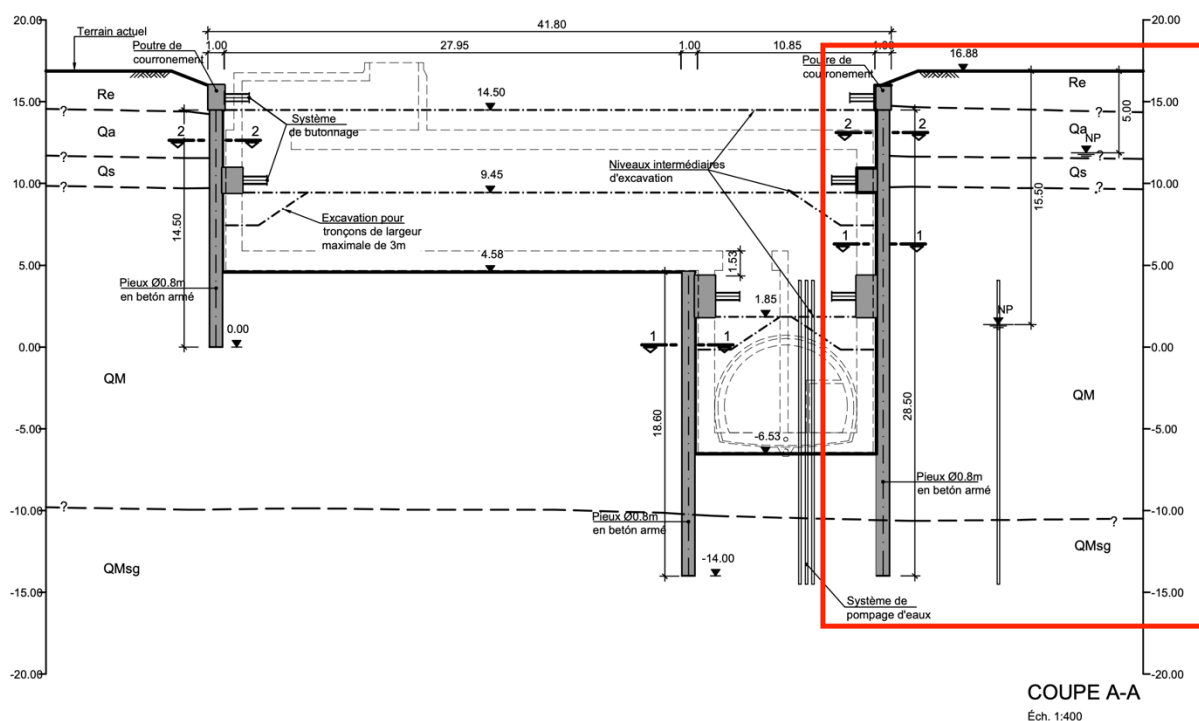


Figure IV. 3 : coupe longitudinale système de butonnage du PV5 Variante projet

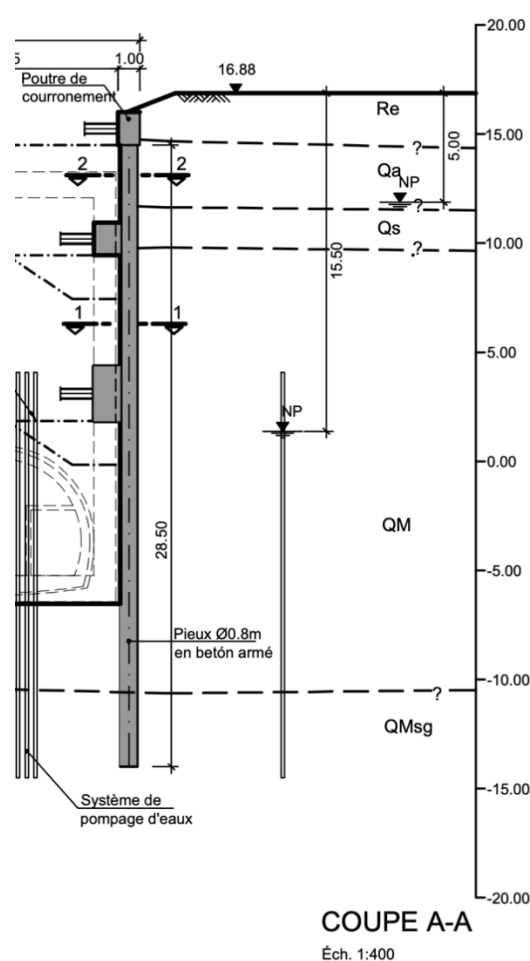


Figure IV. 4 : l'écran concernait par l'étude de la variante projet

## IV.3.2 Les pieux forés en béton armé

### IV.3.2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques :

L'écran de soutènement de la coupe A-A est constitué de 16 pieux forés en béton armé, implantés à un entraxe de 1,10 m sur une longueur totale d'écran de 17,40 m. Chaque pieu présente un diamètre de 800 mm et une longueur totale de 30,00 m, dont environ 7,47 m d'encastrement sous le niveau final d'excavation, garantissant ainsi la mobilisation de la résistance passive du sol nécessaire à la stabilité de l'écran.

Les pieux sont réalisés en béton armé de classe C30/37 XC2, conformément aux prescriptions du plan d'exécution. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux :

**Tableau IV. 3 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux forés**

| Paramètre                        | Valeur                                         |
|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Diamètre des pieux               | Ø 800 mm                                       |
| Longueur totale                  | 30,00 m                                        |
| Nombre de pieux (écran A-A)      | 16 pieux                                       |
| Espacement entre pieux           | 1,10 m (axe à axe)                             |
| Longueur de l'écran              | 17,40 m                                        |
| Armatures longitudinales         | 13 barres HA Ø32 mm réparties sur le périmètre |
| Armatures transversales (cadres) | Cadres Ø12 mm espacés de 150 mm                |
| Enrobage des armatures           | 50 mm                                          |
| Classe du béton                  | C30/37 XC2                                     |
| Nuance de l'acier                | B500A                                          |

## IV.3.2.2 Ferrailage des pieux

La cage d'armatures de chaque pieu est composée de 13 barres longitudinales en acier haute adhérence de diamètre Ø32 mm, réparties uniformément sur le périmètre de la section circulaire. Le maintien et la stabilité de ces armatures longitudinales sont assurés par des cadres transversaux en acier Ø12 mm espacés de 150 mm sur toute la hauteur du pieu. L'enrobage nominal des armatures est fixé à 50 mm, conformément aux exigences de durabilité de la classe d'exposition XC2.

Les armatures sont en acier de nuance B500A, avec une longueur minimale de superposition de  $50\phi$  (soit 1 600 mm pour les barres Ø32 mm), conformément aux spécifications du bureau d'études.

## IV.3.3 Le système de butonnage

Le soutènement interne de la fouille est assuré par trois niveaux de butonnage métallique, installés progressivement au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation. Les boutons, travaillant en compression, reprennent les efforts horizontaux exercés par le sol sur les pieux et les transmettent vers la paroi opposée. Le tableau suivant présente une synthèse des trois niveaux de butonnage :

**Tableau IV. 4 : Récapitulatif des niveaux de butonnage**

| Niveau | Cote (m/TN) | Système | Profilé   | Longueur (m) | Nuance acier |
|--------|-------------|---------|-----------|--------------|--------------|
| N1     | +15,25      | SB1     | HEB 500   | 6,00         | S275         |
| N2     | +10,20      | SB1     | HEB 500   | 6,00         | S275         |
| N3     | +3,10       | SB6     | 2 HEB 500 | 5,08         | S275         |

Tous les profils métalliques utilisés sont en acier de construction de nuance S275, conformément à la liste des profils métalliques figurant dans les plans d'exécution du bureau d'études. Les vis et chevilles d'assemblage sont de classe de résistance CL8.8.

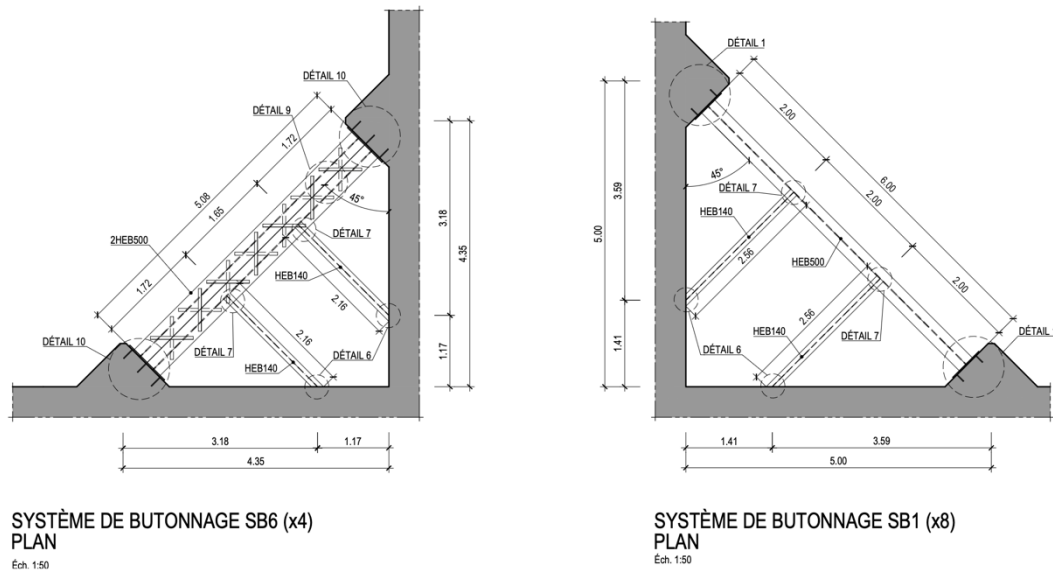


Figure IV. 5 : Plan du système de butonnage aux trois niveaux d'étaie

## IV.3.3.1 Niveau N1 et N2 Système SB1

Les deux premiers niveaux de butonnage N1 et N2, situés respectivement aux cotes +15,25 m et +10,20 m par rapport au niveau de référence du projet, utilisent le système de butonnage de référence SB1. Ce système est composé d'un profilé HEB 500 comme buton principal, renforcé par deux profilés HEB 140 disposés en contreventement incliné à 45°, assurant la stabilité latérale et la reprise des efforts de flambement

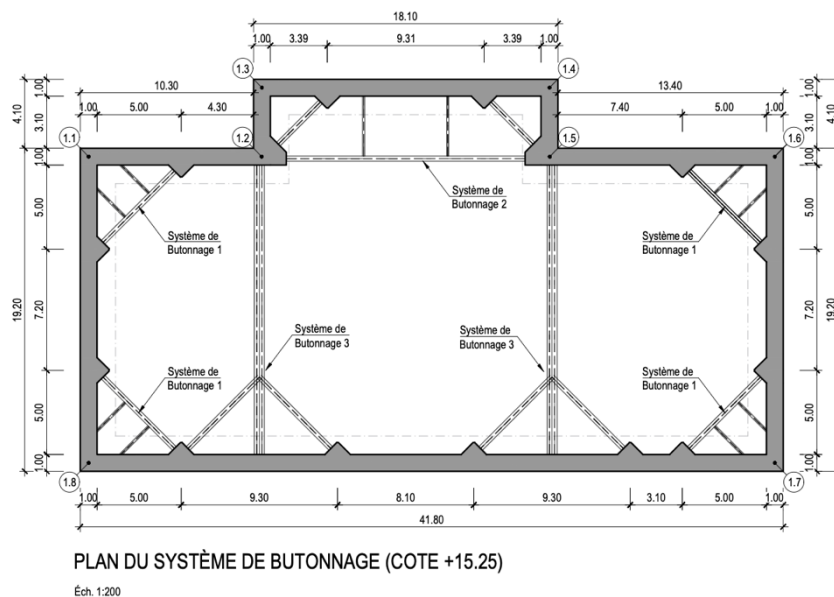
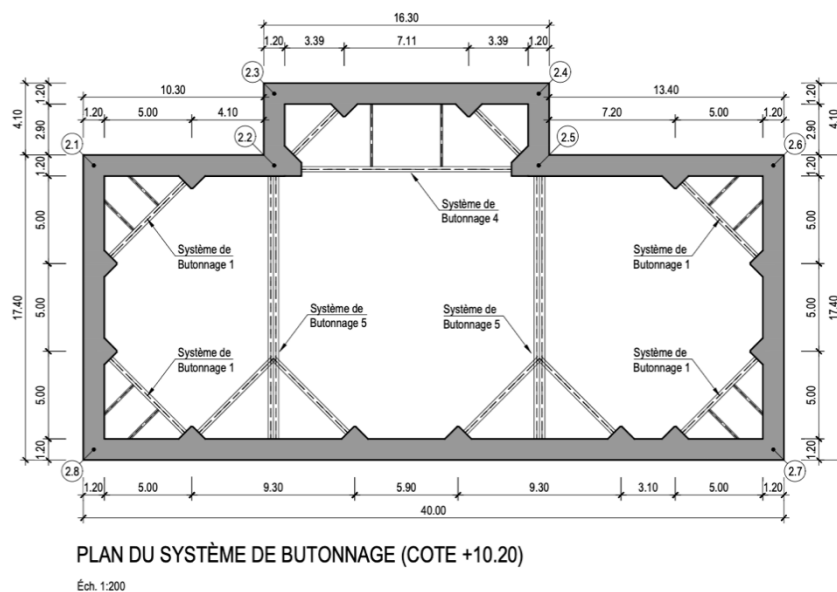


Figure IV. 6 : Plan du système de butonnage SB +15.25



**Figure IV. 7 : Plan du système de butonnage SB cote +10.20**

Le système SB1 est répété à 8 reprises sur le plan du système de butonnage. Le tableau suivant en présente les caractéristiques détaillées :

**Tableau IV. 5 : Caractéristiques détaillées du système de butonnage SB1 (niveaux N1 et N2)**

| Paramètre                   | Valeur             |
|-----------------------------|--------------------|
| Référence système           | SB1                |
| Nombre de systèmes          | 8 systèmes (x8)    |
| Profilé principal           | HEB 500            |
| Longueur du buton principal | 6,00 m             |
| Profilé de contreventement  | HEB 140            |
| Longueur HEB 140            | 2,56 m             |
| Espacement entre butons     | 5,00 m (axe à axe) |
| Nuance de l'acier           | S275               |
| Poids par pièce (HEB500)    | 1 122,00 kg        |
| Poids total du système SB1  | 10 356,35 kg       |

Le poids unitaire du profilé HEB 500 est de 187 kg/m, ce qui confère au buton principal de 6,00 m une masse de 1 122,00 kg. Le poids total de l'ensemble des systèmes SB1 mis en œuvre sur le chantier s'élève à 10 356,35 kg, incluant les profilés principaux, les contreventements HEB 140 et les pièces d'assemblage.

## IV.3.3.2 Niveau N3 (Système SB6) :

Le troisième niveau de butonnage N3, situé à la cote +3,10 m, correspond à la phase d'excavation la plus profonde et sollicite donc l'écran de manière maximale. Pour répondre à ces efforts plus importants, le système de butonnage SB6 a été adopté, utilisant un profilé double 2HEB 500 comme buton principal, soit une section résistante deux fois supérieure à celle du niveau SB1.

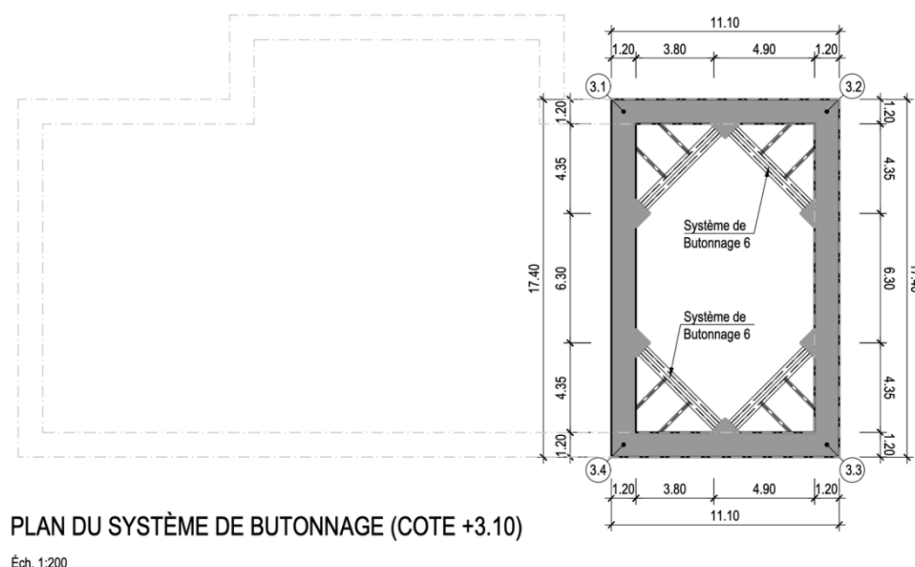


Figure IV. 8 : Plan du système de butonnage SB cote +3.10

Le système SB6 est répété à 4 reprises dans le plan de butonnage. Le tableau suivant en présente les caractéristiques détaillées :

Tableau IV. 6 : Caractéristiques détaillées du système de butonnage SB6 (niveau N3)

| Paramètre                   | Valeur                     |
|-----------------------------|----------------------------|
| Référence système           | SB6                        |
| Nombre de systèmes          | 4 systèmes (x4)            |
| Profilé principal           | 2 HEB 500 (double profilé) |
| Longueur du buton principal | 5,08 m                     |
| Profilé de contreventement  | HEB 140                    |
| Longueur HEB 140            | 2,16 m                     |
| Espacement entre butons     | 4,65 m (axe à axe)         |
| Nuance de l'acier           | S275                       |
| Poids par pièce (2HEB500)   | 1 899,92 kg                |
| Poids total du système SB6  | 8 182,02 kg                |

Le recours au double profilé 2HEB 500 au niveau N3 s'explique par l'augmentation significative des poussées latérales des terres à cette profondeur, ainsi que par la présence de la



nappe phréatique principale à 15,50 m générant des pressions hydrostatiques supplémentaires. L'espacement réduit entre les butons (4,65 m contre 5,00 m pour SB1) participe également à une meilleure répartition des efforts sur la paroi à ce niveau critique.

Le poids total de l'ensemble du système de butonnage de la variante projet, tous niveaux confondus et tous systèmes (SB1 à SB6) inclus sur l'ensemble du puits de ventilation PV5, est de 59 430,48 kg, conformément à la liste des profils métalliques figurant dans les plans d'exécution.

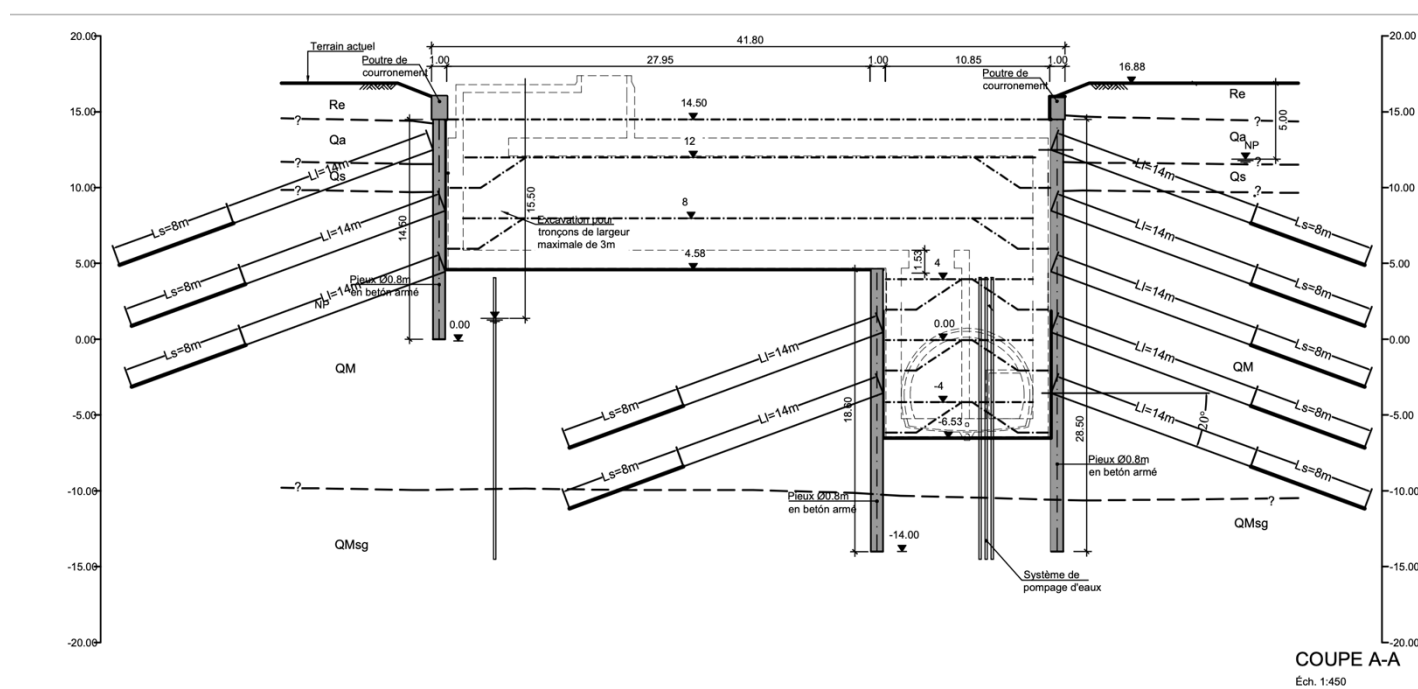
#### IV.4 Variante 1 proposée Pieux + 5 niveaux de tirants d'ancrage

#### IV.4.1 Description générale

La première variante proposée consiste à remplacer intégralement le système de butonnage de la solution BET par cinq niveaux de tirants d'ancrage précontraints. Cette solution présente l'avantage majeur de libérer entièrement l'espace intérieur de la fouille, facilitant ainsi la circulation des engins de terrassement, l'organisation du chantier et la mise en œuvre des ouvrages définitifs.

Les tirants d'ancrage, travaillant en traction, transmettent les efforts horizontaux exercés par le sol sur les pieux vers un massif de sol stable situé en profondeur, au-delà de la surface de rupture potentielle. Chaque tirant est constitué d'une armature de 6 torons haute résistance, scellée dans le terrain sur une longueur de 8,00 m (longueur scellée) et libre sur 14,00 m (longueur libre), pour une longueur totale de 22,00 m par tirant.

Les pieux de soutènement conservent les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques que celles de la variante projet, le système d'étalement constituant le seul paramètre variant entre les deux solutions.



**Figure IV. 9 : Coupe longitudinale du système la variante 1 proposée**

## IV.4.2 Les pieux forés en béton armé

Les pieux forés utilisés dans cette variante sont strictement identiques à ceux de la variante projet. L'écran de soutènement de la coupe A-A est constitué de 16 pieux Ø800 mm, d'une longueur totale de 30,00 m, espacés de 1,10 m axe à axe sur une longueur d'écran de 17,40 m. Le ferrailage et les matériaux restent inchangés, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV. 7 : Caractéristiques des pieux forés (Variante 1 proposée)

| Paramètre                | Valeur                          |
|--------------------------|---------------------------------|
| Diamètre des pieux       | Ø 800 mm                        |
| Longueur totale          | 30,00 m                         |
| Nombre de pieux          | 16 pieux                        |
| Espacement entre pieux   | 1,10 m (axe à axe)              |
| Longueur de l'écran      | 17,40 m                         |
| Armatures longitudinales | 12 barres HA Ø20 mm             |
| Armatures transversales  | Cadres Ø12 mm espacés de 150 mm |
| Enrobage                 | 50 mm                           |
| Classe du béton          | C30/37 XC2                      |
| Nuance de l'acier        | B500A                           |

## IV.4.3 Les tirants d'ancrage

### IV.4.3.1 Caractéristiques générales

Les tirants d'ancrage adoptés dans cette variante sont de type actif précontraint à torons. Ils sont inclinés à 20° par rapport à l'horizontale afin d'optimiser la composante horizontale de l'effort d'ancrage et d'atteindre des horizons géotechniques suffisamment résistants pour assurer un bon transfert des efforts par adhérence dans la longueur scellée.

Chaque tirant est composé de 6 torons haute résistance, avec une force maximale admissible de 700 kN. La longueur totale de chaque tirant est de 22,00 m, répartie entre une longueur libre de 14,00 m et une longueur scellée de 8,00 m. Un tirant est positionné entre chaque deux pieux consécutifs, soit 15 tirants par niveau. Le tableau suivant présente

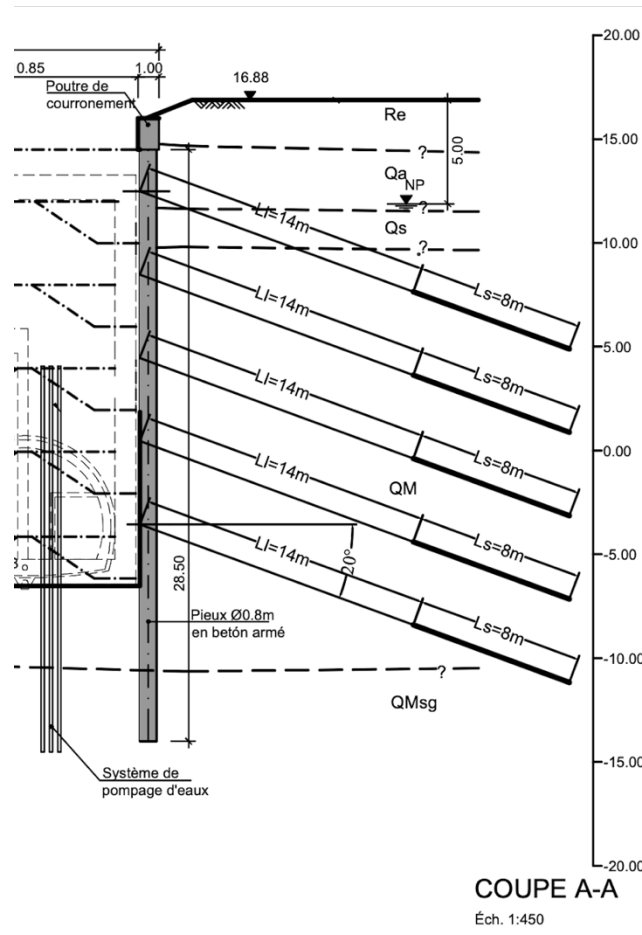


Figure IV. 10 : Schéma de principe de la variante 1 proposée

L'ensemble des caractéristiques générales des tirants d'ancrage :

Tableau IV. 8 : Caractéristiques générales des tirants d'ancrage (Variante 1 proposée)

| Paramètre                    | Valeur                                             |
|------------------------------|----------------------------------------------------|
| Type de tirant               | Tirant actif précontraint à torons                 |
| Longueur totale              | 22,00 m ( $Ll = 14 \text{ m} + Ls = 8 \text{ m}$ ) |
| Longueur libre (Ll)          | 14,00 m                                            |
| Longueur scellée (Ls)        | 8,00 m                                             |
| Nombre de torons par tirant  | 6 torons                                           |
| Force maximale admissible    | 700 kN                                             |
| Inclinaison des tirants      | 20° par rapport à l'horizontale                    |
| Nombre de tirants par niveau | 15 tirants (1 tirant entre chaque deux pieux)      |
| Espacement entre tirants     | 1,10 m (axe à axe)                                 |
| Nombre total de niveaux      | 5 niveaux                                          |
| Nombre total de tirants      | 75 tirants ( $5 \times 15$ )                       |

## IV.4.3.2 Niveaux de tirants et précontrainte appliquée

La variante 1 proposée comprend quatre niveaux de tirants d'ancrage, dont les cotes d'implantation ont été définies en cohérence avec le phasage d'excavation adopté dans la variante projet, afin de permettre une comparaison pertinente entre les deux solutions. Le tableau suivant présente la synthèse des cinq niveaux de tirants :

**Tableau IV. 9 : Récapitulatif des niveaux de tirants d'ancrage (Variante 1 proposée)**

| Niveau | Cote (m/TN) | Nbr de tirants | Espacement (m) | Ll (m) | Ls (m) | Précontrainte (kN) | Inclinaison |
|--------|-------------|----------------|----------------|--------|--------|--------------------|-------------|
| N1     | +12,50      | 15             | 1,10           | 14     | 8      | 30                 | 20°         |
| N2     | +8,50       | 15             | 1,10           | 14     | 8      | 150                | 20°         |
| N3     | +4,50       | 15             | 1,10           | 14     | 8      | 150                | 20°         |
| N4     | -0,50       | 15             | 1,10           | 14     | 8      | 150                | 20°         |
| N5     | -3,50       | 15             | 1,10           | 14     | 8      | 150                | 20°         |

La valeur de précontrainte appliquée à chaque niveau de tirant a été définie en tenant compte de l'évolution des pressions des terres et des pressions hydrostatiques avec la profondeur. Le tableau suivant détaille les valeurs de précontrainte retenues pour chaque niveau ainsi que leur justification :

**Tableau IV. 10 : Précontrainte appliquée par niveau de tirants (Variante 1 proposée)**

| Niveau | Cote (m/TN) | Nbr tirants | Précontrainte appliquée (kN) | Justification                                        |
|--------|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------------------------------|
| N1     | +12,50      | 15          | 30 kN                        | Précontrainte réduite, faibles poussées en tête      |
| N2     | +8,50       | 15          | 150 kN                       | Poussées actives croissantes avec la profondeur      |
| N3     | +4,50       | 15          | 150 kN                       | Présence de la nappe phréatique, pressions hydrost.  |
| N4     | -0,50       | 15          | 150 kN                       | Présence de la nappe phréatique, pressions hydrost.  |
| N5     | -3,50       | 15          | 150 kN                       | Niveau le plus sollicité, fond de fouille approchant |

Au niveau N1, situé en tête de l'écran à la cote +12,50 m, une précontrainte réduite de 30 kN est appliquée. Cette valeur modérée est justifiée par la faible profondeur à ce stade de l'excavation, qui engendre des poussées des terres relativement limitées. L'objectif principal de ce premier niveau est d'assurer le maintien de la paroi lors des premières phases de terrassement.

Aux niveaux N2, N3, N4 et N5, une précontrainte uniforme de 150 kN est appliquée. Cette valeur plus élevée est justifiée par l'augmentation progressive des poussées latérales des terres avec la profondeur, ainsi que par la présence de la nappe phréatique principale à 15,50 m qui génère des pressions hydrostatiques significatives au niveau des tirants inférieurs.

### IV.4.3.3 Description par niveau

**Niveau N1 (cote +12,50 m) :** premier niveau de tirants mis en place dès la première phase d'excavation. Il comprend 15 tirants espacés de 1,10 m, inclinés à 20°, précontraints à 30 kN. Ce niveau correspond à la zone de remblai et d'argile limoneuse QA, terrain peu résistant mais suffisamment stable pour permettre l'ancrage dans les horizons sous-jacents.

**Niveau N2 (cote +8,50 m) :** deuxième niveau de tirants installé après la deuxième phase d'excavation. Les 15 tirants sont espacés de 1,10 m et précontraints à 150 kN. Ce niveau se situe dans la zone de transition entre la couche de sables limoneux-argileux QS et le début de la couche d'argile marneuse QM, horizon particulièrement résistant et favorable à l'ancrage.

**Niveau N3 (cote +4,50 m) :** troisième niveau de tirants, mis en place lors de la troisième phase d'excavation. Les 15 tirants sont espacés de 1,10 m et précontraints à 150 kN. Ce niveau est entièrement situé dans la couche d'argile marneuse QM, formation compacte ( $p_l > 2,5$  MPa) offrant une excellente capacité d'ancrage par adhérence.

**Niveau N4 (cote -0,50 m) :** quatrième et dernier niveau de tirants, correspondant à la phase d'excavation la plus profonde. Les 15 tirants sont espacés de 1,10 m et précontraints à 150 kN. Ce niveau est le plus sollicité de la variante, subissant simultanément les poussées importantes des terres à grande profondeur et les pressions hydrostatiques de la nappe phréatique principale située à 15,50 m. La longueur scellée de 8,00 m dans la couche QM ou QMsg assure un ancrage sûr et efficace.

**Niveau N5 (cote -4,50 m) :** cinquième et dernier niveau de tirants, mis en place lors de la phase finale d'excavation, au fond de la fouille. Les 15 tirants sont espacés de 1,10 m et précontraints à 150 kN. Ce niveau est entièrement ancré dans la couche d'argile marneuse QM, voire dans l'horizon sablo-graveleux QMsg sous-jacent, formations compactes offrant une excellente résistance à l'arrachement. Situé au point le plus bas du soutènement, il reprend les efforts résiduels en pied d'écran et contribue, avec le niveau N4, à limiter les déplacements dans la zone la plus sollicitée de la paroi, soumise aux poussées maximales des terres et à la pression hydrostatique de la nappe principale. La longueur scellée de 8,00 m garantit un ancrage sûr et durable.





### IV.5.2 Les pieux forés en béton armé

Les pieux forés utilisés dans cette variante sont strictement identiques à ceux des variantes précédentes. L'écran de soutènement est constitué de 16 pieux Ø800 mm, d'une longueur totale de 30,00 m, espacés de 1,10 m axe à axe sur une longueur d'écran de 17,40 m. Le ferrailage et les matériaux restent inchangés, comme indiqué dans le tableau suivant :

| Paramètre                | Valeur                          |
|--------------------------|---------------------------------|
| Diamètre des pieux       | Ø 800 mm                        |
| Longueur totale          | 30,00 m                         |
| Nombre de pieux          | 16 pieux                        |
| Espacement entre pieux   | 1,10 m (axe à axe)              |
| Longueur de l'écran      | 17,40 m                         |
| Armatures longitudinales | 18 barres HA Ø25 mm             |
| Armatures transversales  | Cadres Ø12 mm espacés de 150 mm |
| Enrobage                 | 50 mm                           |
| Classe du béton          | C30/37 XC2                      |
| Nuance de l'acier        | B500A                           |

**Tableau IV.11 : Caractéristiques des pieux forés (Variante 2 proposée)**

### IV.5.3 Récapitulatif général du système d'étalement

La variante 2 proposée comprend trois niveaux d'étalement au total : deux niveaux de butonnage dans la partie supérieure (N1 et N2) et un niveau de tirants d'ancrage dans la partie inférieure (N3). Le tableau suivant présente une synthèse globale du système d'étalement :

**Tableau IV. 11 : Récapitulatif du système d'étalement mixte (Variante 2 proposée)**

| Niveau    | Cote (m/TN) | Type d'étalement | Système / Profil | Espacement (m) | Précontrainte / Nuance |
|-----------|-------------|------------------|------------------|----------------|------------------------|
| <b>N1</b> | +15,25      | Buton            | HEB 200          | 7,20           | S235                   |
| <b>N2</b> | +7,25       | Buton            | SB1 HEB 500      | 5,00           | S275                   |
| <b>N3</b> | -1,00       | Tirant d'ancrage | 5 torons 700 kN  | 1,10           | 150 kN                 |

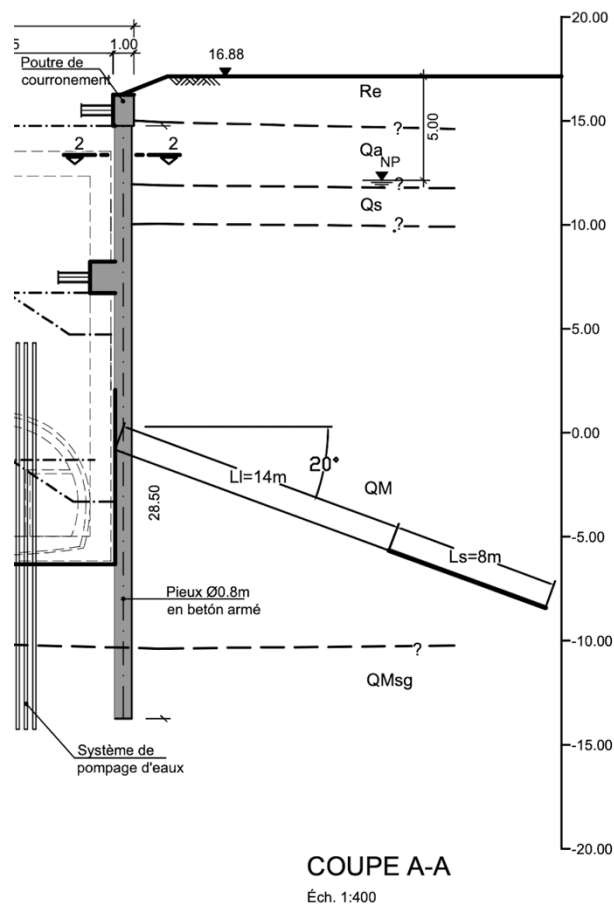


Figure IV. 12 : Schéma de principe de la variante 2 proposée

## IV.5.4 Le système de butonnage

### IV.5.4.1 Niveau N1 Profilé HEB 200 (cote +15,25 m)

Le premier niveau de butonnage N1, situé à la cote +15,25 m, adopte un profilé HEB 200, contrairement aux variantes précédentes qui utilisaient le profilé HEB 500. Ce choix est justifié par la faible profondeur de ce niveau au moment de son installation, correspondant à la première phase d'excavation où les poussées latérales des terres sont encore limitées. Le recours à un profilé plus léger permet d'optimiser l'utilisation des matériaux tout en assurant une résistance suffisante à ce stade du terrassement. L'espacement de 7,2 m entre butons, garantit une répartition homogène des efforts sur l'ensemble de l'écran.

**Tableau IV. 12 : Caractéristiques du buton N1 HEB 200 (Variante 2 proposée)**

| Paramètre                  | Valeur                                           |
|----------------------------|--------------------------------------------------|
| Niveau concerné            | N1 cote +15,25 m                                 |
| Profilé adopté             | HEB 200                                          |
| Espacement entre butons    | 7,2 m                                            |
| Nuance de l'acier          | S235                                             |
| Justification du choix     | Faibles poussées en tête profil allégé suffisant |
| Profilé de contreventement | HEB 140                                          |
| Longueur HEB 140           | 2,56 m                                           |

## IV.5.4.2 Niveau N2 Système SB1 HEB 500 (cote +7,25 m)

Le deuxième niveau de butonnage N2, situé à la cote +7,25 m, reprend le système SB1 composé d'un profilé principal HEB 500 de 6,00 m de longueur, renforcé par des contreventements HEB 140 inclinés à 45°. À cette profondeur, les poussées des terres sont plus importantes et nécessitent une section résistante plus élevée, justifiant le recours au profilé HEB 500. Ce niveau joue un rôle crucial dans la stabilité de l'écran en assurant la transition entre la zone de butonnage supérieure et la zone d'ancrage inférieure par tirants.

**Tableau IV. 13 : Caractéristiques du buton N2 SB1 HEB 500 (Variante 2 proposée)**

| Paramètre                   | Valeur          |
|-----------------------------|-----------------|
| Niveau concerné             | N2 cote +6,50 m |
| Référence système           | SB1             |
| Profilé principal           | HEB 500         |
| Longueur du buton principal | 6,00 m          |
| Profilé de contreventement  | HEB 140         |
| Longueur HEB 140            | 2,56 m          |
| Espacement entre butons     | 5,00 m          |
| Nuance de l'acier           | S275            |

## IV.5.5 Le tirant d'ancrage (niveau N3)

Le niveau N3, situé à la cote -1,00 m, constitue l'unique niveau de tirants d'ancrage de la variante 2. Il est mis en place lors de la phase finale d'excavation, après l'installation des deux niveaux de butonnage supérieurs. Les tirants précontraints permettent de reprendre les

efforts horizontaux importants générés à cette profondeur, tout en libérant l'espace intérieur de la fouille nécessaire aux travaux de réalisation de l'ouvrage définitif.

Ce niveau comprend 15 tirants espacés de 1,10 m, soit un tirant par intervalle entre pieux. Chaque tirant est constitué de 5 torons haute résistance, avec une longueur libre de 14,00 m et une longueur scellée de 8,00 m dans la couche d'argile marneuse QM, et est précontraint à 150 kN. Le tableau suivant en présente les caractéristiques détaillées :

**Tableau IV. 14 : Caractéristiques du tirant d'ancrage N3 (Variante 2 proposée)**

| Paramètre                   | Valeur                             |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Niveau concerné             | N3 cote -1,50 m                    |
| Type de tirant              | Tirant actif précontraint à torons |
| Nombre de torons par tirant | 5 torons                           |
| Force maximale admissible   | 700 kN                             |
| Longueur libre (Ll)         | 14,00 m                            |
| Longueur scellée (Ls)       | 8,00 m                             |
| Longueur totale             | 22,00 m                            |
| Inclinaison                 | 20° par rapport à l'horizontale    |
| Précontrainte appliquée     | 150 kN                             |
| Nombre de tirants           | 15tirants                          |
| Espacement entre tirants    | 1,10 m (axe à axe)                 |

## CHAPITRE V : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

### V.1 Données principales de modélisation

#### V.1.1 Présentation générale du logiciel et hypothèses de calcul :

La modélisation numérique du système de soutènement a été réalisée à l'aide du logiciel GEO5 plus précisément dans la fenêtre Sheeting Check dans le cadre d'une étude technico-économique portant sur une excavation profonde.

##### ➤ Module « Sheeting Check » sur GEO5



Le module « Sheeting Check » du logiciel GEO5 correspond au module de vérification du système de soutènement durant une phase donnée de construction. Cette interface permet d'analyser le comportement de la paroi de soutènement sous l'effet des pressions des terres, des surcharges et des conditions hydrogéologiques. Elle regroupe les principales données de calcul, notamment les paramètres géotechniques, les caractéristiques de la structure, les coefficients de sécurité, les conditions d'excavation ainsi que les résultats des vérifications structurales et géotechniques. Cette fenêtre permet également d'évaluer les déplacements de la paroi, les efforts internes, la stabilité globale du système de soutènement et l'interaction sol-structure au cours des différentes phases d'exécution.

L'analyse est effectuée conformément aux normes européennes relatives aux structures géotechniques et aux ouvrages en béton armé.

La modélisation comprend plusieurs phases de construction couvrant l'ensemble du processus d'excavation progressive. La phase initiale de modélisation consiste en la mise en place du modèle géotechnique, intégrant la définition de la géométrie, la stratigraphie, les paramètres mécaniques des couches de sol et les conditions hydrogéologiques du site. Cette phase constitue le socle commun sur lequel repose l'ensemble de l'analyse.

En phase finale, l'excavation atteint sa profondeur maximale de 22,53 m, configuration à partir de laquelle sont réalisées deux vérifications dimensionnantes : une situation statique et une situation sismique.

Les vérifications ont été réalisées selon les Eurocodes suivants :

- Eurocode 2 (EN 1992-1-1) pour le béton armé.
- Eurocode 3 (EN 1993-1-1) pour les éléments métalliques.

#### V.1.2 Paramètres de calcul et coefficients de sécurité :

L'analyse des pressions des terres est réalisée selon :

- La théorie de Coulomb pour la poussée active.
- La méthode de Caquot-Kérisel pour la poussée passive.
- Utilisation de la méthode de l'équilibre limite avec application des coefficients de sécurité (ASD - Allowable Stress Design) pour le calcul géotechnique.

L'action sismique est prise en compte par la méthode pseudo-statique de Mononobe-Okabe.

Les coefficients de sécurité adoptés sont conformes aux recommandations normatives :

**Tableau V. 1 : Les différents coefficients de sécurité dans le logiciel**

| Facteur de sécurité                         | Situation Transitoire (SF) | Situation Sismique (SF) |
|---------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Renversement (SFo)                          | 1.50                       | 1.00                    |
| Résistance au glissement (SFs)              | 1.50                       | 1.00                    |
| Capacité portante (SFb)                     | 1.50                       | 1.00                    |
| Résistance du parement/maille (SFn)         | 1.50                       | 1.00                    |
| Glissement le long du géosynthétique (SFsr) | 1.50                       | 1.00                    |
| Résistance du géosynthétique (SFst)         | 1.50                       | 1.00                    |
| Résistance à l'arrachement (SFpo)           | 1.50                       | 1.00                    |
| Résistance de la connexion (SFcon)          | 1.50                       | 1.00                    |

Le module de réaction horizontal  $K_h$  est déterminé selon la méthode de Schmitt, qui relie le module de réaction aux caractéristiques de déformation œdométrique des couches de sol.

Une pression minimale est appliquée dans le calcul, fixée à  $\sigma_{a \min} = 0.30\sigma_z$ , afin d'éviter des pressions actives irréalistes dans les zones où la cohésion du sol pourrait conduire à des tractions.

## V.1.3 Géométrie et caractéristiques de la structure de soutènement :

La structure étudiée est un rideau de pieux sécants en béton armé assurant le soutènement de l'excavation.

- Longueur totale : 30,00 m
- Diamètre des pieux : 0,80 m
- Entraxe : 1,10 m
- Aire de la section transversale ramenée au mètre linéaire :  $A = 4,57 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{m}$
- Moment d'inertie ramené au mètre linéaire :  $I = 1,83 \times 10^{-2} \text{ m}^4/\text{m}$
- Coefficient de réduction de pression sous la fouille : 1,00

Ces caractéristiques de section sont générées automatiquement par GEO5 en fonction du diamètre et de l'entraxe des pieux, et ramenées à la largeur unitaire pour les calculs en déformation plane.

Une poutre de couronnement est installée à une profondeur de 0,75 m avec un espacement de 1,00 m.

Les conditions aux limites tiennent compte des appuis, rotations et déplacements autorisés.

## V.1.4 Caractéristiques mécaniques des matériaux :

Le béton utilisé est de classe C30/37 :

- Résistance à la compression : 30 MPa
- Module d'élasticité : 33 000 MPa
- Résistance moyenne en traction directe :  $f_{ctm} = 2,90 \text{ MPa}$



- Module de cisaillement :  $G = 13\,750\text{ MPa}$

Les armatures sont en acier B500A :

- Limite d'élasticité :  $500\text{ MPa}$
- Module d'élasticité :  $E_s = 200\,000\text{ MPa}$

Ces caractéristiques permettent la vérification des sollicitations en flexion et cisaillement selon l'Eurocode 2.

## V.1.5 Paramètres géotechniques du terrain :

**Tableau V. 2 : Les paramètres géotechniques**

| Couche  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\Phi$ (°) | C (kPa) | $\nu$ | Edef (MPa) | Type        |
|---------|-------------------------------|------------|---------|-------|------------|-------------|
| Remblai | 17                            | 20         | 0       | 0.30  | 10         | Non cohésif |
| QA      | 17                            | 24         | 30      | 0.30  | 35         | Cohésif     |
| QS      | 18                            | 30         | 10      | 0.30  | 50         | Non cohésif |
| Qm      | 18                            | 22         | 47      | 0.30  | 65         | Cohésif     |
| Qmsg    | 18                            | 26         | 35      | 0.30  | 80         | Cohésif     |

Les paramètres utilisés proviennent des investigations géotechniques du site et permettent de définir le comportement mécanique global du massif de sol.

L'angle de frottement sol-structure  $\delta$  est pris égal aux deux tiers de l'angle de frottement interne  $\phi_{ef}$  pour les sols non cohésifs, conformément aux recommandations de l'Eurocode 7. Les poids volumiques saturés sont compris entre 20 et 21 kN/m<sup>3</sup> selon les couches, et sont mobilisés dans le calcul des pressions interstitielles dès que le niveau de la nappe est atteint.

## V.1.6 Profil lithologique :

**Tableau V. 3 : Profil géologique**

| Couche | Épaisseur (m) | Profondeur (m) | Nature du sol |
|--------|---------------|----------------|---------------|
| 1      | 2.50          | 0.00 – 2.50    | Remblai       |
| 2      | 3.50          | 2.50 – 6.00    | QA            |
| 3      | 1.50          | 6.00 – 7.50    | QS            |
| 4      | 14.00         | 7.50 – 21.50   | Qm            |
| 5      | 13.50         | 21.50 – 35.00  | Qmsg          |

Du point de vue hydrogéologique, le niveau de la nappe phréatique est initialement situé à une profondeur de 15,50 m côté remblai pour les premières phases de la construction. Un rabattement de nappe est ensuite réalisé, portant le niveau piézométrique à 21,50 m de profondeur pour les phases d'excavation les plus profondes, incluant la situation statique et la situation sismique à 22,53 m, afin de réduire les pressions hydrauliques exercées sur la paroi.

## V.1.7 Conditions de terrain et d'excavation :

L'excavation atteint une profondeur de 1,50 m dans la première phase.

L'excavation atteint sa profondeur finale de 22,53 m en phase finale, qui constitue la configuration la plus sollicitante de l'ouvrage, sur laquelle sont conduites la situation statique et la situation sismique.

Le terrain naturel en arrière de la paroi présente une pente de 1 : 2,27, correspondant à un angle d'inclinaison de 23,75°. Cette configuration influe directement sur la distribution des pressions latérales actives exercées sur la paroi. Un remblai d'une hauteur de 0,88 m sur une longueur de 2,00 m est également pris en compte en arrière de la paroi, conformément à la topographie réelle du site.

## V.1.8 Charges et surcharges appliquées :

Une surcharge de chantier uniforme de 15 kN/m<sup>2</sup> est appliquée en surface, à partir d'une abscisse  $x = 2,50$  m en arrière de la paroi, sur une longueur de 4,00 m.

Cette surcharge représente les équipements, matériaux et circulations temporaires sur le chantier.

## V.1.9 Élément particulier de soutènement :

La stabilisation de la paroi est assurée par une combinaison d'éléments de soutènement mis en place progressivement au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation. La configuration complète du système d'étaieement est celle active lors de la situation statique et de la situation sismique à la profondeur finale de 22,53 m. Les détails de cette configuration sont propres à chaque variante et feront l'objet d'une présentation spécifique pour chacune d'elles.

