

SOMMAIRE

Table des matières

SOMMAIRE.....	i
DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
AVANT-PROPOS.....	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des sigles et abréviations	ix
RÉSUMÉ.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	4
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL.....	5
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU PROJET	12
DEUXIÈME PARTIE : ANALYSES ET CHOIX DE LA MÉTHODE ADÉQUATE POUR NOTRE STRUCTURE	22
CHAPITRE 3 : LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DE PAROIS DU SOL.....	23
CHAPITRE 4 : ANALYSE COMPARÉE DES DIFFERENTES METHODES DE RENFORCEMENT DE PAROI.....	43
TROISIÈME PARTIE : DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE	54



CHAPITRE 5 : CALCULS ET MODÉLISATIONS DES CHARGES APPLIQUÉES À LA PAROI.....	55
CHAPITRE 6 : DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE.....	65
CONCLUSION GÉNÉRALE	83
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
ANNEXES.....	86
TABLE DES MATIÈRES.....	88



DÉDICACE

À l'éternel Dieu, pour ses bienfaits

À feu mon père N'DRI Konan Charles

À feu mon grand-père KOFFI Jean-Baptiste

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont accompagnés, de près comme de loin, et qui ont mis à notre disposition leurs personnes afin de nous aider au bon déroulement de notre stage.

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements à la direction de l'École Supérieure des Travaux Publics (ESTP) et celle de la Shenzhen Polytechnical University (深圳职业技术大学 ou SZPU) pour leur engagement et leur investissement dans notre formation. Nous remercions particulièrement le Professeur KONAN Denis, Directeur de l'ESTP, Monsieur GNAN Kouassi Roméo, Directeur des Études du Cycle Technicien Supérieur ainsi que Monsieur DJE Anderson notre encadreur pédagogique pour leurs précieux soutien.

Ensuite, nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre entreprise d'accueil ICCATEX INTERNATIONAL ainsi qu'à l'ensemble de son personnel pour leur accueil, leurs conseils et l'encadrement qu'ils nous ont offert. Nous remercions tout particulièrement Monsieur DIABATE Lanciné, Directeur de l'entreprise, ainsi que l'ensemble des ingénieurs notamment Monsieur TUO Nambelikah et Monsieur KAMAGATE Lamine, pour leur bienveillance et leur disponibilité. Nous sommes aussi très reconnaissants envers Monsieur Traoré Amad Dramane, notre maître de stage, pour son suivi rigoureux, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de cette expérience.

Enfin, nous remercions nos parents, nos amis et nos condisciples pour leur soutien constant et leurs encouragements précieux.

AVANT-PROPOS

L'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny est un établissement public de formation supérieure et de recherche scientifique situé à Yamoussoukro en Côte d'Ivoire. Il fut créé par décret 96-678 suite à la fusion de quatre (4) grandes écoles que sont : L'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Pratiques (ENSTP), L'Institut National Supérieure de l'Enseignement Technique (INSET), L'Institut Agricole de Bouaké (IAB) et L'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA). L'INPHB comporte trois (03) sites : les sites Nord, Centre et Sud. Ces sites abritent plusieurs écoles à savoir

- Sept (7) grandes écoles à savoir :
 - L'Ecole Supérieure des Travaux Publics (ESTP),
 - L'Ecole Supérieure des Mines et Géologie (ESMG),
 - L'Ecole Supérieure de Commerce et d'Administration des Entreprises (ESCAE),
 - L'Ecole Supérieure d'Industrie (ESI),
 - L'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA),
 - L'Ecole Supérieure de l'Aéronautique et du Spatial (ESAS),
 - L'Ecole Supérieure de Chimie, du Pétrole et de l'Energie (ESCPE).
- Une Ecole Préparatoire aux Grandes Ecoles (EPGE)
- Deux Ecoles Doctorales (ED) :
 - L'Ecole Doctorale des Sciences et Techniques de l'Ingénieur,
 - L'Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques et Procédés de Transformation.
- Une école consacrée aux formations spécialisées et à la formation continue : Ecole des Formations Spécialisées et du Perfectionnement des Cadres (EFCPC)

L'ESTP met un accent sur l'ingénierie des structures à travers un programme pluridisciplinaire associant savoirs théoriques et compétences pratiques. Cette formation vise à créer des techniciens et ingénieurs apte à faire face aux défis actuels de construction.