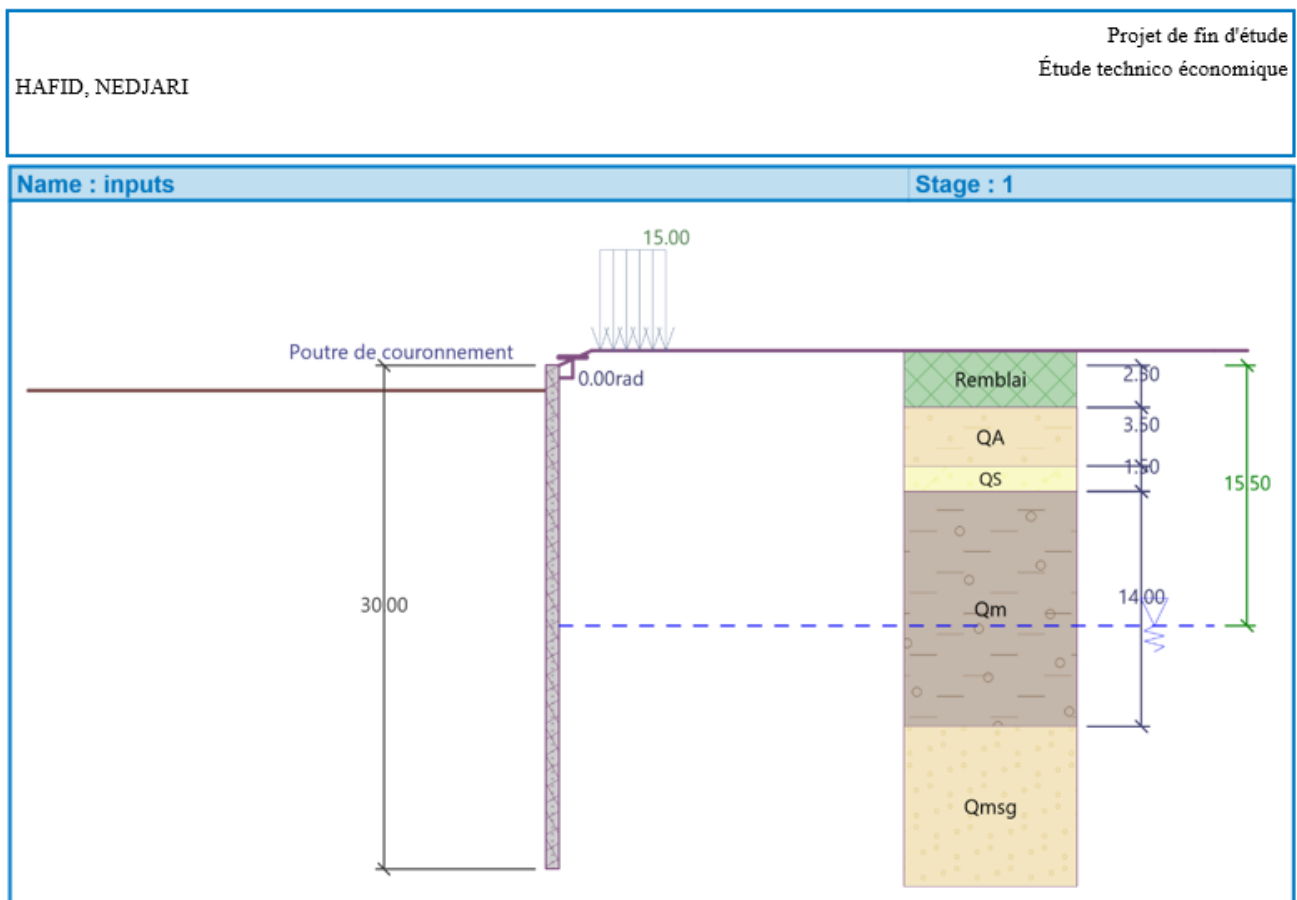


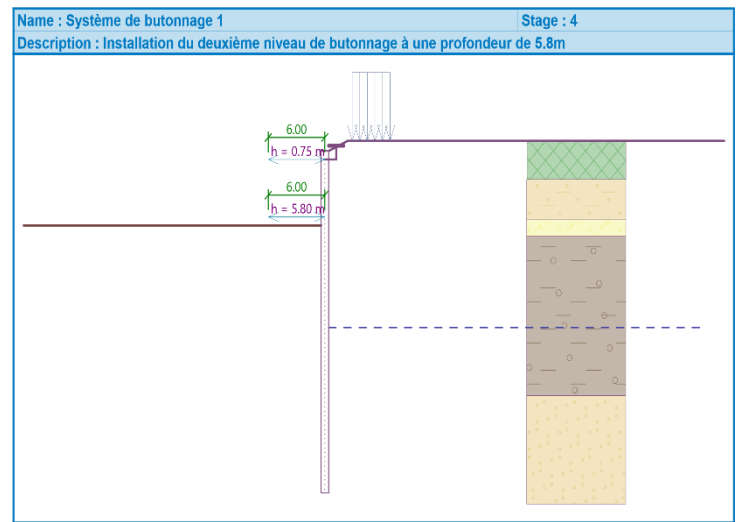
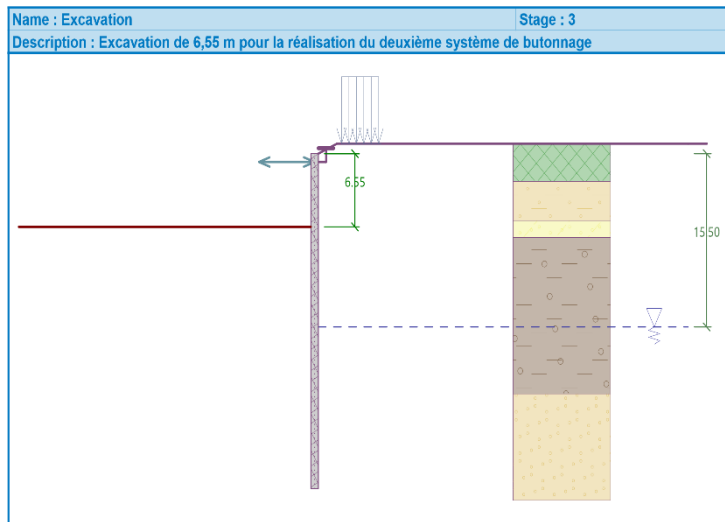
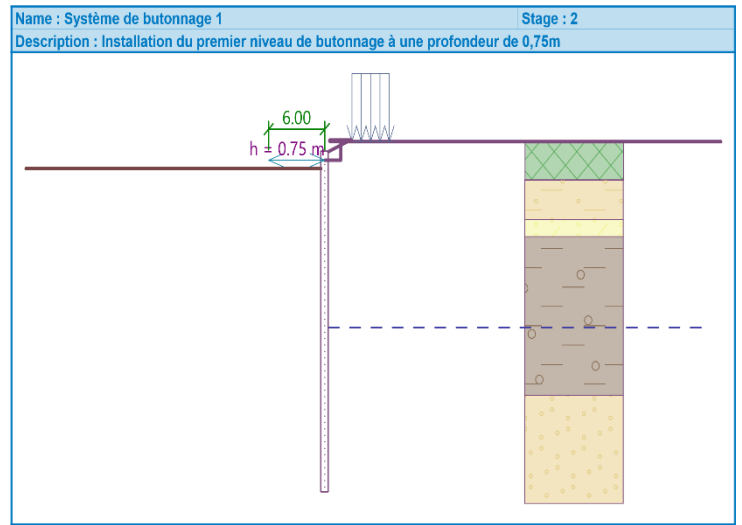
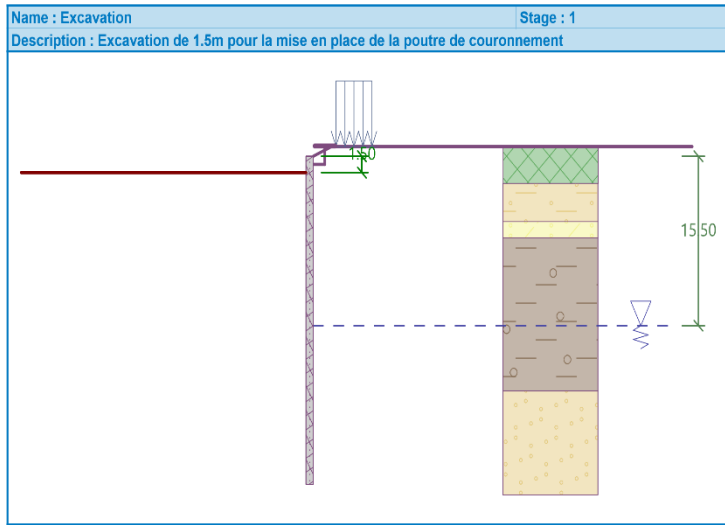
Figure V. 1 : les données principales de modélisation

### V.2 variante projet : système de butonnage (solution du projet)

#### V.2.1 Hypothèses et phasage de modélisation :

La modélisation a été réalisée selon la méthode aux pressions dépendantes (dependent pressures), en situation transitoire pour les phases statiques (1 à 8) et sismique pour la phase 9. Le phasage de modélisation est le suivant :

- Phase 1 : Réalisation de la poutre de couronnement (support en tête à  $z = 0,75$  m), excavation limitée à 1,50 m en front de paroi, sans buton actif.
- Phase 2 : Installation du premier buton Sb 1 à  $z = 0,75$  m (longueur 6,00 m, espacement 7,20 m,  $E = 210\,000$  MPa,  $A = 23900$  mm), excavation maintenue à 1,50 m.
- Phase 3 : Approfondissement de l'excavation à 6,55 m, le buton Sb 1 ( $z = 0,75$  m) est actif.
- Phase 4 : Installation du deuxième buton Sb 1 à  $z = 5,80$  m (longueur 6,00 m, espacement 7,20 m,  $E = 210\,000$  MPa,  $A = 23900$  mm), excavation maintenue à 6,55 m, deux butons actifs.
- Phase 5 : Approfondissement de l'excavation à 14,15 m, deux butons actifs ( $z = 0,75$  m et  $z = 5,80$  m).
- Phase 6 : Installation du troisième buton Sb 6 à  $z = 12,90$  m (longueur 8,70 m, espacement 6,30 m, section double), excavation maintenue à 14,15 m, trois butons actifs.
- Phase 7 : Abaissement de la nappe phréatique de 15,50 m à 21,50 m de profondeur (rabattement de nappe), excavation maintenue à 14,15 m, trois butons actifs.
- Phase 8 : Approfondissement de l'excavation à 22,53 m, trois butons actifs ( $z = 0,75$  m,  $z = 5,80$  m,  $z = 12,90$  m), nappe à 21,50 m.
- Phase 9 : Vérification en situation sismique (Mononobe-Okabe), configuration identique à la phase 8 (excavation à 22,53 m, trois butons actifs, nappe à 21,50 m), avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et une accélération verticale  $K_v = 0,03$ .



# CHAPITRE V : MODÉLISATION NUMÉRIQUE

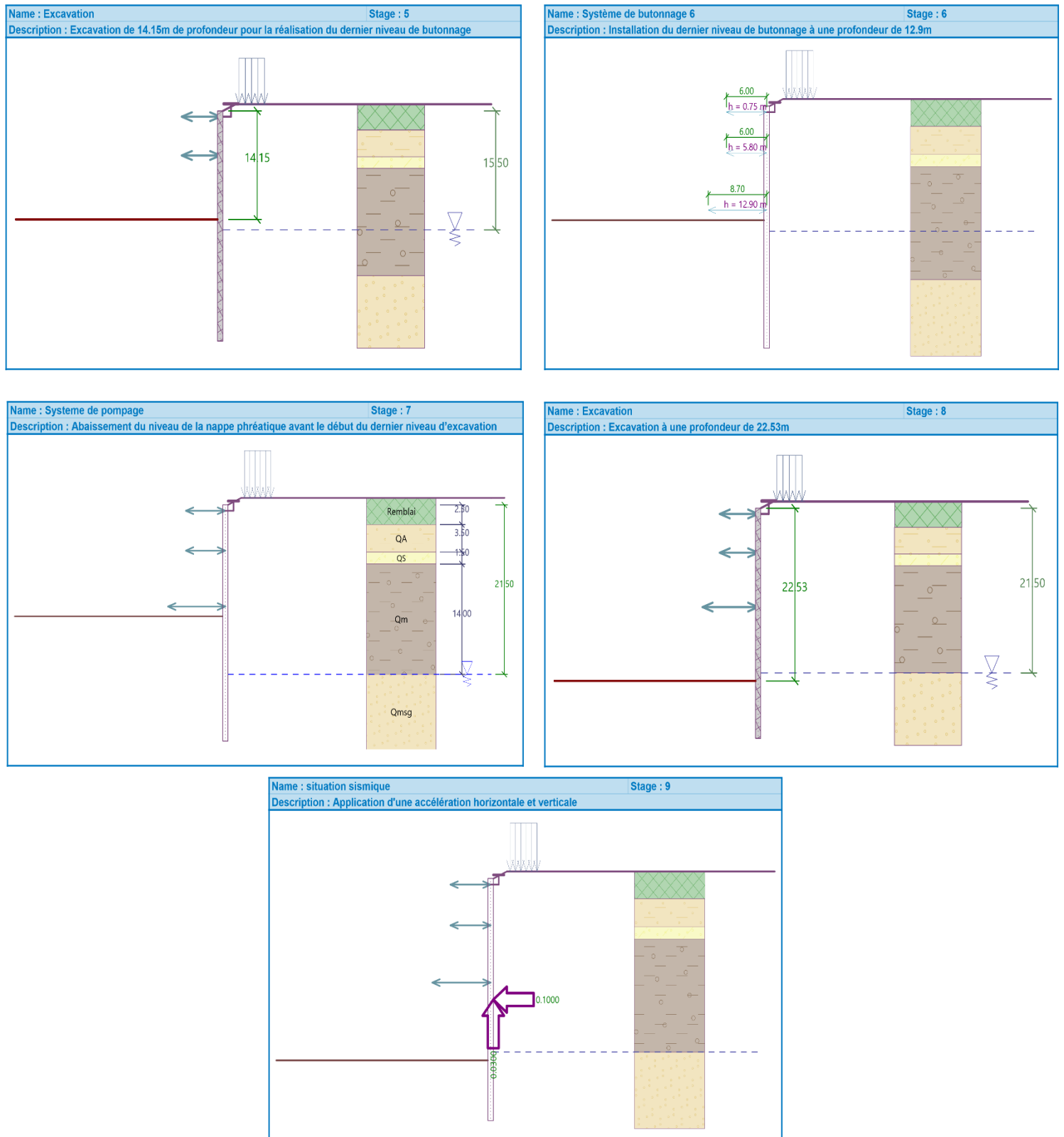


Figure V. 2 : Modélisation du butonnage : phasage de la solution

## V.2.2 Résultats en situation statique

### V.2.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

Cette section présente la distribution du module de réaction du sol  $K_h$  (côté passif et côté actif) ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran à chaque phase de construction.

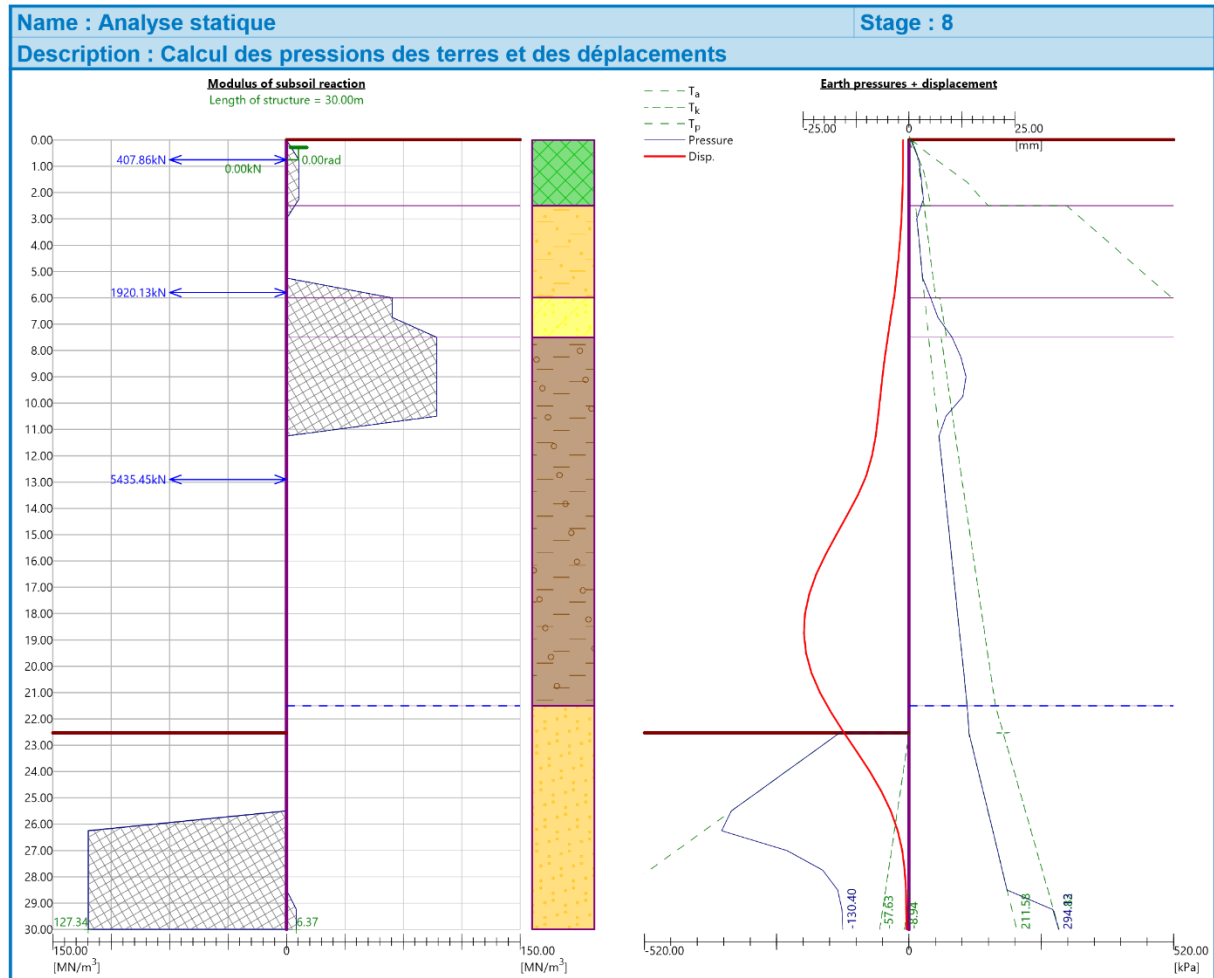


Figure V. 3 : Distribution du module de réaction du sol  $K_h$  en fonction de la profondeur

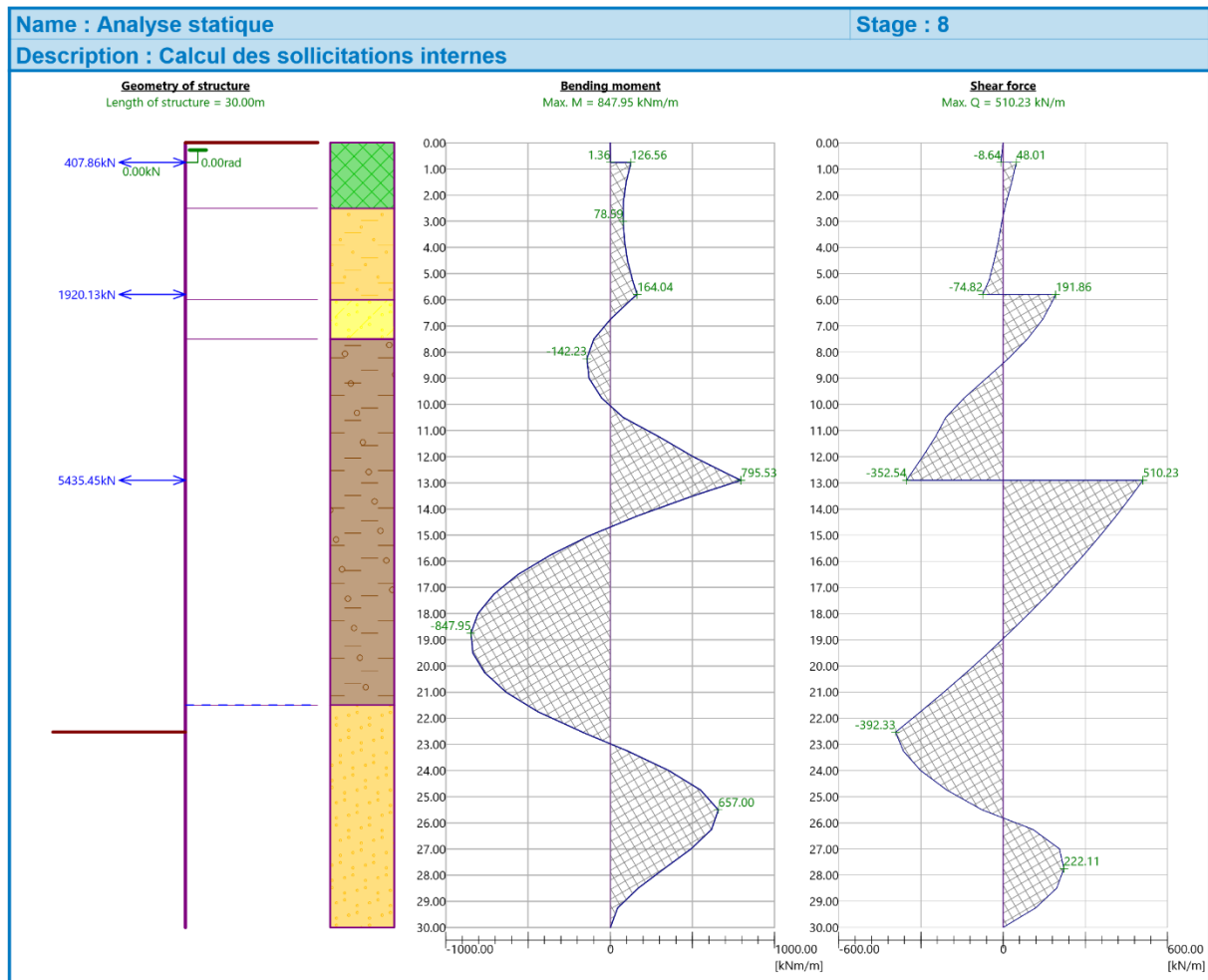
### V.2.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :

Cette section présente l'évolution des efforts internes (moment fléchissant et effort tranchant) dans l'écran au fil des phases de construction. Les valeurs maximales enregistrées en situation statique (phase 8) sont :

- Effort tranchant maximum :  $V = 510,35 \text{ kN/m}$  (soit  $561,39 \text{ kN}$  par pieu)
- Moment fléchissant maximum :  $M = 847,12 \text{ kNm/m}$  (soit  $931,83 \text{ kNm}$  par pieu)

Ces valeurs pilotent le dimensionnement de l'armature longitudinale et transversale des pieux.





**Figure V. 4 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants)**

Le moment fléchissant maximal est atteint à une profondeur de 19,50 m, et l'effort tranchant maximal à 12,90 m (niveau du bouton Sb 6), avec un saut brutal de -353,90 kN/m à +510,35 kN/m traduisant la réaction importante de ce bouton. Les réactions dans les boutons en situation statique finale sont :

- Bouton Sb 1 (z = 0,75 m) : 425,22 kN
- Bouton Sb 1 (z = 5,80 m) : 1 897,16 kN
- Bouton Sb 6 (z = 12,90 m) : 5 444,80 kN

### V.2.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :

Cette section présente les déplacements horizontaux de l'écran à chaque phase. Le déplacement maximal évolue progressivement avec l'avancement de l'excavation :

- Phases 1 à 4 : déplacement maximal  $\leq 1,7$  mm
- Phase 5 : déplacement maximal = 7,5 mm
- Phase 6 : déplacement maximal = 7,5 mm
- Phase 7 : déplacement maximal = 7,5 mm
- Phase 8 : déplacement maximal = 24,9 mm

Ces déplacements restent compatibles avec les exigences de déformation pour ce type d'ouvrage.

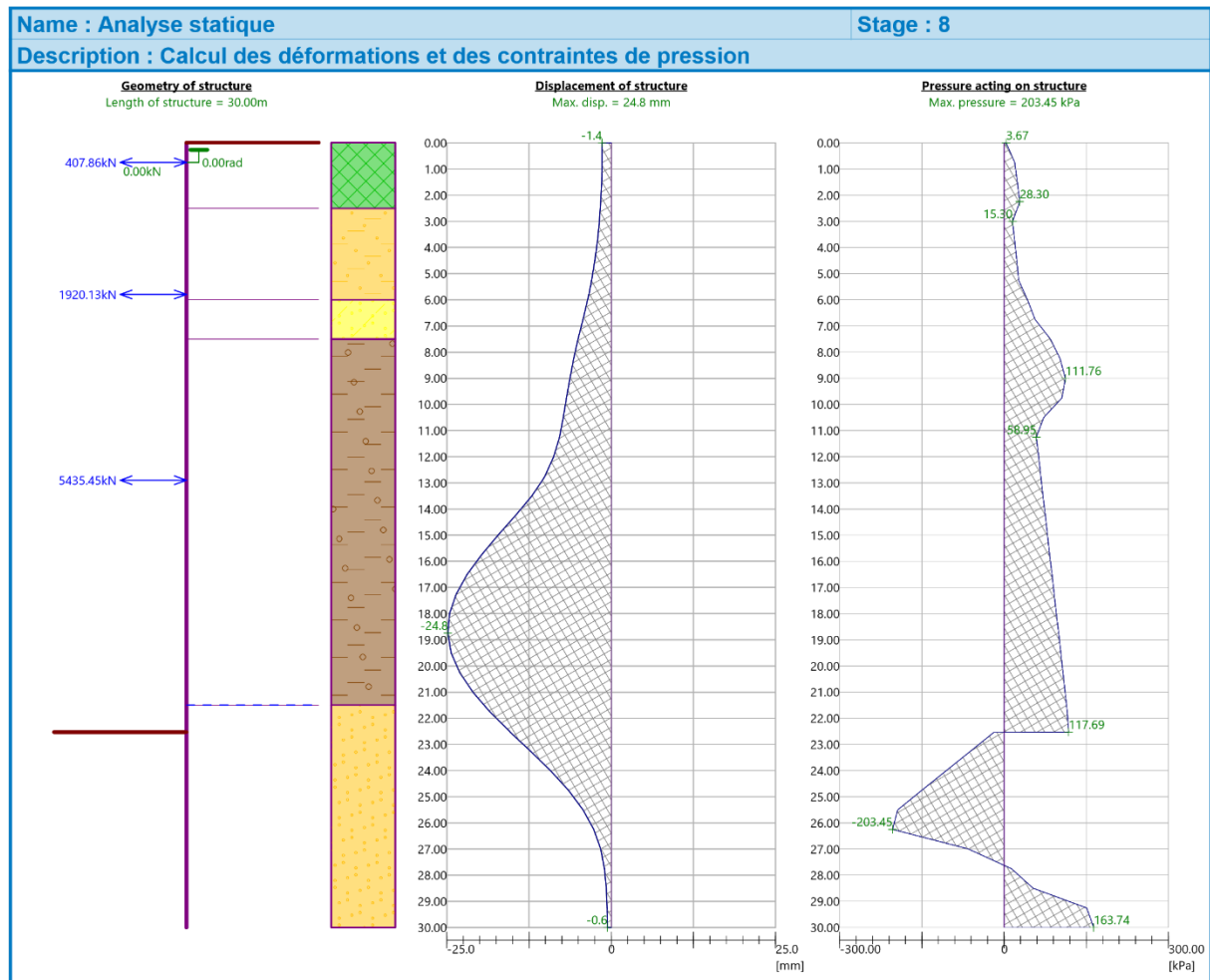


Figure V. 5 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation statique solution avec butonnage

## V.2.2.4 Tassements du sol :

Cette section présente les tassements en surface du terrain derrière l'écran à chaque phase de construction. Le tassement maximal en surface évolue comme suit :

- Phases 1 à 2 :  $\delta_{\max} = 0,3 \text{ mm}$
- Phases 3 à 4 :  $\delta_{\max} = 0,9 \text{ mm}$
- Phases 5 à 6 :  $\delta_{\max} = 4,5 \text{ mm}$
- Phase 7 :  $\delta_{\max} = 4,4 \text{ mm}$
- Phase 8 :  $\delta_{\max} = 17,5 \text{ mm}$  (tassement maximal en  $x \approx 13,19 \text{ m}$  derrière l'écran)

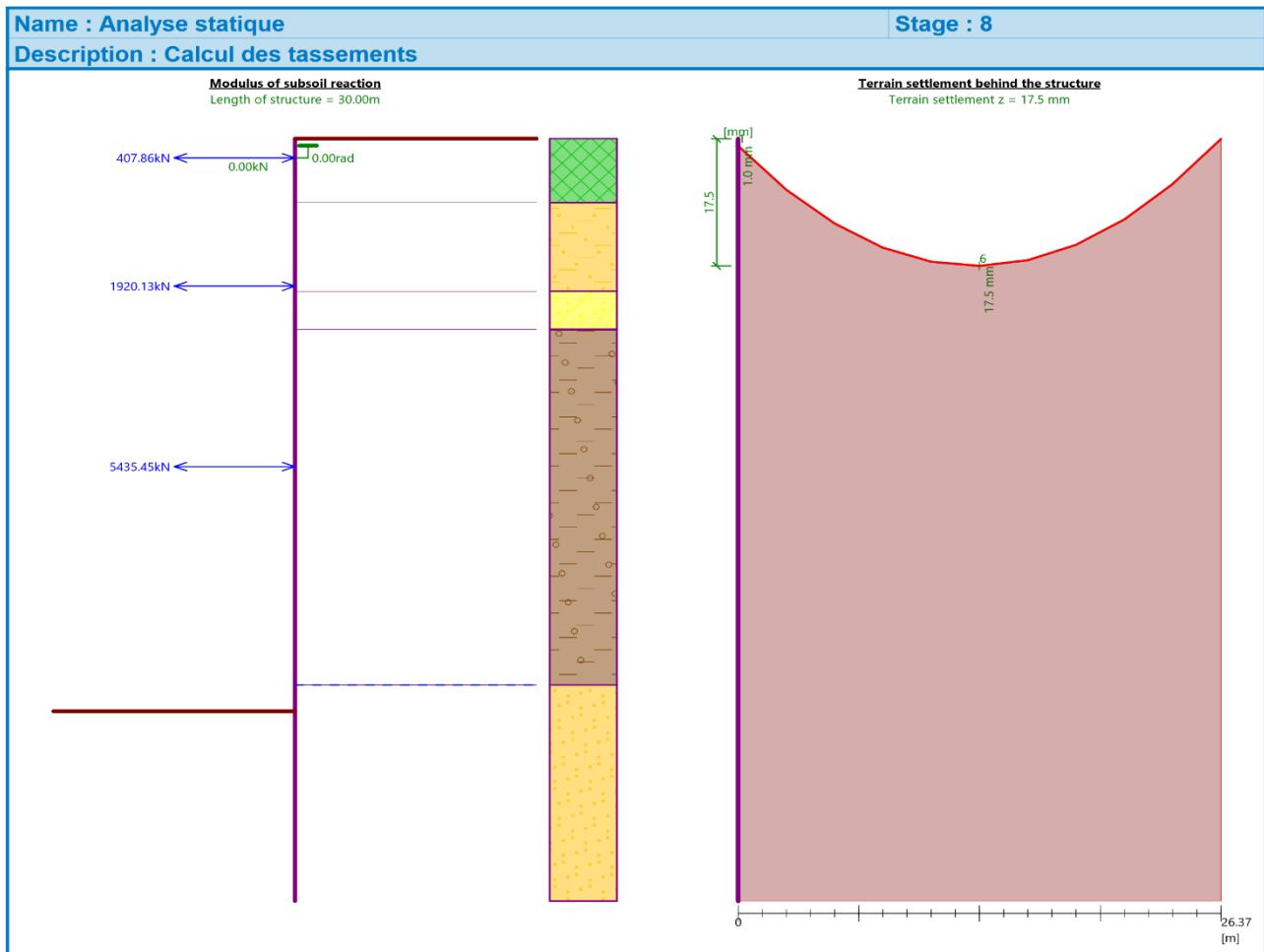


Figure V. 6 : Tassements du sol en surface en situation statique solution avec butonnage

#### V.2.2.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop situation statique :

La vérification de la stabilité globale du talus a été réalisée par la méthode de Bishop (surfaces de glissement circulaires), en situation transitoire, avec un coefficient de sécurité requis  $SF = 1,50$ .

Les paramètres de la surface de glissement critique optimisée sont les suivants :

- ✓ Centre de la surface de glissement :  $x = -5,52 \text{ m}$  ;  $z = 2,12 \text{ m}$
- ✓ Rayon :  $R = 32,61 \text{ m}$
- ✓ Angles :  $\alpha_1 = -40,90^\circ$  ;  $\alpha_2 = 87,82^\circ$
- ✓ Poids total du sol au-dessus de la surface de glissement :  $14\,449,60 \text{ kN/m}$

Les résultats de la vérification sont :

- Somme des forces actives (déstabilisatrices) :  $F_a = 5\,287,10 \text{ kN/m}$
- Somme des forces passives (stabilisatrices) :  $F_p = 9\,183,11 \text{ kN/m}$
- Moment de glissement :  $M_a = 172\,412,35 \text{ kNm/m}$
- Moment résistant :  $M_p = 299\,461,12 \text{ kNm/m}$

Le coefficient de sécurité obtenu est :

$$SF = M_p / M_a = 1,74 > 1,50 = SF \text{ requis}$$

La vérification de la stabilité des talus est SATISFAISANTE.

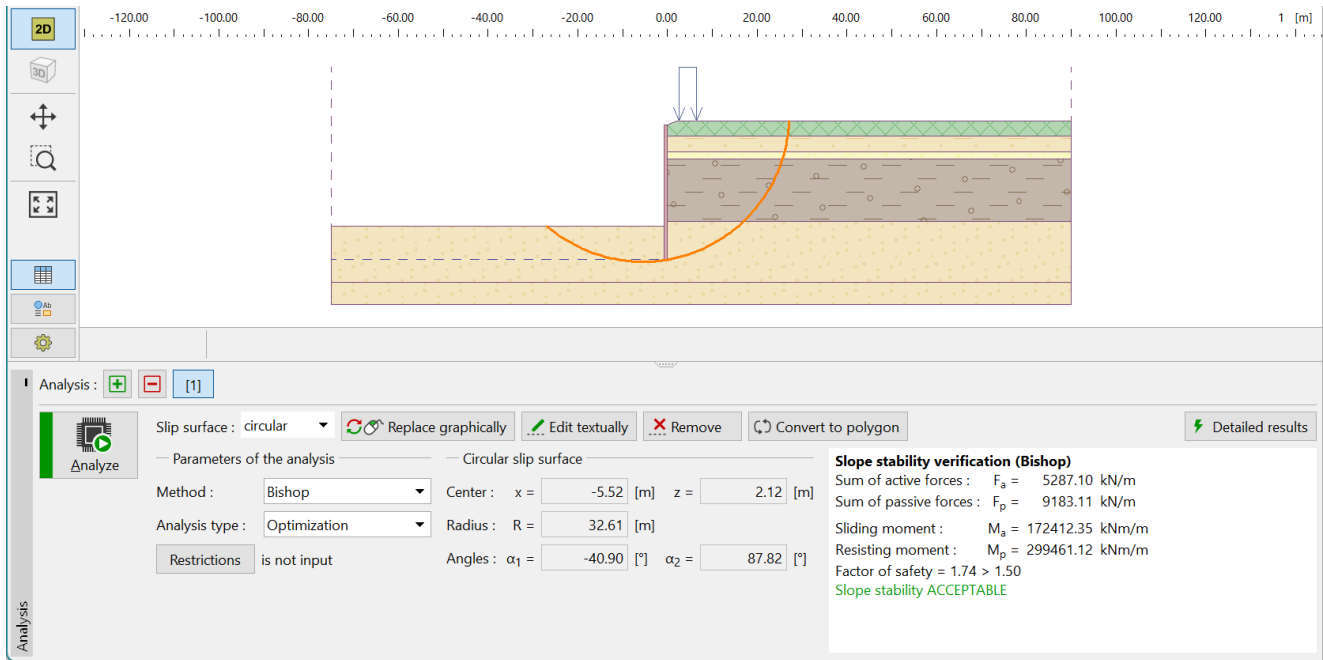


Figure V. 7 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique solution avec butonnage

## V.2.3 Résultats en situation sismique

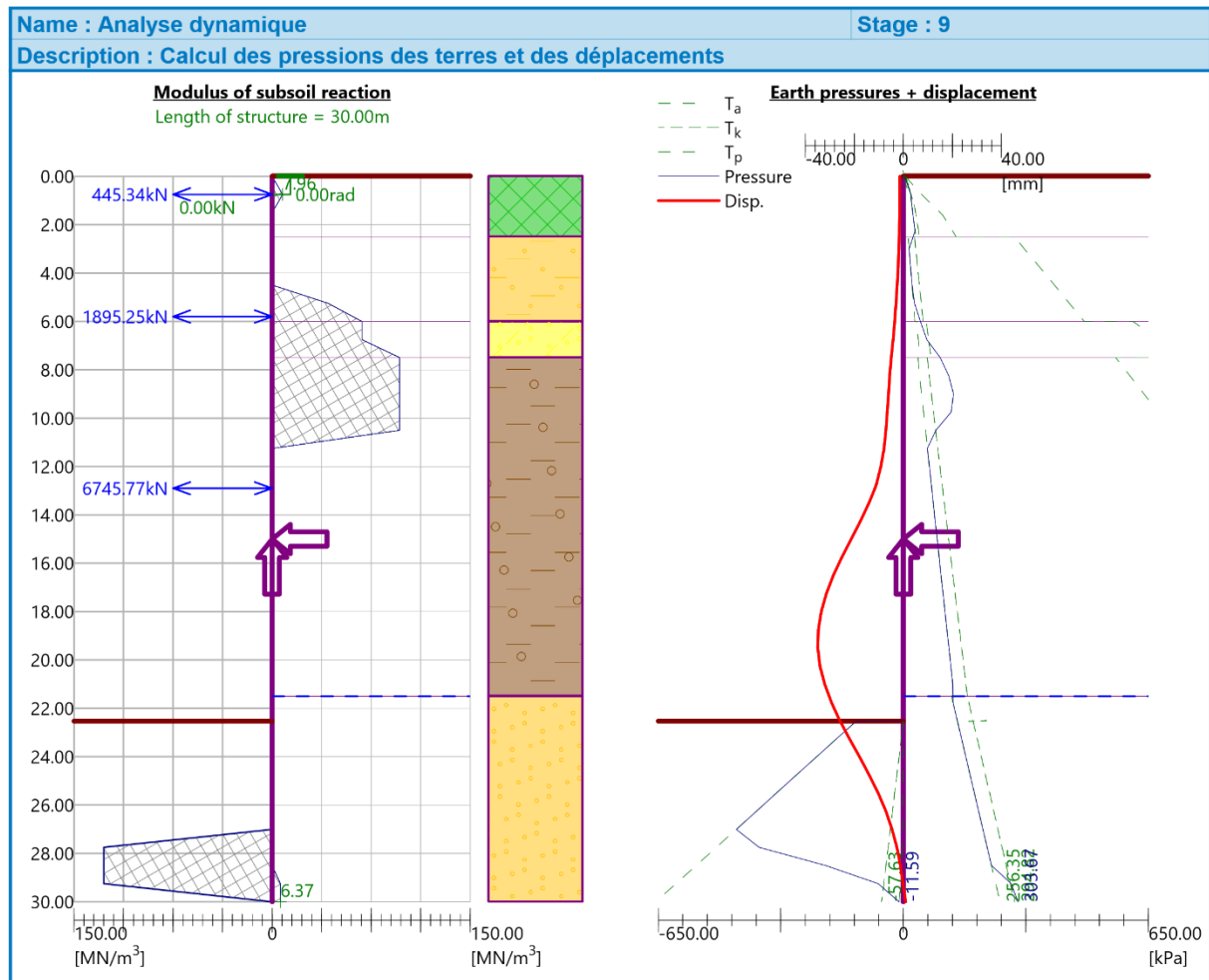
### V.2.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

La distribution du module de réaction du sol  $K_h$  ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran sont présentées pour la phase 9 (situation sismique), correspondant à une configuration identique à la phase 8, excavation de 22,53 m, trois butons actifs ( $z = 0,75$  m,

$z = 5,80$  m et  $z = 12,90$  m) et nappe phréatique à 21,50 m, avec application des accélérations sismiques ( $K_h = 0,10$  ;  $K_v = 0,03$ ) selon la méthode de Mononobe-Okabe.

Par rapport à la situation statique, l'effet sismique induit une augmentation des pressions actives derrière l'écran.

La pression passive maximale mobilisable reste de  $R_{max} = 2\,919,87$  kN/m, avec une pression passive mobilisée de  $R_{mob} = 1\,932,58$  kN/m, conduisant à un coefficient de sécurité de  $SF = 1,51 > 1,50$ , jugé satisfaisant.



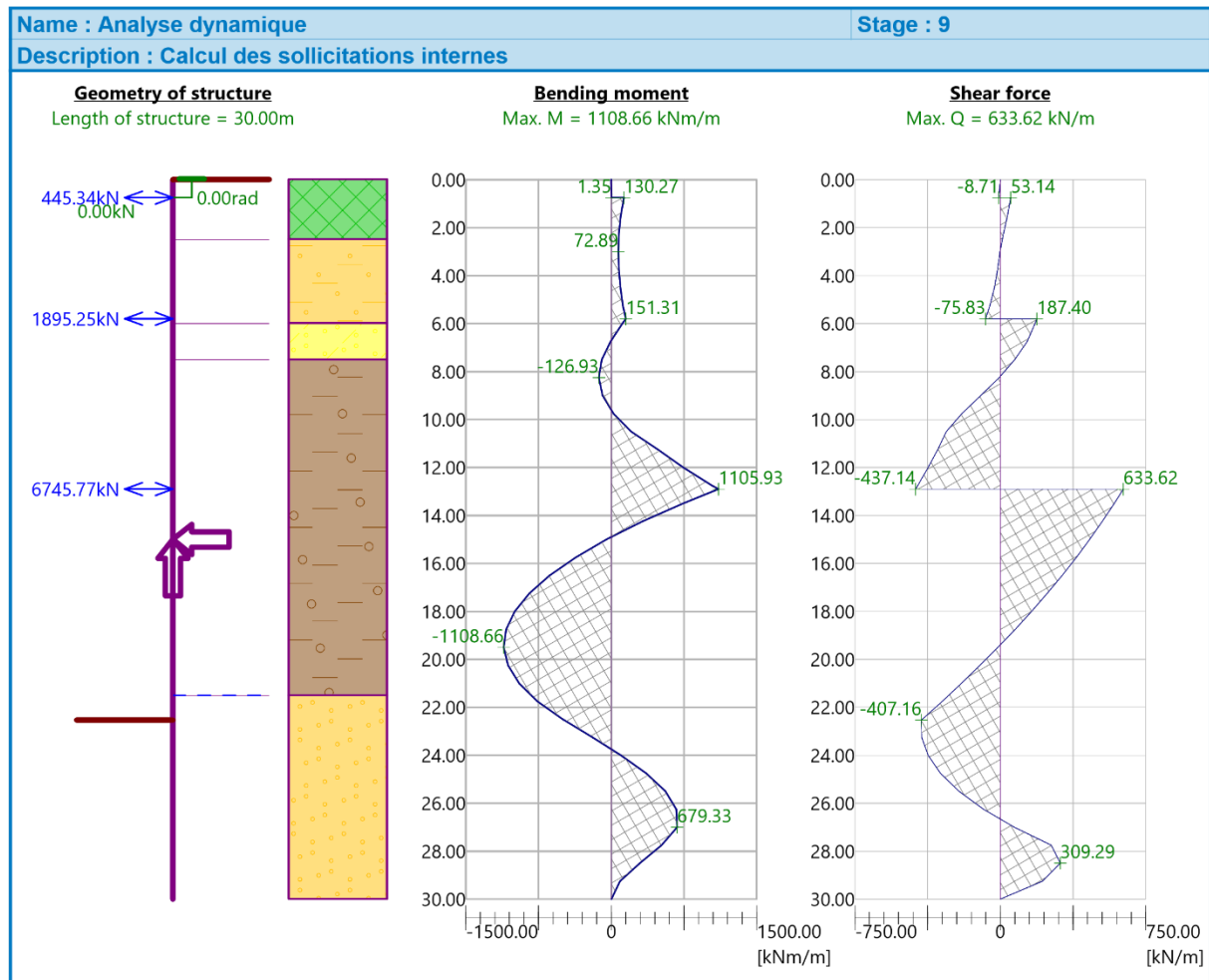
**Figure V. 8 : Distribution du module de réaction  $K_h$  et pressions sur l'écran en situation sismique solution avec butonnage**

En situation sismique (phase 9), les efforts internes dans l'écran sont sensiblement plus élevés qu'en situation statique, en raison de l'inertie des terres et de l'augmentation des poussées sismiques. Les valeurs maximales obtenues sont :

- Effort tranchant maximum :  $V = 633,73 \text{ kN/m}$  (soit  $697,11 \text{ kN}$  par pieu)
- Moment fléchissant maximum :  $M = 1\,107,86 \text{ kNm/m}$  (soit  $1\,218,64 \text{ kNm}$  par pieu)

Le moment fléchissant maximal est atteint à une profondeur de  $19,50 \text{ m}$ , et l'effort tranchant maximal à  $12,90 \text{ m}$  (niveau du buton Sb 6). Les réactions dans les butons en situation sismique sont :

- Buton Sb 1 ( $z = 0,75 \text{ m}$ ) :  $464,43 \text{ kN}$
- Buton Sb 1 ( $z = 5,80 \text{ m}$ ) :  $1\,874,02 \text{ kN}$
- Buton Sb 6 ( $z = 12,90 \text{ m}$ ) :  $6\,755,29 \text{ kN}$



**Figure V.9 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en situation sismique solution avec butonnage**

En situation sismique, les déplacements horizontaux de l'écran sont nettement amplifiés par rapport à la situation statique.

Le déplacement maximal atteint 34,8 mm à une profondeur de 19,50 m, contre 24,9 mm en phase 8.

Le déplacement en tête de paroi reste limité à 1,45 mm. Le profil de déplacement montre un ventre prononcé dans la zone non butonnée entre le buton Sb 6 ( $z = 12,90$  m) et le fond d'excavation ( $z = 22,53$  m), traduisant une sollicitation importante de l'écran dans cette zone sous l'effet des forces sismiques.

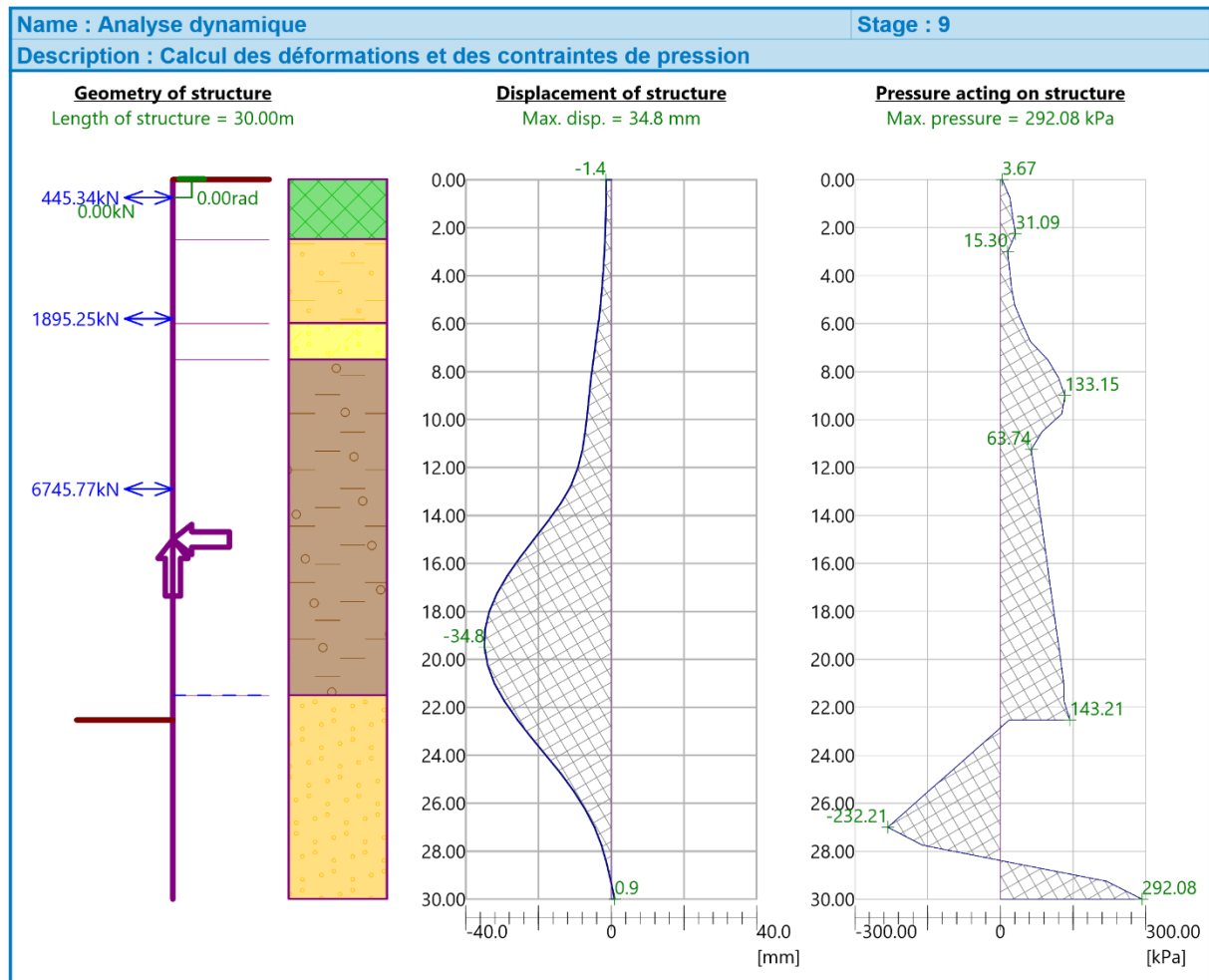


Figure V. 10 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation sismique solution avec butonnage

## V.2.3.4 Tassements du sol :

En situation sismique (phase 9), les tassements en surface du terrain derrière l'écran sont maximaux et atteignent  $\delta_{\max} = 23,8$  mm à environ  $x = 13,19$  m derrière l'écran.



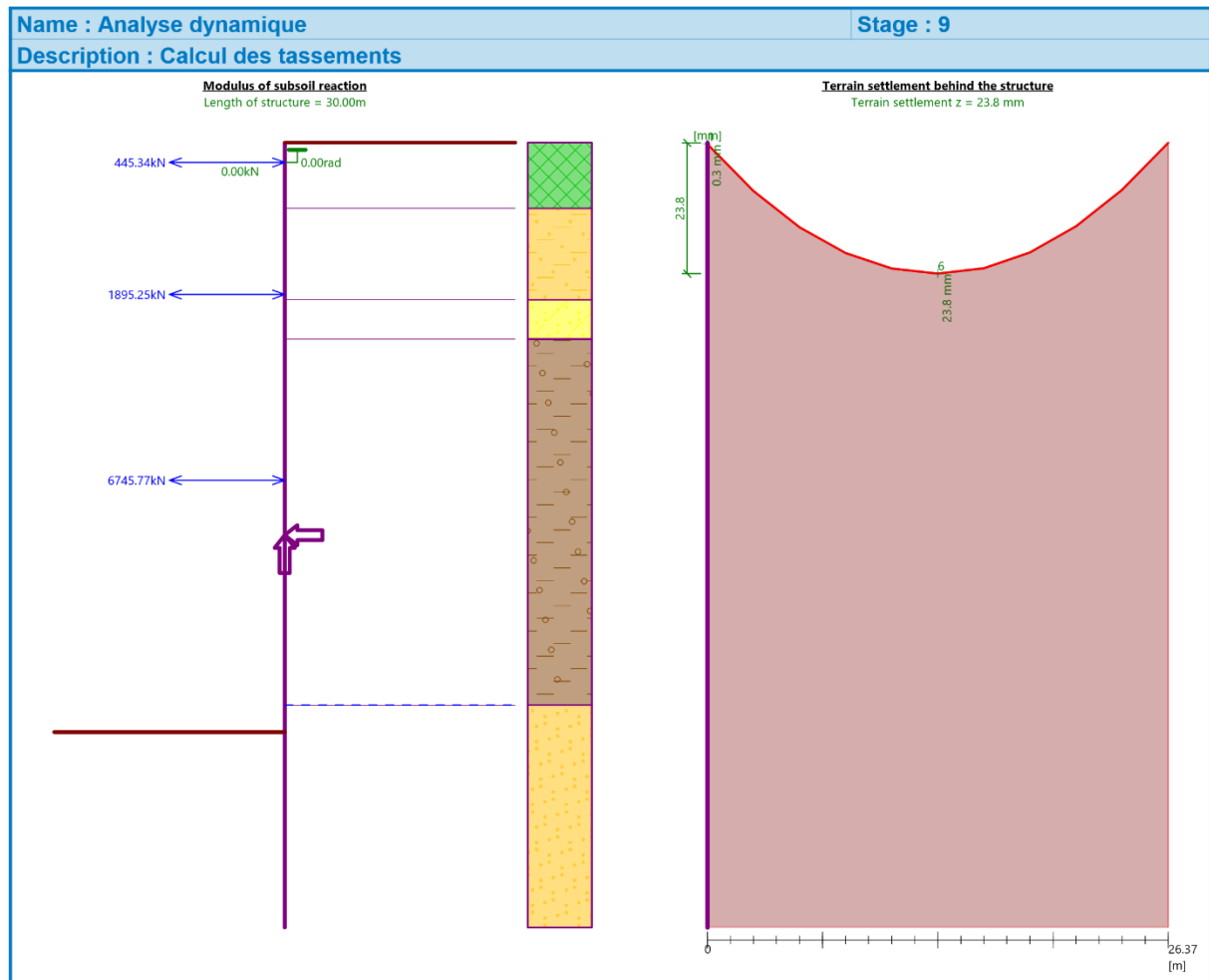


Figure V. 11 : Tassements du sol en surface en situation sismique solution avec butonnage

### V.2.3.5 Vérification de la stabilité des talus par la méthode de Bishop situation sismique :

La vérification en situation sismique est réalisée avec les coefficients d'accélération  $K_h = 0,10$  et  $K_v = 0,03$ , et un coefficient de sécurité requis réduit à  $SF = 1,00$  conformément aux exigences réglementaires en situation sismique.

Les paramètres de la surface de glissement optimisée sont les suivants :

- ✓ Centre de la surface de glissement :  $x = -6,80$  m ;  $z = 7,52$  m
- ✓ Rayon :  $R = 38,12$  m
- ✓ Angles :  $\alpha_1 = -37,97^\circ$  ;  $\alpha_2 = 79,97^\circ$
- ✓ Poids total du sol au-dessus de la surface de glissement :  $15\,829,54$  kN/m

Les résultats de la vérification sont :

- Somme des forces actives (déstabilisatrices) :  $F_a = 6\,437,62$  kN/m
- Somme des forces passives (stabilisatrices) :  $F_p = 9\,559,65$  kN/m
- Moment de glissement :  $M_a = 245\,401,92$  kNm/m
- Moment résistant :  $M_p = 364\,414,00$  kNm/m

Le coefficient de sécurité obtenu est :

$$SF = M_p / M_a = 1,48 > 1,00 = SF \text{ requis}$$

La vérification de la stabilité des talus en situation sismique est SATISFAISANTE.

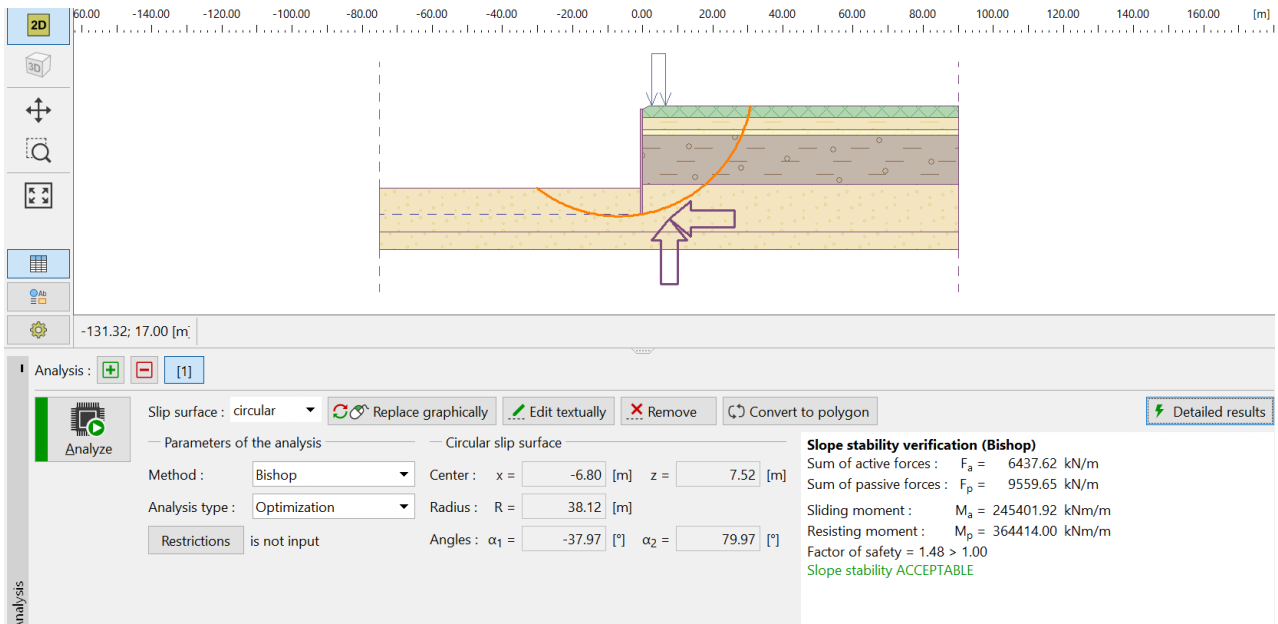


Figure V. 12 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique solution avec butonnage

## V.2.3 Vérification de ferrailage des pieux de l'écran de soutènement :

Le dimensionnement du ferrailage des pieux est réalisé conformément à la norme EN 1992-1-1 (EC2), en prenant en compte l'enveloppe des efforts internes issus de l'ensemble des phases de construction (phases 1 à 9). Le facteur partiel sur les charges appliqué est de 1,00.