Pour parfaire cette formation, il est demandé aux élèves en fin de cycle de réaliser un Projet de Fin d'Etude (PFE) d'une durée minimale de quatre (4) mois. C'est en cela que nous, élèves techniciens supérieurs en troisième année, par ce présent mémoire relaterons les tâches et actions accomplies au sein de notre structure d'accueil durant notre PFE.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Quelques projets réalisés par ICCATEX International	7
Figure 2 : Localisation d'ICCATEX International	8
Figure 3 : L'organigramme d'ICCATEX International.....	10
Figure 4 : Fiche signalétique d'ICCATEX International	10
Figure 5 : La localisation du plateau.....	12
Figure 6 : Situation géographique du site	16
Figure 7 : Les pieux en béton projeté	26
Figure 8 : Mise en place du jet grouting	27
Figure 9 : Ordre de coulage des pieux sécants	28
Figure 10 : Détail des pieux sécants	29
Figure 11 : Pieux sécants	29
Figure 12 : Les murettes-guides	30
Figure 13 : La construction d'une paroi moulée.....	30
Figure 14 : Les parois berlinoises	32
Figure 15 : Les parois berlinoises	33
Figure 16 : Les contreforts.....	33
Figure 17 : Une paroi préfabriquée.....	34
Figure 18 : Des serrures a la jonction de deux palplanches.....	35
Figure 19 : Des palplanches en acier	36
Figure 20 : Les parois clouées	37
Figure 21 : Schéma détaillé d'un tirant.....	38
Figure 22 : Soutènement d'ancrage dans le sol	39
Figure 23 : Les différentes étapes de la mise en place de soutènements de mur de tirants	40

Figure 24 : Le soutènement de mur de tirants	40
Figure 25 : Paroi ancrée	41
Figure 26 : Une paroi moulée avec ancrages	42
Figure 27 : Modélisation du pieu	60
Figure 28 : Diagramme de la poussée active du sol	61
Figure 29 : Diagramme de la butée du sol	61
Figure 30 : Diagramme de la charge supplémentaire	62
Figure 31 : Diagramme de l'effort normal N sous la combinaison à l'ELU	62
Figure 32 : Diagramme du moment M_y sous la combinaison à l'ELU	63
Figure 33 : Coordonnées de nos différentes lignes de construction	76
Figure 34 : Interface voile.....	77
Figure 35 : Interface appuis	78
Figure 36 : Interface cas de charges	Figure 37 : Interface définir charge.....
	79
Figure 38 : Interface définir combinaisons	79
Figure 39 : Interface tableau des combinaisons.....	79
Figure 40 : Interface diagrammes	Figure 41 : cartographies
	80
Figure 42 : Cartographie des déplacements.....	80
Figure 43 : Diagrammes des déplacements	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau climatique du Plateau	13
Tableau 2 : Tableau de classification des méthodes selon leurs avantages et inconvénients	50
Tableau 3 : Tableau de classification des méthodes selon les facteurs que sont la résistance aux déplacements, la stabilité et les coûts.	51
Tableau 4 : Tableau de classification des méthodes répondant aux exigences du projet selon le ratio qualité/prix.	52
Tableau 5 : Récapitulatif des moments et efforts sollicitant	63

LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

DCE : Le Dossier de Consultation des Entreprises

CFO : Chief Financial Officer

CFA : Chartered Financial Analyst

APD: Avant-Projet Détaillé

APS: Avant-Projet Sommaire

PMR : Personne à Mobilité Réduite

DQE : Devis Quantitatif et Estimatif

m : Mètre

d : Le diamètre du pieu

MPa : Mégapascal

kN: kiloNewton

kN/m : kilonewton par mètre

Pa : Pascal

γ_b : Le poids volumique du béton

γ_c : Le coefficient de sécurité partiel pour le béton

γ_s : Le coefficient de sécurité partiel pour l'acier

γ : Le poids volumique du sol

t/ m³ : Tonnes par mètre cube

cm : Centimètre

Pa : La poussée active des terres

P : Le poids propre de la paroi

p : Le poids de la poutre

Pp : Poussée passive des terres

Km² : Kilomètre carré

°C : degré Celsius

mm : millimètre

A : L'aire

G : Les charges permanentes

Q : Charges supplémentaire

F_h : Les forces horizontales

F_v : Les forces résistantes

P : Le poids propre

H : La hauteur

S : La somme de toutes les charges

δ : L'angle de friction

M(P_p) : Le moment de la butée

M(P_a) : Le moment de la poussée active

M(P) : Le moment du poids propre de la paroi

M(p) : Le moment du poids propre de la poutre

M(Q) : Le moment de la charge supplémentaire

N_{ed} : Effort normal

M_{ed} : Moment fléchissant

N_{cr} : Effort normal critique

L_{eq} : Longueur de flambement

f_{cd} : La résistance de conception du béton

f_{yd} : La limite élastique de calcul de l'acier

f_{ck} : La résistance caractéristique du béton à la compression

f_{yk} : La limite élastique caractéristique de l'acier



N_{rd} : L'effort normal résistant

M_{rd} : Le moment résistant

z : Le bras de levier

i : Le rayon de giration

λ : l'élanement

A_c : L'aire de la section transversale du béton

e : L'excentricité

x : L'axe neutre

z : Le bras de levier

η : Le coefficient de réduction des contraintes

M : Le moment fléchissant

N : La force axiale (en Newtons).

RÉSUMÉ

Dans l'optique d'effectuer notre Projet de Fin d'Étude, nous avons effectué un stage dans le bureau d'études ICCATEX International. Ce stage s'est déroulé dans la période du 04 Novembre 2024 au 28 Février 2025.

Ce mémoire porte sur **l'étude d'une méthode de confortement de paroi d'un immeuble R+7 avec deux sous-sols dans la commune du Plateau**. Le projet de notre étude est un immeuble R+7 situé dans ladite commune. Le maître d'ouvrage veut en faire un bâtiment à usage commercial. Dans l'optique d'avoir un ouvrage fonctionnel respectant les différentes normes et recommandations de construction, celui-ci fit appel au bureau d'études **ICCATEX International**. Le bureau d'études ICCATEX international devra faire une étude technique mais aussi fournir les différents plans d'exécutions du projet notamment les plans d'exécution du gros-œuvre, des lots techniques et le plan de blindage des fouilles.

Notre travail, durant ces quatre (4) mois a été de proposer la solution de confortement de paroi la mieux adaptée à notre projet. Pour ce faire, nous avons lister les différentes méthodes de confortement de paroi existantes, procéder à une étude comparative de ces différentes méthodes, déterminer la plus avantageuse et effectuer son dimensionnement.

Mots clés* : immeuble R+7 avec deux sous-sols, méthode de confortement de paroi, étude comparative, avantageuse, dimensionnement

ABSTRACT

In order to carry out our End-of-Study Project, we did an internship in the ICCATEX International design office. This internship took place in the period from November 04, 2024 to February 28, 2025.

This thesis focuses on **the study of a method of wall reinforcement of an R+7 building with two basements in the commune of Plateau**. The project of our firm is an R+7 building located in the commune of Plateau. Its owner Mr. FANNY Adama wants to turn it into a building for commercial use. In order to have a functional structure that complies with the various standards and recommendations, he called on the **ICCATEX International design office**. The ICCATEX international design office will have to carry out a structural study of the site but also provide the various execution plans for the project.

During these four (4) months, we had to propose the most suitable soil retention solution for our project. To do this, we have listed the different existing wall reinforcement methods, carried out a comparative study of these different methods, determined the most advantageous and sizing it.

Keywords*: R+7 building with two basements, wall reinforcement method, comparative study, advantageous, sizing

INTRODUCTION

❖ CONTEXTE ET JUSTIFICATION

La commune du Plateau, ancien quartier colon durant l'époque coloniale situé à Abidjan est désormais le fief de toutes activités économiques et administratives du pays, certains iront même jusqu' à la qualifier de cœur des activités économiques et administratives de la Côte d'ivoire. Cette commune de par les activités qui s'y déroulent est caractérisée par une urbanisation importante et possède une forte concentration de bâtiment à usage mixtes ce qui en fait d'elle une zone particulièrement encombrée. De ce fait, le sous-sol devient une solution incontournable à ces problèmes d'occupation d'espaces, celle-ci permettant non seulement de libérer la surface mais aussi d'utiliser l'espace souterrain sans contraintes. L'un des facteurs clés à la réalisation d'ouvrages possédant des sous-sols est le confortement des parois dont l'objectif est de résister aux différentes pressions souterraines exercées par les sols, ainsi qu'aux différents phénomènes physiques engendrées par les bâtiments environnants. Dans l'optique de résoudre ces défis, ce mémoire s'intéressera à **L'ETUDE D'UNE SOLUTION DE CONFORTEMENT DE PAROI D'UN BÂTIMENT DE TYPE R+7 AVEC 2 NIVEAUX DE SOUS-SOL AU PLATEAU**