Les efforts de dimensionnement maximaux retenus sont :

- Déplacement maximal : 34,8 mm (à z = 19,50 m)
- Moment fléchissant maximal :  $M_{\max} = +1\,107,49$  kNm/m (à z = 12,90 m)
- Moment fléchissant minimal :  $M_{\min} = -1\,107,86$  kNm/m (à z = 19,50 m)
- Effort tranchant maximal :  $V_{\max} = 633,73$  kN/m

Les efforts internes ramenés à la section d'un pieu (espacement a = 1,10 m) sont :

- Moment de calcul :  $M_{Ed} = 1\,218,64$  kNm
- Effort tranchant de calcul :  $V_{Ed} = 697,11$  kN

### V.2.3.1 Vérification à la flexion :

La section de pieu est vérifiée en flexion avec les caractéristiques suivantes :

- ✓ Diamètre du pieu : d = 0,80 m
- ✓ Enrobage : c = 50 mm
- ✓ Armatures longitudinales : 13 barres HA Ø32 mm
- ✓ Type de structure : poutre
- ✓ Taux d'armatures :  $\rho = 1,040\% > \rho_{\min} = 0,151\%$  ✓

La vérification donne :

- Moment sollicitant :  $M_{Ed} = 1\,218,64 \text{ kNm}$
- Moment résistant :  $M_{Rd} = 1\,266,32 \text{ kNm}$

$$M_{Rd} = 1\,266,32 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1\,218,64 \text{ kNm} \checkmark$$

La vérification à la flexion est SATISFAISANTE.

### V.2.3.2 Vérification à l'effort tranchant :

La section de pieu est vérifiée à l'effort tranchant avec les caractéristiques suivantes :

- ✓ Armatures transversales : cadres Ø12 mm, espacement 150 mm
- ✓ Section d'armatures transversales :  $A_{sw} = 2 \times 754,0 = 1\,508,0 \text{ mm}^2$
- ✓ Largeur efficace de la section :  $b_w = 0,70 \text{ m}$
- ✓ Hauteur utile :  $d = 0,64 \text{ m}$

La vérification donne :

- Effort tranchant ultime résistant :  $V_{Rd} = 944,12 \text{ kN}$
- Effort tranchant sollicitant :  $V_{Ed} = 697,11 \text{ kN}$

$$V_{Rd} = 944,12 \text{ kN} > V_{Ed} = 697,11 \text{ kN} \checkmark$$

La vérification à l'effort tranchant est SATISFAISANTE.

### V.2.3.3 Conclusion du dimensionnement :

L'ensemble des vérifications de la section de pieu ( $d = 0,80 \text{ m}$ , espacement  $a = 1,10 \text{ m}$ , béton C30/37, acier B500A) est satisfaisant.

Le ferrailage retenu, composé de 13 barres longitudinales HA Ø32 mm avec des cadres transversaux Ø12 mm espacés de 150 mm, garantit la résistance de l'écran de soutènement vis-à-vis des sollicitations en flexion et en effort tranchant pour l'ensemble des phases de construction, y compris la situation sismique.

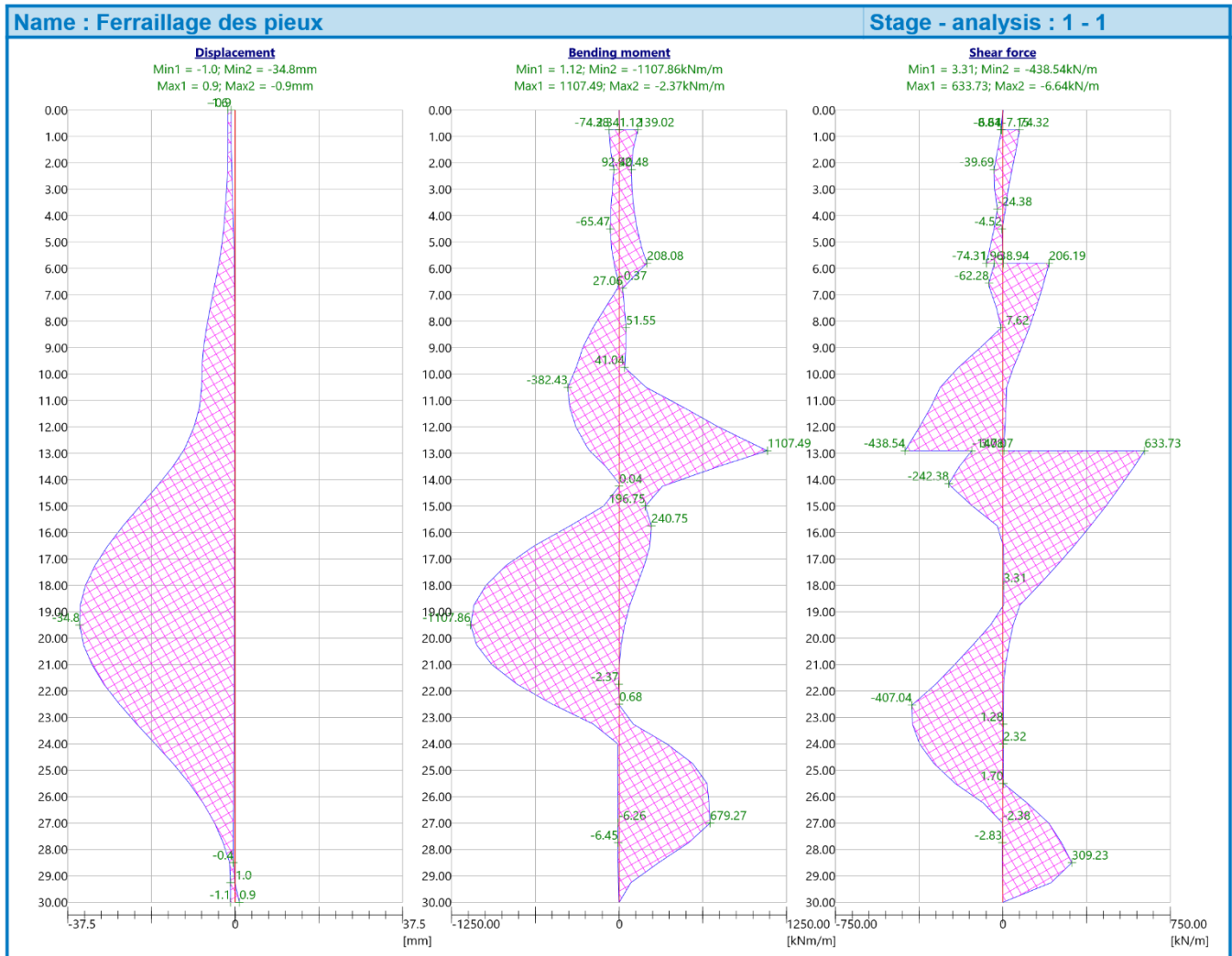


Figure V. 13 : diagramme du dimensionnement solution avec butonnage

## V.2.3 Interprétation des résultats (Solution avec système de butonnage)

### V.2.3.1 Interprétation de la situation statique :

L'analyse des résultats en situation statique, menée de la phase 1 à la phase 8, montre une évolution progressive et cohérente des efforts internes, des déplacements et des tassements au fur et à mesure de l'approfondissement de l'excavation et de la mise en place successive des butons.

#### 1. Évolution des déplacements :

Durant les premières phases (phases 1 à 4), les déplacements horizontaux de l'écran restent très faibles, inférieurs à 1,7 mm, grâce à la faible profondeur d'excavation (1,50 m puis 6,55 m) et à l'efficacité du premier buton Sb 1 installé à  $z = 0,75$  m. À partir de la phase 5, avec l'approfondissement de l'excavation à 14,15 m, les déplacements augmentent sensiblement pour atteindre 7,5 mm, valeur qui se maintient jusqu'à la phase 7. En phase 8, correspondant à l'excavation finale à 22,53 m, le déplacement maximal atteint 24,9 mm à une profondeur de 19,50 m, dans la zone non butonnée entre le buton Sb 6 ( $z = 12,90$  m) et le fond de fouille. Cette évolution confirme que la zone la plus déformable de l'écran est celle située entre le dernier niveau de butonnage et le fond d'excavation, en l'absence de soutènement intermédiaire.

#### 2. Évolution des efforts internes :

Les efforts internes dans l'écran augmentent progressivement avec l'avancement de l'excavation. Le moment fléchissant maximal passe de 73,36 kNm/m en phase 1 à 847,12 kNm/m en phase 8, soit une multiplication par un facteur supérieur à 11.

De même, l'effort tranchant maximal passe de 39,25 kN/m en phase 1 à 510,35 kN/m en phase 8.

Ces valeurs sont largement pilotées par la réaction du buton Sb 6 ( $z = 12,90$  m), dont la force de réaction atteint 5 444,80 kN en phase 8, traduisant le rôle déterminant de ce buton dans l'équilibre de l'écran à grande profondeur d'excavation.

### 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface du terrain derrière l'écran restent négligeables durant les premières phases ( $\delta_{\max} = 0,3$  mm en phases 1 et 2).

Ils augmentent progressivement pour atteindre 4,5 mm en phases 5 et 6, puis 17,1 mm en phase 8, avec un maximum localisé à environ 13,19 m derrière l'écran.

Cette distribution en cloche des tassements est caractéristique d'une excavation profonde soutenue par écran, où les déformations de l'écran induisent un affaissement du massif de sol adjacent. Les tassements obtenus restent dans des limites acceptables au regard de la profondeur d'excavation de 22,53 m.

### 4. Stabilité globale :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,74$ , nettement supérieur au seuil requis de 1,50.

#### V.2.3.2 Interprétation de la situation sismique :

La phase 9 correspond à la vérification de l'ouvrage sous sollicitation sismique, avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et d'une accélération verticale  $K_v = 0,03$ , selon la méthode de Mononobe-Okabe, dans la configuration de la phase 8 (excavation à 22,53 m, trois butons actifs, nappe à 21,50 m).

#### 1. Évolution des déplacements :

Le déplacement maximal de l'écran passe de 24,9 mm en situation statique à 34,8 mm en situation sismique, soit une augmentation de +39,8 %. Ce déplacement reste localisé à la profondeur de 19,50 m, dans la zone non butonnée entre le buton Sb 6 et le fond d'excavation. Bien que cette valeur soit plus élevée, elle reste compatible avec le comportement attendu d'un écran de soutènement en béton armé soumis à un séisme de calcul.

#### 2. Évolution des efforts internes :

Le séisme induit une augmentation significative de l'ensemble des sollicitations par rapport à la situation statique.

Le moment fléchissant maximal passe de 847,12 kNm/m (phase 8) à 1 107,86 kNm/m (phase 9), soit une augmentation de +30,9 %. L'effort tranchant maximal passe de 510,35 kN/m à 633,73 kN/m, soit une augmentation de +24,2 %.

Ces augmentations sont directement liées à l'accroissement des poussées sismiques des terres et à l'inertie du massif de sol mobilisé lors du séisme. La réaction du buton Sb 6 ( $z = 12,90$  m) atteint 6 755,29 kN en situation sismique, contre 5 444,80 kN en statique, confirmant la concentration des efforts sur ce niveau de butonnage critique.

#### 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface passent de 17,1 mm en situation statique à 23,8 mm en situation sismique, soit une augmentation de +39,2 %, avec un maximum toujours localisé à  $x \approx 13,19$  m derrière l'écran.

Cette amplification est attendue et traduit l'effet dynamique du séisme sur le massif de sol adjacent à l'écran.

### 4. Stabilité globale :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,48$ , supérieur au seuil requis réduit de 1,00 applicable en situation sismique.

La surface de glissement critique présente un rayon plus grand ( $R = 38,12$  m contre 32,61 m en statique) et un centre décalé ( $x = -6,80$  m ;  $z = 7,52$  m), traduisant une mobilisation plus profonde du massif sous l'effet des forces sismiques.

Malgré l'augmentation des forces déstabilisatrices ( $F_a = 6\,437,62$  kN/m contre 5 287,10 kN/m en statique), la résistance du massif reste suffisante pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

### V.2.3.3 Conclusion d'interprétation :

L'analyse comparative des résultats en situations statique et sismique permet de dégager les conclusions suivantes :

- La solution avec système de butonnage assure une bonne maîtrise des déformations et des efforts internes de l'écran tout au long du phasage de construction. Le système de trois butons (Sb 1 à  $z = 0,75$  m, Sb 1 à  $z = 5,80$  m et Sb 6 à  $z = 12,90$  m) permet de limiter efficacement les déplacements horizontaux et de redistribuer les efforts dans l'écran. Le buton Sb 6, positionné à 12,90 m de profondeur, joue un rôle prépondérant dans l'équilibre global de l'ouvrage, en reprenant l'essentiel des efforts générés par la grande profondeur d'excavation.
- Le ferrailage retenu pour les pieux (13 barres HA Ø32 mm en armatures longitudinales et cadres Ø12 mm espacés de 150 mm) satisfait aux vérifications à la flexion et à l'effort tranchant pour l'ensemble des phases, y compris en situation sismique, avec des marges de sécurité suffisantes ( $M_{Rd} = 1\,266,32$  kNm  $>$   $M_{Ed} = 1\,218,64$  kNm ,  $V_{Rd} = 944,12$  kN  $>$   $V_{Ed} = 697,11$  kN).
- Enfin, la stabilité globale de l'ouvrage est assurée dans les deux situations, avec des coefficients de sécurité de  $SF = 1,74$  en statique et  $SF = 1,48$  en sismique, tous deux supérieurs aux valeurs requises respectives de 1,50 et 1,00. La solution avec système de butonnage est donc techniquement validée pour ce projet.

### V.3 Variante 1 : solution avec tirants d'ancrage

#### V.3.1 Hypothèses et phasage de modélisation :

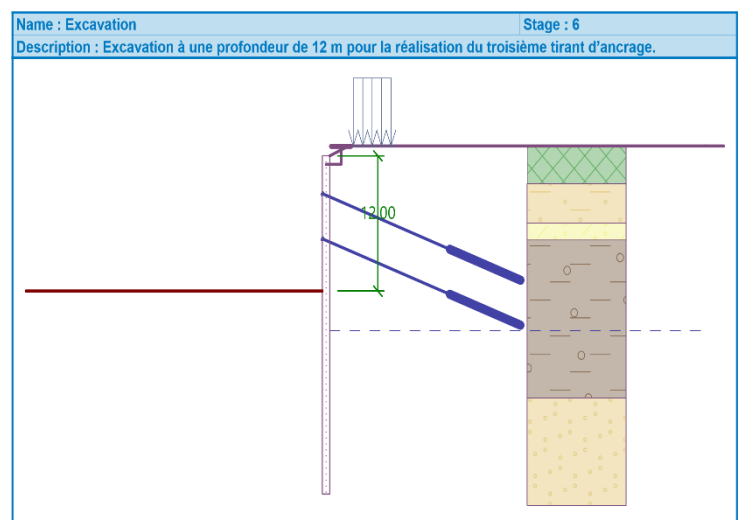
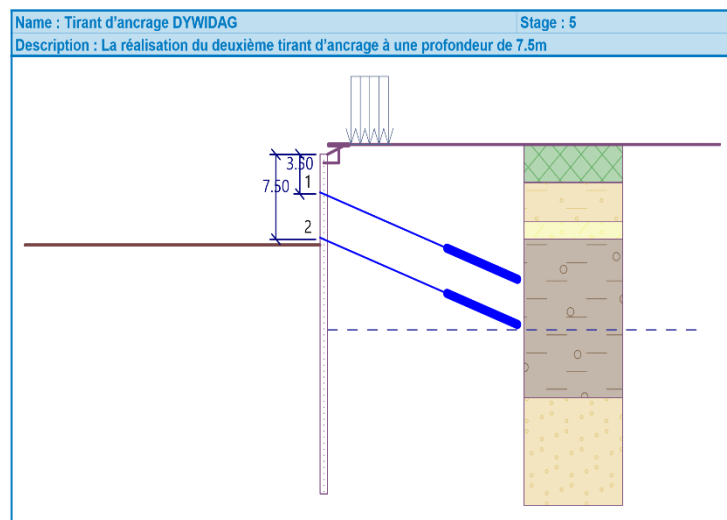
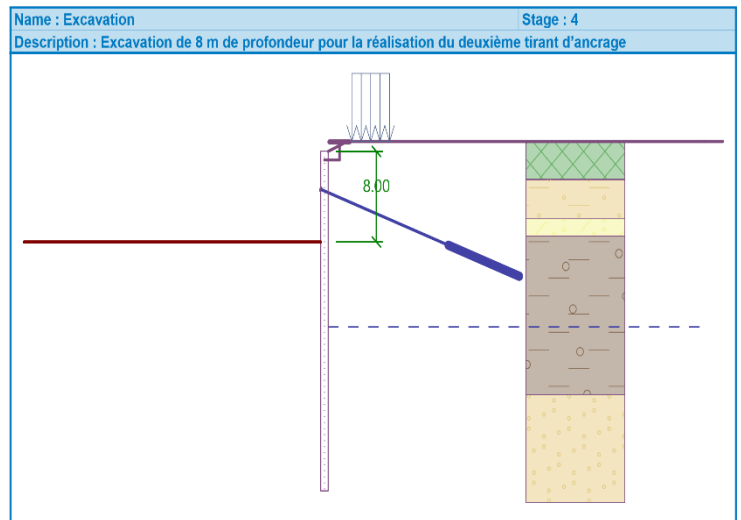
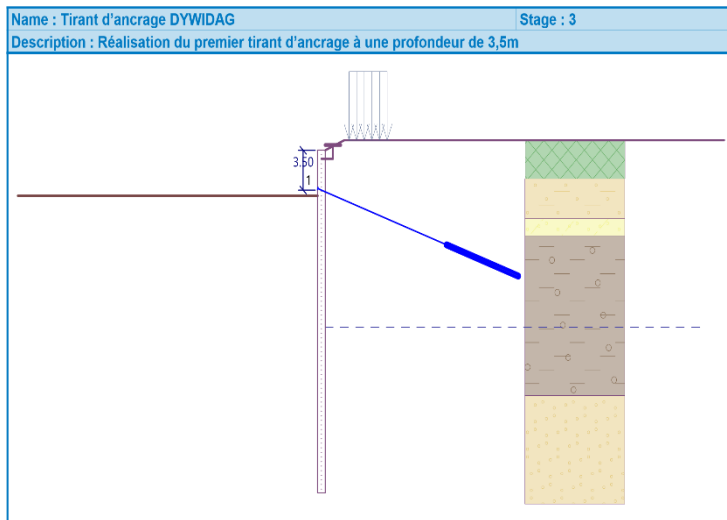
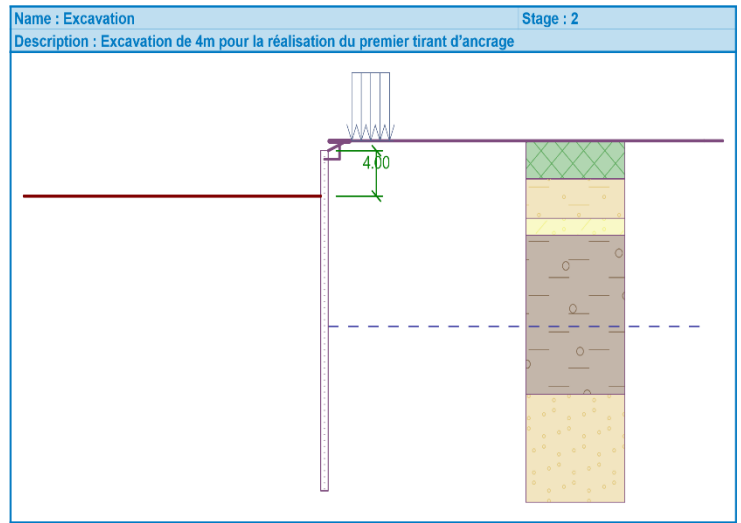
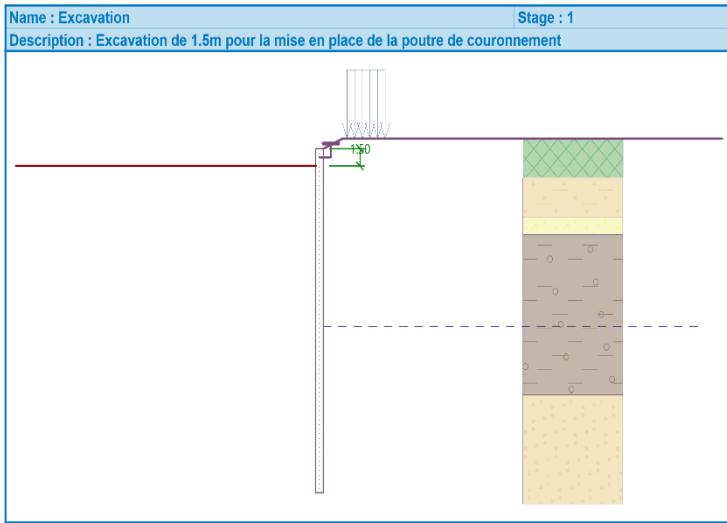
La modélisation a été réalisée selon la méthode aux pressions dépendantes (dependent pressures), en situation transitoire pour les phases statiques (1 à 12) et sismique pour la phase 13.

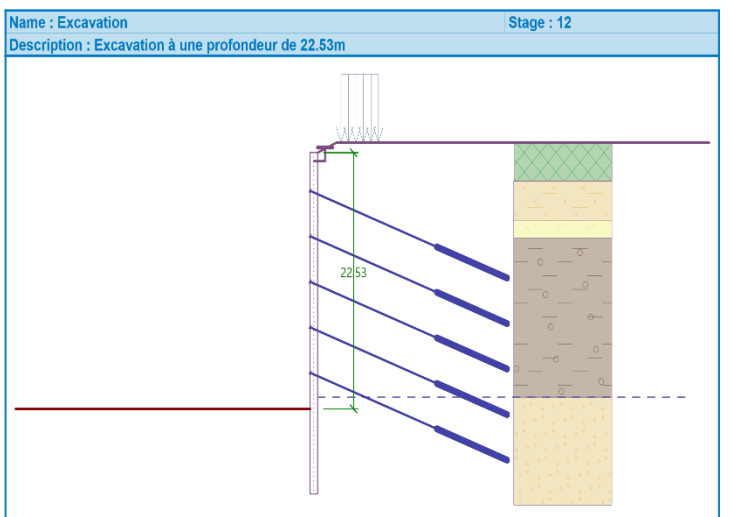
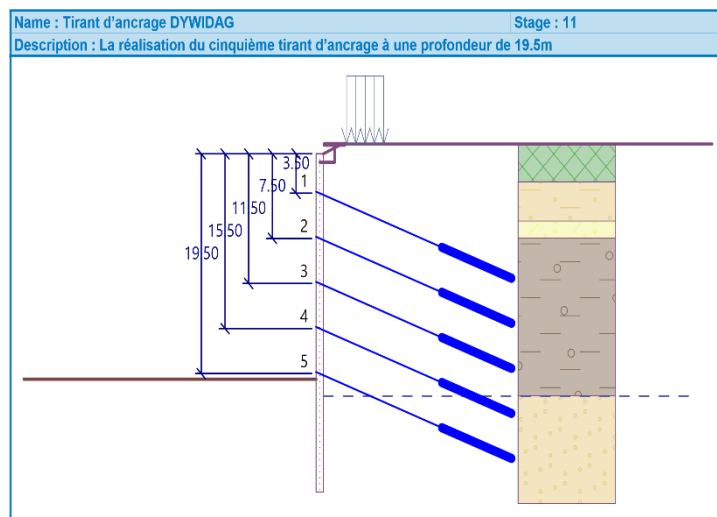
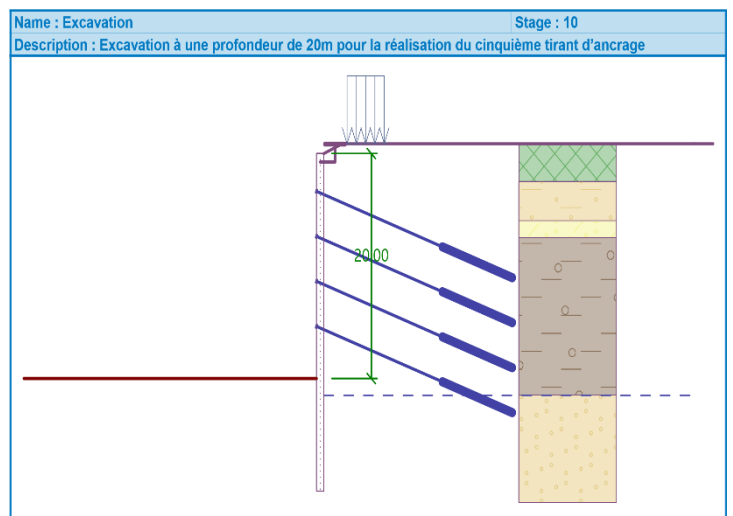
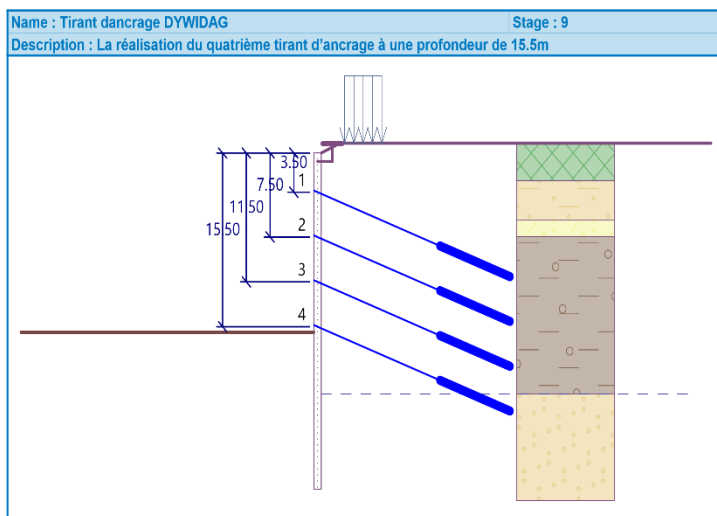
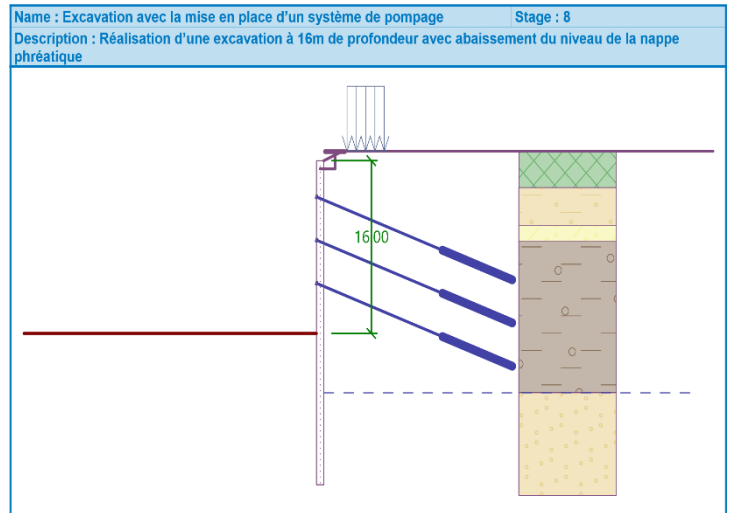
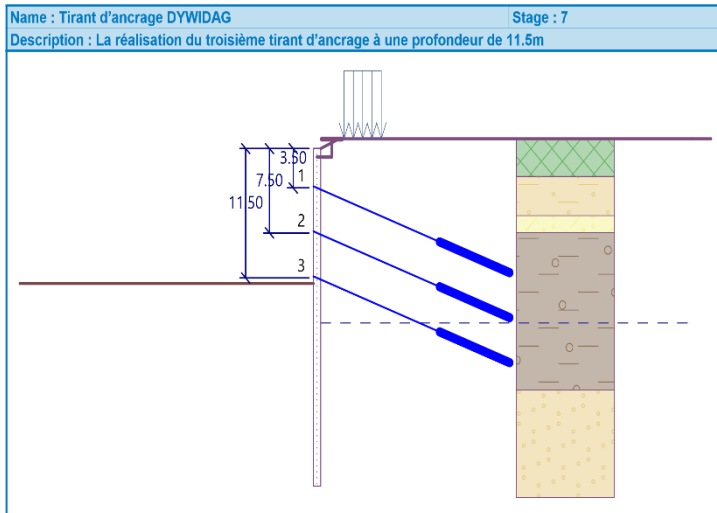
Les tirants d'ancrage utilisés sont de type DYWIDAG temporaire 0,6" St 1860 MPa, constitués de 6 torons de section  $A_1 = 140 \text{ mm}^2$  chacun, avec une longueur libre de 14,00 m, une longueur de scellement de 8,00 m, une inclinaison de  $20^\circ$  et un espacement de 1,10 m.

Le phasage de modélisation est le suivant :

- Phase 1 : Réalisation de la poutre de couronnement (support en tête à  $z = 0,75 \text{ m}$ ), excavation limitée à 1,50 m en front de paroi, nappe phréatique à 15,50 m, sans tirant actif.
- Phase 2 : Approfondissement de l'excavation à 4,00 m, poutre de couronnement maintenue, aucun tirant actif.
- Phase 3 : Installation du premier tirant d'ancrage à  $z = 3,50 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 30 kN, excavation maintenue à 4,00 m.
- Phase 4 : Approfondissement de l'excavation à 8,00 m, un tirant actif.
- Phase 5 : Installation du deuxième tirant d'ancrage à  $z = 7,50 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 150 kN, excavation maintenue à 8,00 m, deux tirants actifs.
- Phase 6 : Approfondissement de l'excavation à 12,00 m, deux tirants actifs.
- Phase 7 : Installation du troisième tirant d'ancrage à  $z = 11,50 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 150 kN, excavation maintenue à 12,00 m, trois tirants actifs.
- Phase 8 : Approfondissement de l'excavation à 16,00 m avec abaissement de la nappe phréatique à 21,50 m, trois tirants actifs.
- Phase 9 : Installation du quatrième tirant d'ancrage à  $z = 15,50 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 150 kN, excavation maintenue à 16,00 m, quatre tirants actifs.
- Phase 10 : Approfondissement de l'excavation à 20,00 m, quatre tirants actifs.
- Phase 11 : Installation du cinquième tirant d'ancrage à  $z = 19,50 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 150 kN, excavation maintenue à 20,00 m, cinq tirants actifs.
- Phase 12 : Approfondissement de l'excavation à 22,53 m (excavation finale), cinq tirants actifs, nappe à 21,50 m.
- Phase 13 : Vérification en situation sismique (Mononobe-Okabe), configuration identique à la phase 12 (excavation à 22,53 m, cinq tirants actifs, nappe à 21,50 m), avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et une accélération verticale  $K_v = 0,03$ .







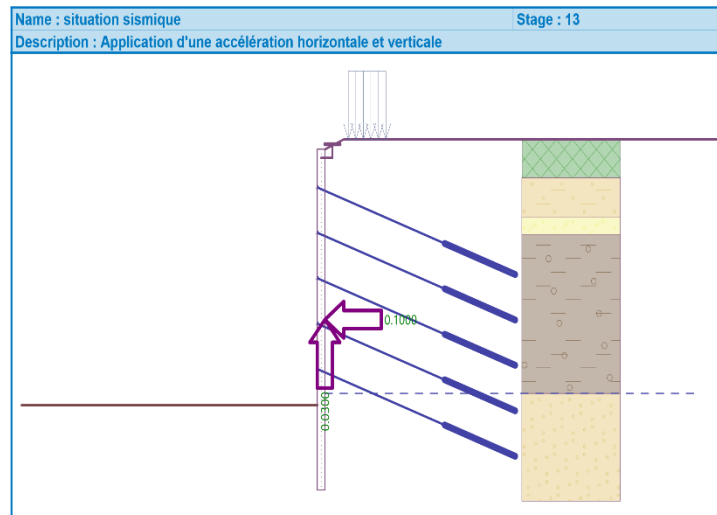


Figure V. 14 : Phaseage de la solution avec tirants d'ancrage

## V.3.2 Résultats en situation statique

### V.3.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

La distribution du module de réaction du sol  $K_h$  ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran sont présentées pour la phase 12 (situation statique finale), correspondant à une excavation de 22,53 m de profondeur avec cinq tirants actifs et la nappe phréatique abaissée à 21,50 m.

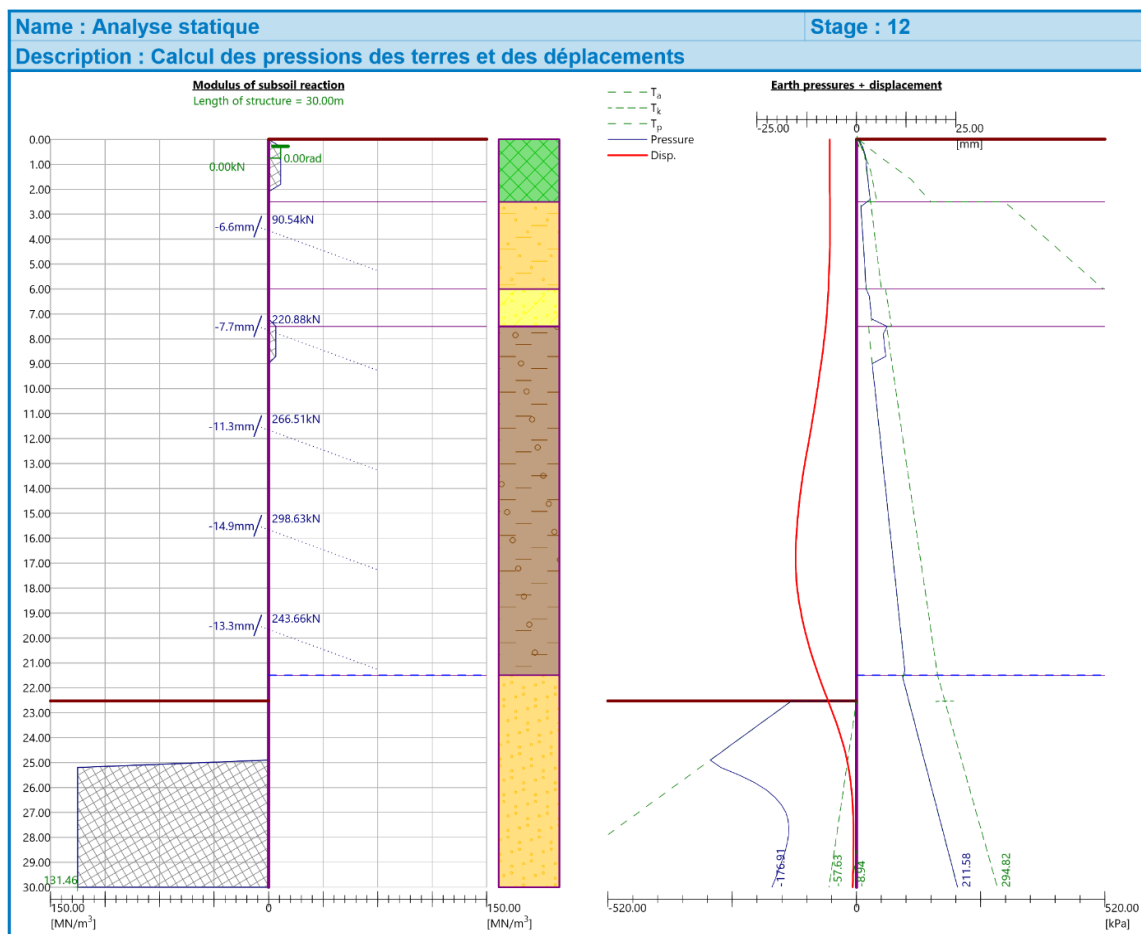
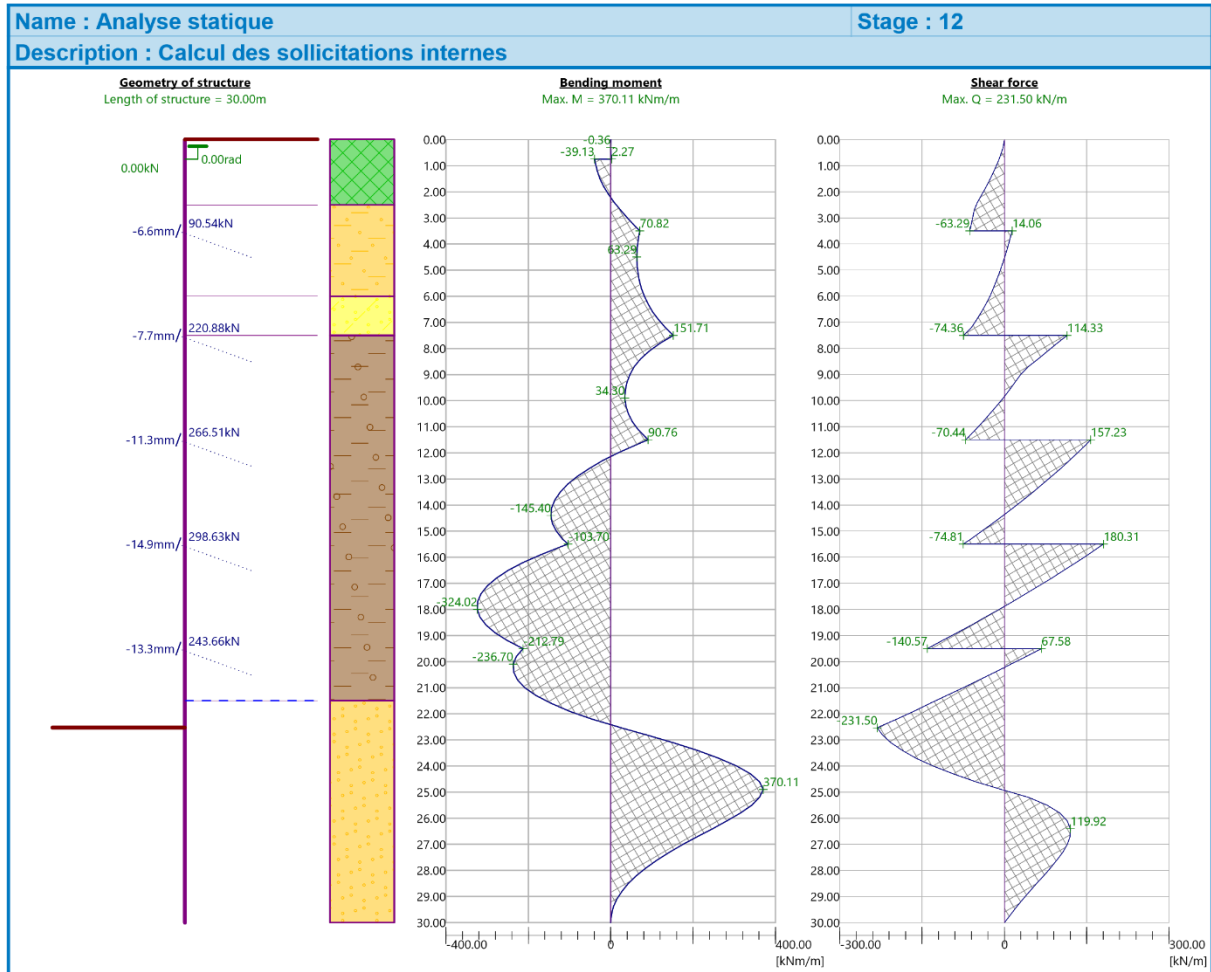


Figure V.15 : Distribution du module de réaction  $K_h$  et pressions sur l'écran en situation statique – solution avec tirants d'ancrage

## V.3.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :

En situation statique finale (phase 12), les efforts internes maximaux dans l'écran sont les suivants :

- Effort tranchant maximum :  $V = 231,50 \text{ kN/m}$  (soit  $254,65 \text{ kN}$  par pieu)
- Moment fléchissant maximum :  $M = 370,11 \text{ kNm/m}$  (soit  $407,12 \text{ kNm}$  par pieu)



**Figure V.16 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en situation statique – solution avec tirants d'ancrage**

Le moment fléchissant maximal est atteint dans la zone comprise entre les tirants à  $z = 15,50 \text{ m}$  et  $z = 19,50 \text{ m}$ , traduisant une flexion importante dans la partie inférieure de l'écran en phase d'excavation finale. Les forces dans les tirants en phase 12 sont :

- Tirant 1 ( $z = 3,50 \text{ m}$ ) :  $90,54 \text{ kN}$
- Tirant 2 ( $z = 7,50 \text{ m}$ ) :  $220,88 \text{ kN}$
- Tirant 3 ( $z = 11,50 \text{ m}$ ) :  $266,51 \text{ kN}$
- Tirant 4 ( $z = 15,50 \text{ m}$ ) :  $298,63 \text{ kN}$
- Tirant 5 ( $z = 19,50 \text{ m}$ ) :  $243,66 \text{ kN}$

L'évolution des efforts internes au fil des phases montre une augmentation progressive, avec un saut notable à partir de la phase 10 (excavation à 20,00 m), où le moment maximal atteint 295,93 kNm/m, et la phase 12 qui constitue la phase la plus sollicitante avec  $M = 370,11$  kNm/m.

### V.3.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :

En situation statique, les déplacements horizontaux de l'écran évoluent progressivement avec l'avancement de l'excavation :

- Phase 1 : déplacement maximal = 0,9 mm
- Phase 2 : déplacement maximal = 2,3 mm
- Phase 3 : déplacement maximal = 2,2 mm
- Phase 4 : déplacement maximal = 6,3 mm
- Phase 5 : déplacement maximal = 6,3 mm
- Phase 6 : déplacement maximal = 6,8 mm
- Phase 7 : déplacement maximal = 6,9 mm
- Phase 8 : déplacement maximal = 6,8 mm
- Phase 9 : déplacement maximal = 6,8 mm
- Phase 10 : déplacement maximal = 10,0 mm
- Phase 11 : déplacement maximal = 10,0 mm
- Phase 12 : déplacement maximal = 15,3 mm

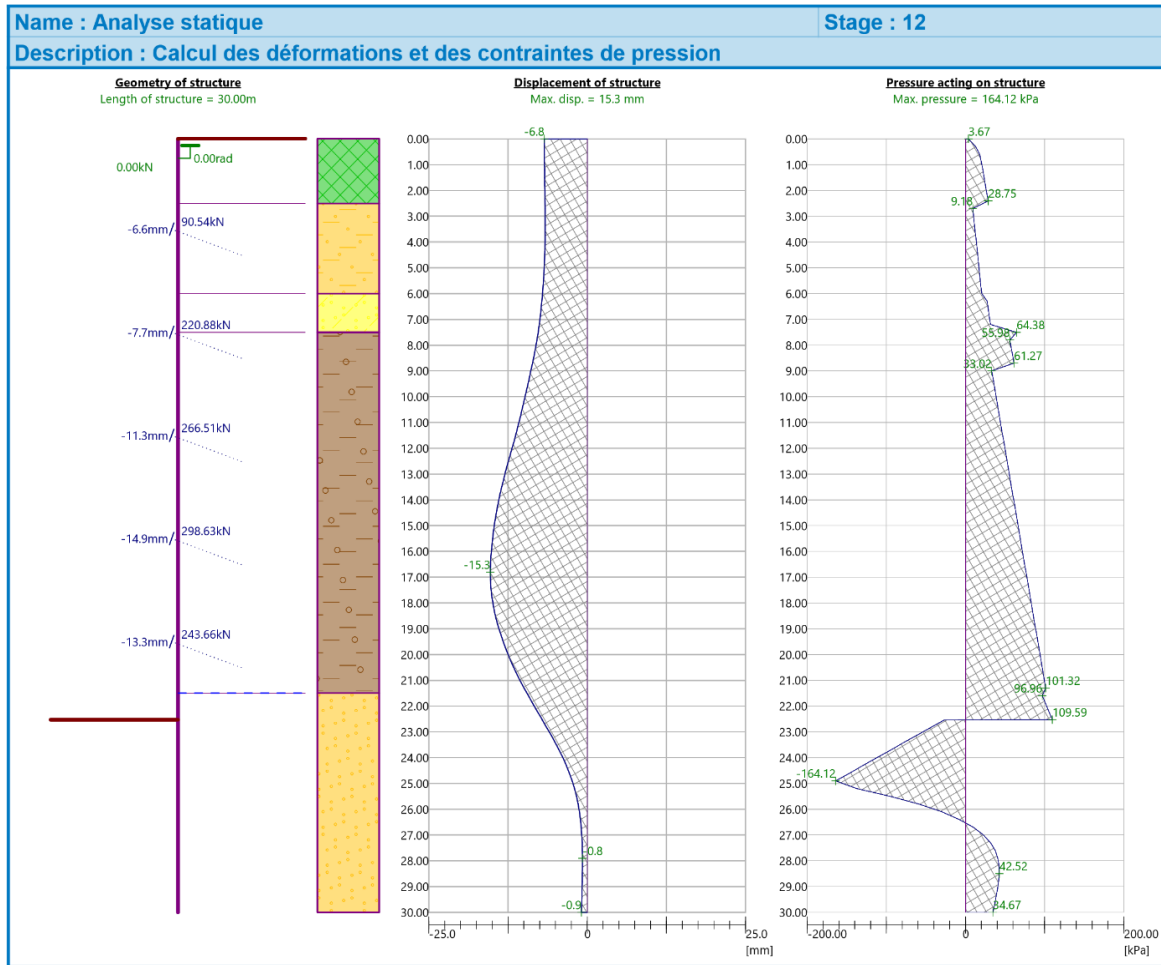
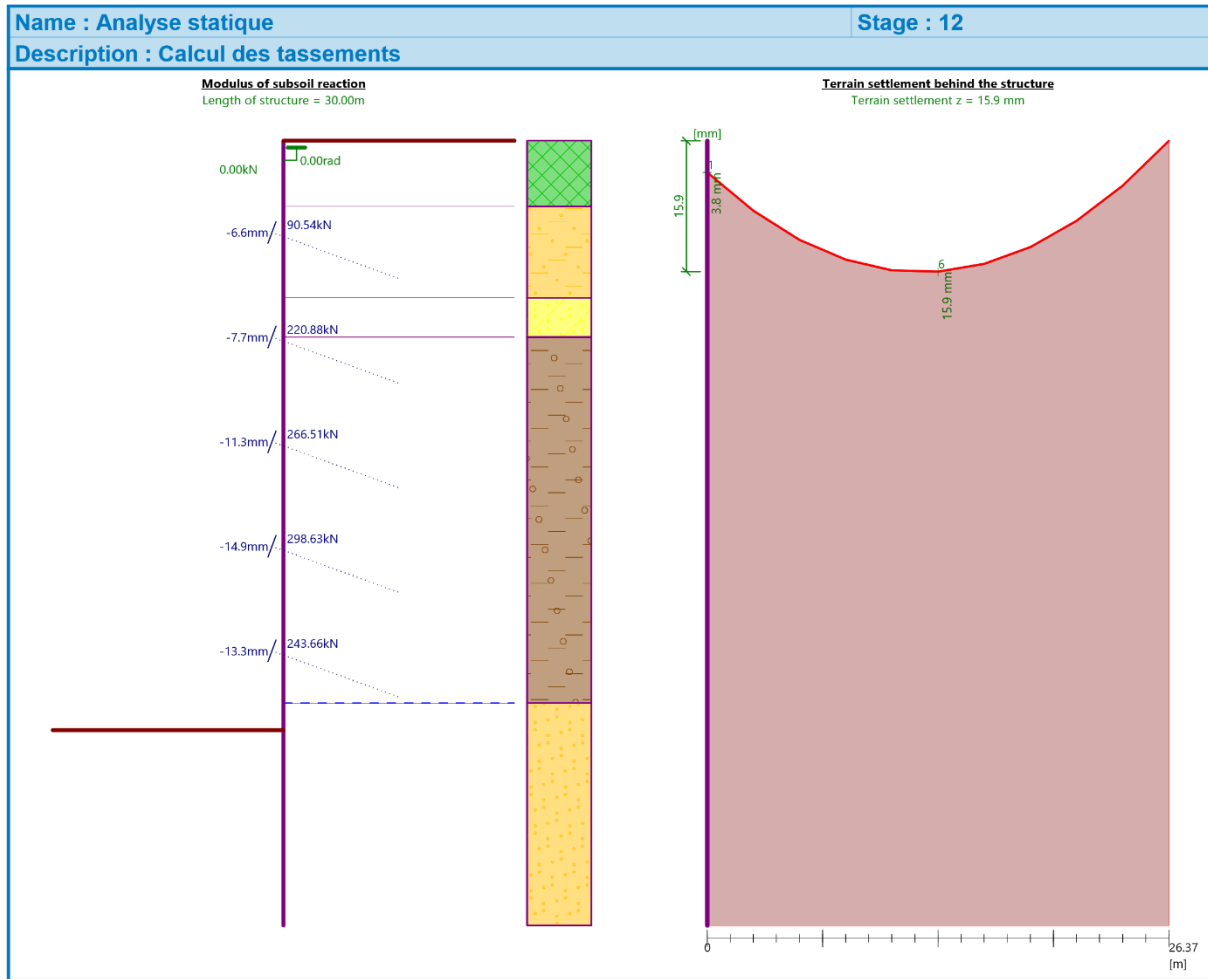


Figure V.17 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation statique – solution avec tirants d'ancrage

## V.3.2.4 Tassements du sol :

Les tassements en surface du terrain derrière l'écran évoluent progressivement avec l'avancement de l'excavation :

- Phases 1 à 3 :  $\delta_{\max} \leq 0,6 \text{ mm}$
- Phase 4 :  $\delta_{\max} = 1,8 \text{ mm}$
- Phases 5 à 7 :  $\delta_{\max} \leq 2,8 \text{ mm}$
- Phase 8 :  $\delta_{\max} = 4,3 \text{ mm}$
- Phase 9 :  $\delta_{\max} = 4,3 \text{ mm}$
- Phase 10 :  $\delta_{\max} = 8,7 \text{ mm}$
- Phase 11 :  $\delta_{\max} = 8,7 \text{ mm}$
- Phase 12 :  $\delta_{\max} = 14,0 \text{ mm}$  (*tassement maximal en situation statique finale*)



**Figure V.18 : Tassements du sol en surface en situation statique – solution avec tirants d'ancrage**

#### V.3.2.5 Vérification de la stabilité des talus par la méthode de Bishop situation statique :

La vérification de la stabilité globale du talus a été réalisée par la méthode de Bishop (surfaces de glissement circulaires), en situation statique transitoire, avec un coefficient de sécurité requis  $SF = 1,50$ . L'analyse prend en compte la contribution des cinq tirants d'ancrage actifs en phase 12 (excavation finale à 22,53 m).

Les paramètres de la surface de glissement critique optimisée sont les suivants :

- ✓ Centre de la surface de glissement :  $x = -5,34 \text{ m}$  ;  $z = 1,40 \text{ m}$
- ✓ Rayon :  $R = 31,86 \text{ m}$
- ✓ Angles :  $\alpha_1 = -41,31^\circ$  ;  $\alpha_2 = 89,06^\circ$
- ✓ Poids total du sol au-dessus de la surface de glissement :  $14\,228,13 \text{ kN/m}$

Les résultats de la vérification sont :

- Somme des forces actives (déstabilisatrices) :  $F_a = 5\,217,37 \text{ kN/m}$
- Somme des forces passives (stabilisatrices) :  $F_p = 9\,283,28 \text{ kN/m}$
- Moment de glissement :  $M_a = 166\,225,30 \text{ kNm/m}$
- Moment résistant :  $M_p = 295\,765,45 \text{ kNm/m}$



- Le coefficient de sécurité obtenu est :
- $SF = M_p / M_a = 1,78 > 1,50 = SF \text{ requis}$

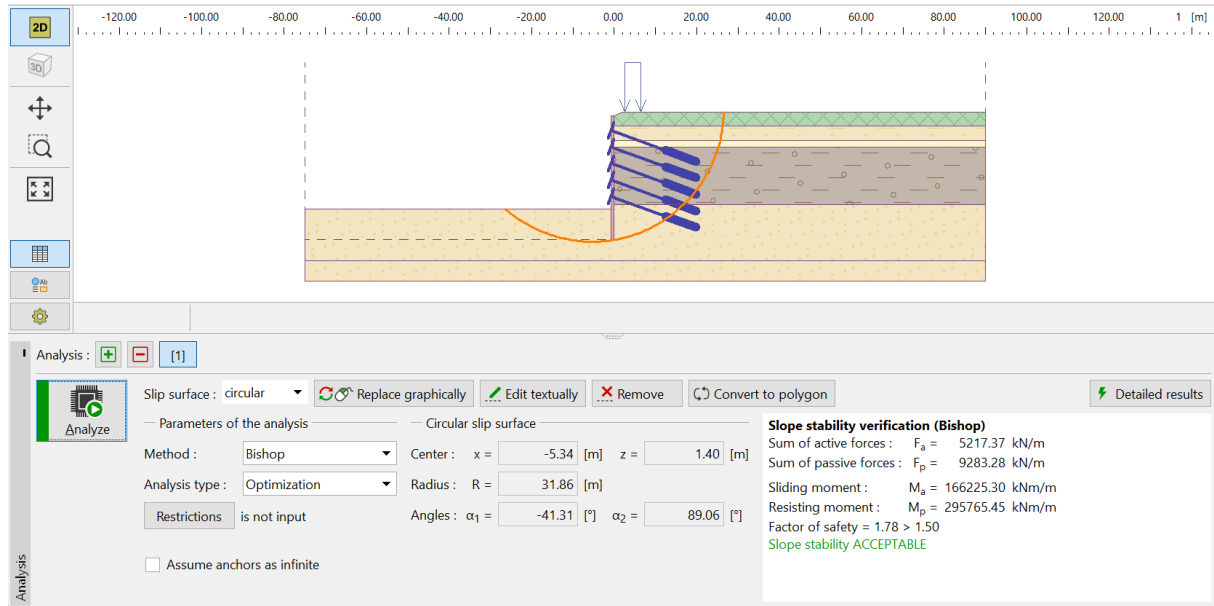


Figure V.19 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique – solution avec tirants d'ancrage

La vérification de la capacité portante des tirants d'ancrage dans le plan de glissement est également satisfaisante, avec les taux d'utilisation suivants :

- Tirant 1 (z = 3,50 m) : force = 90,54 kN, taux d'utilisation = 36,6 % ✓
- Tirant 2 (z = 7,50 m) : force = 220,88 kN, taux d'utilisation = 64,0 % ✓
- Tirant 3 (z = 11,50 m) : force = 266,51 kN, taux d'utilisation = 60,2 % ✓
- Tirant 4 (z = 15,50 m) : force = 298,63 kN, taux d'utilisation = 54,2 % ✓
- Tirant 5 (z = 19,50 m) : force = 243,66 kN, taux d'utilisation = 44,2 % ✓

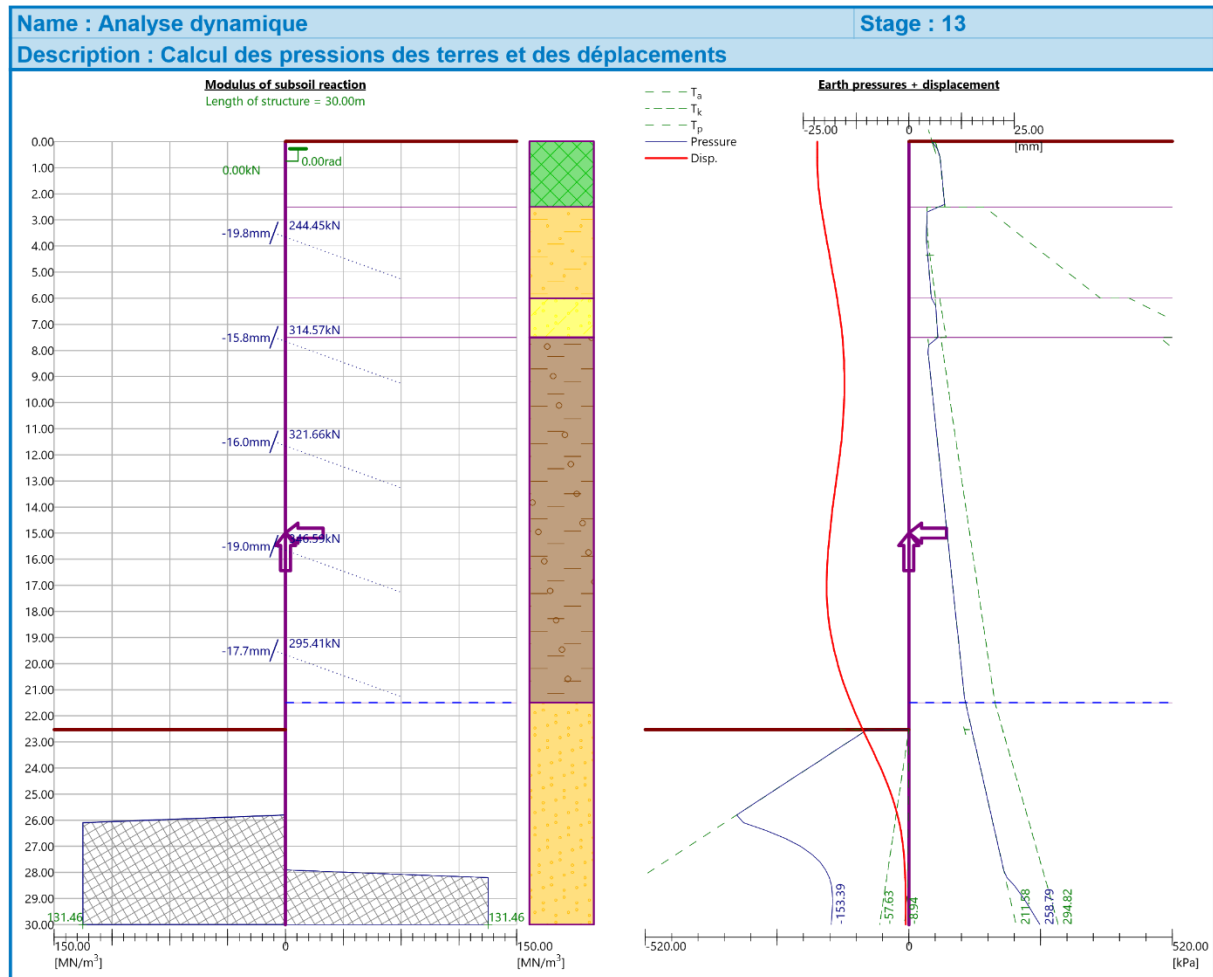
Tous les tirants sont vérifiés vis-à-vis de la résistance à la traction ( $R_t = 1\,041,60$  kN), de l'arrachement dans le sol et de l'arrachement dans le coulis de scellement. La vérification de la stabilité des talus en situation statique est SATISFAISANTE.

## V.3.3 Résultats en situation sismique

### V.3.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

La distribution du module de réaction du sol  $K_h$  ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran sont présentées pour la phase 13 (situation sismique), correspondant à une configuration identique à la phase 12, excavation de 22,53 m, cinq tirants actifs (z = 3,50 m, z = 7,50 m, z = 11,50 m, z = 15,50 m et z = 19,50 m) et nappe phréatique à 21,50 m, avec application des accélérations sismiques ( $K_h = 0,10$  ;  $K_v = 0,03$ ) selon la méthode de Mononobe-Okabe.

L'effet sismique se traduit par une modification significative de la distribution des pressions sur l'écran. Par rapport à la situation statique (phase 12), les pressions actives derrière l'écran sont augmentées en raison de la poussée sismique des terres.



**Figure V.20 : Distribution du module de réaction  $K$  h et pressions sur l'écran en situation sismique – solution avec tirants d'ancrage**

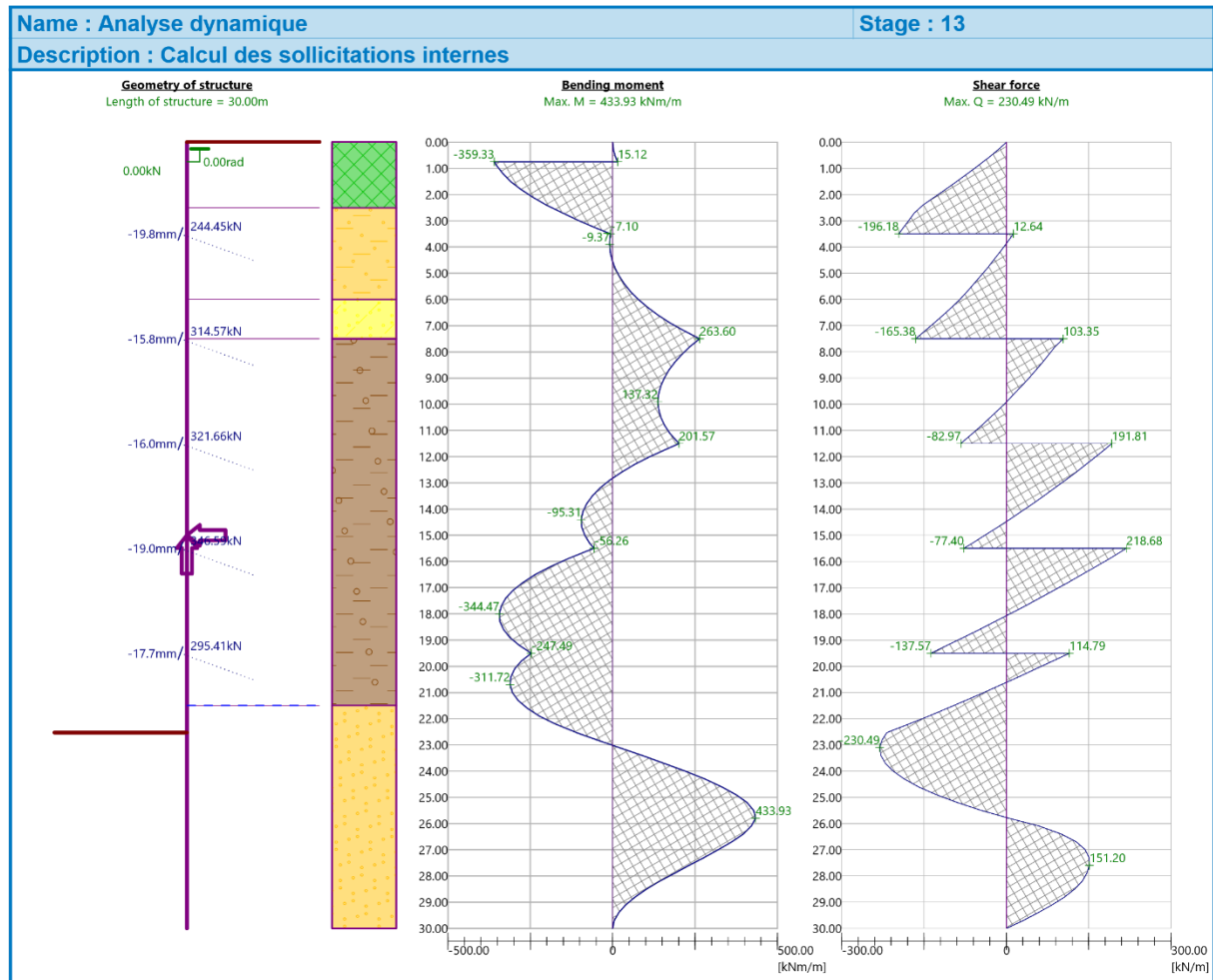
### V.3.3.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :

En situation sismique (phase 13), les efforts internes dans l'écran sont sensiblement plus élevés qu'en situation statique, en raison de l'augmentation des poussées sismiques et de l'inertie des terres mobilisées.

Les valeurs maximales obtenues sont :

- Effort tranchant maximum :  $V = 230,49 \text{ kN/m}$  (soit  $253,54 \text{ kN}$  par pieu)

- Moment fléchissant maximum :  $M = 433,93 \text{ kNm/m}$  (soit  $477,32 \text{ kNm}$  par pieu)



**Figure V.21 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en situation sismique – solution avec tirants d'ancrage**

Le moment fléchissant maximal est atteint dans la zone centrale de l'écran, entre les tirants de niveau 3 ( $z = 11,50 \text{ m}$ ) et de niveau 5 ( $z = 19,50 \text{ m}$ ), reflétant la forte sollicitation de cette zone sous effet sismique.

### V.3.3.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :

En situation sismique (phase 13), les déplacements horizontaux de l'écran sont nettement amplifiés par rapport à la situation statique.

Le déplacement maximal atteint  $21,7 \text{ mm}$  contre  $15,3 \text{ mm}$  en phase 12, soit une augmentation de  $+42 \%$ . Le déplacement en tête de paroi est de  $21,73 \text{ mm}$ , ce qui est significativement plus

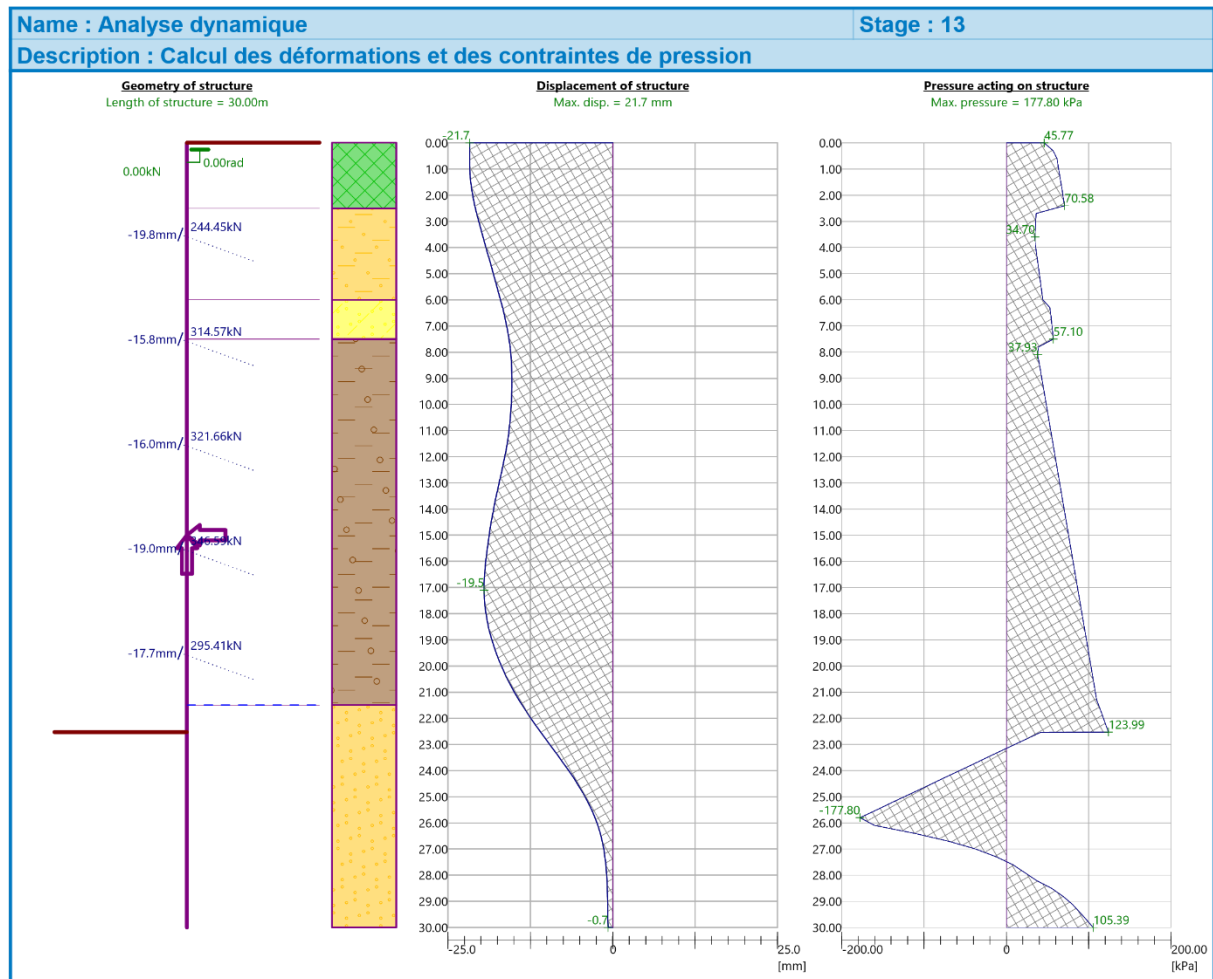


Figure V.22 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation sismique – solution avec tirants d'ancrage

élevé que les 6,75 mm observés en statique, traduisant une mobilisation importante de la partie supérieure de l'écran sous l'effet de la poussée sismique.

### V.3.3.4 Tassements du sol :

En situation sismique (phase 13), les tassements en surface du terrain derrière l'écran sont maximaux et atteignent  $\delta_{\max} = 22,4$  mm à environ  $x = 10,55$  m derrière l'écran, contre 14,0 mm en situation statique (phase 12), soit une augmentation de +60 %.

L'amplification des tassements en situation sismique est significative et traduit l'effet dynamique du séisme sur le massif de sol adjacent à l'écran.

Toutefois, ces tassements restent compatibles avec le comportement attendu d'un ouvrage de soutènement ancré soumis à un événement sismique de calcul, compte tenu de la profondeur d'excavation de 22,53 m.

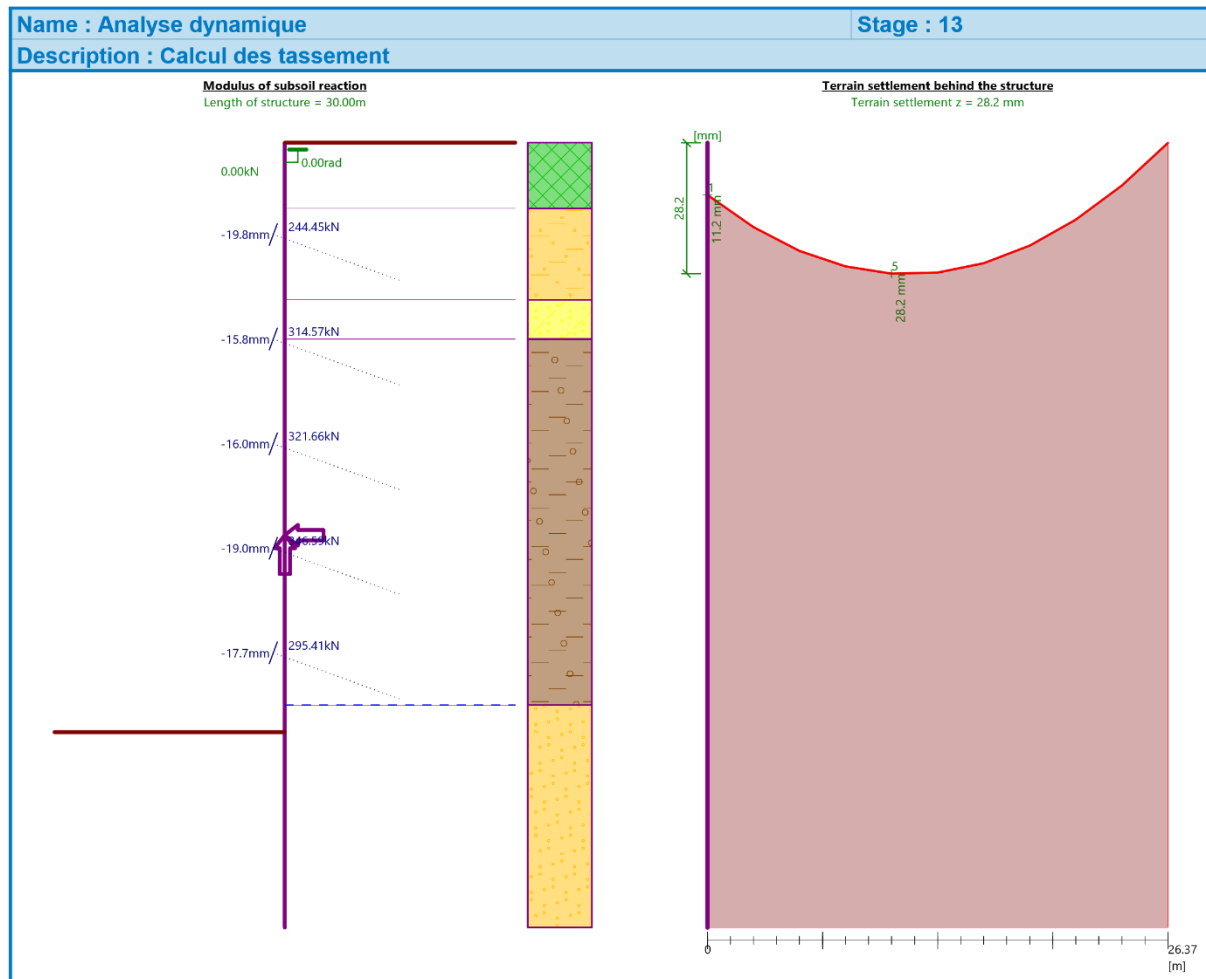


Figure V.23 : Tassements du sol en surface en situation sismique – solution avec tirants d'ancrage

### V.3.3.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique :

La vérification de la stabilité globale du talus a été réalisée par la méthode de Bishop basée sur les surfaces de glissement circulaires, en situation sismique, avec prise en compte des coefficients pseudo-statiques horizontaux et verticaux. L'analyse a été effectuée conformément à l'approche ASD (Allowable Stress Design), avec un coefficient de sécurité requis égal à  $SF = 1,00$ .

L'étude intègre l'effet des cinq tirants d'ancrage actifs ainsi que l'influence des actions sismiques définies par : coefficient sismique horizontal :  $K_h = 0,10$  et un coefficient sismique vertical :  $K_v = 0,03$

Les paramètres de la surface de glissement critique optimisée sont les suivants :

- ✓ Centre de la surface de glissement :  
 $x = -4,80 \text{ m}$  ;  $z = 13,08 \text{ m}$
- ✓ Rayon de la surface critique :  
 $R = 43,35 \text{ m}$
- ✓ Angles caractéristiques :  
 $\alpha_1 = -34,77^\circ$  ;  $\alpha_2 = 73,65^\circ$

- ✓ Poids total du massif de sol au-dessus de la surface de glissement :  
17 886,85 kN/m

Les résultats de la vérification de stabilité obtenus sont :

- Somme des forces actives déstabilisatrices :  
 $F_a = 6\,968,24 \text{ kN/m}$
- Somme des forces passives stabilisatrices :  
 $F_p = 10\,636,90 \text{ kN/m}$
- Moment de glissement :  
 $M_a = 302\,073,24 \text{ kNm/m}$
- Moment résistant :  
 $M_p = 461\,109,67 \text{ kNm/m}$

Le coefficient de sécurité obtenu est :

$$SF = M_p / M_a = 1,53 > 1,00 = SF \text{ requis}$$

Par conséquent, la stabilité globale du talus en situation sismique est considérée comme SATISFAISANTE.

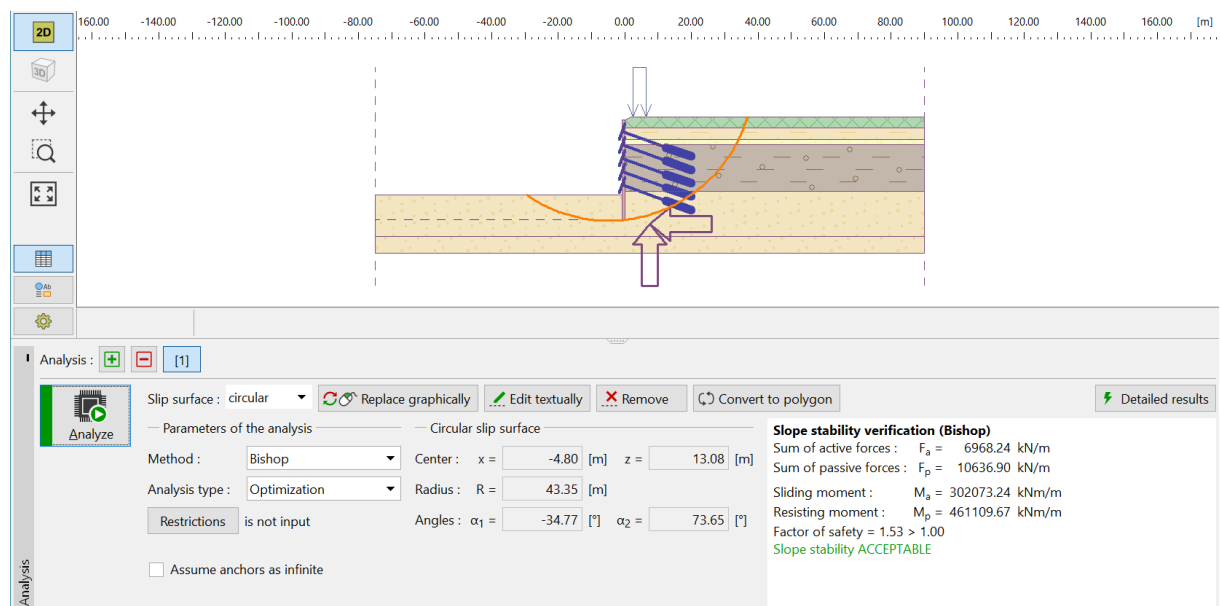


Figure V.24 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique – solution avec tirants d'ancrage

La vérification des tirants d'ancrage vis-à-vis des efforts de traction et des résistances à l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement est également satisfaisante. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Tirant 1 ( $z = 3,50 \text{ m}$ ) :  
Force = 244,45 kN ; taux d'utilisation = 98,8 % ✓
- Tirant 2 ( $z = 7,50 \text{ m}$ ) :  
Force = 314,57 kN ; taux d'utilisation = 91,2 % ✓
- Tirant 3 ( $z = 11,50 \text{ m}$ ) :  
Force = 321,66 kN ; taux d'utilisation = 72,7 % ✓

- Tirant 4 ( $z = 15,50$  m) :  
Force = 346,59 kN ; taux d'utilisation = 62,9 % ✓
- Tirant 5 ( $z = 19,50$  m) :  
Force = 295,41 kN ; taux d'utilisation = 53,6 % ✓

Tous les tirants vérifient les conditions de résistance à la traction avec une résistance caractéristique  $R_t = 1\,041,60$  kN, ainsi que les vérifications relatives à l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement.

Ainsi, la vérification de la stabilité des talus en situation sismique est jugée SATISFAISANTE.

### V.3.4 Ferrailage des pieux de l'écran de soutènement :

Le dimensionnement du ferrailage des pieux est réalisé conformément à la norme EN 1992-1-1 (EC2), en prenant en compte l'enveloppe des efforts internes issus de l'ensemble des phases de construction (phases 1 à 13). Le facteur partiel sur les charges appliqué est de 1,00. Les efforts de dimensionnement maximaux retenus sur l'enveloppe toutes phases confondues sont :

- Déplacement maximal : 21,7 mm (en tête, phase 13 sismique)
- Moment fléchissant maximal :  $M_{\max} = +433,93$  kNm/m (phase 13)
- Moment fléchissant minimal :  $M_{\min} = -359,33$  kNm/m (phase 13, en tête à  $z = 0,75$  m)
- Effort tranchant maximal :  $V_{\max} = 249,72$  kN/m (phase 13)

Les efforts internes ramenés à la section d'un pieu (espacement  $a = 1,10$  m) sont :

- Moment de calcul :  $M_{Ed} = 477,32$  kNm
- Effort tranchant de calcul :  $V_{Ed} = 274,69$  kN

#### V.3.4.1 Vérification à la flexion :

La section de pieu est vérifiée en flexion avec les caractéristiques suivantes :

- Diamètre du pieu :  $d = 0,80$  m
- Enrobage :  $c = 50$  mm
- Béton : C30/37, résistance caractéristique  $f_{ck} = 30,00$  MPa
- Armatures longitudinales : 12 barres HA Ø20 mm
- Acier : B500A, limite élastique  $f_{yk} = 500,00$  MPa
- Type de structure : poutre
- Taux d'armatures :  $\rho = 0,375\% > \rho_{\min} = 0,130\%$  ✓

La vérification donne :

- Moment sollicitant :  $M_{Ed} = 477,32$  kNm
- Moment résistant :  $M_{Rd} = 498,75$  kNm

$$M_{Rd} = 498,75 \text{ kNm} > M_{Ed} = 477,32 \text{ kNm} \quad \checkmark$$



La vérification à la flexion est SATISFAISANTE, avec un taux d'utilisation de 95,7 %, traduisant un dimensionnement optimisé et économique de l'armature longitudinale, bien adapté aux sollicitations modérées de cette variante.

### V.3.4.2 Vérification à l'effort tranchant :

La section de pieu est vérifiée à l'effort tranchant avec les caractéristiques suivantes :

- Armatures transversales : cadres Ø12 mm, espacement 200 mm
- Section d'armatures transversales :  $A_{sw} = 2 \times 565,5 = 1\,131,0 \text{ mm}^2$
- Largeur efficace de la section :  $b_w = 0,70 \text{ m}$
- Hauteur utile :  $d = 0,64 \text{ m}$

La vérification donne :

- Effort tranchant ultime résistant :  $V_{Rd} = 708,09 \text{ kN}$
- Effort tranchant sollicitant :  $V_{Ed} = 274,69 \text{ kN}$

$$V_{Rd} = 708,09 \text{ kN} > V_{Ed} = 274,69 \text{ kN} \checkmark$$

La vérification à l'effort tranchant est SATISFAISANTE, avec un taux d'utilisation de 38,8 %, confirmant la bonne résistance de la section vis-à-vis des efforts tranchants générés par cette variante.

### V.3.4.3. Conclusion du dimensionnement :

L'ensemble des vérifications de la section de pieu ( $d = 0,80 \text{ m}$ , espacement  $a = 1,10 \text{ m}$ , béton C30/37, acier B500A) est satisfaisant. Le ferrailage retenu, composé de 12 barres longitudinales HA Ø20 mm avec des cadres transversaux Ø12 mm espacés de 200 mm, garantit la résistance de l'écran de soutènement vis-à-vis des sollicitations en flexion et en effort tranchant pour l'ensemble des phases de construction, y compris la situation sismique.

Le taux d'utilisation à la flexion de 95,7 % confirme l'optimisation du dimensionnement, tandis que le taux d'utilisation à l'effort tranchant de 38,8 % assure une marge de sécurité confortable vis-à-vis des efforts transversaux.

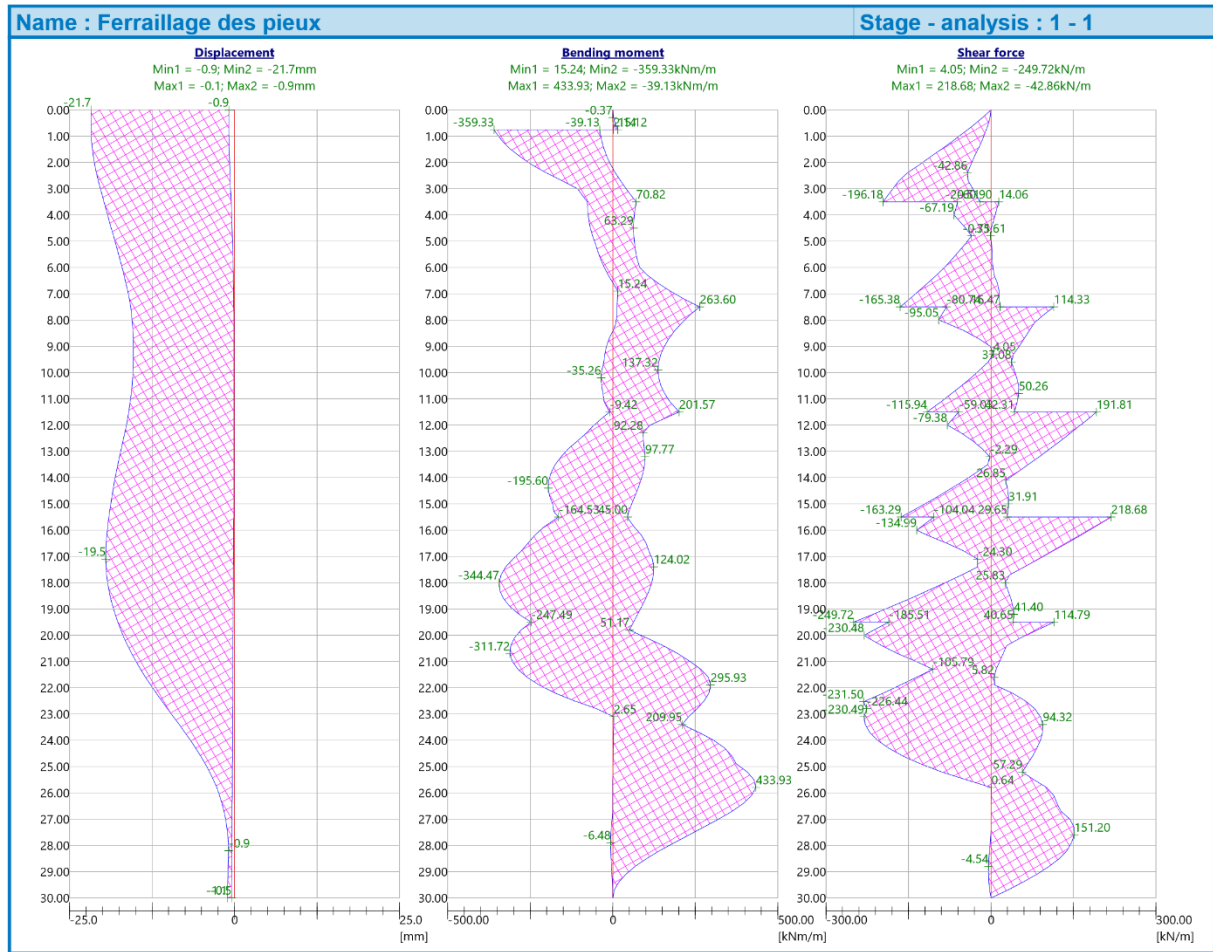


Figure V.25 : diagramme du dimensionnement – solution avec tirants d'ancrage

### V.3.5 Interprétation générale des résultats (solution avec tirants d'ancrage)

#### V.3.5.1 Interprétation de la situation statique :

L'analyse des résultats en situation statique, menée de la phase 1 à la phase 12, montre une évolution progressive et bien maîtrisée des efforts internes, des déplacements et des tassements au fur et à mesure de l'approfondissement de l'excavation et de la mise en place successive des cinq niveaux de tirants d'ancrage.

##### 1. Évolution des déplacements :

Durant les premières phases (phases 1 à 3), les déplacements horizontaux de l'écran restent très faibles, inférieurs à 2,3 mm, grâce à la faible profondeur d'excavation et à la présence de la poutre de couronnement. À partir de la phase 4, avec l'approfondissement de l'excavation à 8,00 m, les déplacements augmentent pour se stabiliser autour de 6,3 à 6,9 mm jusqu'à la phase 7, traduisant l'efficacité des deux premiers niveaux de tirants.

À partir de la phase 8 (excavation à 16,00 m avec rabattement de nappe à 21,50 m), les déplacements restent maîtrisés à 6,8 mm grâce aux trois premiers niveaux de tirants.

En phase 10, avec l'excavation à 20,00 m, le déplacement maximal atteint 10,0 mm, valeur qui se maintient en phase 11.

En phase 12, correspondant à l'excavation finale à 22,53 m, le déplacement maximal atteint 15,3 mm, localisé dans la zone centrale de l'écran entre les tirants de niveau 3 ( $z = 11,50$  m) et de niveau 4 ( $z = 15,50$  m).

Cette évolution confirme que le système de tirants multi-niveaux permet une répartition efficace des déformations sur toute la hauteur de l'écran, évitant la formation d'un ventre de déplacement prononcé.

## 2. Évolution des efforts internes :

Les efforts internes dans l'écran augmentent progressivement avec l'avancement de l'excavation, tout en restant bien encadrés par la présence des tirants successifs. Le moment fléchissant maximal passe de 69,14 kNm/m en phase 1 à 370,11 kNm/m en phase 12, avec une augmentation notable à partir de la phase 10 ( $M = 295,93$  kNm/m).

L'effort tranchant maximal passe de 42,86 kN/m en phase 1 à 231,50 kN/m en phase 12.

Ces valeurs restent significativement inférieures à celles obtenues dans la solution avec butonnage ( $M = 847,12$  kNm/m et  $V = 510,35$  kN/m), confirmant l'avantage structural de la solution avec tirants d'ancrage.

Les forces dans les tirants en phase 12 atteignent leurs valeurs maximales pour le tirant de niveau 4 ( $z = 15,50$  m : 298,63 kN), traduisant le rôle prépondérant de ce niveau dans l'équilibre de l'écran en phase finale.

## 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface du terrain derrière l'écran restent très faibles durant les premières phases ( $\delta_{\max} = 0,3$  mm en phase 1). Ils augmentent progressivement pour atteindre 4,3 mm en phases 8 et 9, puis 8,7 mm en phases 10 et 11, et enfin 14,0 mm en phase 12, avec un maximum localisé à environ 13,19 m derrière l'écran.

Ces tassements, comparés à ceux de la solution avec butonnage (17,1 mm en phase statique finale), montrent que la solution avec tirants d'ancrage génère des tassements légèrement inférieurs, ce qui constitue un avantage en termes de protection des ouvrages avoisinants.

## 4. Stabilité globale et vérification des tirants :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,78$ , nettement supérieur au seuil requis de 1,50. Tous les tirants d'ancrage sont vérifiés avec des taux d'utilisation satisfaisants, compris entre 36,6 % (tirant 1,  $z = 3,50$  m) et 64,0 % (tirant 2,  $z = 7,50$  m), confirmant une bonne marge de sécurité vis-à-vis de l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement.

La vérification de la stabilité interne des tirants est satisfaisante pour toutes les phases de construction, avec des coefficients de sécurité largement supérieurs au minimum requis de 1,50.

### V.3.5.2 Interprétation de la situation sismique :

La phase 13 correspond à la vérification de l'ouvrage sous sollicitation sismique, avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et d'une accélération verticale  $K_v = 0,03$ , selon la méthode de Mononobe-Okabe, dans la configuration de la phase 12 (excavation à 22,53 m, cinq tirants actifs, nappe à 21,50 m).

#### 1. Évolution des déplacements :

Le déplacement maximal de l'écran passe de 15,3 mm en situation statique à 21,7 mm en situation sismique, soit une augmentation de +42 %.

Le profil de déplacement en situation sismique montre une mobilisation plus homogène de l'écran sur toute sa hauteur, avec des valeurs comprises entre 10,92 mm et 21,73 mm, traduisant une meilleure distribution des efforts sismiques grâce aux cinq niveaux de tirants, contrairement à la solution avec butonnage où le déplacement maximal est concentré dans la zone inférieure non butonnée.

#### 2. Évolution des efforts internes :

Le séisme induit une augmentation significative de l'ensemble des sollicitations par rapport à la situation statique.

Le moment fléchissant maximal passe de 370,11 kNm/m (phase 12) à 433,93 kNm/m (phase 13), soit une augmentation de +17,2 %. L'effort tranchant maximal passe de 231,50 kN/m à 249,72 kN/m, soit une augmentation de +7,9 %.

Ces augmentations, relativement modérées par rapport à celles observées dans la solution avec butonnage (+30,9 % sur le moment), témoignent de la meilleure répartition des efforts sismiques assurée par le système de tirants multi-niveaux.

Les forces dans les tirants augmentent sensiblement en situation sismique, avec une amplification particulièrement marquée pour le tirant de niveau 1 ( $z = 3,50$  m), dont la force passe de 90,54 kN à 244,45 kN, soit une augmentation de +170 %, traduisant la forte sollicitation de la partie supérieure de l'écran sous l'effet de la poussée sismique.

La vérification de la stabilité interne des tirants reste satisfaisante en situation sismique, avec un coefficient de sécurité minimum de  $SF = 3,13$  pour le tirant de niveau 3, largement supérieur au seuil requis de 1,00.

### 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface passent de 14,0 mm en situation statique à 22,4 mm en situation sismique, soit une augmentation de +60 %, avec un maximum localisé à  $x \approx 13,19$  m derrière l'écran. Bien que cette amplification soit notable, les tassements sismiques obtenus (22,4 mm) restent comparables à ceux de la solution avec butonnage en situation sismique (23,8 mm), confirmant un comportement global similaire des deux solutions face à l'aléa sismique.

### 4. Stabilité globale en situation sismique :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,53$ , largement supérieur au seuil requis réduit de 1,00 applicable en situation sismique.

Par rapport à la situation statique ( $SF = 1,78$ ), le coefficient de sécurité enregistre une réduction de 14 %, qui reste néanmoins très au-dessus du seuil requis. La surface de glissement critique en situation sismique présente un rayon plus grand ( $R = 43,35$  m contre 31,86 m en statique) et un centre décalé vers le haut ( $x = -4,80$  m ;  $z = 13,08$  m contre  $z = 1,40$  m en statique), traduisant une mobilisation plus profonde et plus étendue du massif de sol sous l'effet des forces sismiques. Malgré l'augmentation des forces déstabilisatrices ( $F_a = 6\,968,24$  kN/m contre 5 217,37 kN/m en statique), la résistance du massif et la contribution des tirants restent suffisantes pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

La vérification de la capacité portante des tirants dans le plan de glissement sismique est satisfaisante, avec des taux d'utilisation sensiblement plus élevés qu'en situation statique en raison de l'augmentation des forces dans les tirants sous effet sismique.

Le tirant de niveau 1 ( $z = 3,50$  m) présente le taux d'utilisation le plus élevé avec 98,8 %, traduisant sa forte sollicitation en situation sismique mais restant en dessous du seuil de rupture.

Les autres tirants présentent des taux d'utilisation décroissants avec la profondeur : 91,2 % pour le tirant 2 ( $z = 7,50$  m), 72,7 % pour le tirant 3 ( $z = 11,50$  m), 62,9 % pour le tirant 4 ( $z = 15,50$  m) et 53,6 % pour le tirant 5 ( $z = 19,50$  m). Tous les tirants vérifient les conditions de résistance à la traction ( $R_t = 1\,041,60$  kN) ainsi que les vérifications relatives à l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement.

### V.3.5.3 Conclusion de l'interprétation :

L'analyse comparative des résultats en situations statique et sismique pour la solution avec tirants d'ancrage permet de dégager les conclusions suivantes :

La solution avec tirants d'ancrage assure une excellente maîtrise des déformations et des efforts internes de l'écran tout au long du phasage de construction grâce à la mise en place progressive de cinq niveaux de tirants DYWIDAG temporaires ( $z = 3,50$  m,  $z = 7,50$  m,  $z = 11,50$  m,  $z = 15,50$  m et  $z = 19,50$  m).

Ce système multi-ancré permet une répartition homogène des efforts sur toute la hauteur de l'écran, limitant à la fois les déplacements horizontaux, les moments fléchissants et les tassements par rapport à la solution avec butonnage.

Le ferrailage retenu pour les pieux (12 barres HA Ø20 mm en armatures longitudinales et cadres Ø12 mm espacés de 200 mm, béton C30/37, acier B500A) satisfait largement aux vérifications à la flexion et à l'effort tranchant pour l'ensemble des phases, y compris en situation sismique, avec des marges de sécurité très confortables ( $M_{Rd} = 1\,197,44 \text{ kNm} \gg$

$M_{Ed} = 477,32 \text{ kNm}$ ,  $V_{Rd} = 944,12 \text{ kN} \gg V_{Ed} = 274,69 \text{ kN}$ ).

Ces marges importantes confirment la bonne adaptation du dimensionnement de l'écran aux sollicitations générées par cette variante.

Enfin, la stabilité globale de l'ouvrage est assurée dans les deux situations, avec des coefficients de sécurité de  $SF = 1,78$  en statique et  $SF = 1,53$  en sismique, tous deux supérieurs aux valeurs requises respectives de 1,50 et 1,00. La solution avec tirants d'ancrage est donc techniquement validée et présente, par rapport à la solution avec butonnage, des avantages notables en termes de réduction des efforts internes dans l'écran, de limitation des déplacements, de tassements légèrement inférieurs en situation statique, et d'une meilleure marge de sécurité globale en situation sismique ( $SF = 1,53$  contre  $SF = 1,48$  pour la solution avec butonnage).

## V.4 Variante 3 : Solution mixte boutons + tirant d'ancrage

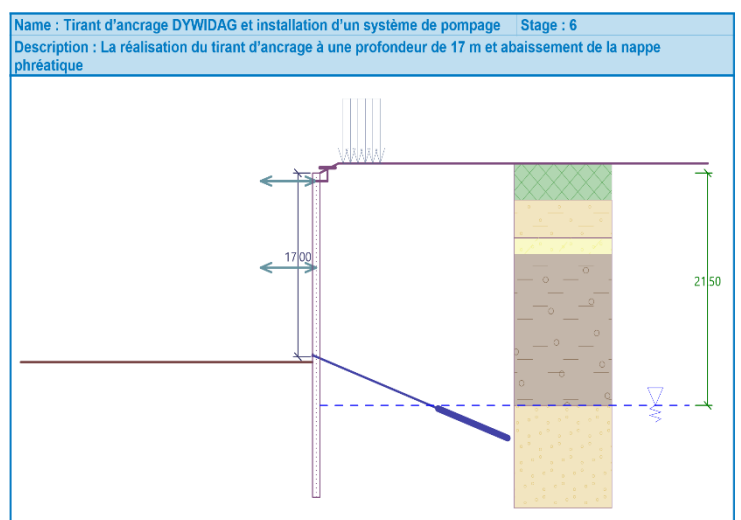
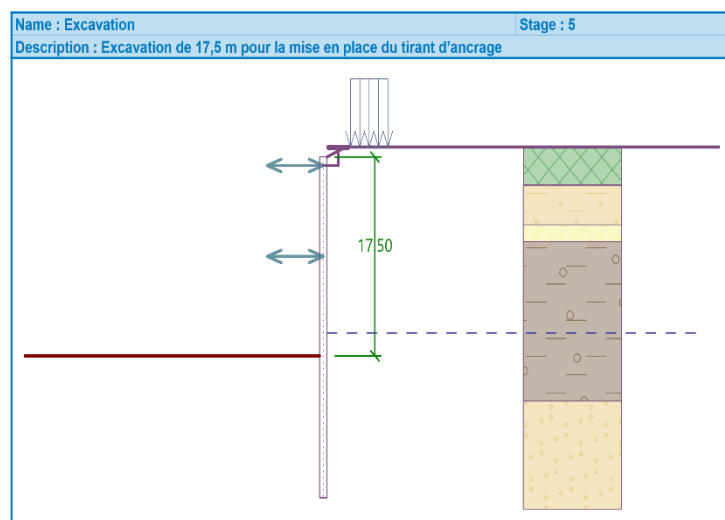
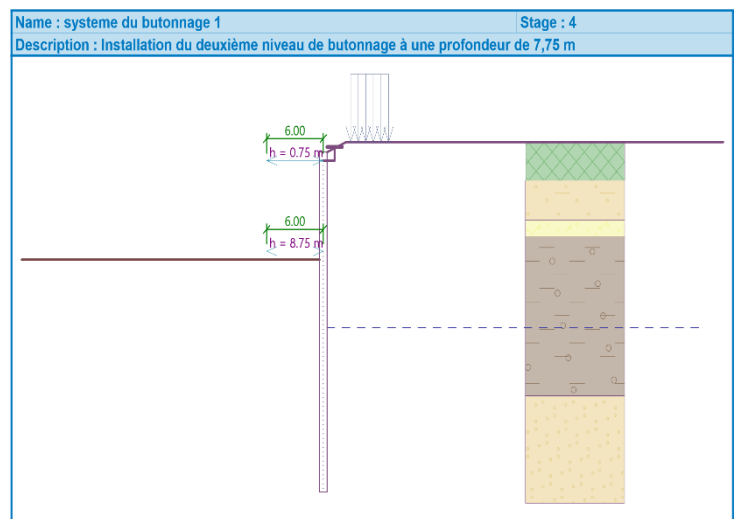
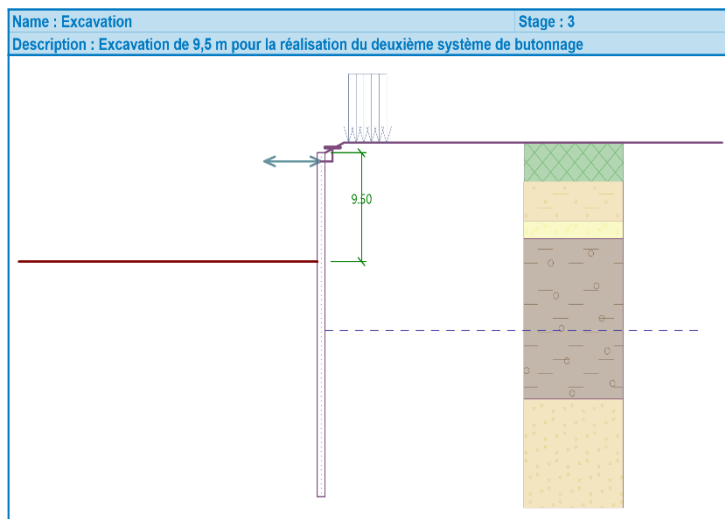
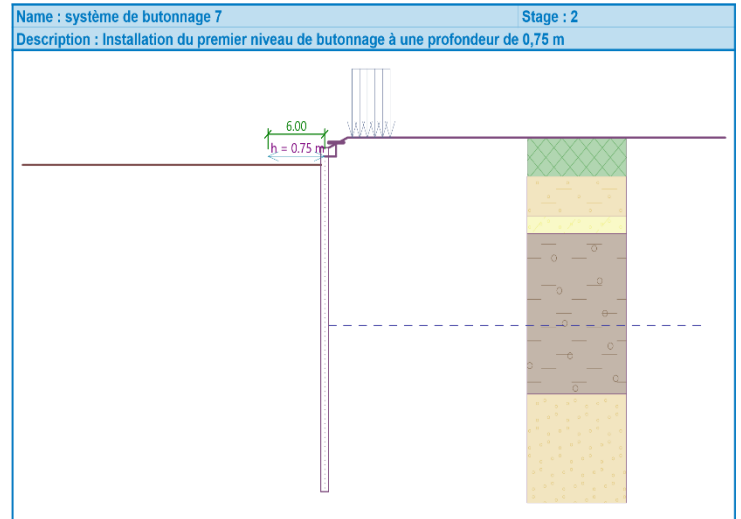
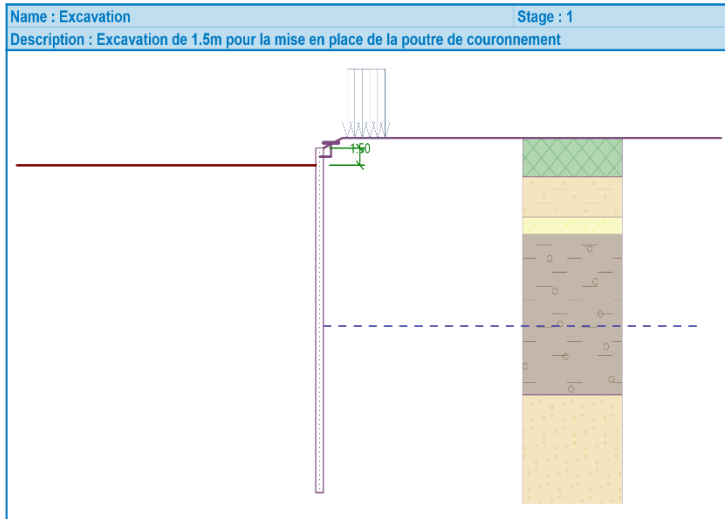
### V.4.1 Hypothèses et phasage de modélisation :

La modélisation a été réalisée selon la méthode aux pressions dépendantes (dependent pressures), en situation transitoire pour les phases statiques (1 à 7) et sismique pour la phase 8. La solution mixte combine deux boutons métalliques (Sb 1) positionnés en partie supérieure de l'écran et un tirant d'ancrage DYWIDAG temporaire 0,6" St 1860 MPa positionné en partie inférieure, constitué de 5 torons de section  $A_1 = 140 \text{ mm}^2$  chacun, avec une longueur libre de 14,00 m, une longueur de scellement de 8,00 m, une inclinaison de  $20^\circ$  et un espacement de 1,10 m.

Le phasage de modélisation est le suivant :

- Phase 1 : Réalisation de la poutre de couronnement (support en tête à  $z = 0,75 \text{ m}$ ), excavation limitée à 1,50 m en front de paroi, nappe phréatique à 15,50 m, sans bouton ni tirant actif.
- Phase 2 : Installation du premier bouton Sb 7 à  $z = 0,75 \text{ m}$  (longueur 6,00 m, espacement 7,20 m,  $E = 210\,000 \text{ MPa}$ ,  $A = 7\,810 \text{ mm}^2$ ), excavation maintenue à 1,50 m.
- Phase 3 : Approfondissement de l'excavation à 9,50 m, un bouton actif ( $z = 0,75 \text{ m}$ ).
- Phase 4 : Installation du deuxième bouton Sb 1 à  $z = 8,75 \text{ m}$  (longueur 6,00 m, espacement 7,20 m,  $E = 210\,000 \text{ MPa}$ ,  $A = 23\,900 \text{ mm}^2$ ), excavation maintenue à 9,50 m, deux boutons actifs.
- Phase 5 : Approfondissement de l'excavation à 17,50 m, deux boutons actifs, nappe phréatique à 15,50 m.
- Phase 6 : Installation du tirant d'ancrage DYWIDAG à  $z = 17,00 \text{ m}$  avec une force de précontrainte de 100 kN, excavation maintenue à 17,50 m, abaissement de la nappe phréatique à 21,50 m, deux boutons actifs et un tirant actif.
- Phase 7 : Approfondissement de l'excavation à 22,53 m (excavation finale), deux boutons actifs, nappe à 21,50 m.
- Phase 8 : Vérification en situation sismique (Mononobe-Okabe), configuration identique à la phase 7 (excavation à 22,53 m, deux boutons actifs, un tirant actif, nappe

à 21,50 m), avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et une accélération verticale  $K_v = 0,03$ .





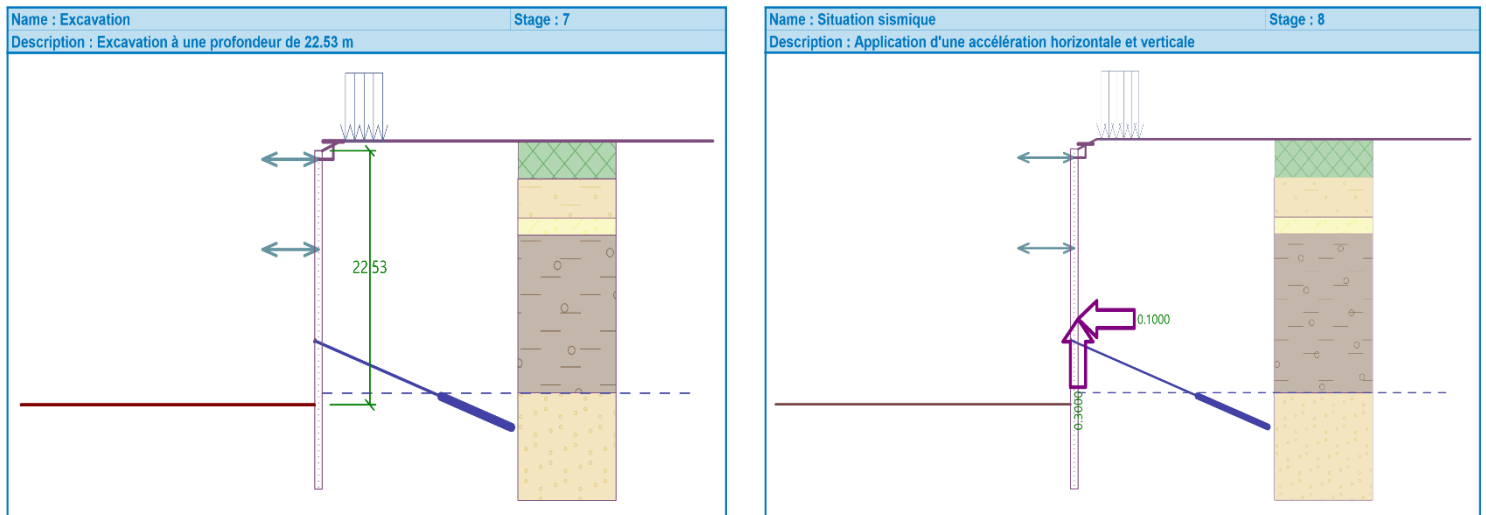


Figure V.26 : Phasage de la solution mixte (butons + tirant d'ancrage)

## V.4.2 Résultats en situation statique

### V.4.2.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

La distribution du module de réaction du sol  $K_h$  ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran sont présentées pour la phase 7 (situation statique finale), correspondant à une excavation de 22,53 m de profondeur avec deux butons actifs ( $z = 0,75$  m et  $z = 8,75$  m), un tirant d'ancrage actif ( $z = 17,00$  m) et la nappe phréatique abaissée à 21,50 m.