❖ ANALYSE DU SUJET ET FORMULATION DE LA PROBLEMATIQUE

Le renforcement des parois nécessite une compréhension poussée des différentes relations résidant entre les sols et les structures, mais aussi un choix adéquat de la méthode de consolidation utilisée. Le choix de la méthode choisie doit prendre en compte différents facteurs tels que les facteurs géotechniques, environnementaux et physiques. Dans un contexte où la sécurité structurelle des ouvrages et la gestion des risques sont des priorités absolues, il devient alors incontournable d'étudier des solutions innovantes et pérennes

conformes aux conditions géotechniques locales. À la vue de cette situation en découle un problème se déroulant comme suit :

- Quelle est la méthode de confortement de paroi adéquate pour notre bâtiment.
- Comment dimensionner le type de paroi choisie afin qu'elle puisse assurer la sécurité et la stabilité de notre structure.

❖ OBJECTIFS DE L'ETUDE

- Objectif général

Proposer une méthode de renforcement des parois d'un bâtiment de type R+7 avec deux niveaux de sous-sols.

- Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre notre objectif principal, il sera question de :

- Recenser les différentes méthodes de consolidation de paroi.
- Choisir la solution la plus adéquate pour notre projet en prenant en compte l'impact économique et environnemental du projet.
- Effectuer le dimensionnement technique de la méthode choisie.

❖ HYPOTHÈSES

- Un choix judicieux de la méthode de renforcement de la paroi basé sur une analyse caractéristique des conditions géotechniques garantit la stabilité et la durabilité de notre ouvrage.

- Un dimensionnement méthodique de l'ouvrage permet de réduire les risques structurels et économiques pouvant arriver à notre structure et aux ouvrages avoisinants.

❖ METHODOLOGIE ET PLAN DE TRAVAIL

- Méthodologie de travail

Afin de parfaire notre étude, nous avons effectué des recherches documentaires, collecté les informations nécessaires auprès d'ingénieurs spécialisés dans le domaine. Ces investigations nous ont permis de mieux comprendre notre thème.

- Plan de travail

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

Chapitre 1 : Présentation de la structure d'accueil

Chapitre 2 : Présentation du projet

DEUXIEME PARTIE : ANALYSE ET CHOIX DE LA METHODE

Chapitre 3 : Les différentes méthodes de renforcement de paroi

Chapitre 4 : Analyse et choix de la méthode adéquate

TROISIEME PARTIE : DIMENSIONNEMENT ET EVALUATION

Chapitre 5 : Calculs et modélisation des charges appliquées sur la paroi

Chapitre 6 : Dimensionnement technique et simulation de la solution proposée



PREMIERE PARTIE : GENERALITES

Cette partie s'articulera autour de deux grands points que sont : **la présentation de notre structure d'accueil et la présentation du projet.**

CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I. HISTORIQUE ET OBJECTIFS

1. Historique de l'entreprise

Dans le but de devenir l'une des entreprises de référence à l'échiquier national, l'entreprise ICCATEX International fut créée le 14 Septembre 2014. C'est une SA (Société Anonyme) dont le régime d'imposition est qualifié de normal. Son directeur général est **M. DIABATÉ Lanciné**, Ingénieur des Travaux Publics et ayant exercé le métier de contrôleur technique depuis plus de 30 ans.

2. Missions et objectifs d'ICCATEX International

❖ Le cœur de métier de l'entreprise :

La mission d'**ICCATEX International** se situe à plusieurs échelles :

- **INGÉNIERIE** : Concevoir des projets de la phase architecturale à celle de la réalisation.
- **CONSEIL** : Conseiller le Maître d'Ouvrage dans la conception depuis la phase de préparation et d'exécution des travaux.
- **COORDINATION** : Prendre en charge la maîtrise d'œuvre d'exécution, l'organisation et le pilotage des travaux.
- **ASSISTANCE TECHNIQUE** : Assister le Maître d'Ouvrage afin de maîtriser les aspects qualitatifs, techniques et financiers mais aussi sur la maîtrise des délais d'exécution.
- **EXPERTISE** : Apporter une expertise technique en vue de déterminer les origines et causes des désordres pouvant affecter les ouvrages.