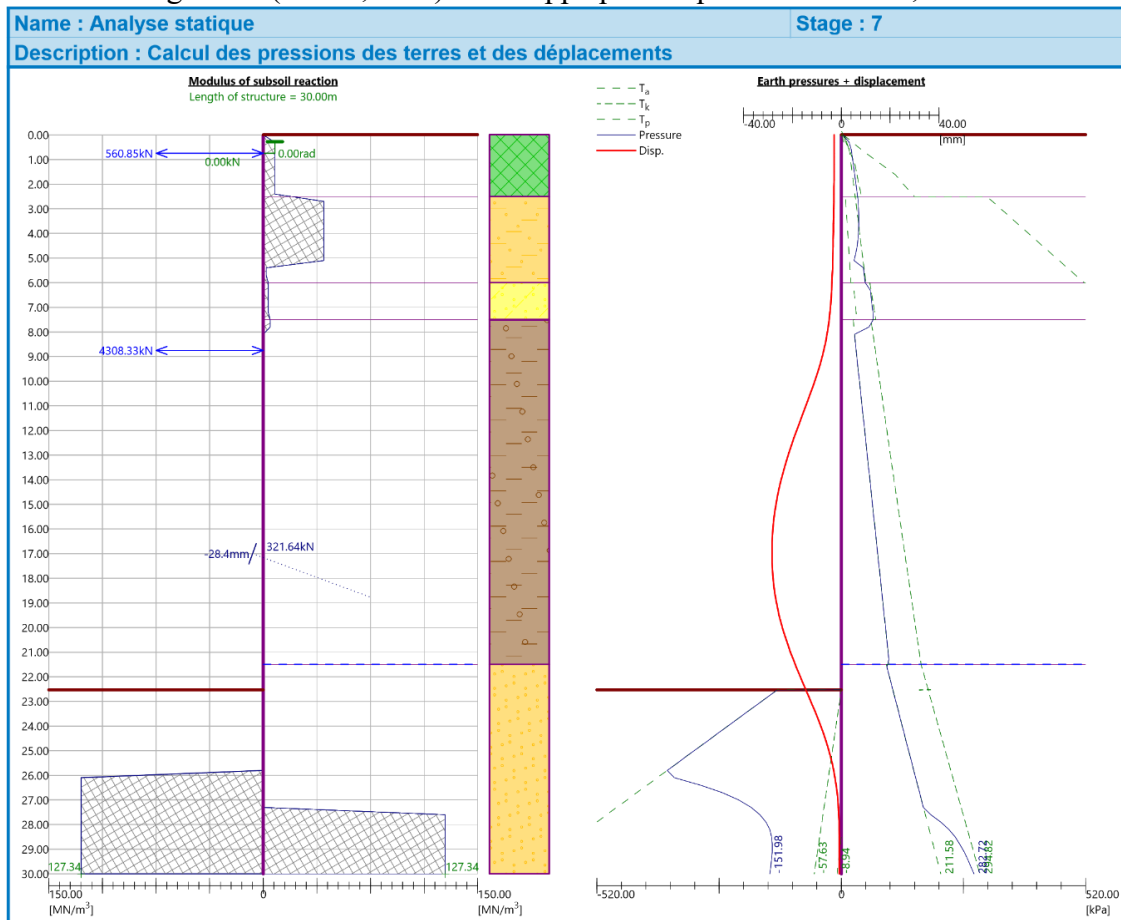


Figure V.27 : Distribution du module de réaction  $K_h$  et pressions sur l'écran en situation statique – solution mixte



## V.4.2.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :

En situation statique finale (phase 7), les efforts internes maximaux dans l'écran sont les suivants :

- Effort tranchant maximum :  $V = 348,82 \text{ kN/m}$  (soit  $383,70 \text{ kN}$  par pieu)
- Moment fléchissant maximum :  $M = 722,98 \text{ kNm/m}$  (soit  $795,27 \text{ kNm}$  par pieu)

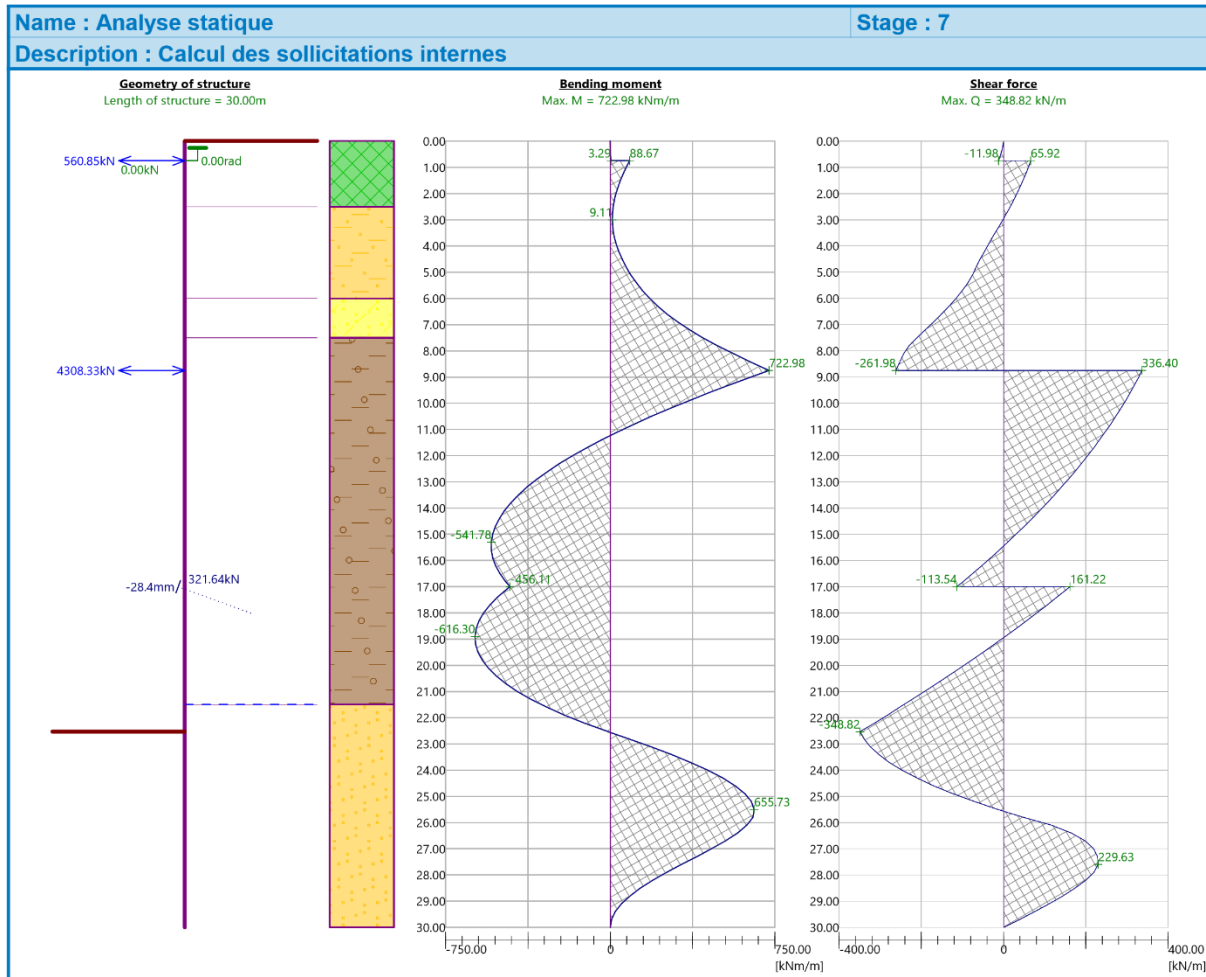


Figure V.28 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en situation statique – solution mixte

Le moment fléchissant maximal est atteint au niveau du deuxième buton ( $z = 8,75 \text{ m}$ ), avec un saut brutal de  $-261,98 \text{ kN/m}$  à  $+336,40 \text{ kN/m}$  traduisant la réaction importante de ce buton ( $4\,308,33 \text{ kN}$ ). Cette concentration des efforts au niveau du buton Sb 1 ( $z = 8,75 \text{ m}$ ) est caractéristique de la solution mixte, où ce buton intermédiaire reprend l'essentiel des poussées des terres sur la grande hauteur d'excavation.

L'évolution des efforts internes au fil des phases montre une augmentation progressive, avec un saut notable à partir de la phase 5 (excavation à  $17,50 \text{ m}$ ,  $M = 354,70 \text{ kNm/m}$ ) puis une forte augmentation en phase 7 (excavation finale à  $22,53 \text{ m}$ ,  $M = 722,98 \text{ kNm/m}$ ), traduisant le rôle déterminant de la profondeur d'excavation finale dans la sollicitation de l'écran.

Les réactions dans les éléments de soutènement en phase 7 sont :

- Buton Sb 7 ( $z = 0,75 \text{ m}$ ) :  $560,85 \text{ kN}$
- Buton Sb 1 ( $z = 8,75 \text{ m}$ ) :  $4\,308,33 \text{ kN}$

- Tirant DYWIDAG ( $z = 17,00$  m) : 321,64 kN

## V.4.2.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :

En situation statique, les déplacements horizontaux de l'écran évoluent progressivement avec l'avancement de l'excavation :

- Phase 1 : déplacement maximal = 0,8 mm
- Phase 2 : déplacement maximal = 0,8 mm
- Phase 3 : déplacement maximal = 3,8 mm
- Phase 4 : déplacement maximal = 3,8 mm
- Phase 5 : déplacement maximal = 9,1 mm
- Phase 6 : déplacement maximal = 9,2 mm
- Phase 7 : déplacement maximal = 28,4 mm

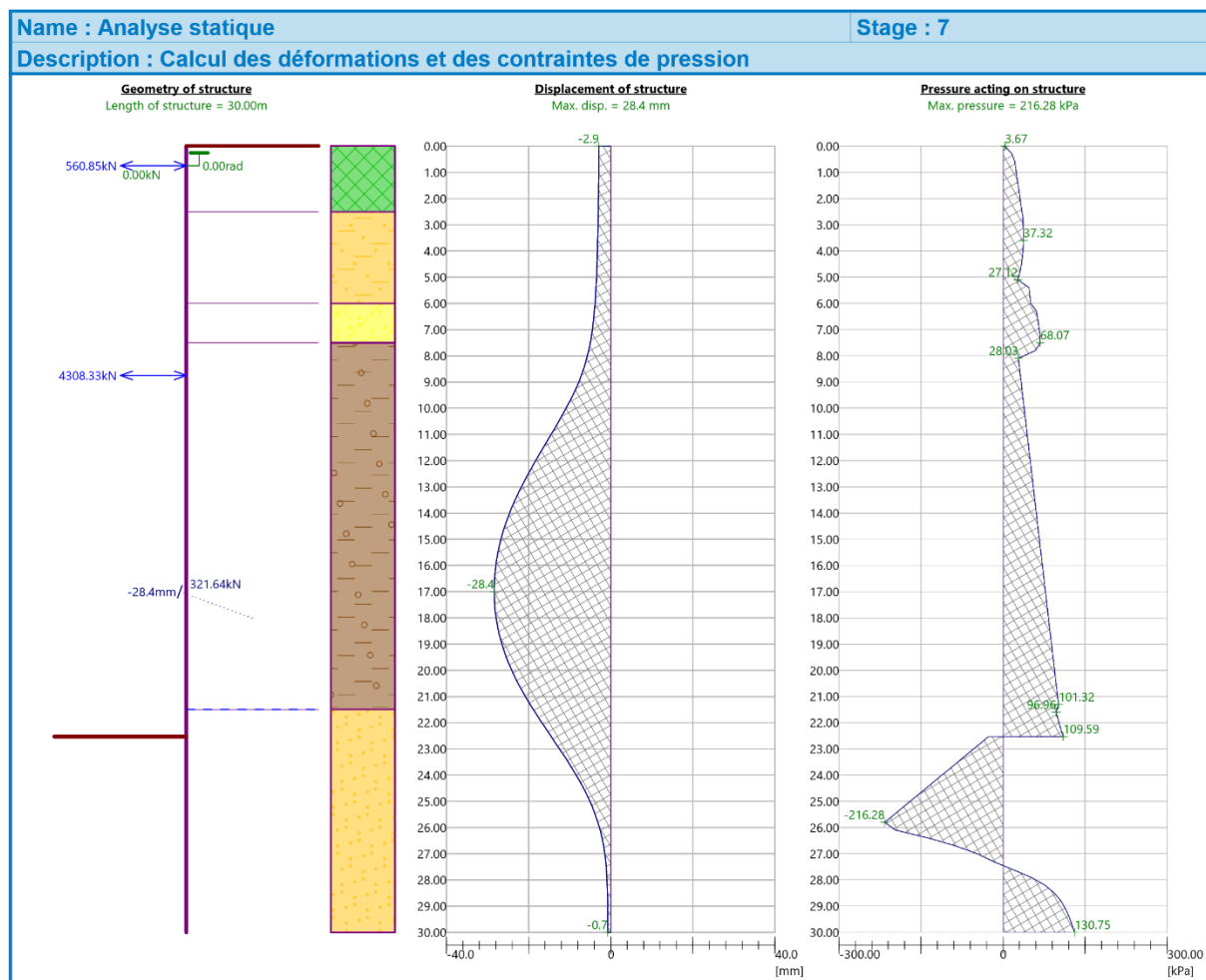


Figure V.29 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation statique – solution mixte

Le déplacement maximal en phase 7 atteint 28,4 mm, localisé au niveau du tirant d'ancrage

( $z = 17,00$  m, déplacement =  $-28,38$  mm), dans la zone de grande hauteur entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le fond d'excavation ( $z = 22,53$  m).

Le saut important entre la phase 6 ( $9,2$  mm) et la phase 7 ( $28,4$  mm) traduit la forte sollicitation de l'écran lors du dernier approfondissement de l'excavation de  $17,50$  m à  $22,53$  m, malgré la présence du tirant.

Ce comportement est caractéristique de la solution mixte, où la grande distance entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le tirant ( $z = 17,00$  m) crée une zone de flexion importante dans la partie centrale de l'écran.

#### V.4.2.4 Tassements du sol :

Les tassements en surface du terrain derrière l'écran évoluent progressivement avec l'avancement de l'excavation :

- Phases 1 et 2 :  $\delta_{\max} = 0,3$  mm
- Phases 3 et 4 :  $\delta_{\max} = 1,9$  mm
- Phase 5 :  $\delta_{\max} = 6,5$  mm
- Phase 6 :  $\delta_{\max} = 6,3$  mm
- Phase 7 :  $\delta_{\max} = 21,3$  mm (*tassement maximal en situation statique finale*)

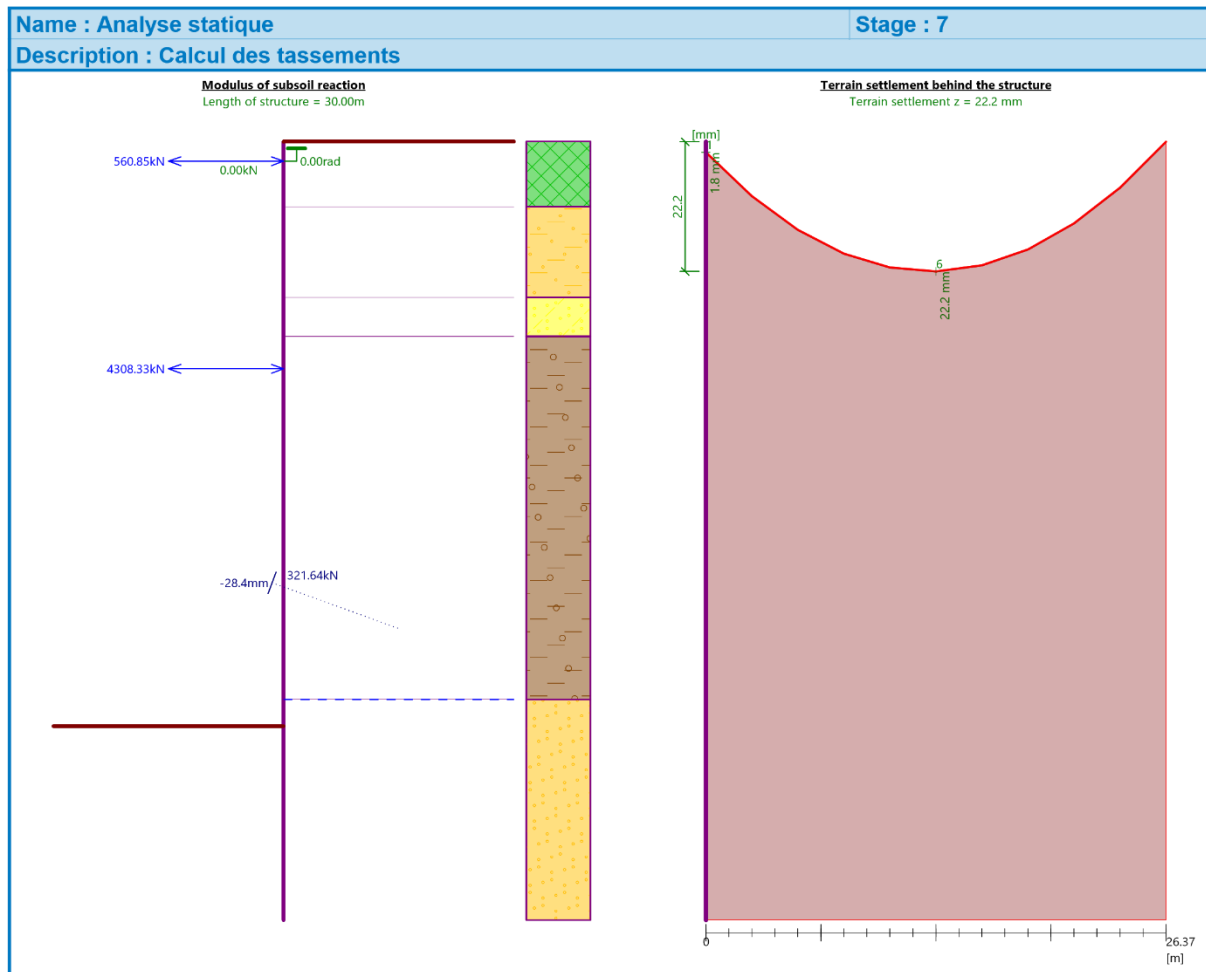


Figure V.30 : Tassements du sol en surface en situation statique – solution mixte

Le tassement maximal de 21,3 mm en situation statique finale est nettement supérieur à celui de la solution avec tirants d'ancrage (14,0 mm) et légèrement supérieur à celui de la solution avec butonnage (17,1 mm), traduisant l'impact des déplacements importants de l'écran en phase 7 sur le massif de sol adjacent.

La distribution en cloche des tassements, avec un maximum à environ 13,19 m derrière l'écran, est caractéristique d'une excavation profonde à soutènement multi-niveaux.

#### V.4.2.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique :

La vérification de la stabilité globale du talus a été réalisée par la méthode de Bishop (surfaces de glissement circulaires), en situation statique transitoire, avec un coefficient de sécurité requis  $SF = 1,50$ . L'analyse prend en compte la contribution du tirant d'ancrage actif en phase 7 (excavation finale à 22,53 m).

Les paramètres de la surface de glissement critique optimisée sont les suivants :

- Centre de la surface de glissement :  $x = -5,99$  m ;  $z = 4,09$  m
- Rayon :  $R = 34,60$  m
- Angles :  $\alpha_1 = -39,70^\circ$  ;  $\alpha_2 = 84,68^\circ$
- Poids total du sol au-dessus de la surface de glissement : 14 911,52 kN/m

Les résultats de la vérification sont :

- Somme des forces actives (déstabilisatrices) :  $F_a = 5\,436,80 \text{ kN/m}$
- Somme des forces passives (stabilisatrices) :  $F_p = 9\,566,15 \text{ kN/m}$
- Moment de glissement :  $M_a = 188\,113,28 \text{ kNm/m}$
- Moment résistant :  $M_p = 330\,988,90 \text{ kNm/m}$

Le coefficient de sécurité obtenu est :

$$SF = M_p / M_a = 1,76 > 1,50 = SF \text{ requis}$$

La vérification de la capacité portante du tirant d'ancrage dans le plan de glissement est

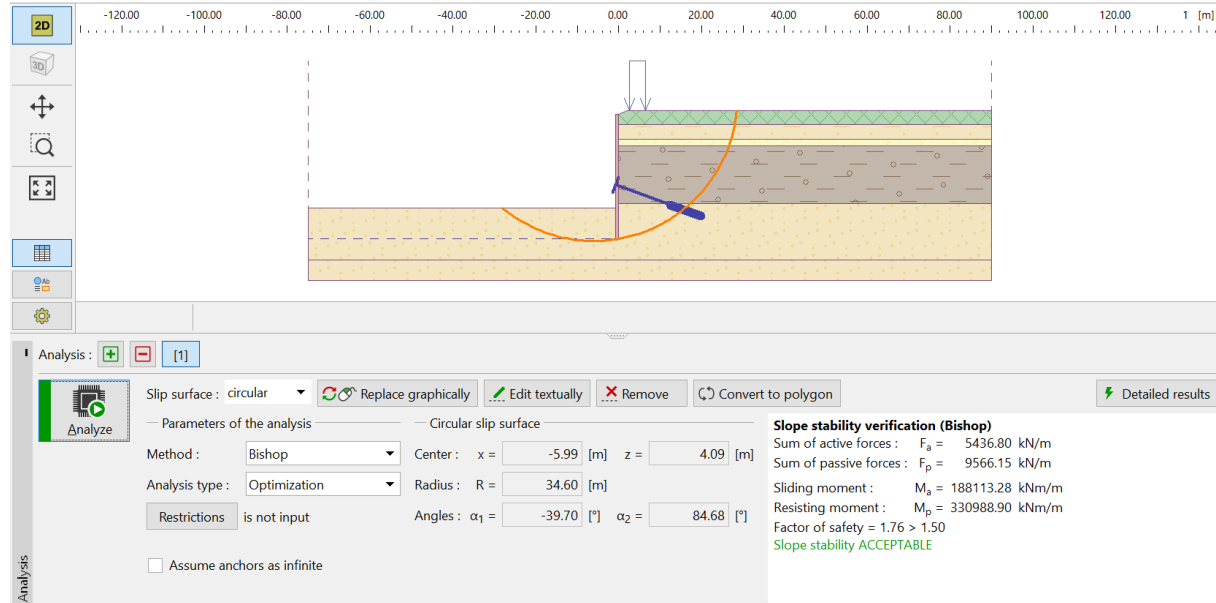


Figure V.31 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique – solution mixte

également satisfaisante :

- Tirant 1 ( $z = 17,00 \text{ m}$ ) : force =  $321,64 \text{ kN}$ , résistance à la traction  $R_t = 868,00 \text{ kN}$ , résistance à l'arrachement dans le sol  $R_e = 676,94 \text{ kN}$ , résistance à l'arrachement dans le coulis  $R_c = 502,94 \text{ kN}$ , taux d'utilisation =  $64,0 \text{ \%}$  ✓

La vérification de la stabilité des talus en situation statique est SATISFAISANTE.

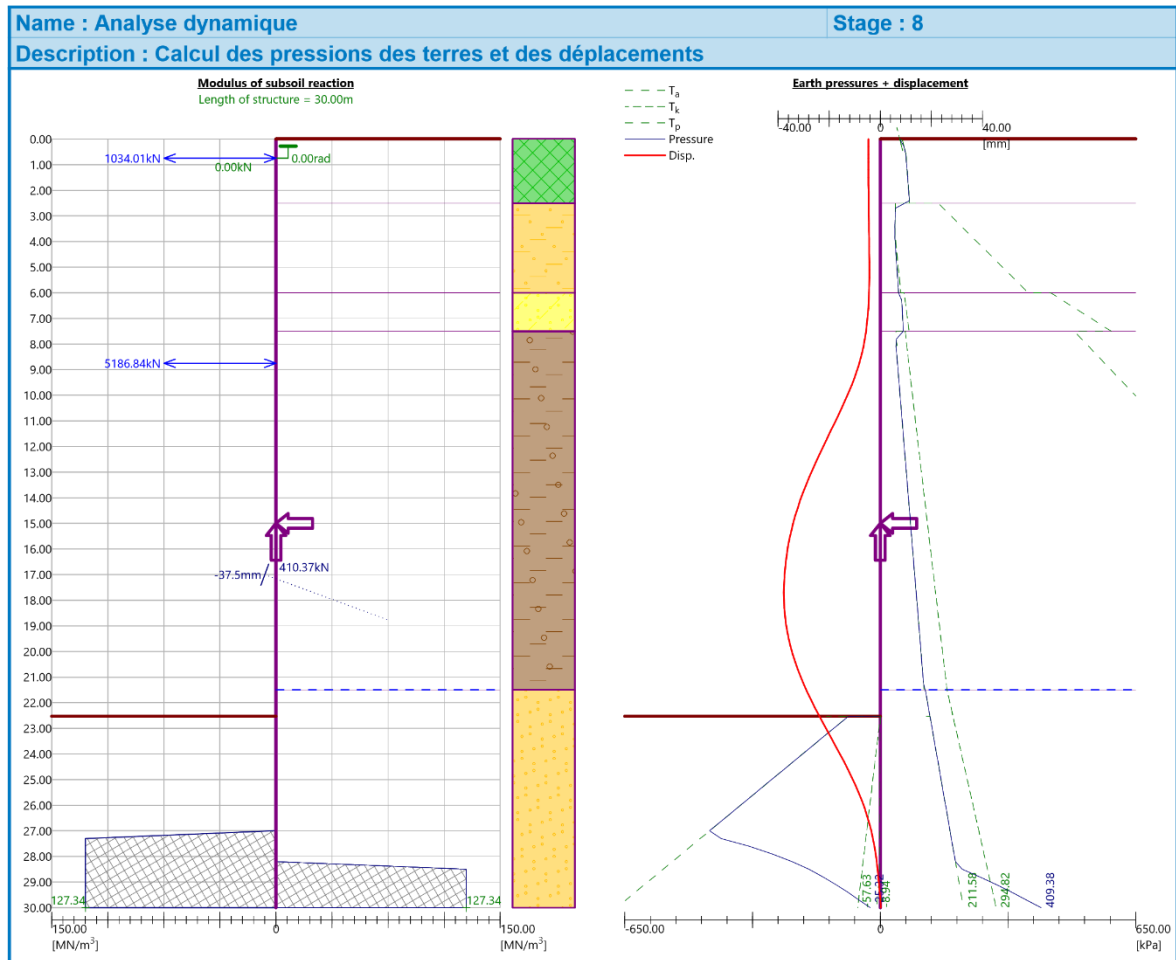
## V.4.3 Résultats en situation sismique

### V.4.3.1 Distribution du module de réaction $K_h$ et des pressions sur l'écran :

La distribution du module de réaction du sol  $K_h$  ainsi que les pressions actives et passives agissant sur l'écran sont présentées pour la phase 8 (situation sismique), correspondant à une configuration identique à la phase 7, excavation de  $22,53 \text{ m}$ , deux butons actifs ( $z = 0,75 \text{ m}$  et  $z = 8,75 \text{ m}$ ) et un tirant d'ancrage actif ( $z = 17,00 \text{ m}$ ), nappe phréatique à  $21,50 \text{ m}$ , avec application des accélérations sismiques ( $K_h = 0,10$  ;  $K_v = 0,03$ ) selon la méthode de Mononobe-Okabe.

L'effet sismique se traduit par une modification très significative de la distribution des pressions sur l'écran.

Par rapport à la situation statique (phase 7), les pressions actives derrière l'écran sont fortement augmentées en raison de la poussée sismique des terres.



**Figure V.32 : Distribution du module de réaction K h et pressions sur l'écran en situation sismique – solution mixte**

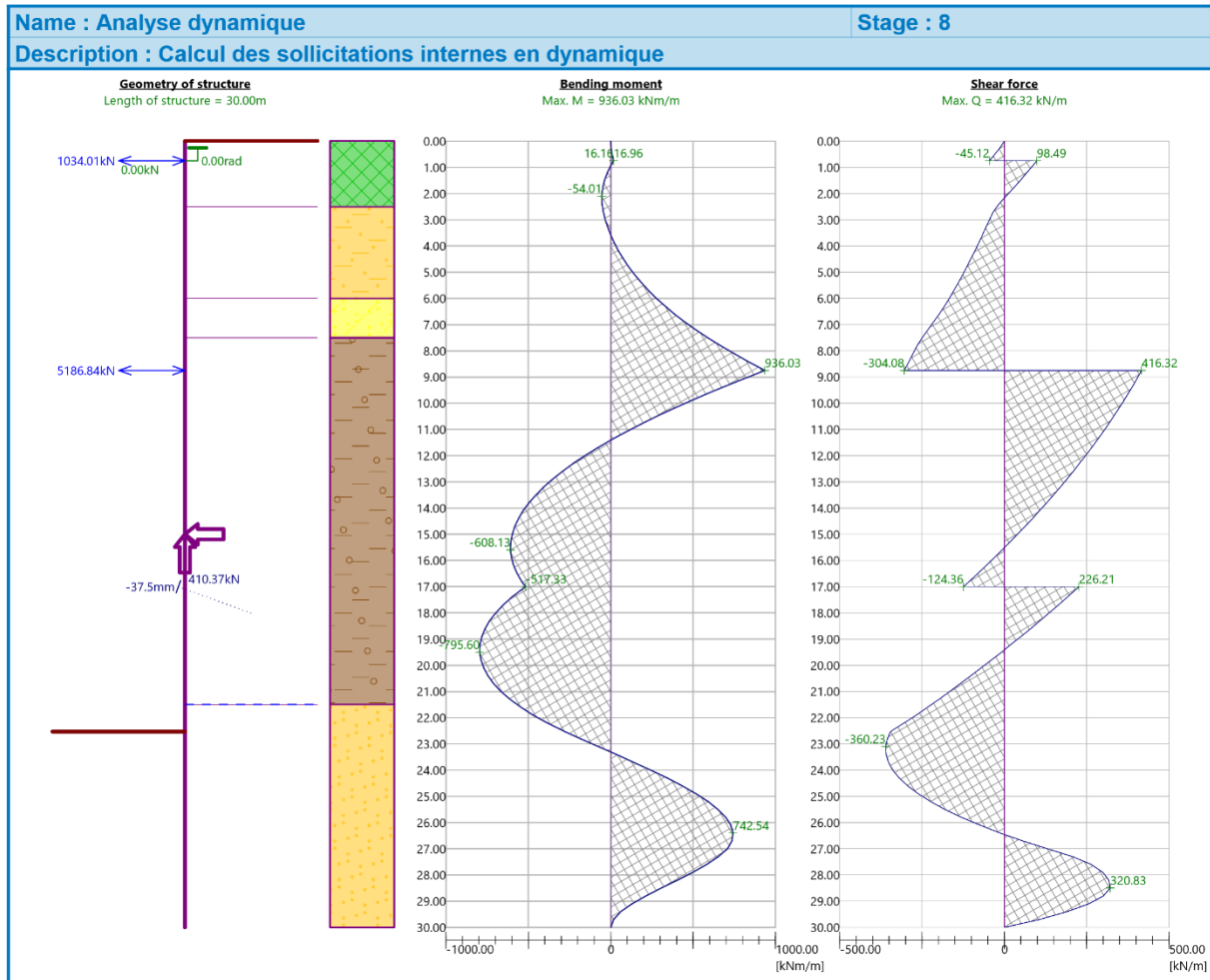
La vérification de la pression passive mobilisée en pied d'écran donne  $R_{mob} = 1\,767,20$  kN/m pour une pression passive maximale mobilisable de  $R_{max} = 2\,812,79$  kN/m, soit un coefficient de sécurité de  $SF_p = 1,59 > 1,50$ , jugé satisfaisant.

La vérification de la capacité portante verticale est également satisfaisante avec  $SF_f = 2,43 > 1,25$  et  $SF_v = 5,37 > 1,50$

### V.4.3.2 Sollicitations et efforts internes de la structure :

En situation sismique (phase 8), les efforts internes dans l'écran sont sensiblement amplifiés par rapport à la situation statique. Les valeurs maximales obtenues sont :

- Effort tranchant maximum :  $V = 416,32$  kN/m (soit 457,95 kN par pieu)
- Moment fléchissant maximum :  $M = 936,03$  kNm/m (soit 1 029,63 kNm par pieu)



**Figure V.33 : Diagrammes des sollicitations internes (moments et efforts tranchants) en situation sismique – solution mixte**

Le moment fléchissant maximal est atteint au niveau du deuxième buton ( $z = 8,75$  m), avec un saut de  $-304,08$  kN/m à  $+416,32$  kN/m, traduisant la très forte sollicitation de ce buton en situation sismique.

Par rapport à la situation statique ( $M = 722,98$  kNm/m), le moment augmente de  $+29,5$  %, et l'effort tranchant passe de  $348,82$  kN/m à  $416,32$  kN/m, soit une augmentation de  $+19,4$  %.

Les réactions dans les éléments de soutènement en situation sismique sont fortement amplifiées :

- Buton Sb 7 ( $z = 0,75$  m) :  $1\,034,01$  kN (contre  $560,85$  kN en statique, soit  $+84,4$  %)
- Buton Sb 1 ( $z = 8,75$  m) :  $5\,186,84$  kN (contre  $4\,308,33$  kN en statique, soit  $+20,4$  %)
- Tirant DYWIDAG ( $z = 17,00$  m) :  $410,37$  kN (contre  $321,64$  kN en statique, soit  $+27,6$  %)

L'amplification particulièrement marquée de la réaction du buton supérieur ( $z = 0,75$  m,  $+84,4$  %) traduit la forte mobilisation de la partie supérieure de l'écran sous l'effet conjugué des poussées sismiques horizontales et verticales.

La vérification de la stabilité interne du tirant reste satisfaisante en situation sismique avec un coefficient de sécurité de  $SF = 6,17 > 1,00$ .



### V.4.3.3 Déplacements de l'écran et contraintes associées :

En situation sismique (phase 8), les déplacements horizontaux de l'écran sont fortement amplifiés par rapport à la situation statique.

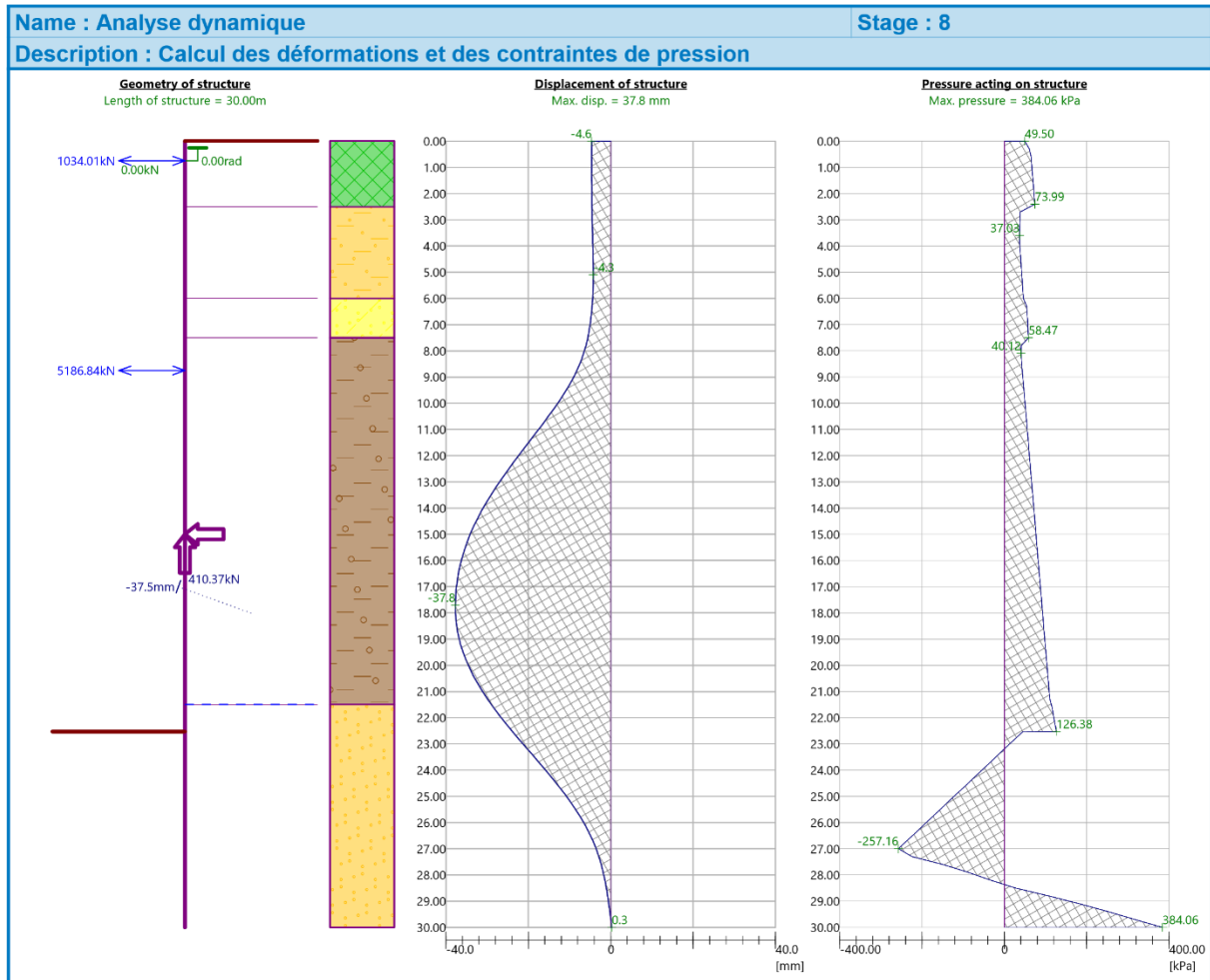


Figure V.34 : Déplacements horizontaux de l'écran en situation sismique – solution mixte

Le déplacement maximal atteint 37,8 mm contre 28,4 mm en phase 7, soit une augmentation de +33,1 %.

Ce déplacement est localisé au niveau du tirant d'ancrage ( $z = 17,00$  m, déplacement = -37,48 mm à -37,72 mm), dans la zone centrale non butonnée entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le fond d'excavation ( $z = 22,53$  m).

Le profil de déplacement en situation sismique montre une concentration importante des déformations dans la zone comprise entre  $z = 15,00$  m et  $z = 19,50$  m, avec des valeurs comprises entre -34,14 mm et -37,72 mm, traduisant la forte sollicitation de cette zone sous l'effet des forces sismiques.

En tête de paroi, le déplacement reste limité à 4,63 mm, en raison de la présence du buton supérieur qui contraint efficacement la partie haute de l'écran.

#### V.4.3.4 Tassements du sol :

En situation sismique (phase 8), les tassements en surface du terrain derrière l'écran atteignent leur valeur maximale de  $\delta_{\max} = 29,4$  mm à environ  $x = 13,19$  m derrière l'écran, contre 21,3 mm en situation statique (phase 7), soit une augmentation de +38,0 %.

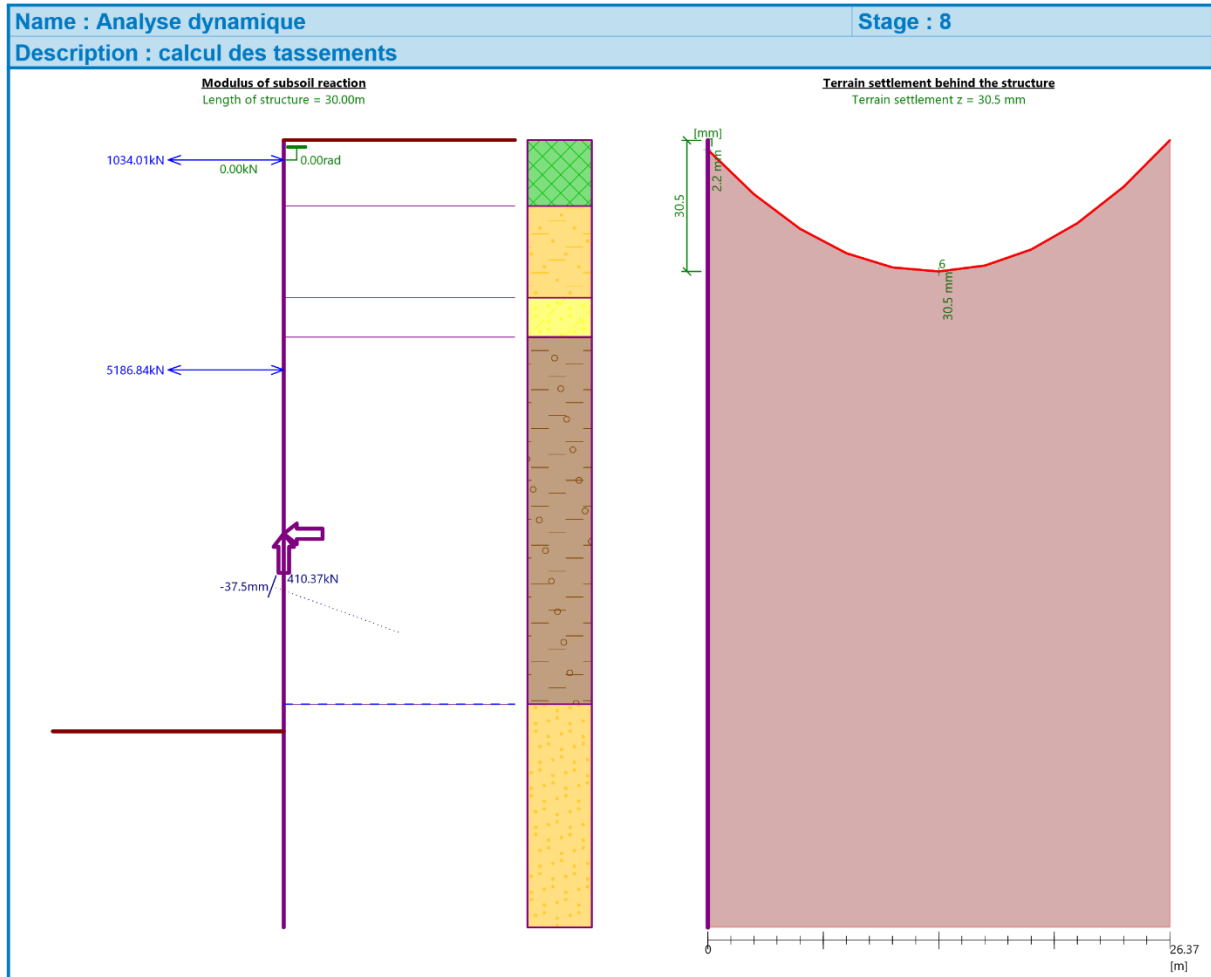


Figure V.35 : Tassements du sol en surface en situation sismique – solution mixte

Ce tassement sismique de 29,4 mm est le plus élevé des trois variantes étudiées (23,8 mm pour la solution avec butonnage et 22,4 mm pour la solution avec tirants d'ancrage), ce qui s'explique par la combinaison de la grande profondeur d'excavation, du nombre limité de niveaux de soutènement.

#### V.4.3.5 Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en Situation sismique :

La vérification de la stabilité globale du talus a été réalisée par la méthode de Bishop (surfaces de glissement circulaires), en situation sismique, avec prise en compte des coefficients pseudo-statiques  $K_h = 0,10$  et  $K_v = 0,03$ , conformément à l'approche ASD.

Le coefficient de sécurité requis est réduit à  $SF = 1,00$  en situation sismique.

L'analyse intègre la contribution du tirant d'ancrage actif ( $z = 17,00$  m) dans la résistance au glissement du massif.

Les paramètres de la surface de glissement critique optimisée sont les suivants :

- Centre de la surface de glissement :  $x = -4,92$  m ;  $z = 14,79$  m

- Rayon :  $R = 45,50 \text{ m}$
- Angles :  $\alpha_1 = -34,89^\circ$  ;  $\alpha_2 = 72,20^\circ$
- Poids total du sol au-dessus de la surface de glissement :  $19\,024,32 \text{ kN/m}$

Par rapport à la situation statique ( $R = 34,60 \text{ m}$  ; centre  $x = -5,99 \text{ m}$ ,  $z = 4,09 \text{ m}$ ), la surface de glissement critique en situation sismique présente un rayon nettement plus grand et un centre décalé vers le haut ( $z = 14,79 \text{ m}$  contre  $z = 4,09 \text{ m}$  en statique), traduisant une mobilisation plus profonde et plus étendue du massif de sol sous l'effet conjugué des forces sismiques horizontales et verticales.

Les résultats de la vérification sont :

- Somme des forces actives (déstabilisatrices) :  $F_a = 5\,596,42 \text{ kN/m}$
- Somme des forces passives (stabilisatrices) :  $F_p = 8\,608,95 \text{ kN/m}$
- Moment de glissement :  $M_a = 254\,637,03 \text{ kNm/m}$
- Moment résistant :  $M_p = 391\,707,03 \text{ kNm/m}$

Le coefficient de sécurité obtenu est :

$$SF = M_p / M_a = 1,54 > 1,00 = SF \text{ requis}$$

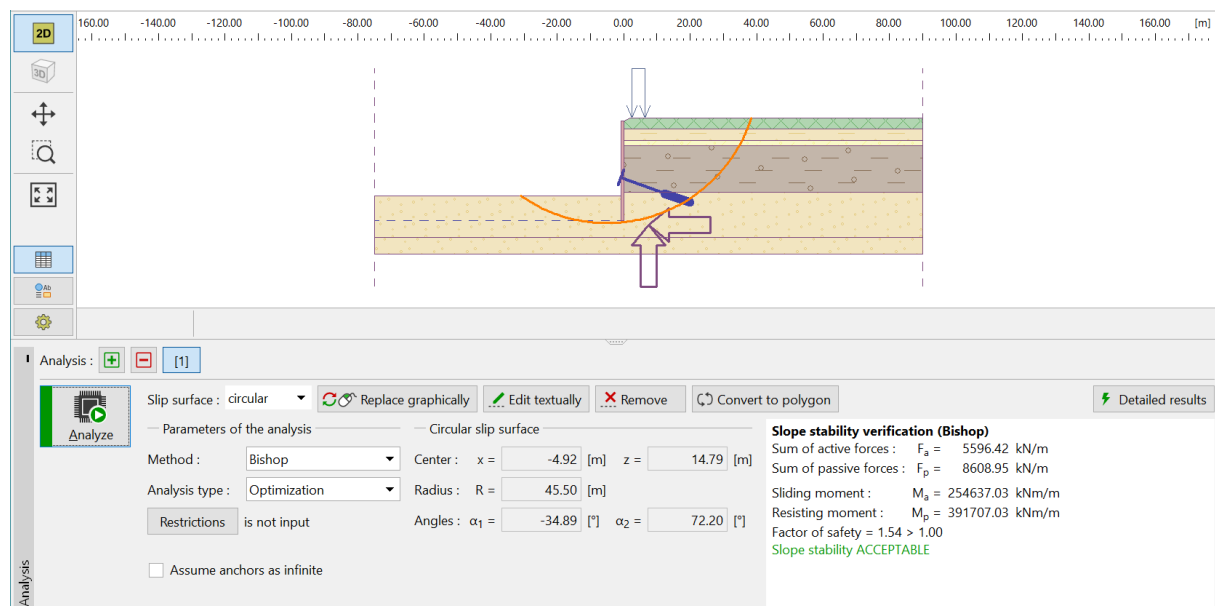


Figure V.36 : Vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique – solution mixte

La comparaison avec la situation statique ( $SF = 1,76$ ) montre une réduction du coefficient de sécurité de  $1,76$  à  $1,54$ , soit une diminution de  $12,5 \%$ , qui reste largement au-dessus du seuil requis de  $1,00$  en situation sismique.

La vérification de la capacité portante du tirant d'ancrage dans le plan de glissement sismique est satisfaisante :

- Tirant 1 ( $z = 17,00 \text{ m}$ ) : force =  $410,37 \text{ kN}$ , résistance à la traction  $R_t = 868,00 \text{ kN}$ , résistance à l'arrachement dans le sol  $R_e = 676,94 \text{ kN}$ , résistance à l'arrachement dans le coulis  $R_c = 502,94 \text{ kN}$ , taux d'utilisation =  $81,6 \%$  ✓

Le taux d'utilisation du tirant passe de 64,0 % en statique à 81,6 % en sismique, traduisant l'augmentation significative de la force dans le tirant sous effet sismique, tout en restant en dessous du seuil de rupture. La vérification de la stabilité des talus en situation sismique est SATISFAISANTE.

### V.4.4 Ferrailage des pieux de l'écran de soutènement, Solution mixte buton + tirant d'ancrage :

Le dimensionnement du ferrailage des pieux est réalisé conformément à la norme EN 1992-1-1 (EC2), en prenant en compte l'enveloppe des efforts internes issus de l'ensemble des phases de construction (phases 1 à 8). Le facteur partiel sur les charges appliqué est de 1,00. Les efforts de dimensionnement maximaux retenus sur l'enveloppe toutes phases confondues sont :

- Déplacement maximal : 37,8 mm (phase 8 sismique)
- Moment fléchissant maximal :  $M_{\max} = +936,03 \text{ kNm/m}$  (phase 8, au niveau du buton  $z = 8,75 \text{ m}$ )
- Moment fléchissant minimal :  $M_{\min} = -795,60 \text{ kNm/m}$  (phase 8, à  $z = 19,50 \text{ m}$ )
- Effort tranchant maximal :  $V_{\max} = 416,32 \text{ kN/m}$  (phase 8)

Les efforts internes ramenés à la section d'un pieu (espacement  $a = 1,10 \text{ m}$ ) sont :

- Moment de calcul :  $M_{Ed} = 1\,029,63 \text{ kNm}$
- Effort tranchant de calcul :  $V_{Ed} = 457,95 \text{ kN}$

#### V.4.4.1 Vérification à la flexion :

La section de pieu est vérifiée en flexion avec les caractéristiques suivantes :

- Diamètre du pieu :  $d = 0,80 \text{ m}$
- Enrobage :  $c = 50 \text{ mm}$
- Béton : C30/37, résistance caractéristique  $f_{ck} = 30,00 \text{ MPa}$
- Armatures longitudinales : 18 barres HA Ø25 mm
- Acier : B500A, limite élastique  $f_{yk} = 500,00 \text{ MPa}$
- Type de structure : poutre
- Taux d'armatures :  $\rho = 0,879 \% > \rho_{\min} = 0,151 \% \checkmark$

La vérification donne :

- Moment sollicitant :  $M_{Ed} = 1\,029,63 \text{ kNm}$
- Moment résistant :  $M_{Rd} = 1\,110,49 \text{ kNm}$

$M_{Rd} = 1\,110,49 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1\,029,63 \text{ kNm} \checkmark$

La vérification à la flexion est SATISFAISANTE, avec un taux d'utilisation de 92,7 %, traduisant un dimensionnement bien optimisé adapté aux fortes sollicitations de cette variante.

### V.4.4.2 Vérification à l'effort tranchant :

La section de pieu est vérifiée à l'effort tranchant avec les caractéristiques suivantes :

- Armatures transversales : cadres Ø12 mm, espacement 200 mm
- Section d'armatures transversales :  $A_{sw} = 2 \times 565,5 = 1\,131,0 \text{ mm}^2$
- Largeur efficace de la section :  $b_w = 0,70 \text{ m}$
- Hauteur utile :  $d = 0,64 \text{ m}$

La vérification donne :

- Effort tranchant ultime résistant :  $V_{Rd} = 708,09 \text{ kN}$
- Effort tranchant sollicitant :  $V_{Ed} = 457,95 \text{ kN}$

$$V_{Rd} = 708,09 \text{ kN} > V_{Ed} = 457,95 \text{ kN} \checkmark$$

La vérification à l'effort tranchant est SATISFAISANTE, avec un taux d'utilisation de 64,7 %, assurant une marge de sécurité suffisante vis-à-vis des efforts tranchants générés par cette variante.

### V.4.4.3 Conclusion du dimensionnement :

L'ensemble des vérifications de la section de pieu ( $d = 0,80 \text{ m}$ , espacement  $a = 1,10 \text{ m}$ , béton C30/37, acier B500A) est satisfaisant.

Le ferrailage retenu, composé de 18 barres longitudinales HA Ø25 mm avec des cadres transversaux Ø12 mm espacés de 200 mm, garantit la résistance de l'écran de soutènement vis-à-vis des sollicitations en flexion et en effort tranchant pour l'ensemble des phases de construction, y compris en situation sismique.

Le taux d'utilisation à la flexion de 92,7 % confirme l'optimisation du dimensionnement face aux sollicitations importantes générées par la grande profondeur d'excavation et l'intensité des accélérations sismiques appliquées. Le taux d'utilisation à l'effort tranchant de 64,7 % assure une marge de sécurité satisfaisante vis-à-vis des efforts transversaux.

Ce ferrailage, intermédiaire entre celui de la solution avec butonnage (13 barres HA Ø32 mm) et celui de la solution avec tirants d'ancrage (12 barres HA Ø20 mm), reflète le niveau de sollicitation intermédiaire de cette solution mixte.

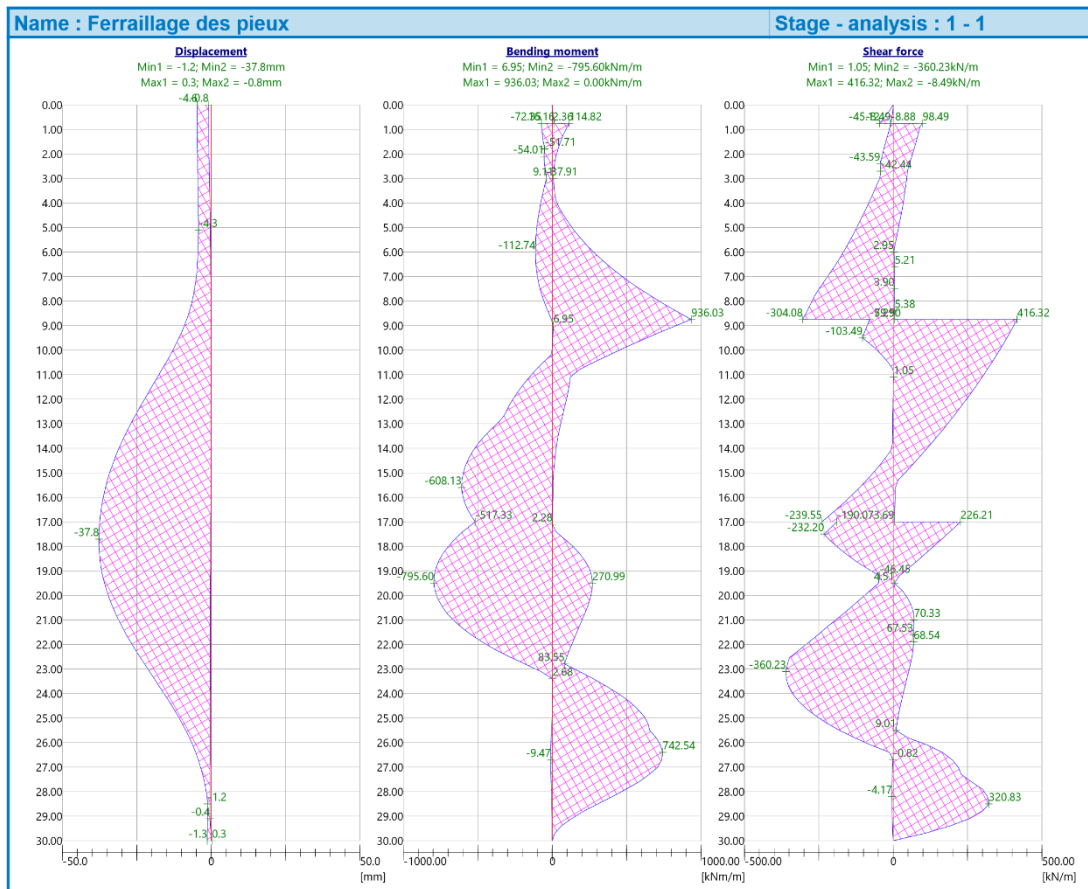


Figure V.37 : diagramme du dimensionnement – solution mixte

## V.4.5 Interprétation générale des résultats (solution mixte butons + tirant d'ancrage) :

### V.4.5.1 Interprétation de la situation statique :

L'analyse des résultats en situation statique, menée de la phase 1 à la phase 7, montre une évolution progressive des efforts internes, des déplacements et des tassements au fur et à mesure de l'approfondissement de l'excavation, avec la mise en place successive de deux butons métalliques en partie supérieure et d'un tirant d'ancrage DYWIDAG en partie inférieure de l'écran.

#### 1. Évolution des déplacements :

Durant les premières phases (phases 1 et 2), les déplacements horizontaux de l'écran restent très faibles, inférieurs à 0,8 mm, grâce à la faible profondeur d'excavation et à la présence de la poutre de couronnement. À partir de la phase 3, avec l'approfondissement de l'excavation à 9,50 m, les déplacements augmentent pour atteindre 3,8 mm, valeur qui se maintient en phase 4 grâce à la mise en place du deuxième bouton Sb 1 à  $z = 8,75$  m.

À partir de la phase 5 (excavation à 17,50 m), les déplacements augmentent sensiblement pour atteindre 9,1 mm, traduisant la sollicitation accrue de l'écran sur la grande hauteur non soutenue sous le deuxième bouton. En phase 6, avec la mise en place du tirant d'ancrage à  $z = 17,00$  m, les déplacements restent maîtrisés à 9,2 mm.

En phase 7, correspondant à l'excavation finale à 22,53 m, le déplacement maximal atteint 28,4 mm, localisé au niveau du tirant d'ancrage ( $z = 17,00$  m), dans la zone de grande hauteur entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le fond d'excavation ( $z = 22,53$  m). Le saut important entre la phase 6 (9,2 mm) et la phase 7 (28,4 mm), soit une augmentation de +208 %, traduit la forte sollicitation de l'écran lors du dernier approfondissement de l'excavation, malgré la présence du tirant. Ce comportement est caractéristique de la solution mixte, où la grande distance verticale entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le tirant ( $z = 17,00$  m), soit 8,25 m, crée une zone de flexion importante dans la partie centrale de l'écran.

## 2. Évolution des efforts internes :

Les efforts internes dans l'écran augmentent progressivement avec l'avancement de l'excavation, avec un saut notable à partir de la phase 5 ( $M = 354,70$  kNm/m) puis une forte augmentation en phase 7.

Le moment fléchissant maximal atteint 722,98 kNm/m en phase finale, localisé au niveau du deuxième buton ( $z = 8,75$  m), avec un saut brutal de -261,98 kN/m à +336,40 kN/m traduisant la réaction importante de ce buton. L'effort tranchant maximal atteint 348,82 kN/m en phase 7. Ces valeurs se situent dans une position intermédiaire entre celles de la solution avec butonnage ( $M = 847,12$  kNm/m et  $V = 510,35$  kN/m) et celles de la solution avec tirants d'ancrage ( $M = 370,11$  kNm/m et  $V = 231,50$  kN/m), confirmant le caractère intermédiaire de la solution mixte en termes de sollicitations structurales.

Les réactions dans les éléments de soutènement en phase 7 montrent une concentration prononcée des efforts au niveau du buton Sb 1 ( $z = 8,75$  m : 4 308,33 kN), qui reprend l'essentiel des poussées des terres sur la grande hauteur d'excavation, traduisant le rôle prépondérant de ce buton intermédiaire dans l'équilibre de l'écran. Le buton supérieur Sb 7 ( $z = 0,75$  m) mobilise 560,85 kN, et le tirant DYWIDAG ( $z = 17,00$  m) reprend 321,64 kN.

## 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface du terrain derrière l'écran restent très faibles durant les premières phases ( $\delta_{\max} = 0,3$  mm en phases 1 et 2). Ils augmentent progressivement pour atteindre 1,9 mm en phases 3 et 4, puis 6,5 mm en phase 5, et enfin 21,3 mm en phase 7, avec un maximum localisé à environ 13,19 m derrière l'écran.

Ces tassements, comparés à ceux de la solution avec tirants d'ancrage (14,0 mm) et de la solution avec butonnage (17,1 mm) en situation statique finale, montrent que la solution mixte génère les tassements les plus élevés des trois variantes, ce qui s'explique par les déplacements importants de l'écran en phase 7 et leur impact sur le massif de sol adjacent.

## 4. Stabilité globale et vérification du tirant :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation statique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,76$ , nettement supérieur au seuil requis de 1,50. Le tirant d'ancrage est vérifié avec un taux d'utilisation satisfaisant de 64,0 %, confirmant une bonne marge de sécurité vis-à-vis de l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement. La vérification de la stabilité interne du tirant est également satisfaisante pour toutes les phases de construction, avec des coefficients de sécurité largement supérieurs au minimum requis de 1,50.

### V.4.5.2 Interprétation de la situation sismique :

La phase 8 correspond à la vérification de l'ouvrage sous sollicitation sismique, avec application d'une accélération horizontale  $K_h = 0,10$  et d'une accélération verticale  $K_v = 0,03$ , selon la méthode de Mononobe-Okabe, dans la configuration de la phase 7 (excavation à 22,53 m, deux butons et un tirant actif, nappe à 21,50 m).

## 1. Évolution des déplacements :

Le déplacement maximal de l'écran passe de 28,4 mm en situation statique à 37,8 mm en situation sismique, soit une augmentation de +33,1 %. Le profil de déplacement en situation



sismique montre une concentration importante des déformations dans la zone comprise entre  $z = 15,00$  m et  $z = 19,50$  m, avec des valeurs comprises entre  $-34,14$  mm et  $-37,72$  mm, traduisant la forte sollicitation de cette zone non soutenue sous l'effet des forces sismiques. En tête de paroi, le déplacement reste limité à  $4,63$  mm grâce à la présence du buton supérieur qui contraint efficacement la partie haute de l'écran.

Contrairement à la solution avec tirants d'ancrage où la mobilisation est homogène sur toute la hauteur, la solution mixte présente une concentration des déplacements dans la zone centrale entre le deuxième buton ( $z = 8,75$  m) et le fond d'excavation, similaire au comportement observé dans la solution avec butonnage.

## 2. Évolution des efforts internes :

Le séisme induit une augmentation significative de l'ensemble des sollicitations par rapport à la situation statique.

Le moment fléchissant maximal passe de  $722,98$  kNm/m (phase 7) à  $936,03$  kNm/m (phase 8), soit une augmentation de  $+29,5$  %.

L'effort tranchant maximal passe de  $348,82$  kN/m à  $416,32$  kN/m, soit une augmentation de  $+19,4$  %. Ces augmentations, comparables à celles observées dans la solution avec butonnage ( $+30,9$  % sur le moment), témoignent de la sensibilité de cette solution mixte à l'aléa sismique, particulièrement renforcée par la valeur élevée de l'accélération verticale appliquée.

Les réactions dans les éléments de soutènement sont fortement amplifiées en situation sismique. Le buton supérieur Sb 7 ( $z = 0,75$  m) voit sa réaction passer de  $560,85$  kN à  $1\,034,01$  kN, soit une augmentation de  $+84,4$  %, traduisant la forte mobilisation de la partie supérieure de l'écran sous l'effet conjugué des poussées sismiques horizontales et verticales. Le buton Sb 1 ( $z = 8,75$  m) atteint  $5\,186,84$  kN ( $+20,4$  %), et le tirant DYWIDAG ( $z = 17,00$  m) atteint  $410,37$  kN ( $+27,6$  %). La vérification de la stabilité interne du tirant reste largement satisfaisante en situation sismique, avec un coefficient de sécurité de  $SF = 6,17$ , très supérieur au seuil requis de  $1,00$ .

## 3. Évolution des tassements :

Les tassements en surface passent de  $21,3$  mm en situation statique à  $29,4$  mm en situation sismique, soit une augmentation de  $+38,0$  %, avec un maximum localisé à  $x \approx 13,19$  m derrière l'écran. Ce tassement sismique de  $29,4$  mm est le plus élevé des trois variantes étudiées ( $23,8$  mm pour la solution avec butonnage et  $22,4$  mm pour la solution avec tirants d'ancrage), ce qui s'explique par la combinaison de la grande profondeur d'excavation, du nombre limité de niveaux de soutènement.

## 4. Stabilité globale en situation sismique :

La vérification de la stabilité globale par la méthode de Bishop en situation sismique donne un coefficient de sécurité de  $SF = 1,54$ , largement supérieur au seuil requis réduit de  $1,00$  applicable en situation sismique. Par rapport à la situation statique ( $SF = 1,76$ ), le coefficient de sécurité enregistre une réduction de  $12,5$  %, qui reste néanmoins très au-dessus du seuil requis. La surface de glissement critique en situation sismique présente un rayon nettement plus grand ( $R = 45,50$  m contre  $34,60$  m en statique) et un centre décalé vers le haut ( $x = -4,92$  m ;  $z = 14,79$  m contre  $z = 4,09$  m en statique), traduisant une mobilisation plus profonde et plus étendue du massif de sol sous l'effet conjugué des forces sismiques horizontales et verticales. Malgré l'augmentation des forces déstabilisatrices ( $F_a = 5\,596,42$  kN/m contre  $5\,436,80$  kN/m en statique), la résistance du massif et la contribution du tirant restent suffisantes pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

La vérification de la capacité portante du tirant dans le plan de glissement sismique est satisfaisante, avec un taux d'utilisation de  $81,6$  %, sensiblement plus élevé qu'en situation statique ( $64,0$  %) en raison de l'augmentation de la force dans le tirant sous effet sismique. Le

tirant vérifie les conditions de résistance à la traction ( $R_t = 868,00 \text{ kN}$ ) ainsi que les vérifications relatives à l'arrachement dans le sol et dans le coulis de scellement, tout en restant en dessous du seuil de rupture.

### V.4.5.3 Conclusion de l'interprétation :

L'analyse comparative des résultats en situations statique et sismique pour la solution mixte butons + tirant d'ancrage permet de dégager les conclusions suivantes :

La solution mixte combine deux butons métalliques en partie supérieure ( $z = 0,75 \text{ m}$  et  $z = 8,75 \text{ m}$ ) et un tirant d'ancrage DYWIDAG temporaire en partie inférieure ( $z = 17,00 \text{ m}$ ). Cette configuration assure une maîtrise satisfaisante des déformations et des efforts internes durant les phases initiales de construction, mais présente une zone de flexion importante dans la partie centrale de l'écran, entre le deuxième buton et le tirant, sur une hauteur non soutenue de  $8,25 \text{ m}$ . Cette caractéristique explique la concentration des déplacements maximaux ( $28,4 \text{ mm}$  en statique,  $37,8 \text{ mm}$  en sismique) dans cette zone et les efforts élevés observés au niveau du buton Sb 1.

Le ferrailage retenu pour les pieux (18 barres HA  $\varnothing 25 \text{ mm}$  en armatures longitudinales et cadres  $\varnothing 12 \text{ mm}$  espacés de  $200 \text{ mm}$ , béton C30/37, acier B500A) satisfait aux vérifications à la flexion et à l'effort tranchant pour l'ensemble des phases, y compris en situation sismique, avec un taux d'utilisation à la flexion de  $92,7 \%$  ( $M_{Rd} = 1\,110,49 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1\,029,63 \text{ kNm}$ ) et un taux d'utilisation à l'effort tranchant de  $64,7 \%$  ( $V_{Rd} = 708,09 \text{ kN} > V_{Ed} = 457,95 \text{ kN}$ ). Le taux d'utilisation élevé à la flexion ( $92,7 \%$ ) traduit un dimensionnement bien optimisé mais avec une marge de sécurité plus réduite que celle des autres variantes, témoignant du niveau intermédiaire élevé des sollicitations de cette solution mixte.

Ce ferrailage, intermédiaire entre celui de la solution avec butonnage (13 barres HA  $\varnothing 32 \text{ mm}$ ) et celui de la solution avec tirants d'ancrage (12 barres HA  $\varnothing 20 \text{ mm}$ ), reflète le niveau de sollicitation intermédiaire de cette solution.

Enfin, la stabilité globale de l'ouvrage est assurée dans les deux situations, avec des coefficients de sécurité de  $SF = 1,76$  en statique et  $SF = 1,54$  en sismique, tous deux supérieurs aux valeurs requises respectives de  $1,50$  et  $1,00$ .

La solution mixte butons + tirant d'ancrage est donc techniquement validée, mais présente, par rapport aux deux autres variantes étudiées, des déplacements maximaux plus importants ( $28,4 \text{ mm}$  contre  $15,3 \text{ mm}$  pour la solution avec tirants et valeur comparable à la solution avec butonnage) et des tassements plus élevés en situations statique et sismique ( $21,3 \text{ mm}$  et  $29,4 \text{ mm}$  respectivement).

La marge de sécurité globale en situation sismique ( $SF = 1,54$ ) reste néanmoins comparable à celle de la solution avec tirants d'ancrage ( $SF = 1,53$ ) et supérieure à celle de la solution avec butonnage ( $SF = 1,48$ ), confirmant un niveau de sécurité satisfaisant face à l'aléa sismique.

### CHAPITRES VI : ÉTUDE DES COÛTS ET DÉLAIS

#### VI.1 Introduction :

Le chapitre précédent a permis, à travers la modélisation numérique réalisée sous le logiciel GEO5 module Sheeting Check, de caractériser le comportement mécanique de chacune des trois variantes de soutènement étudiées pour l'écran de référence du puits de ventilation PV5. Les résultats obtenus, portant sur les moments fléchissants, les déplacements horizontaux et les efforts dans les appuis, ont constitué la base technique de la comparaison structurale entre les variantes.

Cependant, le choix d'une solution de soutènement ne saurait se fonder uniquement sur des critères techniques. Dans le contexte d'un projet d'infrastructure urbaine de l'envergure de l'extension du métro d'Alger, les considérations économiques et les contraintes de planning occupent une place déterminante dans le processus décisionnel. En effet, le coût de réalisation et la durée d'exécution constituent deux paramètres essentiels pour le maître d'ouvrage l'Entreprise Métro d'Alger dans l'évaluation et la sélection de la solution la mieux adaptée.

Le présent chapitre a pour objectif de procéder à une analyse technico-économique comparative des trois variantes, articulée autour de deux axes principaux. Le premier axe porte sur l'estimation des coûts de fourniture des matériaux pour chaque variante, en s'appuyant sur les prix unitaires issus du bordereau des prix du marché de réalisation du lot 1 de l'extension du métro d'Alger. Le second axe concerne l'analyse des délais d'exécution propres à chaque système d'étalement, en tenant compte des rendements journaliers de chantier et du phasage séquentiel des tâches. Une synthèse comparative, illustrée par des diagrammes, clôturera ce chapitre en dégagant la solution la plus avantageuse sur le plan technico-économique.

#### VI.2 Analyse des coûts

##### VI.2.1 Méthodologie et hypothèses de calcul :

L'estimation des coûts porte sur les éléments constitutifs du système de soutènement pour l'écran de la coupe A-A. Une particularité essentielle de cette étude concerne le mode de calcul des prix des pieux forés et de la poutre de couronnement : ces deux éléments sont chiffrés selon un prix forfaitaire au mètre linéaire (de l'ordre de 80 000 à 150 000 DA/ml), englobant le forage, la fourniture du béton, le ferrailage ainsi que la mise en œuvre. Ce prix forfaitaire est indépendant du détail du ferrailage adopté. Par conséquent, le diamètre ( $\varnothing 800$  mm) et la longueur (30,00 m) des pieux étant identiques pour les trois variantes, le coût des pieux est rigoureusement identique d'une variante à l'autre, quelle que soit la section d'acier longitudinal retenue. Il en va de même pour la poutre de couronnement, élément commun aux trois variantes, dont le coût forfaitaire est identique dans tous les cas et n'influe donc pas sur la comparaison.

Les prix unitaires sont issus du bordereau des prix du marché de réalisation établi par l'Entreprise Métro d'Alger dans le cadre de l'extension El Harrach – Aéroport International Houari Boumediene. Le tableau suivant récapitule les prix retenus pour chaque nature d'ouvrage :

**Tableau VI. 1 : Prix unitaires selon BPU Bordereau du projet retenu pour l'estimation des coûts**

| N°<br>Réf. | Désignation                                                                          | Unité          | PU (DA)    | Source           |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------|------------------|
| —          | Pieu foré Ø800 mm béton armé C30/37 XC2 (forage, ferraillage et mise en œuvre)       | ml             | 150 000,00 | Prix forfaitaire |
| —          | Poutre de couronnement béton armé (commune aux trois variantes)                      | ml             | Forfait    | Prix forfaitaire |
| 05.205     | Profilé acier de construction S275 / poutre métallique reconstituée                  | kg             | 520,00     | Bordereau EMA    |
| 05.301     | Tirant d'ancrage jusqu'à 700 kN (forage, injection, tête d'ancrage, mise en tension) | ml             | 24 300,00  | Bordereau EMA    |
| —          | Massifs d'appui (béton armé + fourniture et pose)                                    | m <sup>3</sup> | 80 000,00  | Prix forfaitaire |

Bien que le ferraillage des pieux n'ait aucune incidence sur le prix payé (tarification forfaitaire), il varie néanmoins selon la variante étudiée, car le type d'étalement conditionne les efforts transmis à la paroi et, par conséquent, le dimensionnement optimal des armatures longitudinales. Ainsi, afin de faire travailler les pieux de manière optimale pour chaque configuration :

— **Variante projet (butons)** : les pieux sont ferraillés avec 13 barres HA Ø32, correspondant aux efforts de flexion importants induits par le butonnage.

— **Variante 1 (tirants seuls)** : les pieux sont ferraillés avec 12 barres HA Ø20, configuration allégée rendue possible par la répartition plus favorable des efforts grâce aux cinq niveaux de tirants d'ancrage précontraints.

— **Variante 2 (solution mixte)** : les pieux comportent 18 barres HA Ø25, configuration intermédiaire adaptée à la combinaison des butons supérieurs et du tirant inférieur.

Le tableau suivant compare les sections d'acier longitudinal des pieux et met en évidence le taux de réduction d'armature par rapport à la solution du projet, prise comme référence (poids linéiques réels : HA32 = 6,313 kg/m, HA25 = 3,854 kg/m, HA20 = 2,466 kg/m, HA12 = 0,888 kg/m) :

**Tableau VI. 2 : Comparaison du ferrailage des pieux et taux de réduction d'acier par rapport à la solution du projet**

| Paramètre                             | Variante projet        | Variante 1            | Variante 2            | Justification                                           |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| Armatures longitudinales              | 13 HA Ø32              | 12 HA Ø20             | 18 HA Ø25             | Optimisation selon les efforts transmis par l'étalement |
| Section d'acier longitudinal As       | 104,55 cm <sup>2</sup> | 37,70 cm <sup>2</sup> | 88,36 cm <sup>2</sup> | 13 HA32 / 12 HA20 / 18 HA25                             |
| Réduction de section As / réf. projet | — (réf.)               | – 63,9 %              | – 15,5 %              | Économie de section par rapport à la solution du projet |
| Armature hélicoïdale                  | Ø12, pas 15cm          | Ø12, pas 15cm         | Ø12, pas 15cm         | Identique pour les trois variantes                      |
| Diamètre des pieux                    | Ø 800 mm               | Ø 800 mm              | Ø 800 mm              | Identique pour les trois variantes                      |
| Longueur totale des pieux             | 30,00 m                | 30,00 m               | 30,00 m               | Forage complet — ressillage puis poutre                 |
| Poids acier total / pieu              | 2 819,16 kg            | 1 244,85 kg           | 2 438,25 kg           | Calculé selon poids linéiques réels                     |
| Poids acier total (16 pieux)          | 45 106,56 kg           | 19 917,60 kg          | 39 012,00 kg          | Réduction V1 : – 55,8 %<br>  V2 : – 13,5 % / réf. VP    |

Ce tableau met en évidence une optimisation significative du ferrailage : la variante 1 permet une réduction de près de 55,8 % du poids total d'acier des pieux par rapport à la solution du projet, et la variante 2 une réduction de 13,5 %. Il convient toutefois de souligner que, du fait de la tarification forfaitaire des pieux, cette réduction d'acier ne se traduit par aucune diminution du prix facturé au maître d'ouvrage : le coût des pieux reste identique pour les trois variantes. Cette économie de matière constitue néanmoins un avantage réel pour l'entreprise de réalisation, qui consomme moins d'acier tout en étant rémunérée au même prix forfaitaire, et demeure ainsi gagnante sur le plan de la marge d'exécution. La poutre de couronnement (17,40 m × 1,50 m × 1,00 m), commune aux trois variantes, est de même chiffrée au forfait et mentionnée pour mémoire, sans incidence sur le résultat comparatif.

Les massifs d'appui, présents uniquement pour les variantes comportant des butons (variante projet et variante 2), sont estimés à un coût forfaitaire de 80 000 DA/m<sup>3</sup> (béton armé + plaques métalliques inclus). Les dimensions retenues sont : TYPE 1 (1,00 × 1,20 × 0,30 m) pour les niveaux SB1 et TYPE 2 (0,80 × 0,80 × 0,30 m) pour le niveau SB6.

## VI.2.2 Coûts Variante du projet (Pieux + Butons)

### VI.2.2.1 Coût des pieux :

Les 16 pieux de la variante projet, de diamètre Ø800 mm et de longueur 30,00 m, sont chiffrés au prix forfaitaire de 150 000 DA/ml. Bien que ferrillés avec 13 barres HA Ø32 et une armature hélicoïdale Ø12 au pas de 15 cm, leur coût ne dépend pas du ferrailage :

**Tableau VI. 3 : Coût des pieux forés, Variante projet**

| Désignation                                                                                       | Unité | Quantité | PU (DA)    | Montant (DA)         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|------------|----------------------|
| Pieux forés Ø800 — 16 pieux × 30,00 m (forfait : béton + ferrailage 13HA32 + Ø12 + mise en œuvre) | ml    | 480      | 150 000,00 | 72 000 000,00        |
| —                                                                                                 | —     | —        | —          | —                    |
| <b>TOTAL PIEUX — Variante projet</b>                                                              |       |          |            | <b>72 000 000,00</b> |

## VI.2.2.2 Coût du système de butonnage et des massifs d'appui :

Le système de butonnage comprend trois niveaux : N1 et N2 avec le système SB1 (3 systèmes HEB500 avec contreventement par niveau), et N3 avec le système SB6 (3 systèmes 2HEB500). Les massifs d'appui TYPE 1 (4 unités pour N1 + N2) et TYPE 2 (2 unités pour N3) sont calculés au forfait de 80 000 DA/m<sup>3</sup> :

**Tableau VI. 4 : Coût du butonnage et des massifs d'appui, Variante projet**

| Désignation                                                                            | Unité          | Quantité         | PU (DA)   | Montant (DA)        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|-----------|---------------------|
| Acier S275 — N1 : 3 × SB1 [HEB500 (L=6,00m) + 2×HEB140] = 3 883,62 kg                  | kg             | 3 883,62         | 520,00    | 2 019 482,00        |
| Acier S275 — N2 : 3 × SB1 (identique N1) = 3 883,62 kg                                 | kg             | 3 883,62         | 520,00    | 2 019 482,00        |
| Acier S275 — N3 : 3 × SB6 [2×HEB500 (L=5,08m) + 2×HEB140] = 6 136,50 kg                | kg             | 6 136,50         | 520,00    | 3 190 980,00        |
| <b>Sous-total acier S275 — Butonnage</b>                                               | kg             | <b>13 903,74</b> |           | <b>7 229 945,00</b> |
| Massifs d'appui TYPE 1 (N1+N2) : 4 massifs × 0,36 m <sup>3</sup> = 1,44 m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | 1,440            | 80 000,00 | 115 200,00          |
| Massifs d'appui TYPE 2 (N3) : 2 massifs × 0,192 m <sup>3</sup> = 0,384 m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> | 0,384            | 80 000,00 | 30 720,00           |
| <b>Sous-total massifs d'appui</b>                                                      | m <sup>3</sup> | <b>1,824</b>     |           | <b>145 920,00</b>   |

## VI.2.2.3 Coût total — Variante projet :

La poutre de couronnement, commune aux trois variantes, est chiffrée au forfait et mentionnée pour mémoire (sans incidence comparative). Le coût total de la variante projet est récapitulé ci-dessous :

**Tableau VI. 5 : Synthèse du coût total Variante projet**

| Poste                                          | Montant (DA)         | Part (%)     |
|------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| Pieux forés Ø800 (forfait au ml)               | 72 000 000,00        | 90,7 %       |
| Poutre de couronnement (forfait, pour mémoire) | —                    | —            |
| Butonnage — acier S275 (SB1 + SB6)             | 7 229 945,00         | 9,1 %        |
| Massifs d'appui (6 massifs — TYPE 1 et TYPE 2) | 145 920,00           | 0,2 %        |
| <b>TOTAL VARIANTE PROJET</b>                   | <b>79 375 865,00</b> | <b>100 %</b> |

Le coût total de la variante projet s'établit à 79 375 865 DA. Le poste pieux représente 90,7 % du coût total, suivi du butonnage (9,1 %). Les massifs d'appui (0,2 %) constituent un poste secondaire. Cette solution, retenue par le bureau d'études, constitue la référence économique de l'étude comparative.

## **VI.2.3 Coûts Variante 1 proposée (Pieux + 5 niveaux de tirants)**

### **VI.2.3.1 Coût des pieux :**

La variante 1 utilise des pieux ferrailés avec 12 barres HA Ø20, configuration allégée par rapport à la variante projet (réduction de 55,8 % du poids d'acier). Toutefois, en raison de la tarification forfaitaire, le coût des pieux demeure identique à celui des autres variantes :

**Tableau VI. 6 : Coût des pieux forés, Variante 1**

| Désignation                                                                                       | Unité | Quantité | PU (DA)    | Montant (DA)         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|------------|----------------------|
| Pieux forés Ø800 — 16 pieux × 30,00 m (forfait : béton + ferrailage 12HA20 + Ø12 + mise en œuvre) | ml    | 480      | 150 000,00 | 72 000 000,00        |
| —                                                                                                 | —     | —        | —          | —                    |
| <b>TOTAL PIEUX Variante 1</b>                                                                     |       |          |            | <b>72 000 000,00</b> |

### **VI.2.3.2 Coût des tirants d'ancrage :**

La variante 1 ne comporte ni massifs d'appui ni butonnage. Le coût de l'étalement est entièrement constitué par les tirants d'ancrage, au nombre de 75 (5 niveaux × 15 tirants) de 22,00 m chacun, calculés au prix de 24 300 DA/ml conformément au poste 05.301 du bordereau :



**Tableau VI. 7 : Coût des tirants d'ancrage, Variante 1**

| Désignation                                                       | Unité | Quantité     | PU (DA)   | Montant (DA)         |
|-------------------------------------------------------------------|-------|--------------|-----------|----------------------|
| N1 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m) — précontrainte 30 kN    | ml    | 330          | 24 300,00 | 8 019 000,00         |
| N2 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m) — précontrainte 150 kN   | ml    | 330          | 24 300,00 | 8 019 000,00         |
| N3 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m) — précontrainte 150 kN   | ml    | 330          | 24 300,00 | 8 019 000,00         |
| N4 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m) — précontrainte 150 kN   | ml    | 330          | 24 300,00 | 8 019 000,00         |
| N5 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m) — précontrainte 150 kN   | ml    | 330          | 24 300,00 | 8 019 000,00         |
| <b>TOTAL TIRANTS — Variante 1 (75 tirants × 22 ml = 1 650 ml)</b> | ml    | <b>1 650</b> |           | <b>40 095 000,00</b> |

## VI.2.3.3 Coût total Variante 1 :

**Tableau VI. 8 : Synthèse du coût total, Variante 1**

| Poste                                              | Montant (DA)          | Part (%)     |
|----------------------------------------------------|-----------------------|--------------|
| Pieux forés Ø800 (forfait au ml)                   | 72 000 000,00         | 64,2 %       |
| Poutre de couronnement (forfait, pour mémoire)     | —                     | —            |
| Tirants d'ancrage — 5 niveaux × 15 tirants × 22 ml | 40 095 000,00         | 35,8 %       |
| <b>TOTAL VARIANTE 1</b>                            | <b>112 095 000,00</b> | <b>100 %</b> |

Le coût total de la variante 1 s'élève à 112 095 000 DA, soit + 41,2 % par rapport à la variante projet. Ce surcoût considérable est entièrement imputable aux tirants d'ancrage, qui représentent 35,8 % du coût total. L'optimisation du ferrailage des pieux (12HA20 au lieu de 13HA32), bien que techniquement avantageuse, ne génère aucune économie sur le prix forfaitaire des pieux et ne compense donc pas le coût élevé des tirants. Cette solution présente néanmoins l'avantage de libérer totalement l'espace intérieur de la fouille.

## VI.2.4 Coûts Variante 2 proposée (Solution mixte)

### VI.2.4.1 Coût des pieux :

La variante 2 utilise des pieux ferrailés avec 18 barres HA Ø25, configuration intermédiaire (réduction de 13,5 % du poids d'acier). De même, le coût des pieux reste identique au prix forfaitaire :

**Tableau VI. 9 : Coût des pieux forés, Variante 2**

| Désignation                                                                                       | Unité | Quantité | PU (DA)    | Montant (DA)         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|------------|----------------------|
| Pieux forés Ø800 — 16 pieux × 30,00 m (forfait : béton + ferrailage 18HA25 + Ø12 + mise en œuvre) | ml    | 480      | 150 000,00 | 72 000 000,00        |
| —                                                                                                 | —     | —        | —          | —                    |
| <b>TOTAL PIEUX Variante 2</b>                                                                     |       |          |            | <b>72 000 000,00</b> |

## VI.2.4.2 Coût du butonnage :

Le butonnage comprend deux niveaux, chacun constitué de 3 systèmes avec contreventement, à l'image du système SB1 : N1 avec 3 systèmes [HEB200 (L = 6,00 m) + 2 × HEB140 de contreventement], et N2 avec 3 systèmes SB1 [HEB500 (L = 6,00 m) + 2 × HEB140 de contreventement]. Les massifs d'appui sont au nombre de 4 (TYPE 1, pour les deux niveaux de butonnage) :

**Tableau VI. 10 : Coût du butonnage et des massifs d'appui, Variante 2**

| Désignation                                                     | Unité | Quantité | PU (DA)   | Montant (DA) |
|-----------------------------------------------------------------|-------|----------|-----------|--------------|
| Acier S235 N1 : 3 × [HEB200 (L=6,00m) + 2×HEB140] = 2 195,22 kg | kg    | 2 195,22 | 520,00    | 1 141 514,00 |
| Acier S275 N2 : 3 × SB1 [HEB500 + 2×HEB140] = 3 883,62 kg       | kg    | 3 883,62 | 520,00    | 2 019 482,00 |
| Massifs d'appui TYPE 1 4 massifs × 0,36 m³ = 1,44 m³            | m³    | 1,440    | 80 000,00 | 115 200,00   |

## VI.2.4.3 Coût des tirants d'ancrage :

La variante 2 ne comporte qu'un seul niveau de tirants (N3), avec 15 tirants de 22,00 m chacun espacés de 1,10 m, soit 330 mètres linéaires au prix de 24 300 DA/ml :

**Tableau VI. 11 : Coût des tirants d'ancrage, Variante 2**

| Désignation                                                                      | Unité | Quantité | PU (DA)   | Montant (DA) |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|-----------|--------------|
| N3 — 15 tirants × 22 ml (Ll=14m + Ls=8m), espacés de 1,10 m précontrainte 150 kN | ml    | 330      | 24 300,00 | 8 019 000,00 |

## VI.2.4.4 Coût total Variante 2 :

**Tableau VI. 12 : Synthèse du coût total, Variante 2**

| Poste                                          | Montant (DA)         | Part (%)     |
|------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| Pieux forés Ø800 (forfait au ml)               | 72 000 000,00        | 86,4 %       |
| Poutre de couronnement (forfait, pour mémoire) | —                    | —            |
| Butonnage — acier S275 (HEB200 N1 + SB1 N2)    | 3 160 996,00         | 3,8 %        |
| Massifs d'appui — 4 massifs TYPE 1 (N1 + N2)   | 115 200,00           | 0,1 %        |
| Tirants d'ancrage — N3 : 15 tirants × 22 ml    | 8 019 000,00         | 9,6 %        |
| <b>TOTAL VARIANTE 2</b>                        | <b>83 295 196,00</b> | <b>100 %</b> |

Le coût total de la variante 2 s'établit à 83 295 196 DA, soit un surcoût de 3 919 331 DA par rapport à la variante projet (+ 4,9 %). Cette faible différence confirme l'intérêt économique de la solution mixte. La réduction du coût par rapport à la variante 1 est de 28 799 804 DA (– 25,7 %), démontrant l'impact économique considérable de la réduction du nombre de niveaux de tirants. Les pieux représentent 86,4 % du coût total, les tirants 9,6 % et le butonnage 3,8 %.

## VI.3 Analyse des délais d'exécution

### VI.3.1 Méthodologie et hypothèses de planning :

L'analyse des délais d'exécution porte sur les tâches du système de soutènement de l'écran de référence (coupe A-A), selon un enchaînement séquentiel de stages successifs. L'excavation proprement dite n'est pas comptabilisée dans ces délais, afin de concentrer la comparaison sur les seules opérations propres à chaque variante.

Les pieux forés et la poutre de couronnement sont communs aux trois variantes : ils sont réalisés avant l'étalement et requièrent exactement le même temps quelle que soit la solution retenue. Ils n'introduisent donc aucune différence entre les variantes et ne sont pas comptabilisés dans le délai total comparatif, qui se limite aux opérations d'étalement. Le tableau suivant récapitule les hypothèses de rendement retenues :

**Tableau VI. 13 : Hypothèses de rendements journaliers des tâches d'étalement**

| Tâche                                                       | Rendement journalier   | Base de calcul           |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Massifs d'appui par niveau (2 massifs : coffrage + coulage) | 2,5 jours / niveau     | 2j + 0,5j                |
| Installation butons (1 lit = 1 niveau)                      | 3 jours / niveau       | 1 lit / 3 jours          |
| Pose et précontrainte des tirants d'ancrage                 | 3 tirants / jour (max) | Rendement chantier       |
| Mode d'enchaînement des tâches                              | Séquentiel (stages)    | Hors excavation et pieux |

### VI.3.2 Délais Variante projet

#### VI.3.2.1 Planning des pieux :

La réalisation des 16 pieux forés Ø800 mm (forage, ferrailage, bétonnage et séchage) ainsi que la poutre de couronnement constituent des tâches communes aux trois variantes. Elles requièrent le même temps d'exécution dans tous les cas et n'apportent par conséquent aucune différence dans la comparaison des plannings. Pour cette raison, elles ne sont pas intégrées au délai total comparatif, qui ne retient que les opérations d'étalement propres à chaque variante.

## VI.3.2.2 Planning du butonnage :

La variante projet comprend trois niveaux de butonnage installés séquentiellement. Chaque niveau nécessite au préalable la réalisation de 2 massifs d'appui en béton armé (coffrage 2 j + coulage 0,5 j), puis l'installation des profilés métalliques (1 lit en 3 jours) :

Tableau VI. 14 : Planning du butonnage, Variante projet

| Stage | Tâche                                         | Calcul     | Durée (j)   | Cumul (j) |
|-------|-----------------------------------------------|------------|-------------|-----------|
| 1     | N1 — 2 massifs d'appui TYPE 1 (cote +14,50 m) | 2j+0,5j    | 2,5         | 2,5       |
| 2     | N1 — Butons SB1 (3 systèmes HEB500)           | 1 lit / 3j | 3           | 5,5       |
| 3     | N2 — 2 massifs d'appui TYPE 1 (cote +9,45 m)  | 2j+0,5j    | 2,5         | 8         |
| 4     | N2 — Butons SB1 (3 systèmes HEB500)           | 1 lit / 3j | 3           | 11        |
| 5     | N3 — 2 massifs d'appui TYPE 2 (cote +1,85 m)  | 2j+0,5j    | 2,5         | 13,5      |
| 6     | N3 — Butons SB6 (3 systèmes 2HEB500)          | 1 lit / 3j | 3           | 16,5      |
|       | <b>TOTAL ÉTAIEMENT VARIANTE PROJET</b>        |            | <b>16,5</b> |           |

## VI.3.2.3 Délai total Variante projet :

Le délai total d'étalement de la variante projet s'établit à 16,5 jours ouvrables ( $\approx 3,3$  semaines), répartis entre les massifs d'appui ( $3 \times 2,5 \text{ j} = 7,5 \text{ j}$ ) et l'installation des butons ( $3 \times 3 \text{ j} = 9 \text{ j}$ ). Ce délai relativement court s'explique par la rapidité de mise en œuvre des profilés métalliques HEB, dont l'installation ne nécessite ni injection ni précontrainte.

## VI.3.3 Délais Variante 1

### VI.3.3.1 Planning des pieux :

Comme pour la variante projet, les pieux forés et la poutre de couronnement sont communs et requièrent le même temps d'exécution. Ils n'introduisent aucune différence entre les variantes et ne sont donc pas comptabilisés dans le délai total comparatif.

### VI.3.3.2 Planning des tirants :

La variante 1 ne comporte pas de massifs d'appui, mais chaque niveau de tirants nécessite davantage de temps de mise en œuvre (forage, injection du coulis et mise en tension). La solution comprend cinq niveaux de tirants à raison de 15 tirants par niveau, posés au rythme maximal de 3 par jour :

Tableau VI. 15 : Planning des tirants, Variante 1

| Stage | Tâche                                                 | Calcul       | Durée (j) | Cumul (j) |
|-------|-------------------------------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| 1     | N1 — Pose 15 tirants (+12,50 m) — précontrainte 30 kN | 15 / 3 par j | 5         | 5         |
| 2     | N2 — Pose 15 tirants (+8,50 m) — 150 kN               | 15 / 3 par j | 5         | 10        |
| 3     | N3 — Pose 15 tirants (+4,50 m) — 150 kN               | 15 / 3 par j | 5         | 15        |
| 4     | N4 — Pose 15 tirants (−0,50 m) — 150 kN               | 15 / 3 par j | 5         | 20        |
| 5     | N5 — Pose 15 tirants (−3,50 m) — 150 kN               | 15 / 3 par j | 5         | 25        |
|       | <b>TOTAL ÉTAIEMENT — VARIANTE 1</b>                   |              | <b>25</b> |           |

### **VI.3.3.3 Délai total Variante 1 :**

Le délai total d'étalement de la variante 1 s'établit à 25 jours ouvrables ( $\approx 5$  semaines). Malgré l'absence de massifs d'appui, le nombre élevé de tirants à poser (75 au total sur cinq niveaux) et le rendement limité de 3 tirants par jour conduisent au délai le plus long des trois variantes. C'est la multiplication des niveaux de tirants qui pénalise le plus le planning de cette solution.

### **VI.3.4 Délais Variante 2**

#### **VI.3.4.1 Planning des pieux :**

Là encore, les pieux forés et la poutre de couronnement sont identiques à ceux des autres variantes et requièrent le même temps d'exécution. N'apportant aucune différence, ils ne sont pas comptés dans le délai total comparatif.

#### **VI.3.4.2 Planning butonnage + tirants :**

La variante 2, combinant deux niveaux de butonnage et un niveau de tirants, bénéficie d'un nombre réduit d'opérations séquentielles. Le niveau de tirants N3 ne comprenant que 8 tirants, sa durée de pose est limitée à 3 jours :

**Tableau VI. 16 : Planning butonnage + tirants Variante 2**

| Stage | Tâche                                         | Calcul      | Durée (j) | Cumul (j) |
|-------|-----------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 1     | N1 — 2 massifs d'appui TYPE 1 (cote +14,50 m) | $2j+0,5j$   | 2,5       | 2,5       |
| 2     | N1 — Butons HEB200 (15 unités, esp. 7,20 m)   | 1 lit / 3j  | 3         | 5,5       |
| 3     | N2 — 2 massifs d'appui TYPE 1 (cote +6,50 m)  | $2j+0,5j$   | 2,5       | 8         |
| 4     | N2 — Butons SB1 HEB500 (3 systèmes)           | 1 lit / 3j  | 3         | 11        |
| 5     | N3 — Pose 8 tirants (−1,50 m) — 150 kN        | 8 / 3 par j | 3         | 14        |
|       | <b>TOTAL ÉTAIEMENT — VARIANTE 2</b>           |             | <b>14</b> |           |

### **VI.3.4.3 Délai total Variante 2 :**

Le délai total d'étalement de la variante 2 s'établit à 14 jours ouvrables ( $\approx 2,8$  semaines), ce qui en fait la solution la plus rapide à mettre en œuvre, avec un gain de 2,5 jours par rapport à la variante projet et de 11 jours par rapport à la variante 1. Ce gain s'explique par le faible nombre de tirants au niveau N3 (8 tirants posés en 3 jours) et par la suppression d'un niveau complet de massifs d'appui par rapport à la variante projet.

### **VI.3.5 Synthèse comparative des délais :**

Le tableau suivant présente la synthèse comparative des délais d'étalement des trois variantes (hors pieux, poutre de couronnement et excavation, identiques pour toutes) :

**Tableau VI. 17 : Synthèse comparative des délais d'étalement des trois variantes**

| Variante                                | Massifs d'appui (j) | Butons / Tirants (j) | TOTAL (j) |
|-----------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------|
| Variante projet (3 butons)              | 7,5                 | 9                    | 16,5      |
| Variante 1 (5 niveaux tirants)          | —                   | 25                   | 25        |
| <b>Variante 2 (2 butons + 1 tirant)</b> | <b>5</b>            | <b>9</b>             | <b>14</b> |

L'analyse comparative met en évidence les conclusions suivantes. La variante 2 est la plus rapide avec 14 jours, soit un gain de 2,5 jours par rapport à la variante projet et de 11 jours par rapport à la variante 1. La variante 1, avec ses cinq niveaux de tirants (75 tirants au total), est

de loin la plus lente : son délai de 25 jours pénalise nettement le planning, l'absence de massifs d'appui ne suffisant pas à compenser la multiplication des niveaux de pose. La variante projet occupe une position intermédiaire (16,5 j). Il convient de souligner que ces délais correspondent aux seules tâches d'étalement, les durées réelles sur chantier peuvent varier selon les aléas de réalisation, les conditions géotechniques et l'organisation des équipes.

## VI.4 Comparaison coût + délai :

Cette section synthétise les résultats des analyses de coûts (VI.2) et de délais (VI.3) afin de comparer les trois variantes de soutènement. Les coûts portent sur les seuls matériaux et les délais sur les seules opérations d'étalement (hors pieux, poutre de couronnement et excavation, identiques pour toutes les variantes).

### VI.4.1 Tableau comparatif global (coût + délai) :

Le tableau suivant rassemble, pour chaque variante, le coût total des matériaux, le délai total d'étalement, ainsi que les écarts relatifs par rapport à la variante projet retenue comme référence :

Tableau VI.19 Comparaison globale coût et délai des trois variantes

| Variante                                        | Coût total (DA)   | Écart coût    | Délai (j) | Écart délai    |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------|-----------|----------------|
| Variante projet (3 butons)                      | 79 375 865        | Référence     | 16,5      | Référence      |
| Variante 1 (5 niveaux tirants)                  | 112 095 000       | +41.2 %       | 25        | +51,5 %        |
| <b>Variante 2 (mixte : 2 butons + 1 tirant)</b> | <b>83 295 196</b> | <b>+4,9 %</b> | <b>14</b> | <b>-15,2 %</b> |

### VI.4.2 Diagramme des coûts par variante (barres empilées par poste) :

Le diagramme suivant décompose le coût total de chaque variante par poste (pieux, poutre de couronnement, butons, massifs d'appui et tirants), ce qui permet d'identifier la contribution de chaque élément :

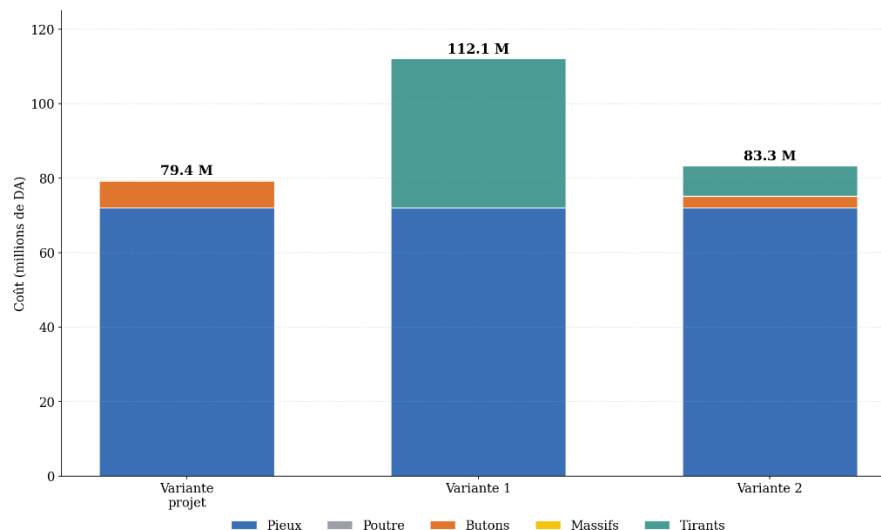
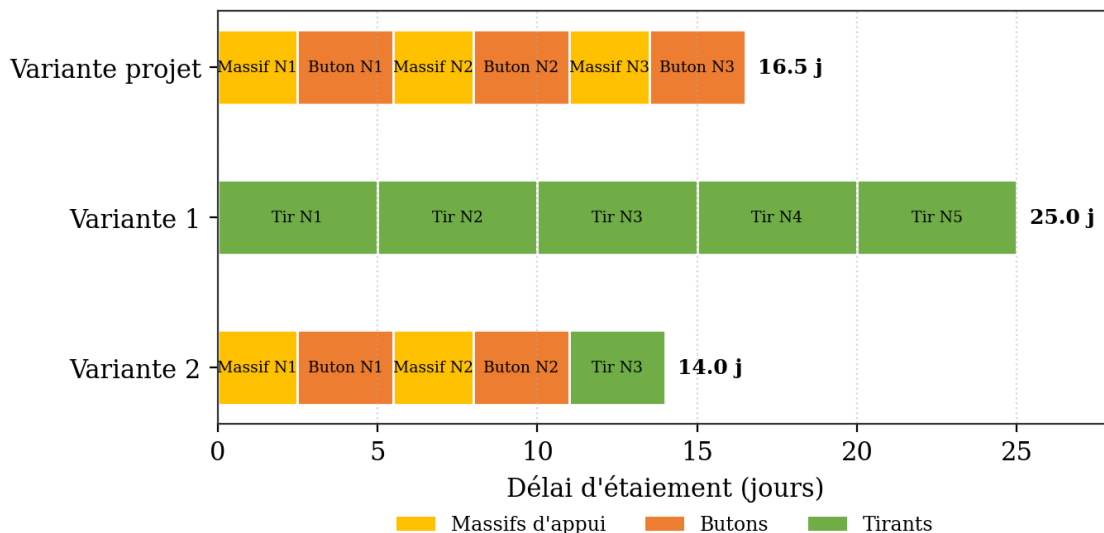


Figure VI. 1 : Décomposition des coûts par poste pour chaque variante

En raison de la tarification forfaitaire des pieux (identique pour les trois variantes), le poste pieux domine largement chaque variante. La part de l'étalement reste néanmoins déterminante : les tirants représentent 35,8 % du coût total de la variante 1, contre seulement 9,6 % pour la variante 2 et un butonnage de 9,1 % pour la variante projet.

## VI.4.3 Diagramme des délais par variante (Gantt simplifié) :

Le diagramme de Gantt simplifié ci-dessous représente l'enchaînement séquentiel des stages d'étalement pour chaque variante, chaque segment correspondant à une opération (massif d'appui, pose de boutons ou pose de tirants) :

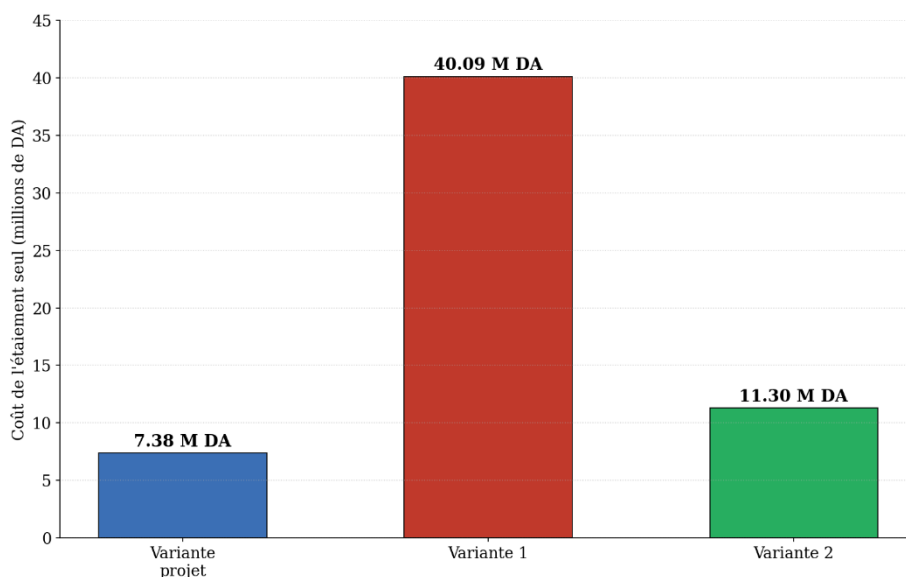


Figures VI. 2 : Diagramme de Gantt simplifié des délais d'étalement

La longueur de la barre de la variante 1, constituée de cinq stages de pose de tirants de 5 jours chacun, illustre la pénalité de planning induite par la multiplication des niveaux de tirants. La variante 2 affiche la barre la plus courte.

## VI.4.4 Diagramme comparatif des coûts seuls d'étalement :

La comparaison directe des coûts des trois variantes est présentée ci-dessous :



Figures VI. 3 : Comparaison des coûts d'étalement seuls (hors pieux) des trois variantes



Sur ce périmètre, les écarts deviennent très marqués : la variante 1 (40,09 M DA) coûte près de 5,4 fois plus chère en étaielement que la variante projet (7,38 M DA), et la variante 2 (11,30 M DA) se situe à un niveau intermédiaire (+ 53,1 % par rapport à la variante projet). Cette représentation confirme que le surcoût de la variante 1 provient exclusivement de la multiplication des niveaux de tirants.

## VI.4.6 Diagramme comparatif des délais seuls :

La comparaison directe des délais d'étaielement des trois variantes est présentée ci-dessous :

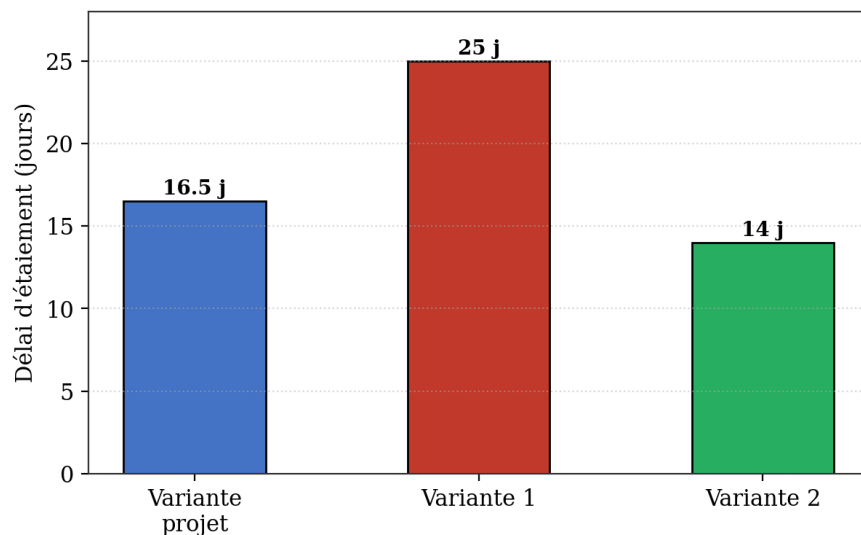


Figure VI. 4 : Comparaison des délais d'étaielement des trois variantes

La variante 2 est la plus rapide (14 jours), devant la variante projet (16,5 jours) et la variante 1 (25 jours).