❖ Les objectifs de l'entreprise :

L'objectif d'ICCATEX International est de se positionner sur l'échiquier des bureaux d'études nationaux comme acteur de référence. Pour relever ce défi, le bureau d'études ICCATEX International s'appuie sur plus d'une soixantaine de collaborateurs permanents, expérimentés et compétents. Ceux-ci exercent dans les différentes branches d'activités de la Construction - Bâtiments (Tous Corps d'États) – Travaux Publics - Travaux Maritimes, etc. L'entreprise ICCATEX International s'appuie aussi sur un vaste réseau de partenaires dans la sous-région ouest africaine (SÉNÉGAL, MALI, NIGER, BURKINA FASO, ...), en Afrique du Nord (MAROC, TUNISIE, EGYPTE) et en FRANCE. Depuis sa création, l'entreprise ICCATEX International a réalisé plusieurs missions d'études techniques ainsi que des missions de contrôle et de suivi de plusieurs projets.

3. Quelques projets réalisés par ICCATEX International

Depuis sa création, de nombreux projets ont fait l'objet de suivis, de contrôles ou encore d'études techniques par le bureau d'études ICCATEX International.



Fig. 1.1 AZALAI Hôtel Marcory Abidjan



Fig. 1.2 SCI Cannebière Cocody - Abidjan



Fig. 1.3 CORIS BANK Treichville
Abidjan



Fig. 1.4 FIBA Abidjan - Treichville



Fig. 1.5 Polyclinique FARAH
Marcory - Abidjan



Fig. 1.6 Centre Commercial COSMOS
Yopougon - Abidjan

Figure 1 : Quelques projets réalisés par ICCATEX International

Source : <https://www.iccatex-inter.com/>

II. ICCATEX ET SON ORGANISATION HIÉRARCHIQUE

1. Situation géographique et coordonnées

Le bureau d'études ICCATEX International est situé à Abidjan, précisément à COCODY Riviera Attoban Abri 2000 Emeraude II-Villa 139. Son adresse postale est 06BP319 Abidjan 06. Elle a pour contact (+225) 27 22 4313 49 / (+225) 07 48 13 17 00 et son fax est (+225) 27 22 43 13 48. Son adresse mail est : iccatex.inter@gmail.com