## VI.4.7 Diagramme coûts + délais combinés (double axe) :

Le diagramme à double axe ci-dessous superpose, pour chaque variante, le coût d'étaielement (axe de gauche) et le délai d'étaielement (axe de droite), afin de comparer les deux critères sur le seul périmètre du système de soutènement :

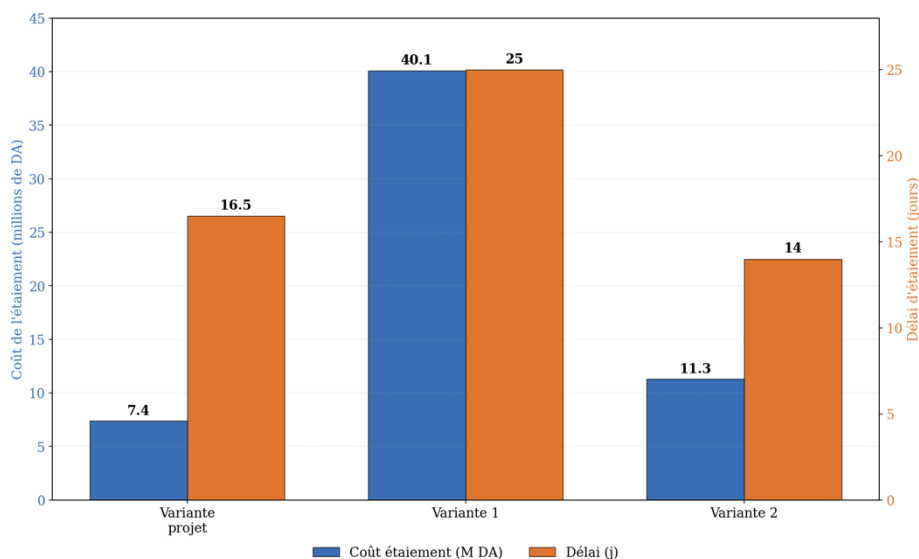


Figure VI. 5 : Comparaison combinée des coûts d'étaielement et des délais des trois variantes

Ce diagramme met clairement en évidence la double pénalité de la variante 1, à la fois la plus coûteuse et la plus longue sur le plan de l'étalement. La variante 2, en revanche, conjugue le délai le plus court (14 jours) et un coût d'étalement modéré, confirmant son statut de meilleur compromis lorsque l'on raisonne hors pieux.

## VI.5 Analyse multicritère détaillée Matrices de notation :

Cette dernière section propose une évaluation multicritère rigoureuse des trois variantes de soutènement, élément par élément (pieux, butons, tirants) et critère par critère (technique, sécurité, coût, délai). Pour chaque élément, un tableau de données rassemble d'abord les résultats de vérification issus du mémoire (chapitres IV et V), et de la note de calcul du projet (vérification butonage HEB selon l'EC3) ; une matrice attribue ensuite à chaque sous-critère une note de 1 à 10 selon des barèmes explicites, avec une justification propre à chaque variante. Les notes sont enfin cumulées, sans pondération ni moyenne, dans un tableau de synthèse donnant un score total sur 100.

### VI.5.1 Barèmes et règles de notation :

Quatre règles de notation sont définies. La règle A traduit le taux de travail d'un élément (rapport sollicitation/résistance) en note d'optimisation : plus l'élément est utilisé près de sa capacité (sans la dépasser), plus le dimensionnement est optimisé. La règle B note la sécurité selon la marge restante d'une vérification satisfaite. La règle C s'applique aux critères « moins, c'est mieux » (coût, délai, déplacement, poids d'acier) par proportionnalité inverse. La règle D couvre les appréciations qualitatives (technique d'exécution, encombrement) justifiées au cas par cas.

Tableau IV. 15 : Barèmes de notation des sous-critères (notes de 1 à 10)

| Règle | Critère noté                                      | Barème                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A     | Optimisation taux de travail $\tau$               | $\tau < 50 \% \rightarrow 2 \text{ à } 5$ ; $50 \% \leq \tau \leq 80 \% \rightarrow 5 \text{ à } 8$ ; $80 \% < \tau \leq 99 \% \rightarrow 8 \text{ à } 10$ (interpolation linéaire dans chaque bande)                           |
| B     | Sécurité, marge $m$ d'une vérification satisfaite | $m < 5 \% \rightarrow 7$ ; $5-20 \% \rightarrow 8$ ; $20-50 \% \rightarrow 9$ ; $m > 50 \% \rightarrow 10$ (toute vérification satisfaite vaut au moins 7)                                                                       |
| C     | Coût, délai, déplacement, poids d'acier           | Notation par rang : variante la plus favorable (valeur minimale) $\rightarrow 3$ points ; $2^e \rightarrow 2$ points ; $3^e \rightarrow 1$ point. En cas d'égalité, les variantes ex æquo reçoivent la même note pleine du rang. |
| D     | Appréciation qualitative                          | Grille 1–10 justifiée (simplicité d'exécution, encombrement de la fouille, nombre d'opérations)                                                                                                                                  |

### VI.5.2 Matrice de notation Pieux :

Les pieux ( $\varnothing 800$  mm,  $L = 30$  m, béton C30/37, acier B500A) sont vérifiés en flexion et à l'effort tranchant pour chaque variante (chapitre V) :

**Tableau IV. 16 : Données de vérification des pieux par variante**

| Paramètre                     | V. projet           | Variante 1      | Variante 2          |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| Ferraillage longitudinal      | 13 HA Ø32           | 12 HA Ø20       | 18 HA Ø25           |
| MEd / MRd (kNm)               | 1 218,64 / 1 266,32 | 477,32 / 498,75 | 1 029,63 / 1 110,49 |
| Taux de travail flexion       | 96,2 %              | 95,7 %          | 92,7 %              |
| VEd / VRd (kN)                | 697,11 / 944,12     | 274,69 / 708,09 | 457,95 / 708,09     |
| Taux de travail tranchant     | 73,8 %              | 38,8 %          | 64,7 %              |
| Poids d'acier (kg/pieu)       | 2 819,16            | 1 244,85        | 2 438,25            |
| Déplacement max statique (mm) | 24,9                | 15,3            | 28,4                |
| Déplacement max sismique (mm) | 34,8                | 21,7            | 37,8                |
| Vérifications EC2             | Satisfaites ✓       | Satisfaites ✓   | Satisfaites ✓       |

La matrice ci-dessous applique les règles A, B et C, avec une justification propre à chaque variante :

**Tableau IV. 17 : Matrice de notation Pieux (notes /10)**

| Sous-critère                                 | VP          | Justification VP                     | V1          | Justification V1                 | V2          | Justification V2                 |
|----------------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|
| Optimisation flexion (A)                     | 9,7         | $\tau = 96,2 \%$ , bande 80–99 %     | 9,7         | $\tau = 95,7 \%$ , bande 80–99 % | 9,3         | $\tau = 92,7 \%$ , bande 80–99 % |
| Sécurité flexion (B)                         | 7           | marge 4,0 % (< 5 %)                  | 7           | marge 4,5 % (< 5 %)              | 8           | marge 7,9 % (5–20 %)             |
| Optimisation tranchant (A)                   | 7,4         | $\tau = 73,8 \%$ , bande 50–80 %     | 4,3         | $\tau = 38,8 \%$ , bande < 50 %  | 6,5         | $\tau = 64,7 \%$ , bande 50–80 % |
| Sécurité tranchant (B)                       | 9           | marge 35 % (20–50 %)                 | 10          | marge 158 % (> 50 %)             | 10          | marge 55 % (> 50 %)              |
| Économie de matière (C)                      | 3           | 2 819 kg/pieu (max., rang 3)         | 7           | 1 245 kg/pieu (min., rang 1)     | 5           | 2 438 kg/pieu (rang 2)           |
| Maîtrise des déplacements (C)                | 5           | 24,9 / 34,8 mm (stat./sism., rang 2) | 7           | 15,3 / 21,7 mm (min., rang 1)    | 3           | 28,4 / 37,8 mm (max., rang 3)    |
| <b>CUMUL PIEUX (<math>\Sigma</math> /60)</b> | <b>41,1</b> |                                      | <b>45,0</b> |                                  | <b>41,8</b> |                                  |

La variante 1 domine le poste pieux avec 45,0 points sur 60 : ferraillage minimal (12HA20), déplacements les plus faibles (15,3 mm en statique, 21,7 mm en sismique) et meilleure marge à l'effort tranchant, conséquences directes de la reprise des poussées par cinq niveaux de tirants précontraints. Les variantes projet (41,1) et 2 (41,8) suivent à un niveau très proche.

### VI.5.3 Matrice de notation Butons :

Les butons concernent la variante du projet (trois niveaux : N1 et N2 en HEB 500, N3 en 2HEB 500, acier S275, contreventements HEB 140 inclinés à 45°) et la variante 2 mixte (N1 : HEB 200 S235 allégé ; N2 : HEB 500 S275). La variante 1 n'est pas concernée. Le tableau de données ci-dessous rassemble, pour la variante projet, les vérifications EC3 du bureau d'études EMA (note de calcul, Tableau 14 : flexion composée + flambement + déversement, formules 6.1 et 6.2 de l'EN 1993-1-1:

**Tableau IV. 18 : Données de vérification des boutons par niveau et par variante**

| Variante   | Niveau / Profilé                  | Nuance | Charge de calcul Nd max (kN) | Taux de travail max (6.1) / (6.2) | Verdict EC3             |
|------------|-----------------------------------|--------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| V. projet  | N1 HEB 500 (PM1.05 / PM1.06)      | S275   | 2 604 ; 2 615                | 0,42 ; 0,42                       | Vérifié ✓               |
| V. projet  | N2 HEB 500 (PM2.05 / PM2.06)      | S275   | 5 538 ; 5 852                | 0,88 ; 0,94                       | Vérifié ✓               |
| V. projet  | N3 2HEB 500 (PM3.02 / PM3.03)     | S275   | 11 143 ; 11 142              | 0,87 ; 0,87                       | Vérifié ✓               |
| Variante 2 | N1 HEB 200 (L = 6,00 m, classe 1) | S235   | 1 128,64 (GEO5)              | 0,997 ; 0,98                      | Vérifié ✓ (a la limite) |
| Variante 2 | N2 HEB 500 (PM2.05 / PM2.06)      | S275   | 5 852 (GEO5)                 | 0,94                              | Vérifié ✓               |

Le bouton le plus sollicité de l'écran de référence est le PM2.06 du niveau N2 (variante du projet), avec un taux de travail de 0,94 selon la formule 6.2, traduisant un dimensionnement optimisé conservant une marge de 6 %. Dans la variante 2, le bouton allégé HEB 200 atteint un taux décisif de 0,997 en flambement + flexion composée (formule 5.51) : un dimensionnement poussé à sa limite (marge 0,3 %), choix audacieux mais parfaitement maîtrisé qui valorise l'allègement du profilé en tête d'écran. La matrice de notation en tire les conséquences :

**Tableau IV. 19 : Matrice de notation Boutons (notes /10)**

| Sous-critère                         | VP   | Justification VP                                                                                                          | V2   | Justification V2                                                                                                            |
|--------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Profilés et nuance d'acier (D)       | 9    | HEB 500 S275 aux 3 niveaux, 2HEB 500 doublé au niveau le plus profond ; systèmes éprouvés du BE, contreventements HEB 140 | 9    | HEB 200 S235 allégé en tête (classe 1, faibles poussées) + HEB 500 S275 en N2 : optimisation du profilé selon la profondeur |
| Optimisation taux de travail max (A) | 9,5  | $\tau_{\max} = 94 \%$ (PM2.06, N2), bande 80–99 %                                                                         | 10   | $\tau_{\text{décisif}} = 99,7 \%$ (HEB 200, formule 5.51), bande 80–99 %                                                    |
| Sécurité marge minimale (B)          | 8    | marge mini 6 % (PM2.06), vérification confortable                                                                         | 7    | marge mini 0,3 % (HEB 200), à la limite                                                                                     |
| Économie de matière (C)              | 5    | 13 904 kg d'acier S275 (rang 2)                                                                                           | 7    | 6 079 kg (minimum, – 56,3 %, rang 1)                                                                                        |
| Technique d'exécution (D)            | 7    | 3 niveaux de boutons, fouille encombrée, 6 massifs d'appui                                                                | 9    | 2 niveaux dont 1 allégé, fouille plus dégagée, 4 massifs                                                                    |
| CUMUL BUTONS ( $\Sigma$ /50)         | 38,5 |                                                                                                                           | 42,0 |                                                                                                                             |

Sur le poste boutons, la variante 2 l'emporte avec 42,0 points sur 50 contre 38,5 pour la variante du projet, soit un écart de 3,5 points. Cet avantage tient à l'allègement du profilé en tête (HEB 200 au lieu de HEB 500), qui réduit de 56 % la masse d'acier mobilisée et dégage davantage la fouille, au prix d'une marge de sécurité plus serrée sur ce bouton (0,3 %). La variante du projet conserve l'avantage de la robustesse, avec des marges plus confortables sur l'ensemble de ses boutons.

## VI.5.4 Matrice de notation Tirants d'ancrage :

Les tirants concernent la variante 1 (75 tirants, 6 torons,  $R_t = 1\,041,60$  kN, espacement 1,10 m, précontrainte 30 kN au niveau N1 et 150 kN aux niveaux N2 à N5) et la variante 2 (15 tirants,

5 torons,  $R_t = 868,00$  kN, espacement 1,10 m, précontrainte 150 kN). Le tableau suivant rassemble les vérifications du chapitre V, tirant par tirant. Le taux de travail indiqué est défini comme le rapport entre la force appliquée dans le tirant et la plus faible des trois résistances (traction  $R_t$ , arrachement dans le sol  $R_e$ , arrachement dans le coulis  $R_c$ ), c'est-à-dire la résistance déterminante. Pour la variante 2, cette résistance déterminante est l'arrachement dans le coulis ( $R_c = 502,94$  kN) : le taux vaut  $321,64/502,94 = 64,0$  % en statique et  $410,37/502,94 = 81,6$  % en sismique. Pour la variante 1, le mémoire fournit directement les taux de travail par tirant (rapportés à la résistance déterminante), sans publier le détail numérique de  $R_e$  et  $R_c$  :

**Tableau IV. 20 : Données de vérification des tirants d'ancrage**

| Var. | Tirant (cote z) | Torons | Précontr. (kN) | Force (kN)<br>stat. sism. | Taux = $F / \min(R_t, R_e, R_c)$<br>stat. sism. | Verdict   |
|------|-----------------|--------|----------------|---------------------------|-------------------------------------------------|-----------|
| V1   | T1 (3,50 m)     | 6      | 30             | 90,54 ; 244,45            | 36,6 % ; 98,8 %                                 | Vérifié ✓ |
| V1   | T2 (7,50 m)     | 6      | 150            | 220,88 ; 314,57           | 64,0 % ; 91,2 %                                 | Vérifié ✓ |
| V1   | T3 (11,50 m)    | 6      | 150            | 266,51 ; 321,66           | 60,2 % ; 72,7 %                                 | Vérifié ✓ |
| V1   | T4 (15,50 m)    | 6      | 150            | 298,63 ; 346,59           | 54,2 % ; 62,9 %                                 | Vérifié ✓ |
| V1   | T5 (19,50 m)    | 6      | 150            | 243,66 ; 295,41           | 44,2 % ; 53,6 %                                 | Vérifié ✓ |
| V2   | T1 (17,00 m)    | 5      | 150            | 321,64 ; 410,37           | 64,0 % ; 81,6 %                                 | Vérifié ✓ |

Pour la variante 1, le mémoire fournit les taux de travail par tirant (force / résistance déterminante) sans publier le détail de  $R_e$  et  $R_c$  ; toutes les vérifications d'arrachement sont déclarées satisfaites. La stabilité interne (V1) présente un coefficient minimal  $SF = 3,13$  (seuil 1,00 en sismique) ; la stabilité globale de Bishop donne  $SF = 1,78 / 1,54$  pour V1 et  $1,76 / 1,53$  pour V2 (statique / sismique). La matrice de notation en découle :

**Tableau IV. 21 : Matrice de notation — Tirants d'ancrage (notes /10)**

| Sous-critère                                      | V1   | Justification V1                                                                   | V2   | Justification V2                                                                   |
|---------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Conception torons / $R_t$ (D)                     | 9    | 6 torons, $R_t = 1\,041,60$ kN, section adaptée aux 5 niveaux fortement sollicités | 9    | 5 torons, $R_t = 868,00$ kN, section ajustée à l'effort du niveau unique           |
| Sécurité traction + arrachement $R_t/R_e/R_c$ (B) | 7    | taux max 98,8 % (T1 sismique) → marge minimale 1,2 %, vérifié mais à la limite     | 8    | taux max 81,6 % (sismique) → marge 18,4 % sur la résistance déterminante ( $R_c$ ) |
| Optimisation — taux de travail (A)                | 10   | taux max = 98,8 % (T1 sismique), bande 80–99 %                                     | 8,2  | taux = 81,6 % (sismique), bande 80–99 %                                            |
| Stabilité interne / globale (B)                   | 10   | $SF$ interne mini = 3,13 (seuil 1,00) ; Bishop 1,78 / 1,54                         | 10   | Bishop 1,76 / 1,53 (seuils 1,50 / 1,00), marges > 50 %                             |
| Espacement / exécution (D)                        | 6    | 75 tirants sur 5 niveaux à 1,10 m, forages très nombreux                           | 9    | 15 tirants sur un seul niveau à 1,10 m, mise en œuvre limitée                      |
| CUMUL TIRANTS ( $\Sigma / 50$ )                   | 42,0 |                                                                                    | 44,2 |                                                                                    |

Sur le poste tirants, la variante 2 devance légèrement la variante 1 avec 44,2 points sur 50 contre 42,0, soit un écart de 2,2 points. La variante 1 obtient la meilleure note d'optimisation (taux décisif de 98,8 % sur le tirant de tête en sismique), mais cette même valeur la pénalise en sécurité (marge de seulement 1,2 %) et son grand nombre d'unités (75 tirants sur 5 niveaux) alourdit l'exécution. La variante 2, avec un taux plus modéré (81,6 %), conserve une meilleure marge de sécurité et une mise en œuvre nettement plus simple (15 tirants sur un seul niveau).

## VI.5.5 Matrice de notation Coûts :

Les coûts par élément (section VI.2) sont notés selon la règle C par rang : la note la plus élevée revient à la variante la moins chère de chaque ligne. Les pieux étant chiffrés au forfait, leur coût est identique pour les trois variantes, qui reçoivent donc la même note.

Tableau VI. 18 : Matrice de notation Coûts (notes /10)

| Élément (coût en DA)                         | V. projet             | Variante 1             | Variante 2            |
|----------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Pieux                                        | 72 000 000 → 7        | 72 000 000 → 7         | 72 000 000 → 7        |
| Butons + massifs                             | 7 375 865 → 5         | —                      | 3 276 196 → 7         |
| Tirants                                      | —                     | 40 095 000 → 5         | 8 019 000 → 7         |
| <b>COÛT TOTAL (note retenue en synthèse)</b> | <b>79 375 865 → 7</b> | <b>112 095 000 → 3</b> | <b>83 295 196 → 5</b> |

## VI.5.6 Matrice de notation Délais :

Les délais d'étalement (section VI.3) sont notés selon la même règle C par rang, la meilleure note revenant à la variante la plus rapide.

Tableau VI. 19 : Matrice de notation Délais (notes /10)

| Élément (délai en jours)                                | V. projet         | Variante 1      | Variante 2      |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| Butons + massifs                                        | 16,5 j → 5        | —               | 11 j → 7        |
| Tirants                                                 | —                 | 25 j → 5        | 3 j → 7         |
| <b>DÉLAI TOTAL étalement (note retenue en synthèse)</b> | <b>16,5 j → 5</b> | <b>25 j → 3</b> | <b>14 j → 7</b> |

## VI.5.7 Tableau de synthèse Cumul des points (/100) :

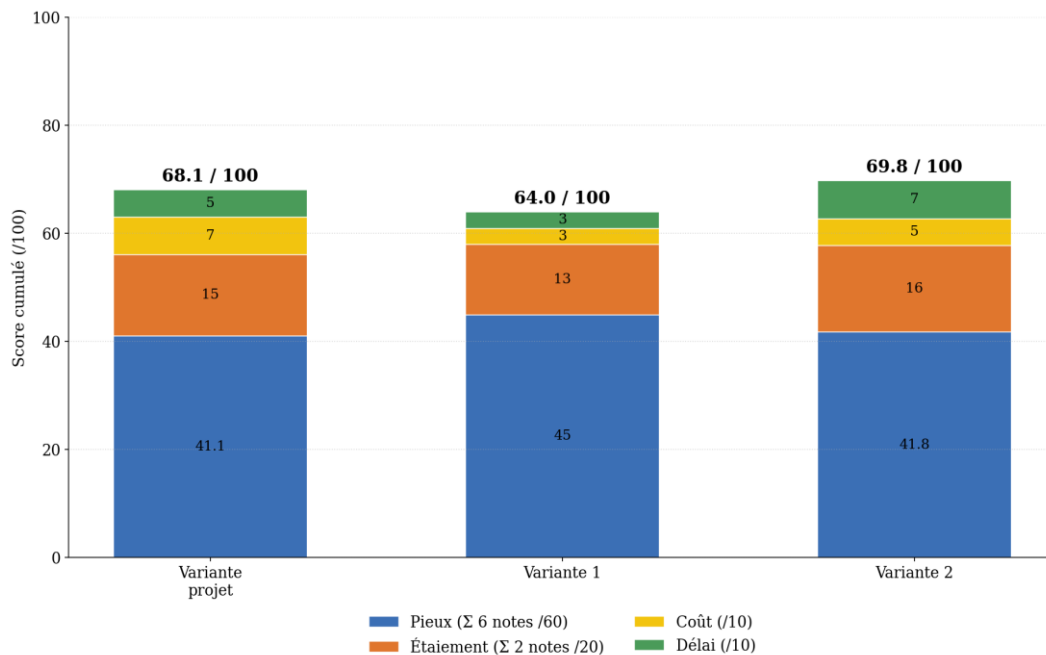
Pour garantir une comparaison équitable, la synthèse retient dix sous-critères identiques pour les trois variantes : les six sous-critères relatifs aux pieux (élément commun aux trois solutions), deux notes attribuées à l'ensemble du système d'étalement de chaque variante (mise en œuvre et marge de sécurité, justifiées par les matrices VI.24 et VI.26), la note de coût total et la note de délai total. Le score final correspond au cumul direct de ces dix notes sur 10, soit un total sur 100, sans pondération ni moyenne.

Tableau VI. 20 : Synthèse générale et cumul des dix notes (/100)

| N° | Sous-critère                                        | V. projet         | Variante 1        | Variante 2        |
|----|-----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1  | Tenue des pieux en flexion (niveau d'optimisation)  | 9,7               | 9,7               | 9,3               |
| 2  | Marge de sécurité des pieux en flexion              | 7                 | 7                 | 8                 |
| 3  | Tenue des pieux à l'effort tranchant (optimisation) | 7,4               | 4,3               | 6,5               |
| 4  | Marge de sécurité des pieux au tranchant            | 9                 | 10                | 10                |
| 5  | Quantité d'acier dans les pieux                     | 3                 | 7                 | 5                 |
| 6  | Limitation des déplacements de l'écran              | 5                 | 7                 | 3                 |
| 7  | Mise en œuvre du système d'étalement                | 7                 | 6                 | 9                 |
| 8  | Marge de sécurité du système d'étalement            | 8                 | 7                 | 7                 |
| 9  | Coût total                                          | 7                 | 3                 | 5                 |
| 10 | Délai total d'étalement                             | 5                 | 3                 | 7                 |
|    | <b>SCORE TOTAL CUMULÉ (Σ des 10 notes)</b>          | <b>68,1 / 100</b> | <b>64,0 / 100</b> | <b>69,8 / 100</b> |

Les notes 7 et 8 portent sur l'ensemble du système d'étalement de chaque variante. Pour la mise en œuvre, la variante du projet obtient 7 (trois niveaux de butons simples à poser mais

encombrants, six massifs d'appui), la variante 1 obtient 6 (forages nombreux pour 75 tirants répartis sur cinq niveaux, mais fouille entièrement dégagée) et la variante 2 obtient 9 (combinaison optimisée associant un bouton allégé HEB 200, un bouton HEB 500 et un seul niveau de tirants). Pour la marge de sécurité, la règle B appliquée à la marge minimale de chaque système donne 8 à la variante du projet (marge de 6 % au bouton le plus sollicité), 7 à la variante 1 (marge de 1,2 % au tirant de tête en situation sismique) et 7 à la variante 2 (marge de 0,3 % au bouton HEB 200 selon la formule de flexion composée). Ces marges serrées traduisent une optimisation poussée de chaque solution, toutes les vérifications restantes satisfaites.



**Figures VI. 6 : Décomposition du score cumulé des trois variantes (/100)**

L'analyse multicritère désigne la variante 2 (solution mixte) comme la mieux classée avec 69,8 points sur 100, devant la variante du projet (68,1) et la variante 1 (64,0). La variante 2 doit son avantage à un coût et un délai maîtrisé, à une mise en œuvre plus souple et à un bon comportement structural d'ensemble. La variante du projet la suit de près, portée par la robustesse de ses pieux et les marges de sécurité confortables de son étalement. La variante 1, malgré d'excellentes performances mécaniques (déplacements minimaux, ferrailage allégé), reste pénalisée par le coût et le délai de ses cinq niveaux de tirants. Les scores restant proches, le choix final pourra être affiné selon les priorités du maître d'ouvrage, qu'il s'agisse de privilégier le délai, la sécurité ou la simplicité d'exécution.



| 1er                  |      | 2e                     |      | 3e                   |      |
|----------------------|------|------------------------|------|----------------------|------|
| Variante 2 Mixte     |      | Variante projet Butons |      | Variante 1 Tirants   |      |
| 69,8                 |      | 68,1                   |      | 64,0                 |      |
| / 100 points cumulés |      | / 100 points cumulés   |      | / 100 points cumulés |      |
| Pieux                | 41,8 | Pieux                  | 41,1 | Pieux                | 45,0 |
| Étalement            | 16,0 | Étalement              | 15,0 | Étalement            | 13,0 |
| Coût                 | 5,0  | Coût                   | 7,0  | Coût                 | 3,0  |
| Délai                | 7,0  | Délai                  | 5,0  | Délai                | 3,0  |
|                      |      |                        |      |                      |      |

Au final, le classement obtenu place la variante 2 en tête, devant la variante du projet, puis la variante 1. Il vient confirmer, chiffres à l'appui, ce que les sections précédentes laissaient déjà entrevoir : c'est la solution mixte qui offre le meilleur compromis entre performance technique et coût pour le soutènement de l'écran étudié. Ce choix demande toutefois de rester vigilant sur deux points. D'une part, ses déplacements sont les plus importants des trois variantes (28,4 mm en statique et 37,8 mm en sismique) et appellent donc un suivi attentif. D'autre part, la marge de sécurité du bouton HEB 200 demeure faible, ce qui impose un contrôle rigoureux lors de sa mise en œuvre, en particulier l'application de la peinture anti-échauffement et la vérification de la précharge, comme le recommande la note de calcul.

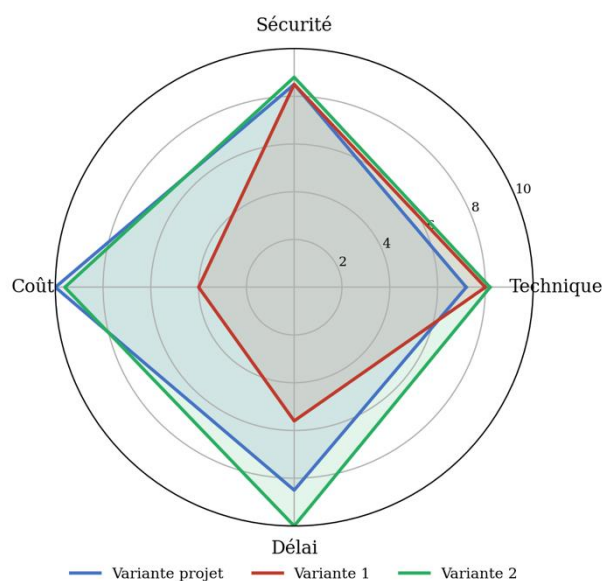


Figure VI. 7 : Profil multicritère des trois variantes (notes /10 par critère)

### CHAPITRES VII : CONCLUSION GÉNÉRALE :

Ce projet de fin d'études a porté sur l'étude technico-économique du blindage de la fouille du puits de ventilation N°05 (PV5), ouvrage s'inscrivant dans l'extension de la ligne 1 du métro d'Alger reliant El Harrach Centre à l'Aéroport International Houari Boumediene. À travers une démarche progressive allant de l'analyse bibliographique jusqu'à la comparaison multicritère des solutions, ce travail visait à identifier le système de soutènement le mieux adapté aux contraintes géotechniques, urbaines et économiques propres à ce site.

L'étude bibliographique a d'abord permis d'établir une base théorique solide en passant en revue les principales techniques de soutènement des fouilles profondes parois berlinoises, palplanches, parois clouées, parois en pieux et parois moulées ainsi que les systèmes d'étalement associés, butons et tirants d'ancrage. Cette synthèse a mis en évidence que le choix d'une solution de blindage ne résulte jamais d'un seul critère, mais d'un compromis entre stabilité, étanchéité, déformations admissibles, contraintes d'emprise et coût.

La présentation du projet et l'investigation géotechnique ont ensuite précisé le cadre réel de l'ouvrage. Les campagnes de reconnaissance (sondages carottés et destructifs, essais SPT, essais pressiométriques Ménard, piézométrie et essais de laboratoire) ont révélé une stratigraphie organisée en cinq horizons, dominée par une épaisse couche d'argile marneuse QM à plasticité élevée et à caractère gonflant, surmontant un horizon sablo-graveleux plus résistant. Deux niveaux d'eau ont été identifiés, une poche superficielle vers 5,0 m et une nappe principale vers 15,5 m, imposant un rabattement en phase d'excavation. Ces conditions, combinées à une profondeur d'excavation atteignant 22,53 m sur l'écran le plus sollicité (coupe A-A), ont confirmé le caractère délicat du soutènement à concevoir.

Sur cette base, trois variantes de blindage reposant toutes sur un rideau de pieux forés Ø800 mm ont été définies et étudiées : la variante du projet (solution du bureau d'études, avec trois niveaux de butons métalliques), la variante 1 (cinq niveaux de tirants d'ancrage précontraints) et la variante 2 (solution mixte associant butons en partie supérieure et tirant en partie inférieure). Chacune a fait l'objet d'une modélisation numérique sous GEO5 (module Sheet Pile Check), en situations statique et sismique, conformément aux Eurocodes et à la méthode de Mononobe-Okabe.

Les résultats de la modélisation ont montré que les trois solutions assurent la stabilité de l'ouvrage et satisfont l'ensemble des vérifications réglementaires (flexion et effort tranchant des pieux, stabilité globale par la méthode de Bishop, vérification des appuis). Des différences de comportement notables sont toutefois apparues. La solution avec tirants d'ancrage offre les déplacements les plus faibles (15,3 mm en statique, 21,7 mm en sismique) et les efforts internes les plus réduits, grâce à une répartition homogène des poussées sur cinq niveaux ; la solution avec butons assure une bonne maîtrise des déformations mais concentre les efforts sur le bouton inférieur ; la solution mixte présente les déplacements les plus élevés (28,4 mm en statique, 37,8 mm en sismique), liés à la grande hauteur non soutenue entre le second bouton et le tirant. Les coefficients de sécurité globaux restent dans tous les cas satisfaisants.

L'analyse technico-économique a complété cette évaluation en intégrant les coûts de réalisation et les délais d'étalement. Elle a révélé que la solution avec tirants seuls, malgré ses excellentes performances structurales, est pénalisée par un coût très élevé (environ 112,1 M DA, soit +41,2 % par rapport à la variante du projet) et le délai le plus long, en raison de la

multiplication des niveaux de tirants. La variante du projet ( $\approx 79,4$  M DA) et la variante mixte ( $\approx 83,3$  M DA) se situent à un niveau de coût comparable, cette dernière offrant le délai d'exécution le plus court.

La synthèse multicritère finale, cumulant les notes attribuées aux pieux, à l'étalement, au coût et au délai, a désigné la solution mixte (variante 2) comme le meilleur compromis technico-économique, avec un score de  $69,8 / 100$ , devant la variante du projet ( $68,1$ ) et la variante avec tirants ( $64,0$ ). Cette solution conjugue un coût proche de la solution de référence, le délai le plus court et un niveau de sécurité satisfaisant. Sa principale réserve concerne ses déplacements plus importants et la marge réduite du bouton allégé HEB 200, qui imposent un suivi attentif lors de l'exécution.

En définitive, ce travail démontre qu'aucune solution n'est intrinsèquement supérieure sur tous les plans : le choix optimal résulte d'un équilibre entre performance mécanique, faisabilité, coût et délai. Pour le contexte spécifique du PV5, la solution mixte apparaît comme la mieux adaptée, à condition d'un contrôle rigoureux des déplacements en phase finale d'excavation. Au-delà du cas étudié, ce projet illustre l'intérêt d'une approche couplant modélisation numérique et analyse économique pour orienter la décision d'ingénierie dans les ouvrages souterrains en milieu urbain.

## Supports de cours

- Mme. Boukezzi, *Charpente métallique : Formulaire de construction métallique selon l'Eurocode 3* [Polycopié de cours]. École Nationale Supérieure des Travaux Publics – Francis Jeanson, Alger.
- Mme. Merdoud, *Mécanique des sols 3 (MDS 3)* [Polycopié de cours]. École Nationale Supérieure des Travaux Publics – Francis Jeanson, Alger.

## Ouvrages réglementaires et normes

- Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2008). *Règles parasismiques pour les ouvrages d'art (RPOA 2008)*. Alger, Algérie.
- Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS). (2020). *Tirants d'ancrage TA 2020 : Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance* (Version 3.0, corrigendum déc. 2023). Marne-la-Vallée.

## Documents techniques et internes de projet

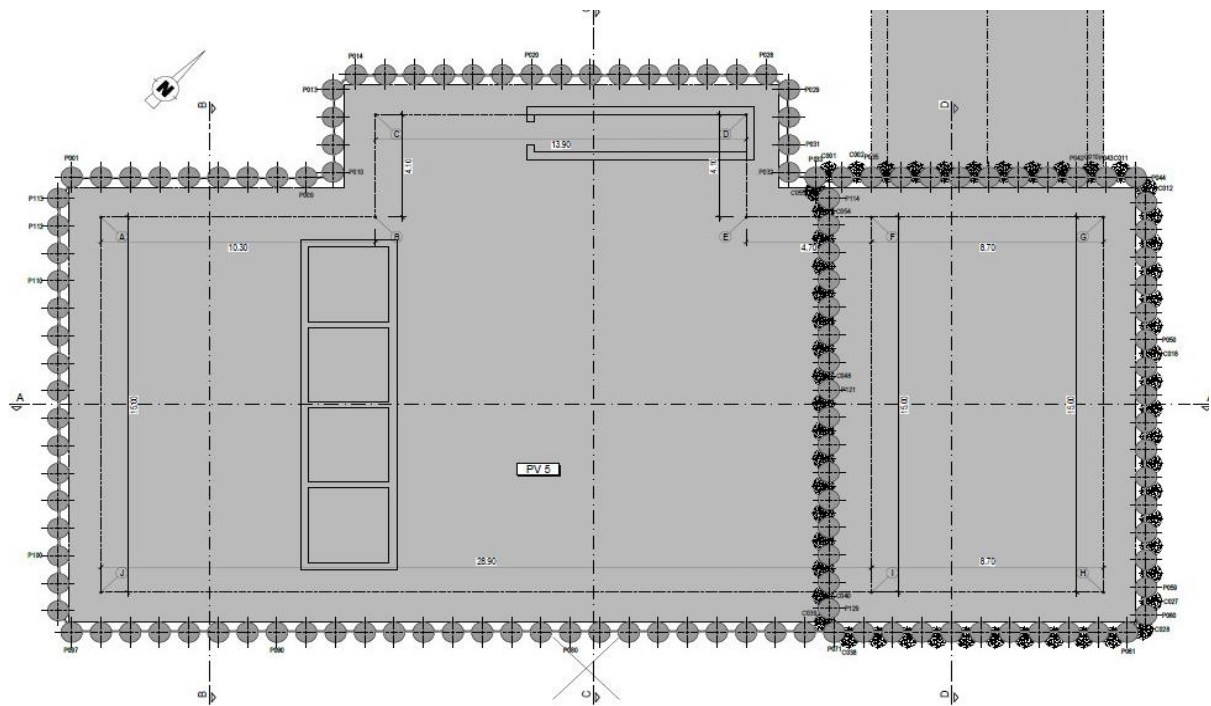
- COSIDER Travaux Publics. (S.d.). *Bordereau des prix unitaires : Extension du métro d'Alger, lot 1 (El Harrach Centre – Aéroport International Houari Boumediene)* [Document de marché].
- DYWIDAG-Systems International. (2005). *Géotechnique DYWIDAG : Tirants d'ancrage multi-toron* (Réf. 04162-2/06.05). Munich, Allemagne.
- EMA / FERCONSULT / CENOR. (Année). *Fichier de codification du projet : Extension du métro d'Alger, lot 1* [Document interne].

## Logiciels et outils numériques

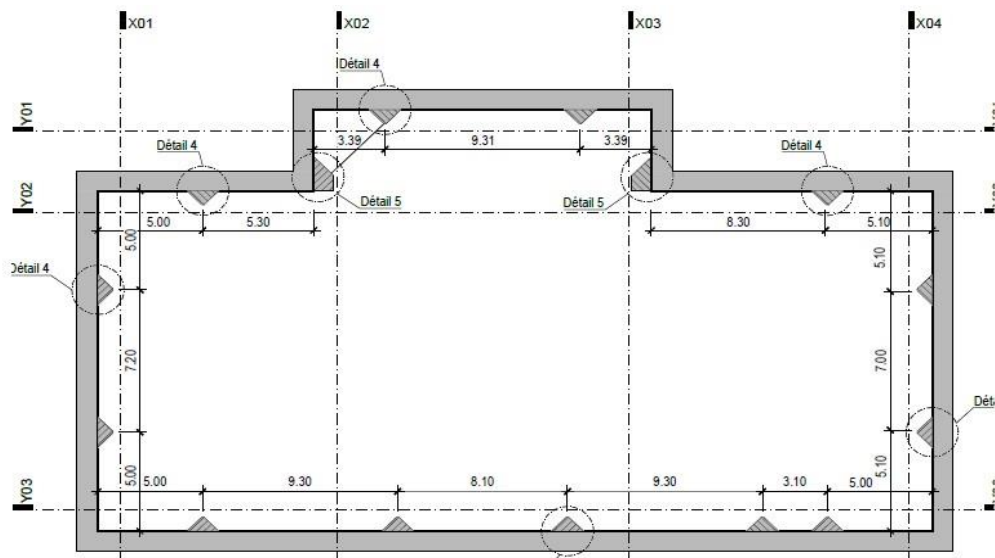
- Autodesk. (2018). *AutoCAD 2018* [Logiciel de dessin assisté par ordinateur]. San Rafael, Californie.
- Fine. (2024). *GEO5 2024 : Logiciel de géotechnique (modules Sheeting Design et Sheeting Check)* [Logiciel]. Prague, République tchèque.

## Données cartographiques et webographiques

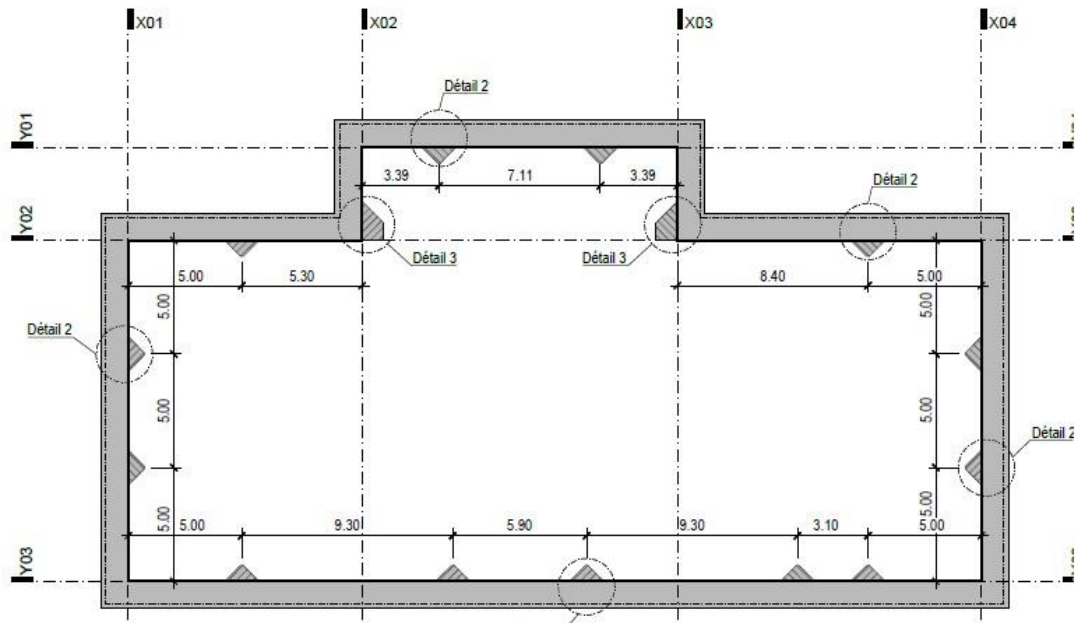
- Hamai, L. (2011). *Carte morphogéologique du bassin de la Mitidja et ses environs* [Figure]. In *Étude gravimétrique de la Mitidja occidentale*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Carte-morphogeologique-du-bassin-de-la-Mitidja-et-ses-environs-donnees-topographiques\\_fig8\\_333669610](https://www.researchgate.net/figure/Carte-morphogeologique-du-bassin-de-la-Mitidja-et-ses-environs-donnees-topographiques_fig8_333669610)
- DJOUDAR, D., KHELFI, M. E. A., & ZAHOUANI, S. (2017). *Répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est*. In *Approche géostatistique de l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja Orientale : Application de trois modèles DRASTIC, PRAST et GALDIT* [Figure]. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Repartition-des-points-deau-dans-la-plaine-de-la-Mitidja-EstZahouani-2017-Les\\_fig3\\_339487695](https://www.researchgate.net/figure/Repartition-des-points-deau-dans-la-plaine-de-la-Mitidja-EstZahouani-2017-Les_fig3_339487695)
- Drouiche, A., Nezzal, F., & Djema, M. (2019). Variabilité interannuelle des précipitations dans la plaine de la Mitidja en Algérie du Nord. *Revue des sciences de l'eau*, 32(2), 119–134. <https://doi.org/10.7202/1065205ar>
- WeatherSpark. (2026). *Météo moyenne à Alger, Algérie, tout au long de l'année*. Consulté le 22 juin 2026, à l'adresse <https://fr.weatherspark.com/y/48929/Météo-moyenne-à-Alger-Algérie-tout-au-long-de-l'année>



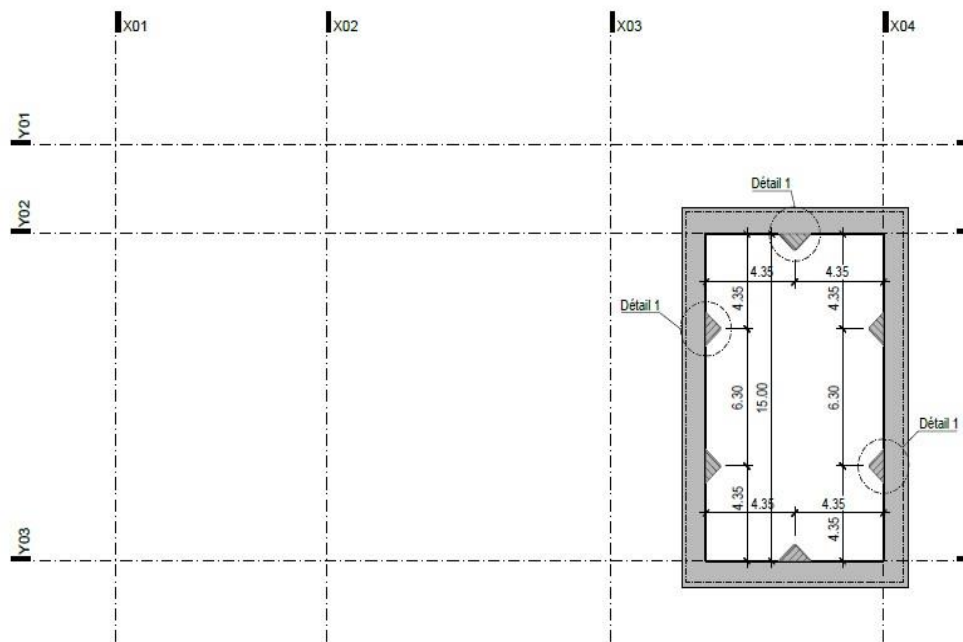
Plan général du blindage du puits de ventilation 05



Vue en Plan Au Niveau +15.25 (Poutre 1 Et Massifs D'appui)



**Vue en Plan Au Niveau +10.20 (Poutre 2 Et Massifs D'appui)**



**Vue Plan Au Niveau +3.10 (Poutre 3 Et Massifs D'appui)**



|                                                                              |                                 | <b>RAPPORT DE FORAGE</b>                                                                                                                                      |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|--------|---------------|------|---------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Projet : METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE - AEROPORT</b>                                                                                                  |                                 | <b>Dossier N° :</b>                                                                                                                                           |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| <b>Endroit : PV 5</b>                                                                                                                                         |                                 | <b>Client : COSIDER M28</b>                                                                                                                                   |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| Date début : 20-05-2015<br>Date fin : 25-05-2015<br>Profondeur forée (m) : 34<br>Niveau d'eau (m) : 7,50                                                      |                                 | Coordonnées GPS:<br>X : 515394.948<br>Y : 4062907.879<br>Z :                                                                                                  |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| Boue de forage : EAU CLAIRE<br>Type forage : CAROTTE<br>Foreuse : SM 8G                                                                                       |                                 | Etat des échantillons :<br>Intact <input type="checkbox"/> Remanié <input type="checkbox"/> Paraffiné <input type="checkbox"/> Roche <input type="checkbox"/> |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| Échelle (m)                                                                                                                                                   | Élévation (m)<br>Profondeur (m) | Récupération<br>25 50 75 100                                                                                                                                  | SPT (N1 + N2) | RCD | Tubage | Carottier     | État | Profondeur<br>Echantillon | Niveau d'eau | Symboles                                                                                                                       | DESCRIPTION                                                  | E SS AIS DE<br>LABORATOIRE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| 1,5                                                                                                                                                           | -1,50                           | 80 %                                                                                                                                                          | 22            |     |        | SPT           |      | 1,98<br>1,43              |              |                                                                                                                                | Remblai                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 3,0                                                                                                                                                           | -1,50                           |                                                                                                                                                               | 18            |     |        | SPT           |      | 2,80<br>8,98              |              |                                                                                                                                | Argile limoneuse sableuse de couleur noirâtre à marron foncé |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 4,5                                                                                                                                                           | -3,00                           | 100 %                                                                                                                                                         | 40            |     |        | SPT           |      | 3,75<br>4,88<br>4,45      |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 6,0                                                                                                                                                           | -4,50                           |                                                                                                                                                               | 37            |     |        | SPT           |      | 5,50<br>5,95              |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 7,5                                                                                                                                                           | -6,00                           | 80 %                                                                                                                                                          | 36            |     |        | SPT           |      | 7,00<br>7,56              |              |                                                                                                                                | Sable caillouteux jaunâtre avec présence de crêe             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 9,0                                                                                                                                                           | -7,50                           | 100 %                                                                                                                                                         | 23            |     |        | SPT           |      | 8,50<br>9,05<br>9,50      |              |                                                                                                                                | Marne peu sableuse                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 10,5                                                                                                                                                          | -9,00                           | 100 %                                                                                                                                                         | 32            |     |        | SPT           |      | 10,00<br>10,45            |              |                                                                                                                                | Sable jaunâtre                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 12,0                                                                                                                                                          | -10,50                          | 100 %                                                                                                                                                         | 40            |     |        | SPT           |      | 11,50<br>12,05            |              |                                                                                                                                | Marne peu sableuse de couleur grise à verdâtre               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 13,5                                                                                                                                                          | -12,00                          | 100 %                                                                                                                                                         | 30            |     |        | CR<br>SPT     |      | 13,00<br>13,45            |              |                                                                                                                                | Marne grisâtre plastique                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 15,0                                                                                                                                                          | -13,50                          | 100 %                                                                                                                                                         | 28            |     |        | SPT           |      | 14,50<br>15,00            |              |                                                                                                                                | Argile limoneuse caillouteuse                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 16,5                                                                                                                                                          | -15,00                          | 90 %                                                                                                                                                          | 58            |     |        | SPT           |      | 16,00<br>16,45            |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 18,0                                                                                                                                                          | -16,50                          | 100 %                                                                                                                                                         | 27            |     |        | SPT           |      | 17,50<br>17,95            |              |                                                                                                                                | Marne grisâtre                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 19,5                                                                                                                                                          | -18,00                          |                                                                                                                                                               | 14            |     |        | SPT           |      | 19,00<br>19,45            |              |                                                                                                                                | Marne plastique peu sableuse peu graveleuse                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 21,0                                                                                                                                                          | -19,50                          | 90 %                                                                                                                                                          | 14            |     |        | SPT           |      | 20,50<br>20,95            |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 22,5                                                                                                                                                          | -21,00                          |                                                                                                                                                               | 9             |     |        | SPT           |      | 22,00<br>22,45            |              |                                                                                                                                | Sable avec trace de limons                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 24,0                                                                                                                                                          | -22,50                          | 95 %                                                                                                                                                          | 28            |     |        | SPT           |      | 23,25<br>23,50<br>23,55   |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 25,5                                                                                                                                                          | -24,00                          |                                                                                                                                                               | 33            |     |        | SPT           |      | 25,00<br>25,45            |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| Fin du forage à une profondeur de 34 m.                                                                                                                       |                                 |                                                                                                                                                               |               |     |        |               |      |                           |              |                                                                                                                                |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| <b>REMARQUES :</b><br>* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm<br>* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage |                                 |                                                                                                                                                               |               |     |        |               |      |                           |              | <b>TYPE CAROTTIER :</b><br>CF : Carottier fendu<br>TM : Tube à paroi mince<br>PS : Tube à position fixe<br>CR : Tube carottier |                                                              | <b>ABREVIATIONS :</b><br>AG : Analyse granulométrique<br>S : Sédimétrie<br>L : Limites d'Atterberg (WL, IP)<br>W : Teneur en eau<br>PV : Poids volumique (Gd, Gh)<br>AC : Analyse chimique<br>CIB : Cisaillement rectiligne<br>TR : Cisaillement Triaxial<br>Rc : Résistance à la compression<br>OED : Essai oedométrique<br>GL : Gonflement libre<br>R : Refus à l'enfoncement |  |
| Préparé par : Mr BENDIMAM                                                                                                                                     |                                 |                                                                                                                                                               |               |     |        | Vérifié par : |      | 13/07/2015                |              | Page : 1 de 2                                                                                                                  |                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |



| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;"> <p><b>Travaux Publics</b><br/>کوسیدار</p> </div> <div style="text-align: right;"> <h2 style="margin: 0;">RAPPORT DE FORAGE</h2> <p>Sondage : SC 44</p> </div> </div> |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------|--------------|----------|-----------------------------------------|-----------------------|
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p><b>Projet :</b> METRO D'ALGER TRONCON EL HARRACHE - AEROPORT</p> <p><b>Endroit :</b> PV 5</p> </div> <div> <p><b>Dossier N° :</b></p> <p><b>Client :</b> COSIDER M28</p> </div> </div>                           |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| <p>Date début : 20-05-2015<br/>Date fin : 25-05-2015<br/>Profondeur forée (m) : 34<br/>Niveau d'eau (m) : 7,50</p>                                                                                                                                                                     |               |                | <p>Coordonnées GPS:<br/>X : 515394.948<br/>Y : 4062907.879<br/>Z :</p> |               | <p>Boue de forage : EAU CLAIRE<br/>Type forage : CAROTTE<br/>Foreuse : SM 8G</p> |        | <p>Etat des échantillons :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Intact </div> <div>Remanié </div> <div>Paraffiné </div> <div>Roche </div> </div> |      |                        |              |          |                                         |                       |
| Echelle (m)                                                                                                                                                                                                                                                                            | Élévation (m) | Profondeur (m) | Récupération                                                           | SPT (N1 + N2) | RQD                                                                              | Tubage | Carottier                                                                                                                                                                        | État | Profondeur Échantillon | Niveau d'eau | Symboles | DESCRIPTION                             | ESSAIS DE LABORATOIRE |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        | -26.15        | 26.15          | 49                                                                     |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 26.50                  |              |          | Sable avec trace de limons              |                       |
| 27.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 26.95                  |              |          |                                         |                       |
| 28.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 28.00                  |              |          |                                         |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 28.45                  |              |          |                                         |                       |
| 30.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 29.15                  |              |          | Argile limoneuse caillouteuse           |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 29.55                  |              |          |                                         |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 29.95                  |              |          |                                         |                       |
| 31.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 31.00                  |              |          |                                         |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 31.45                  |              |          |                                         |                       |
| 33.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 32.50                  |              |          |                                         |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 32.95                  |              |          |                                         |                       |
| 34.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 34.00                  |              |          | Fin du forage à une profondeur de 34 m. |                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        | SPT                                                                                                                                                                              |      | 34.45                  |              |          |                                         |                       |
| 36.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 37.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 39.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 40.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 42.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 43.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 45.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 46.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 48.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 49.5                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |
| 51.0                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               |                |                                                                        |               |                                                                                  |        |                                                                                                                                                                                  |      |                        |              |          |                                         |                       |

**REMARQUES :**

\* SPT : Pour les SPT à 60 coups la pénétration est inférieure à 45cm

\* le niveau d'eau est la dernière lecture d'eau dans le sondage

**TYPE CAROTTIER :**

CF : Carottier fendu  
TM : Tube à paroi mince  
PS : Tube à position fixe  
CR : Tube carottier

**ABREVIATIONS :**

AG : Analyse granulométrique

S : Sédimentométrie

L : Limites d'Atterberg (WL, IP)

W : Teneur en eau

PV : Poids volumique (Gd, Gn)

AO : Analyse chimique

CIS : Cisaillement rectiligne

TR : Cisaillement Triaxial

Rc : Résistance à la compression

OED : Essai oedométrique

GL : Gonflement libre

R : Refus à renforcement

Préparé par : Mr BENDIMAM

Vérifié par :

13/07/2015

Page : 2 de 2

© SoftTests 2013

### Répartition lithologique dans le sol selon le sondage SC44

SC44

Caisse 01(00,00 - 07,50m)



Caisse 02(07,50 - 12,50 m)





SC44

Caisse 03(12,50 - 17,50m)



Caisse 04(17,50 - 24,50 m)



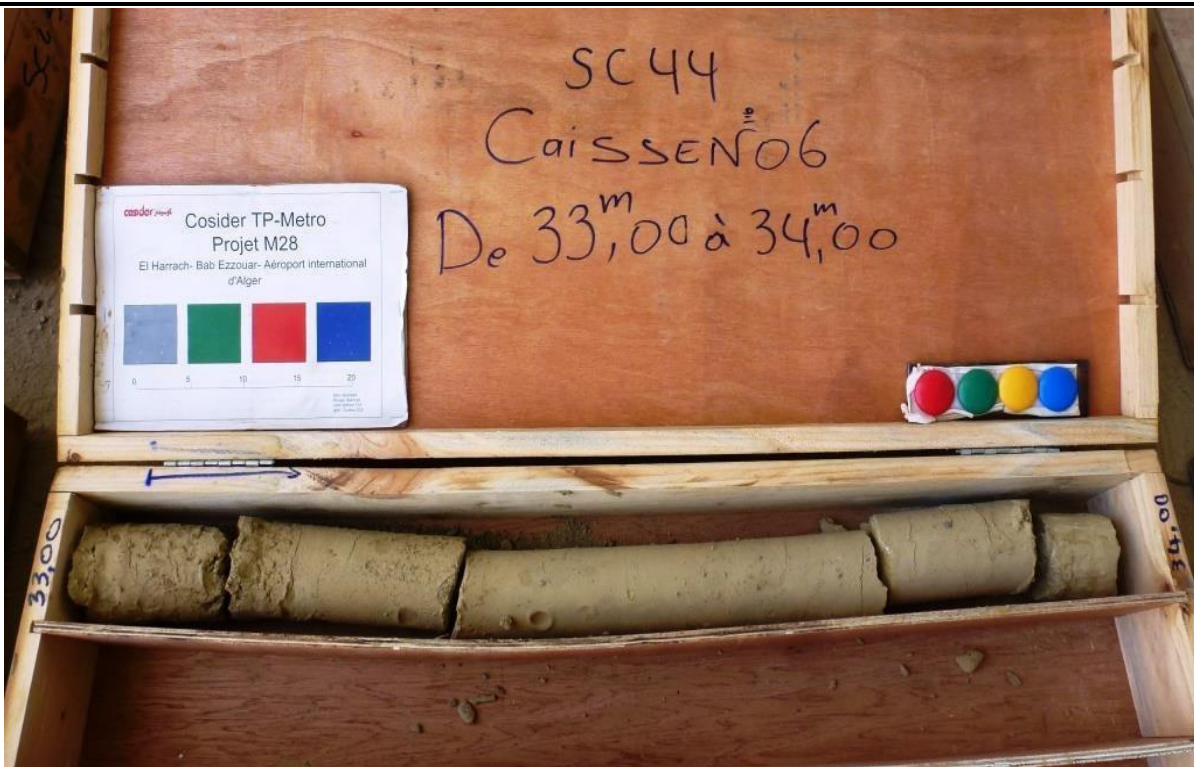


SC44

Caisse 05(24,50- 33.00m)



Caisse 02(07,50 - 12,50 m)



Les caisses à carottes récupérées

| Phase                                  | Sondage   | Essai SPT (quantités) | Essais pressiométriques (quantités) | Identification <sup>(1)</sup> (quantités) | Résistance à la compression simple (quantités) | Cisaillement à la boîte (quantités) | Essais Triaxiaux (quantités) | Gonflement libre (quantités) | Analyses chimiques (quantités) |
|----------------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| APD                                    | S21       | 14                    | 33                                  | 3                                         | 2                                              | 2                                   | 1                            | -                            | -                              |
| Campagne de Prospection Complémentaire | SC44-SP30 | 23                    | 7                                   | 4                                         | 2                                              | 1                                   | 1                            | (2)                          | 1                              |
|                                        | SC45      | 23                    | -                                   | 5                                         | 3                                              | 1                                   | 1                            | (2)                          | 1                              |

(1) Essais d'identification : incluent le teneur en eau naturelle, le degré de saturation, la masse volumique humide, sec et des particules solides du sol, les analyses granulométriques et les limites d'Atterberg

(2) Essais en cours

### Résumé des travaux de prospection et essais réalisés dans plusieurs études

| Phase | Unité | Essais SPT |       |       |                  |                 |                                 |
|-------|-------|------------|-------|-------|------------------|-----------------|---------------------------------|
|       |       | Sondage    |       |       | N <sub>SPT</sub> | N <sub>60</sub> | (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub> |
|       |       |            |       |       |                  |                 |                                 |
|       |       | Debout     | Fin   |       |                  |                 |                                 |
| APD   | QA    | S21        | 2,00  | —     | Refus            | --              | --                              |
|       | QS    | S21        | 4,00  | 4,45  | 54               | 37              | 37                              |
|       | QM    | S21        | 8,00  | 8,45  | 41               | 36              | --                              |
|       | QM    | S21        | 10,50 | 10,95 | 51               | 47              | --                              |
|       | QM    | S21        | 12,50 | 12,95 | 16               | 15              | --                              |
|       | QM    | S21        | 14,50 | 14,95 | 46               | 42              | --                              |
|       | QM    | S21        | 17,00 | 17,45 | 35               | 32              | --                              |



| Phase                                  | Unité | Essais SPT |                |       |                  |                 |                                 |
|----------------------------------------|-------|------------|----------------|-------|------------------|-----------------|---------------------------------|
|                                        |       | Sondage    |                |       | N <sub>SPT</sub> | N <sub>60</sub> | (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub> |
|                                        |       | Code       | Profondeur (m) |       |                  |                 |                                 |
|                                        |       |            | Debout         | Fin   |                  |                 |                                 |
| APD                                    | QM    | S21        | 18,50          | 18,95 | 33               | 30              | --                              |
|                                        | QM    | S21        | 20,50          | 20,95 | 36               | 33              | --                              |
|                                        | QMsg  | S21        | 21,50          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | S21        | 24,00          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | S21        | 28,00          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | S21        | 31,00          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | S21        | 35,00          | 35,45 | 40               | 37              | --                              |
| Campagne de Prospection Complémentaire | R     | SC44       | 1,00           | 1,45  | 22               | 15              | --                              |
|                                        | QA    | SC44       | 2,50           | 2,95  | 18               | 12              | --                              |
|                                        | QA    | SC44       | 4,00           | 4,45  | 40               | 28              | --                              |
|                                        | QA    | SC44       | 5,50           | 5,95  | 37               | 29              | --                              |
|                                        | QS    | SC44       | 7,00           | 7,45  | 36               | 31              | 27                              |
|                                        | QM    | SC44       | 8,50           | 8,95  | 23               | 20              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 10,00          | 10,45 | 32               | 28              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 11,50          | 11,95 | 40               | 37              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 13,00          | 13,45 | 30               | 28              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 14,50          | 14,95 | 26               | 24              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 16,00          | 16,45 | 56               | 51              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 17,50          | 17,95 | 27               | 25              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 19,00          | 19,45 | 14               | 13              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 20,50          | 20,95 | 14               | 13              | --                              |
|                                        | QM    | SC44       | 22,00          | 22,45 | 9                | 8               | --                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 23,50          | 23,95 | 26               | 24              | 13                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 25,00          | 25,45 | 33               | 30              | 16                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 26,50          | 26,95 | 49               | 45              | 24                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 28,00          | 28,45 | 36               | 33              | 17                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 29,50          | 29,95 | 35               | 32              | 16                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 31,00          | 31,45 | 47               | 43              | 21                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 32,50          | --    | Refus            | 55              | --                              |
|                                        | QMsg  | SC44       | 34,00          | 34,45 | 31               | 28              | 13                              |

| Phase                                  | Unité | Essais SPT |                |       |                  |                 |                                 |
|----------------------------------------|-------|------------|----------------|-------|------------------|-----------------|---------------------------------|
|                                        |       | Sondage    |                |       | N <sub>SPT</sub> | N <sub>60</sub> | (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub> |
|                                        |       | Code       | Profondeur (m) |       |                  |                 |                                 |
|                                        |       |            | Debout         | Fin   |                  |                 |                                 |
| Campagne de Prospection Complémentaire | R     | SC45       | 1,00           | 1,45  | 18               | 12              | --                              |
|                                        | R     | SC45       | 2,50           | 2,95  | 15               | 10              | --                              |
|                                        | QA    | SC45       | 4,00           | 4,45  | 24               | 17              | --                              |
|                                        | QA    | SC45       | 5,50           | 5,95  | 22               | 17              | --                              |
|                                        | QS    | SC45       | 7,00           | 7,45  | 26               | 23              | 19                              |
|                                        | QM    | SC45       | 8,50           | 8,95  | 54               | 47              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 10,00          | 10,45 | 44               | 38              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 11,50          | 11,95 | 27               | 25              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 13,00          | 13,45 | 37               | 34              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 14,50          | 14,95 | 14               | 13              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 16,00          | 16,45 | 34               | 31              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 17,50          | 17,95 | 28               | 26              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 19,00          | 19,45 | 38               | 35              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 20,50          | 20,95 | 42               | 39              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 22,00          | 22,45 | 36               | 33              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 23,50          | 23,95 | 37               | 34              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 25,00          | 25,45 | 35               | 32              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 26,50          | 26,95 | 36               | 33              | --                              |
|                                        | QM    | SC45       | 28,00          | 28,45 | 31               | 28              | --                              |
|                                        | QMsg  | SC45       | 29,50          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | SC45       | 31,00          | --    | Refus            | --              | --                              |
|                                        | QMsg  | SC45       | 32,50          | 32,95 | 33               | 30              | 15                              |
|                                        | QMsg  | SC45       | 34,00          | 34,45 | 31               | 28              | 13                              |

Résumé des résultats des essais in situ réalisés dans plusieurs études - SPT



| Phase | Unité | Essais Pressiométriques |                   |       |         |    |           |
|-------|-------|-------------------------|-------------------|-------|---------|----|-----------|
|       |       | Sondage                 |                   | $P_i$ | $E_M$   |    | $E_M/P_i$ |
|       |       | Code                    | Profondeur<br>(m) |       |         |    |           |
| APD   | R     | S21                     | 1,00              | 4,5   | 172,113 | 38 |           |
|       | QA    | S21                     | 2,00              | 0,311 | 0,334   | 1  |           |
|       | QA    | S21                     | 3,00              | 0,291 | 0,416   | 1  |           |
|       | QS    | S21                     | 4,00              | 1,59  | 3,831   | 2  |           |
|       | QS    | S21                     | 5,00              | 0,55  | 1,055   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 6,00              | 0,871 | 3,485   | 4  |           |
|       | QM    | S21                     | 7,00              | 2,41  | 5,397   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 8,00              | 1,2   | 1,657   | 1  |           |
|       | QM    | S21                     | 9,00              | 0,921 | 2,028   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 10,00             | 2,04  | 3,363   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 11,00             | 1,02  | 3,719   | 4  |           |
|       | QM    | S21                     | 12,00             | 2,05  | 3,369   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 13,00             | 2,23  | 5,473   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 14,00             | 2,433 | 4,478   | 2  |           |
|       | QM    | S21                     | 15,00             | 2,45  | 3,205   | 1  |           |
| APD   | QM    | S21                     | 16,00             | 1,26  | 1,668   | 1  |           |
|       | QM    | S21                     | 17,00             | 3,814 | 19,421  | 5  |           |
|       | QM    | S21                     | 18,00             | 3,93  | 87,918  | 22 |           |
|       | QM    | S21                     | 19,00             | 3,02  | 4,399   | 1  |           |
|       | QM    | S21                     | 20,00             | 2,095 | 2,844   | 1  |           |
|       | QM    | S21                     | 21,00             | 2,505 | 21,448  | 9  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 22,00             | 1,742 | 2,885   | 2  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 23,00             | 1,14  | 1,186   | 1  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 24,00             | 1,15  | 1,186   | 1  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 25,00             | 1,93  | 6,295   | 3  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 26,00             | 1,99  | 3,47    | 2  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 27,00             | 1,19  | 1,516   | 1  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 28,00             | 1,98  | 3,103   | 2  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 29,00             | 2,31  | 7,879   | 3  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 30,00             | 2,32  | 4,64    | 2  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 31,00             | 2,541 | 2,889   | 1  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 32,00             | 2,51  | 11,057  | 4  |           |
|       | QMsg  | S21                     | 33,00             | 2,427 | 3,739   | 2  |           |

| Phase                                  | Unité | Essais Pressiométriques |            |      |        |           |
|----------------------------------------|-------|-------------------------|------------|------|--------|-----------|
|                                        |       | Sondage                 |            | PI   | $E_M$  | $E_M/P_I$ |
|                                        |       | Code                    | Profondeur |      |        |           |
|                                        |       |                         | (m)        | MPa  | MPa    | --        |
| Campagne de Prospection Complémentaire | QA    | SP30                    | 4,25       | 2,20 | 93,70  | 43        |
|                                        | QM    | SP30                    | 8,50       | 5,21 | 59,81  | 11        |
|                                        | QM    | SP30                    | 12,75      | 2,02 | 25,67  | 13        |
|                                        | QM    | SP30                    | 16,80      | 4,62 | 51,54  | 11        |
|                                        | QMsg  | SP30                    | 25,25      | 2,80 | 34,36  | 12        |
|                                        | QMsg  | SP30                    | 29,75      | 5,19 | 122,98 | 24        |
|                                        | QMsg  | SP30                    | 34,00      | 5,22 | 145,84 | 28        |

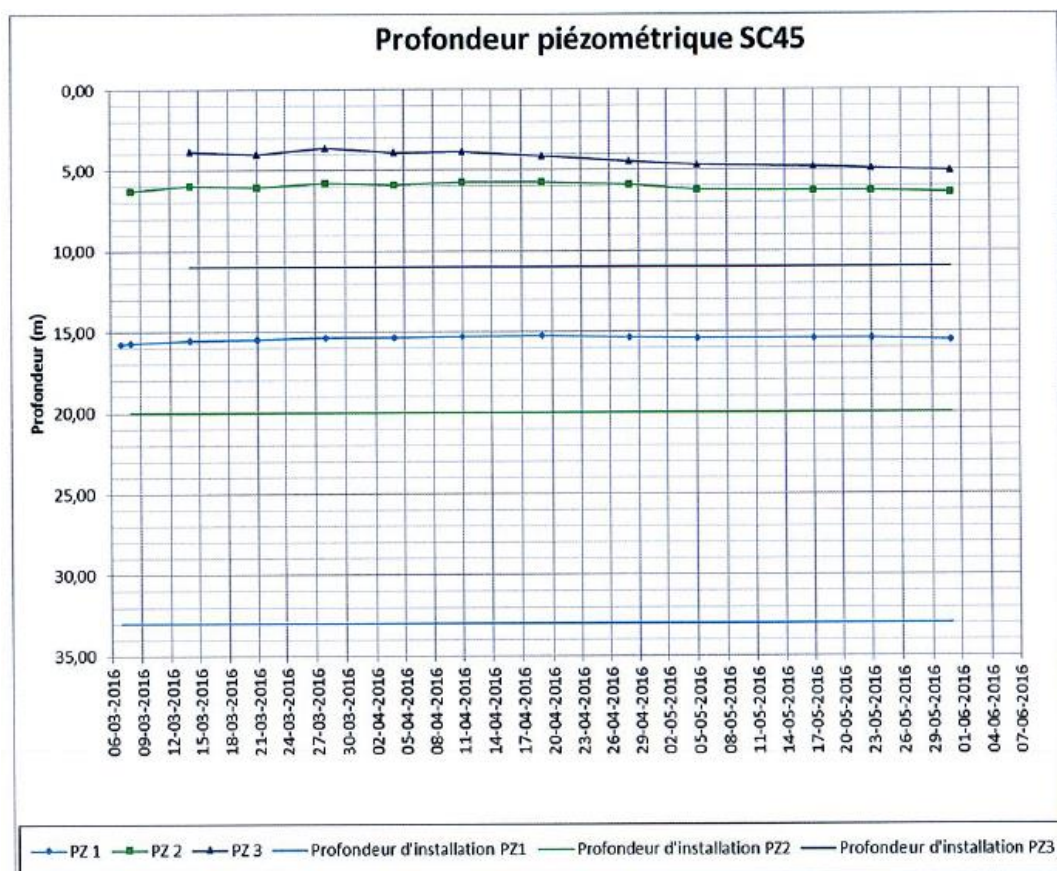
Résumé des résultats des essais in situ réalisés dans plusieurs études - PMT

| Phase                            | Sondage | Profondeur |       | UNITE | RC<br>$\sigma_c$<br>(kPa) | Cisaillement à la boîte<br>(UU) |                 | Cisaillement à la<br>boîte (CD) |                | Essais<br>Triaxiaux<br>CU+U |
|----------------------------------|---------|------------|-------|-------|---------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|-----------------------------|
|                                  |         | Début      | Fin   |       |                           | $C_u$<br>(kPa)                  | $\phi_u$<br>(°) | $C'$<br>(kPa)                   | $\phi'$<br>(°) |                             |
| APD                              | S21     | 7,2        | 7,7   | QM    | 501                       | 149                             | 19              | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | S21     | 10,6       | 11    | QM    | 179                       | 97                              | 21              | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | S21     | 21,2       | 21,5  | QMsg  | ...                       | ...                             | ...             | ...                             | ...            | ...                         |
| Campagne de Prospection en Cours | SC45    | 3,5        | 4     | QA    | ...                       | ...                             | ...             | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | SC45    | 11,2       | 11,47 | QM    | 446                       | ...                             | ...             | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | SC45    | 14,15      | 14,3  | QM    | ...                       | ...                             | ...             | ...                             | ...            | Imp.                        |
|                                  | SC45    | 20,5       | 20,8  | QM    | ...                       |                                 |                 | 49                              | 18             | ...                         |
|                                  | SC45    | 23,8       | 24,1  | QM    | 409                       |                                 |                 | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | SC44    | 3,75       | 4,05  | QA    | ...                       |                                 |                 | ...                             | ...            | ...                         |
|                                  | SC44    | 9          | 9,5   | QM    | ...                       |                                 |                 | 58                              | 15             | ...                         |
|                                  | SC44    | 14,5       | 15    | QM    | ...                       |                                 |                 | ...                             | ...            | Imp.                        |
|                                  | SC44    | 29,15      | 29,45 | QMsg  | 439                       |                                 |                 | ...                             | ...            | ...                         |

Résumé des résultats des essais en laboratoire réalisés dans plusieurs études pour obtentions de paramètres mécaniques des sols

| Sondage      | Niveaux Terrain | Profondeur Zone Percée | Date       | Lectures Prof.(m) |
|--------------|-----------------|------------------------|------------|-------------------|
| SC45- PZ TPO | 16,90           | 4,00-17,00             | 15-02-2016 | 2,26              |
|              |                 |                        | 24-02-2016 | 4,02              |
|              |                 |                        | 01-03-2016 | 4,70              |
|              |                 |                        | 08-03-2016 | 4,06              |
|              |                 |                        | 13-03-2016 | --                |
|              |                 |                        | 21-03-2016 | 3,18              |
|              |                 |                        | 28-03-2015 | 2,56              |
|              |                 |                        | 04-04-2016 | 2,78              |
|              |                 |                        | 17-04-2016 | --                |
|              |                 |                        | 20-04-2016 | 3,13              |
|              |                 |                        | 02-05-2016 | 3,99              |
|              |                 |                        | 16-05-2016 | 4,71              |
|              |                 |                        | 24-05-2016 | 5,31              |
|              |                 |                        | 29-05-2016 | 5,32              |

### Résumé des lectures piézométriques a tube ouvert



### Lectures des piézomètres a corde vibrante SC45



| Classe de sol          | Description                  | Pressiomètre Pl (Mpa) |
|------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Argile, Limons         | A. Argile et limon mous      | <0.7                  |
|                        | B.Argiles et limons fermes   | 1.2-2                 |
|                        | C.Argiles très fermes à durs | >2.5                  |
| Sables, Graves         | A.Lache                      | <0.5                  |
|                        | B.Moyenement compacts        | 1-2                   |
|                        | C.compacts                   | >2.5                  |
| Craies                 | A.Molles                     | <0.7                  |
|                        | B.Altéré                     | 1-2.5                 |
|                        | C.Compactes                  | >3                    |
| Marne; Marno-calcaires | A. Tendres                   | 1.5-4                 |
|                        | B.Compactes                  | > 4.5                 |

La classification du DTU13.12

|                                            | Tourbe      |          | Argile      |          | Limon       |          | Sable       |          | Grave       |          |
|--------------------------------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| Type                                       | $E_m / P_l$ | $\alpha$ | $E_m / P_l$ | $\alpha$ | $E_m / P_l$ | $\alpha$ | $E_m / P_l$ | $\alpha$ | $E_m / P_l$ | $\alpha$ |
| Surconsolidé ou très serré                 | ---         | --       | >16         | 1        | >14         | 2/3      | >12         | 1/2      | >10         | 1/3      |
| Normalement consolidé ou normalement serré | ---         | 1.0      | 9-16        | 2/3      | 8-14        | 1/2      | 7-12        | 1/3      | 6-10        | 1/4      |
| Sous-consolidé altéré et remanié ou lache  | ---         | ---      | 7-9         | 1/2      | 5-8         | 1/2      | 5-7         | 1/3      | ---         | ---      |

Classification Ménard

|                                              |                                                                      |                                               |                                  |           |                      |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-----------|----------------------|
| Sols fins                                    | $D < 50 \text{ mm}$<br>Tamisat<br>à $80 \mu\text{m} > 35 \%$         | $I_p < 10$                                    |                                  |           | <b>A<sub>1</sub></b> |
|                                              |                                                                      | $10 < I_p < 20$                               |                                  |           | <b>A<sub>2</sub></b> |
|                                              |                                                                      | $20 < I_p < 50$                               |                                  |           | <b>A<sub>3</sub></b> |
|                                              |                                                                      | $I_p > 50$                                    |                                  |           | <b>A<sub>4</sub></b> |
| Sols sableux<br>et graveleux<br>avec fines   | $D < 50 \text{ mm}$<br>Tamisat à $80 \mu\text{m}$<br>entre 5 et 35 % | Tamisat<br>à $80 \mu\text{m}$<br>de 5 à 12 %  | Refus à 2 mm<br>inférieur à 30 % | $ES > 35$ | <b>B<sub>1</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               |                                  | $ES < 35$ | <b>B<sub>2</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               | Refus à 2 mm<br>supérieur à 30 % | $ES > 25$ | <b>B<sub>3</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               |                                  | $ES < 25$ | <b>B<sub>4</sub></b> |
|                                              |                                                                      | Tamisat<br>à $80 \mu\text{m}$<br>de 12 à 35 % | $I_p < 10$                       |           | <b>B<sub>5</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               | $I_p > 10$                       |           | <b>B<sub>6</sub></b> |
| Sols comportant<br>fines et<br>gros éléments | $D > 50 \text{ mm}$<br>Tamisat<br>à $80 \mu\text{m} > 5 \%$          | Tamisat à $80 \mu\text{m}$ élevé              |                                  |           | <b>C<sub>1</sub></b> |
|                                              |                                                                      | Tamisat<br>à $80 \mu\text{m}$<br>faible       | $D < 250 \text{ mm}$             |           | <b>C<sub>2</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               | $D > 250 \text{ mm}$             |           | <b>C<sub>3</sub></b> |
| Sols et roches<br>insensibles à l'eau        | Tamisat<br>à $80 \mu\text{m} < 5 \%$                                 | $D < 50 \text{ mm}$                           | Refus à 2 mm inférieur à 30 %    |           | <b>D<sub>1</sub></b> |
|                                              |                                                                      |                                               | Refus à 2 mm supérieur à 30 %    |           | <b>D<sub>2</sub></b> |
|                                              |                                                                      | $50 \text{ mm} < D < 250 \text{ mm}$          |                                  |           | <b>D<sub>3</sub></b> |
|                                              |                                                                      | $D > 250 \text{ mm}$                          |                                  |           | <b>D<sub>4</sub></b> |

### Classification des sols (RTR)

| Matériaux |                                                                                                                    | Compacité         | $N_S$ | $D_r$ (%) | $\gamma_d$ (kN·m <sup>-3</sup> ) | $e$  | $\phi'$ (°) |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|-----------|----------------------------------|------|-------------|
| GW        | Graviers ou mélanges graviers sables à granulométrie étalée. Peu ou pas de fines                                   | dense             | 90    | 75        | 21,7                             | 0,22 | 40          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 55    | 50        | 20,4                             | 0,28 | 36          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <28   | 25        | 19,3                             | 0,36 | 32          |
| GP        | Graviers ou mélanges graviers sables à granulométrie étroite. Peu ou pas de fines                                  | dense             | 70    | 75        | 20,0                             | 0,33 | 38          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 50    | 50        | 18,9                             | 0,39 | 35          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <20   | 25        | 17,9                             | 0,47 | 32          |
| SW        | Sables ou sables graveleux à granulométrie étalée. Peu ou pas de fines                                             | dense             | 65    | 75        | 18,6                             | 0,43 | 37          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 35    | 50        | 17,6                             | 0,49 | 34          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <15   | 25        | 16,7                             | 0,57 | 30          |
| SP        | Sables ou sables graveleux à granulométrie étalée. Peu ou pas de fines                                             | dense             | 50    | 75        | 17,3                             | 0,52 | 36          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 30    | 50        | 16,4                             | 0,60 | 33          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <10   | 25        | 15,6                             | 0,65 | 29          |
| SM        | Sables limoneux, mélanges sables-silts                                                                             | dense             | 45    | 75        | 16,2                             | 0,62 | 35          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 25    | 50        | 15,2                             | 0,74 | 32          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <8    | 25        | 14,6                             | 0,80 | 29          |
| ML        | Silts inorganiques et sables très fins, mouture de roche, sables fins limoneux ou argileux avec légère plasticité. | dense             | 35    | 75        | 14,6                             | 0,80 | 33          |
|           |                                                                                                                    | moyennement dense | 20    | 50        | 13,8                             | 0,90 | 31          |
|           |                                                                                                                    | lâche             | <4    | 25        | 13,2                             | 1,00 | 27          |

### La classification de Hunt (2005)

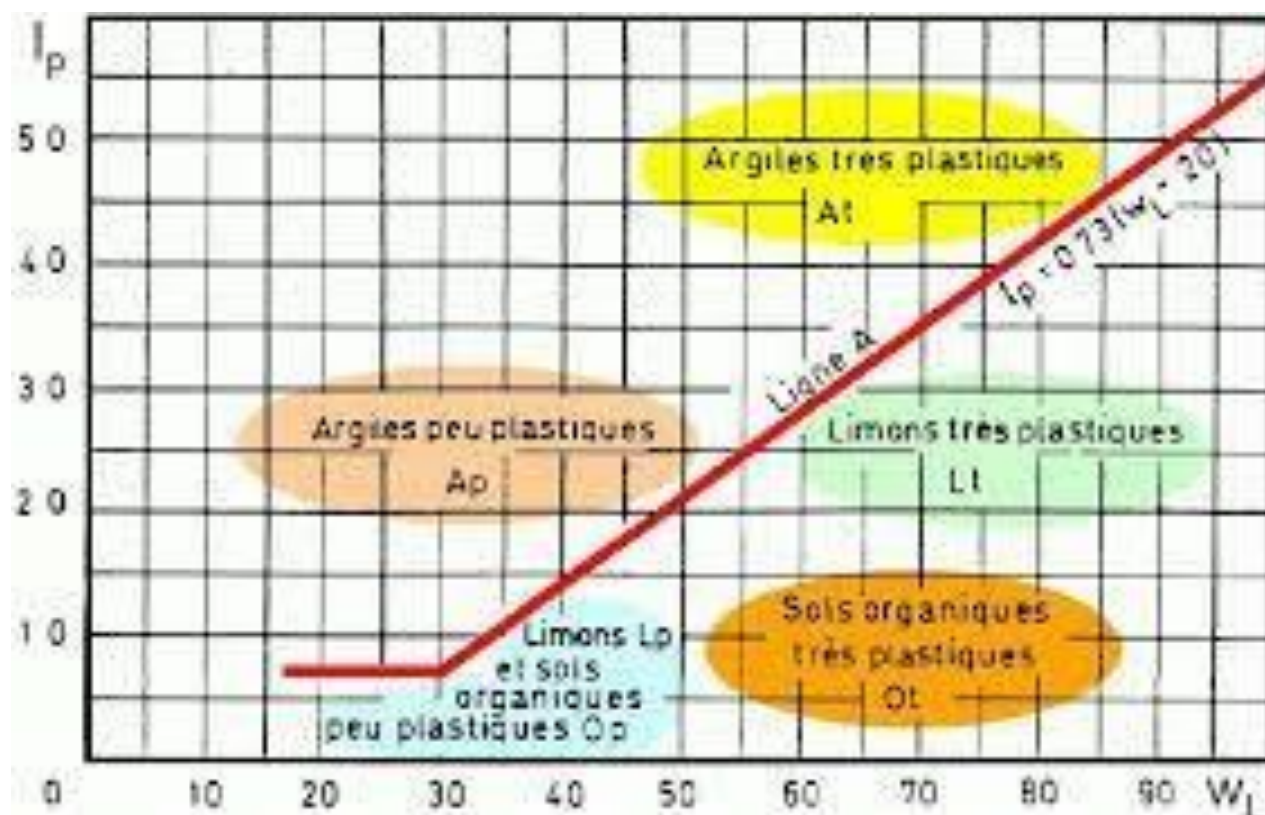


Diagramme de Casagrande

| Teneur en $\text{CaCO}_3$ (%) | Désignation géotechnique |
|-------------------------------|--------------------------|
| 0 - 10                        | Argile                   |
| 10 - 30                       | Argile marneuse          |
| 30 - 70                       | Marne                    |
| 70 - 90                       | Calcaire marneux         |
| 90 - 100                      | Calcaire                 |
|                               | Sols                     |
|                               | Roches                   |

Classification des sols selon le pourcentage en  $\text{CaCO}_3$



| Utilisation du béton                                                                                               | Classe de chlorures | Teneur maximale en Cl- rapportée à la masse de ciment |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| Béton contenant ni armature en acier, ni pièces métalliques noyées                                                 | Cl 1,0              | 1 %                                                   |
| Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées, et formulé avec un ciment de type CEM III | Cl 0,65             | 0,65 %                                                |
| Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées                                            | Cl 0,40             | 0,40 %                                                |
| Béton contenant des armatures de précontrainte en acier                                                            | Cl 0,20<br>Cl 0,10  | 0,20 %<br>0,10 %                                      |

**Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton**

## NOTE DE CALCUL — VÉRIFICATION D'UN BUTON MÉTALLIQUE HEB 200

*Flexion composée — Résistance de section & Stabilité (flambement et déversement) — selon ENV 1993-1-1 (1992)*

### CONTEXTE

Remplacement d'un buton initialement en HEB 500 (S275, L=6 m) par un profilé HEB 200 (S235). L'effort normal de compression maximal appliqué sur le buton, issu du modèle GEO5, est NEd = 1128,64 kN. On vérifie le HEB 200 vis-à-vis de la flexion composée (N+M), en résistance de section puis en stabilité (flambement par flexion et déversement).

### 1.1 CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DU PROFILÉ — HEB 200

| Désignation              | Symbole        | Valeur | Unité           |
|--------------------------|----------------|--------|-----------------|
| Hauteur de section       | h              | 200    | mm              |
| Largeur des semelles     | b              | 200    | mm              |
| Épaisseur de l'âme       | tw             | 9      | mm              |
| Épaisseur des semelles   | tf             | 15     | mm              |
| Rayon de congé           | r              | 18     | mm              |
| Aire de la section       | A              | 78,08  | cm <sup>2</sup> |
| Moment d'inertie / y-y   | Iy             | 5696   | cm <sup>4</sup> |
| Moment d'inertie / z-z   | Iz             | 2003   | cm <sup>4</sup> |
| Rayon de giration / y    | iy             | 8,54   | cm              |
| Rayon de giration / z    | iz             | 5,07   | cm              |
| Module élastique / y     | Wel,y          | 569,6  | cm <sup>3</sup> |
| Module plastique / y     | Wpl,y          | 642,5  | cm <sup>3</sup> |
| Module élastique / z     | Wel,z          | 200,3  | cm <sup>3</sup> |
| Module plastique / z     | Wpl,z          | 305,8  | cm <sup>3</sup> |
| Inertie de torsion       | It             | 59,28  | cm <sup>4</sup> |
| Inertie de gauchissement | Iw             | 171100 | cm <sup>6</sup> |
| Masse linéique           | g <sub>0</sub> | 61,3   | kg/m            |

### 1.2 CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU — ACIER S235

| Désignation                        | Symbole | Valeur | Unité |
|------------------------------------|---------|--------|-------|
| Limite d'élasticité                | fy      | 235    | MPa   |
| Module d'élasticité                | E       | 210000 | MPa   |
| Module de cisaillement             | G       | 81000  | MPa   |
| Coef. partiel (résistance section) | γM0     | 1      | -     |
| Coef. partiel (résistance barres)  | γM1     | 1,1    | -     |

### 1.3 SOLLICITATIONS ET LONGUEURS DE FLAMBEMENT

| Désignation                                  | Symbole | Valeur  | Unité |
|----------------------------------------------|---------|---------|-------|
| Effort normal de compression (GEO5)          | NEd     | 1128,64 | kN    |
| Longueur du buton (entre appuis)             | L       | 6       | m     |
| Charge linéique (poids propre majoré)        | q       | 9,6     | kN/m  |
| Coef. de longueur de flambement (bi-encasté) | K       | 0,3339  | -     |
| Moment d'extrémité variable (réf.)           | MQ      | 1,8     | kN·m  |
| Moment d'extrémité minimal                   | Mmin    | 0,9     | kN·m  |

|                                               |           |        |   |
|-----------------------------------------------|-----------|--------|---|
| <b>Longueur de flambement (les deux axes)</b> | <b>Lf</b> | 2,0034 | m |
|-----------------------------------------------|-----------|--------|---|

Buton encasté à ses deux extrémités ⇒ Lf = 0,5·L = 3,0 m sur les axes y et z.

#### Légende :

|                  |        |            |             |
|------------------|--------|------------|-------------|
| Données d'entrée | Calcul | Vérifié OK | Non vérifié |
|------------------|--------|------------|-------------|

## 2. CLASSIFICATION DE LA SECTION

ENV 1993-1-1 — Tableau 5.3.1 (paroi comprimée / fléchie)

### 2.1 PARAMÈTRE $\varepsilon$ ET DONNÉES

|                                                           |                                        |         |    |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|----|
| Coefficient $\varepsilon = \sqrt{(235/f_y)}$              | $\varepsilon = \text{RACINE}(235/f_y)$ | 1,000   | -  |
| Hauteur de l'âme droite $d = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r$ | $d = h - 2t_f - 2r$                    | 134,000 | mm |
| Largeur en console de semelle $c = (b - t_w)/2 - r$       | $c = (b - t_w)/2 - r$                  | 77,500  | mm |

### 2.2 CLASSIFICATION DE L'ÂME (comprimée — flexion composée)

|                                                                 |                        |                      |                 |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| Élancement de l'âme $d/t_w$                                     | $d / t_w$              | 14,889               | mm              |
| Limite Classe 1 (âme comprimée) : $33 \cdot \varepsilon$        | $33 \cdot \varepsilon$ | 33,000               | -               |
| <b>Vérification âme (<math>d/t_w \leq 33\varepsilon</math>)</b> | 14,889                 | $\leq 33\varepsilon$ | <b>CLASSE 1</b> |

Note : l'âme d'un HEB 200 ( $d/t_w \approx 14,9$ ) est en Classe 1 quel que soit le taux de compression (limite la plus sévère  $33\varepsilon = 33$ ).

### 2.3 CLASSIFICATION DE LA SEMELLE (console comprimée)

|                                                                     |                        |                      |                 |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| Élancement de la semelle $c/t_f$                                    | $c / t_f$              | 5,167                | -               |
| Limite Classe 1 (semelle comprimée) : $10 \cdot \varepsilon$        | $10 \cdot \varepsilon$ | 10,000               | -               |
| <b>Vérification semelle (<math>c/t_f \leq 10\varepsilon</math>)</b> | 5,167                  | $\leq 10\varepsilon$ | <b>CLASSE 1</b> |

### 2.4 CONCLUSION

La section HEB 200 est de **CLASSE 1** : analyse plastique autorisée (modules plastiques  $W_{pl}$  utilisables).

## 3. RÉSISTANCE DE LA SECTION

Compression + Flexion composée (interaction M-N) — ENV 1993-1-1 §5.4

### 3.1 RÉSISTANCE EN COMPRESSION (effort axial seul)

|                                                                                                                              |                             |             |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|----------------|
| Effort axial de calcul                                                                                                       | $N_{Ed}$                    | 1128,640    | kN             |
| Résistance plastique de section $N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M1}$                                                      | $A \cdot f_y / \gamma_{M1}$ | 1668,073    | kN             |
| (Conformément à votre note manuscrite, $\gamma_{M1} = 1,1$ est utilisé. Avec $\gamma_{M0} = 1,0$ : $N_{pl,Rd} = 1834,9$ kN.) |                             |             |                |
| <b>Critère compression : <math>N_{Ed} / N_{pl,Rd}</math></b>                                                                 | 0,677                       | $\leq 1,00$ | <b>VÉRIFIÉ</b> |

### 3.2 RÉSISTANCE EN FLEXION (moment seul)

|                                                                             |                                    |         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------|------|
| Moment fléchissant de calcul $M_{y,Ed} = q \cdot L^2 / 12$ (encastrement)   | $q \cdot L^2 / 12$                 | 28,800  | kN·m |
| Moment de flexion dû au poids propre du buton (poutre bi-encastree).        |                                    |         |      |
| Moment résistant plastique $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}$ | $W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}$ | 137,261 | kN·m |

### 3.3 INTERACTION M-N — MOMENT RÉSISTANT RÉDUIT (§5.4.8.1)

|                                                                           |                                      |          |                 |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| Taux de compression $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$                              | $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$             | 0,677    | -               |
| Aire de l'âme $A_w = A - 2 \cdot b \cdot t_f$                             | $A_w = A - 2 \cdot b \cdot t_f$      | 1808,000 | mm <sup>2</sup> |
| Paramètre $a = \min(A_w / A ; 0,5)$                                       | $a = \min(A_w / A ; 0,5)$            | 0,232    | -               |
| Moment résistant réduit $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) / (1-0,5a)$ | $M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n) / (1-0,5a)$ | 50,201   | kN·m            |

Valable car  $n > a$  : le moment résistant est réduit par l'effort normal (formule pour flexion / y-y).

|                                                                        |       |             |                |
|------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|----------------|
| <b>Critère résistance section : <math>M_{y,Ed} / M_{N,y,Rd}</math></b> | 0,574 | $\leq 1,00$ | <b>VÉRIFIÉ</b> |
|------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|----------------|

### 3.4 CONCLUSION — RÉSISTANCE DE SECTION

Résistance de section **VÉRIFIÉE** en flexion composée (M-N).

## 4. STABILITÉ — FLAMBEMENT PAR FLEXION

ENV 1993-1-1 §5.5.1 (flambement simple) et §5.5.4 (flexion composée, formule 5.51)

### 4.1 ÉLANCEMENTS RÉDUITS

|                                                                                       |                                           |        |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|---|
| Élancement de référence $\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = 93,9 \cdot \varepsilon$ | $\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y}$            | 93,913 | - |
| Élancement / axe y $\lambda_y = L_f / i_y$                                            | $\lambda_y = L_f / i_y$                   | 23,459 | - |
| Élancement réduit / axe y $\bar{\lambda}_y = \lambda_y / \lambda_1$                   | $\bar{\lambda}_y = \lambda_y / \lambda_1$ | 0,250  | - |
| Élancement / axe z $\lambda_z = L_f / i_z$                                            | $\lambda_z = L_f / i_z$                   | 39,515 | - |
| Élancement réduit / axe z $\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1$                   | $\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1$ | 0,421  | - |

### 4.2 COURBES DE FLAMBEMENT & COEFFICIENTS $\chi$

HEB 200 :  $h/b = 1,0 \leq 1,2$  et  $t_f = 15 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \Rightarrow$  axe y : courbe b ( $\alpha=0,34$ ) ; axe z : courbe c ( $\alpha=0,49$ ).

|                                                                                |                                       |       |   |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|---|
| Facteur d'imperfection / y (courbe b)                                          | $\alpha_y$                            | 0,340 | - |
| $\Phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$ | $\Phi_y$                              | 0,540 | - |
| $\chi_y = 1/(\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2})$                    | $\chi_y$                              | 0,982 | - |
| Facteur d'imperfection / z (courbe c)                                          | $\alpha_z$                            | 0,490 | - |
| $\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha_z(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$ | $\Phi_z$                              | 0,643 | - |
| $\chi_z = 1/(\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2})$                    | $\chi_z$                              | 0,886 | - |
| Coefficient minimal $\chi_{\min} = \min(\chi_y ; \chi_z)$                      | $\chi_{\min} = \min(\chi_y ; \chi_z)$ | 0,886 | - |

### 4.3 RÉSISTANCE AU FLAMBEMENT SIMPLE (compression seule)

|                                                                                   |                                               |             |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|---------|
| Résistance au flambement $N_{b,Rd} = \chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$ | $\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$ | 1478,389    | kN      |
| Critère flambement simple : $N_{Ed} / N_{b,Rd}$                                   | 0,763                                         | $\leq 1,00$ | VÉRIFIÉ |

### 4.4 FACTEUR DE MOMENT UNIFORME ÉQUIVALENT $\beta_{M,y}$

Diagramme combiné : moments d'extrémité (variation linéaire) + charge transversale répartie (poids propre).

|                                                                                        |                                                                                    |       |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|---|
| Rapport des moments d'extrémité $\psi = M_{\min} / M_Q$                                | $\psi = M_{\min} / M_Q$                                                            | 0,500 | - |
| $\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \cdot \psi$ (moments d'extrémité)                          | $1,8 - 0,7 \psi$                                                                   | 1,450 | - |
| $\beta_{M,Q}$ (charge uniformément répartie)                                           | $\beta_{M,Q}$                                                                      | 1,300 | - |
| Écart de moment de la charge transversale $\Delta M$                                   | $\Delta M$                                                                         | 3,700 | - |
| $\beta_{M,y} = \beta_{M,\psi} + (M_Q / \Delta M) \cdot (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ | $\beta_M = \beta_{M,\psi} + (M_Q / \Delta M) \cdot (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ | 1,377 | - |

### 4.5 FACTEUR D'INTERACTION $k_y$ (§5.5.4)

|                                                                                              |                                                             |        |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|---|
| $\mu_y = \bar{\lambda}_y \cdot (2 \cdot \beta_{M,y} - 4) + (W_{pl,y} - W_{el,y}) / W_{el,y}$ | $\mu_y$                                                     | -0,183 | - |
| $\mu_y$ borné ( $\mu_y \leq 0,90$ )                                                          | $\min(\mu_y ; 0,90)$                                        | -0,183 | - |
| $k_y = 1 - \mu_y \cdot N_{Ed} / (\chi_y \cdot A \cdot f_y)$ ( $k_y \leq 1,5$ )               | $k_y = 1 - \mu_y \cdot N_{Ed} / (\chi_y \cdot A \cdot f_y)$ | 1,115  | - |

### 4.6 VÉRIFICATION FLEXION COMPOSÉE — FORMULE 5.51

$N_{Ed} / (\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}) + k_y \cdot M_{y,Ed} / (W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}) \leq 1$

|                                                                                  |         |             |         |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|---------|
| Terme 1 — effort normal $N_{Ed} / (\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1})$ | terme N | 0,763       | -       |
| Terme 2 — moment $k_y \cdot M_{y,Ed} / (W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1})$       | terme M | 0,234       | -       |
| Critère 5.51 (flambement + flexion)                                              | 0,997   | $\leq 1,00$ | VÉRIFIÉ |

## 5. STABILITÉ — DÉVERSEMENT

ENV 1993-1-1 §5.5.2 (déversement) et §5.5.4 (formule 5.52)

### 5.1 MOMENT CRITIQUE ÉLASTIQUE DE DÉVERSEMENT $M_{cr}$

|                                                                                                                       |          |          |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|------|
| Longueur entre maintiens latéraux $L$ (= $L_f$ )                                                                      | $L$      | 2003,400 | mm   |
| Facteur de moment $C_1$ (charge répartie, appuis fourche)                                                             | $C_1$    | 1,132    | -    |
| $M_{cr} = C_1 \cdot (\pi^2 E I_z / L^2) \cdot \sqrt{[I_w / I_z + L^2 \cdot G \cdot I_t / (\pi^2 \cdot E \cdot I_z)]}$ | $M_{cr}$ | 1344,441 | kN·m |

### 5.2 ÉLANCEMENT RÉDUIT ET COEFFICIENT $\chi_{LT}$

|                                                                         |                                                       |       |   |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|---|
| Élancement réduit $\lambda_{LT} = \sqrt{(W_{pl,y} \cdot f_y / M_{cr})}$ | $\lambda_{LT} = \sqrt{(W_{pl,y} \cdot f_y / M_{cr})}$ | 0,335 | - |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|---|

$\lambda_{LT} \leq 0,4 \Rightarrow$  le déversement peut être négligé ( $\chi_{LT} = 1,0$ ). Le calcul complet est néanmoins mené ci-dessous.

|                                                                                |               |       |   |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------|---|
| Facteur d'imperfection $\alpha_{LT}$ (profilé laminé, courbe a)                | $\alpha_{LT}$ | 0,210 | - |
| $\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2]$ | $\Phi_{LT}$   | 0,570 | - |
| $\chi_{LT} = 1 / (\Phi_{LT} + \sqrt{(\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2)}) \leq 1,0$ | $\chi_{LT}$   | 0,969 | - |

### 5.3 FACTEUR D'INTERACTION $k_{LT}$ (§5.5.4)

|                                                                       |            |        |   |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|--------|---|
| $\mu_{LT} = 0,15 \cdot \lambda_z \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,90$ | $\mu_{LT}$ | -0,063 | - |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|--------|---|

$\beta_{M,LT}$  pris égal à  $\beta_{M,y}$  (facteur de moment équivalent pour le déversement).

|                                                                                           |                                                                   |       |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|---|
| $k_{LT} = 1 - \mu_{LT} \cdot N_{Ed} / (\chi_z \cdot A \cdot f_y) \quad (k_{LT} \leq 1,0)$ | $k_{LT} = 1 - \mu_{LT} \cdot N_{Ed} / (\chi_z \cdot A \cdot f_y)$ | 1,000 | - |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|---|

### 5.4 VÉRIFICATION FLEXION COMPOSÉE AVEC DÉVERSEMENT — FORMULE 5.52

$N_{Ed} / (\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}) + k_{LT} \cdot M_{y,Ed} / (\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}) \leq 1$

|                                                                                               |         |       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|-----------------------|
| Terme 1 — effort normal $N_{Ed} / (\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1})$                   | terme N | 0,763 | -                     |
| Terme 2 — moment $k_{LT} \cdot M_{y,Ed} / (\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1})$ | terme M | 0,216 | -                     |
| <b>Critère 5.52 (déversement + flexion)</b>                                                   |         | 0,980 | <b>≤ 1,00 VÉRIFIÉ</b> |

## 6. SYNTHÈSE DES VÉRIFICATIONS — BUTON HEB 200 (S235)

| Vérification                                   | Réf. ENV 1993-1-1 | Taux de travail | Critère  | Verdict         |
|------------------------------------------------|-------------------|-----------------|----------|-----------------|
| Classification de la section                   | Tab. 5.3.1        | —               | Classe 1 | <b>CLASSE 1</b> |
| Résistance — compression seule                 | §5.4.4            | 0,677           | ≤ 1,00   | <b>VÉRIFIÉ</b>  |
| Résistance section — flexion composée M-N      | §5.4.8.1          | 0,574           | ≤ 1,00   | <b>VÉRIFIÉ</b>  |
| Stabilité — flambement simple (compression)    | §5.5.1            | 0,763           | ≤ 1,00   | <b>VÉRIFIÉ</b>  |
| Stabilité — flambement + flexion (form. 5.51)  | §5.5.4            | 0,997           | ≤ 1,00   | <b>VÉRIFIÉ</b>  |
| Stabilité — déversement + flexion (form. 5.52) | §5.5.4            | 0,980           | ≤ 1,00   | <b>VÉRIFIÉ</b>  |

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Toutes les vérifications sont satisfaites : le profilé HEB 200 (S235) convient pour remplacer le buton, vis-à-vis de la résistance de section, du flambement et du déversement en flexion composée.

**Tableau 14 – Vérifications des boutons fléchies et comprimées**

| Buton I.D. | Profil    | Nd    | L     | Myd    | L0,y  | L0,z<br>[L] | L0,LT<br>[L] | (6.1) *   | (6.2) *   |
|------------|-----------|-------|-------|--------|-------|-------------|--------------|-----------|-----------|
|            |           | (kN)  | (m)   | (kNm)  | (m)   | (m)         | (m)          | (-)       | (-)       |
| PM1.01     | HE 500 B  | 2404  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,37<1,00 | 0,37<1,00 |
| PM1.02     | HE 500 B  | 2670  | 3,55  | 2,95   | 3,55  | 3,55        | 3,55         | 0,41<1,00 | 0,48<1,00 |
| PM1.03     | HE 500 B  | 2103  | 14,20 | 47,13  | 14,20 | 5,00        | 14,20        | 0,44<1,00 | 0,47<1,00 |
| PM1.04     | HE 500 B  | 2885  | 3,55  | 2,95   | 3,55  | 3,55        | 3,55         | 0,44<1,00 | 0,52<1,00 |
| PM1.05     | HE 500 B  | 2604  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,42<1,00 | 0,4<1,00  |
| PM1.06     | HE 500 B  | 2615  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,42<1,00 | 0,4<1,00  |
| PM1.07     | HE 500 B  | 2296  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,4<1,00  | 0,53<1,00 |
| PM1.08     | 2HE 500 B | 5267  | 17,20 | 138,31 | 17,20 | 12,60       | 17,20        | 0,64<1,00 | 0,64<1,00 |
| PM1.09     | HE 500 B  | 2383  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,37<1,00 | 0,55<1,00 |
| PM1.10     | HE 500 B  | 2339  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,36<1,00 | 0,54<1,00 |
| PM1.11     | 2HE 500 B | 4900  | 17,20 | 138,31 | 17,20 | 12,60       | 17,20        | 0,6<1,00  | 0,6<1,00  |
| PM1.12     | HE 500 B  | 2261  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,35<1,00 | 0,52<1,00 |
| PM1.13     | HE 500 B  | 2672  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,43<1,00 | 0,43<1,00 |
| PM2.01     | HE 500 B  | 3967  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,63<1,00 | 0,64<1,00 |
| PM2.02     | HE 500 B  | 4976  | 3,55  | 2,95   | 3,55  | 3,55        | 3,55         | 0,76<1,00 | 0,89<1,00 |
| PM2.03     | HE 500 B  | 6578  | 13,90 | 90,33  | 13,90 | 4,00        | 13,90        | 0,99<1,00 | 0,97<1,00 |
| PM2.04     | HE 500 B  | 5563  | 3,55  | 2,95   | 3,55  | 3,55        | 3,55         | 0,85<1,00 | 0,99<1,00 |
| PM2.05     | HE 500 B  | 5538  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,88<1,00 | 0,89<1,00 |
| PM2.06     | HE 500 B  | 5852  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,93<1,00 | 0,94<1,00 |
| PM2.07     | HE 500 B  | 3763  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,59<1,00 | 0,86<1,00 |
| PM2.08     | 2HE 500 B | 10427 | 15,00 | 105,19 | 15,00 | 10,50       | 15,00        | 0,99<1,00 | 0,98<1,00 |
| PM2.09     | HE 500 B  | 4044  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,64<1,00 | 0,93<1,00 |
| PM2.10     | HE 500 B  | 3494  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,55<1,00 | 0,8<1,00  |
| PM2.11     | 2HE 500 B | 8700  | 15,00 | 105,19 | 15,00 | 10,50       | 15,00        | 0,99<1,00 | 0,98<1,00 |
| PM2.12     | HE 500 B  | 3253  | 5,60  | 7,33   | 5,60  | 5,60        | 5,60         | 0,51<1,00 | 0,75<1,00 |
| PM2.13     | HE 500 B  | 5102  | 6,00  | 8,42   | 6,00  | 2,00        | 6,00         | 0,81<1,00 | 0,82<1,00 |
| PM3.01     | 2HE 500 B | 9566  | 5,08  | 12,06  | 5,08  | 1,70        | 5,08         | 0,75<1,00 | 0,73<1,00 |
| PM3.02     | 2HE 500 B | 11143 | 5,08  | 12,06  | 5,08  | 1,70        | 5,08         | 0,87<1,00 | 0,85<1,00 |
| PM3.03     | 2HE 500 B | 11142 | 5,08  | 12,06  | 5,08  | 1,70        | 5,08         | 0,87<1,00 | 0,85<1,00 |
| PM3.04     | 2HE 500 B | 9566  | 5,08  | 12,06  | 5,08  | 1,70        | 5,08         | 0,75<1,00 | 0,73<1,00 |

\* EN 1993-1-1 6.3.3 (4)