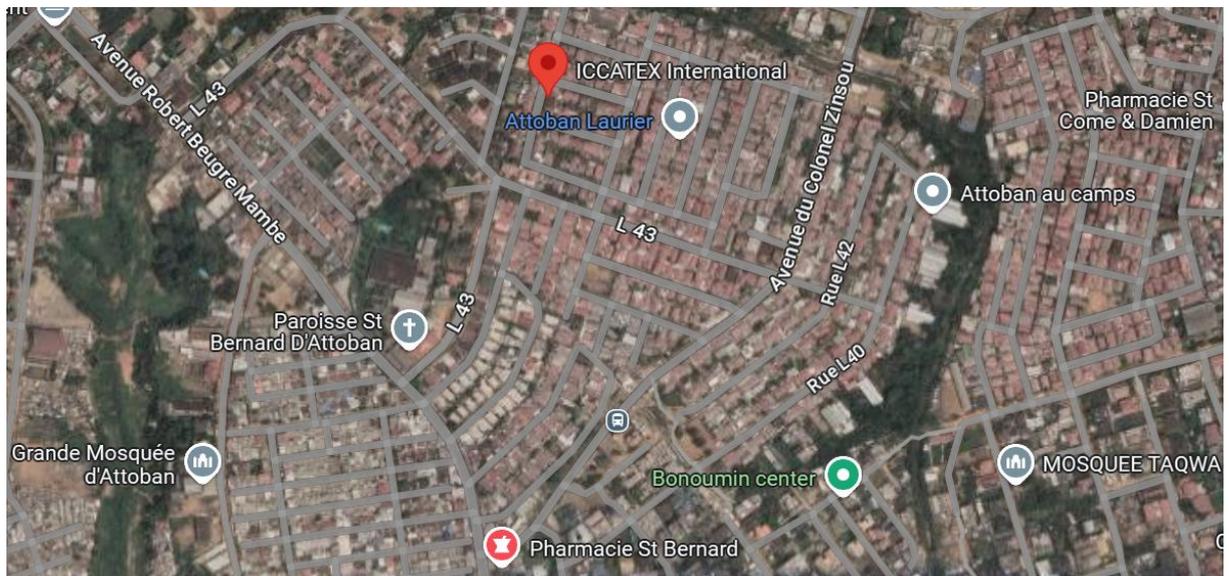


Figure 2 : Localisation d'ICCATEX International

Source : <https://www.google.com/maps/>

2. Organisation hiérarchique

ICCATEX International est composé de trois principaux organes que sont :

- **La direction générale**

C'est l'organe suprême de l'agence. Il est chargé de définir les objectifs à atteindre au cours de l'année, de s'assurer que les tâches à effectuer durant toute l'année sont validées, de contracter des contrats durant toute l'année mais aussi de prendre des décisions concernant les activités de l'entreprise. Il est dirigé par M. DIABATE Lanciné, Administrateur Général de la société.

- **Le service administration**

Ce service contient des branches que sont :

- Le service comptable : Il est dirigé par Mme TOKPA Rosette. Sa mission est d'établir le budget annuel et veiller à son respect, créer des dossiers administratifs pour les recrutés, payer les factures, s'assurer que les salariés soient payés, rédiger les courriers et s'assurer du paiement effectif des impôts. Ce service comporte aussi les assistants, les chauffeurs et les agents de maîtrise.

- **La direction technique**

Cet organe englobe toutes les activités en rapport avec le suivi ainsi que la conception des projets. Il comporte 04 départements :

- **Le département voiries et réseaux divers** : Il est composé d'ingénieurs chargés des calculs et du dimensionnement des réseaux électriques et autres compartiments en rapport.

- **Le département structure** : Il est composé d'ingénieurs chargés des calculs de structure, c'est-à-dire le calcul des ossatures des bâtiments.

- **Le département lots techniques** : Ce département est composé de personnes ayant pour charge l'attribution des différents lots ainsi que les calculs et opérations les concernant.

- **Le département OPC-MOE** : Ce département est chargé du suivi des chantiers afin que ceux-ci puissent bien se dérouler et respecter les délais conclus entre ICCATEX International et ses clients.

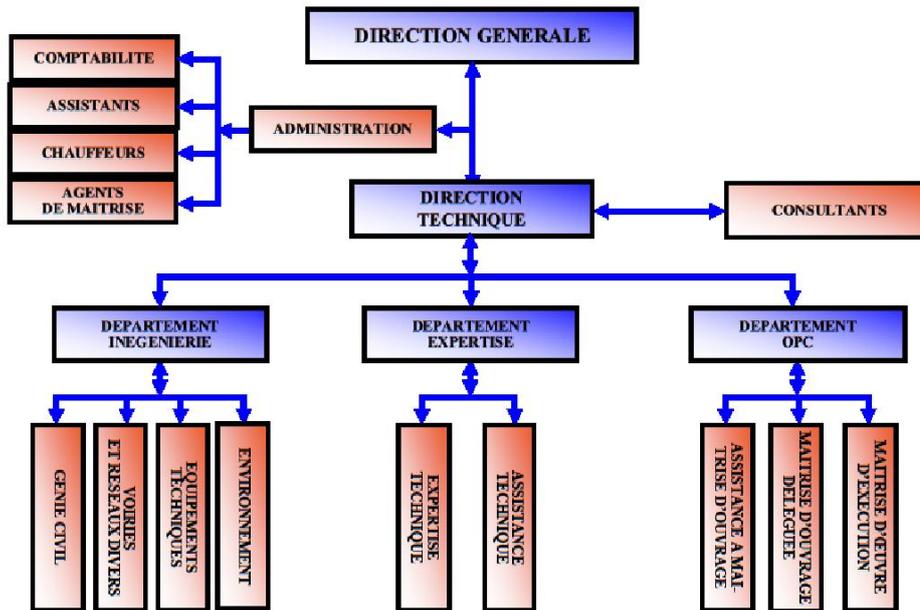


Figure 3 : L'organigramme d'ICCATEX International

Source : ICCATEX International

IDENTITE	
FORME JURIDIQUE : SA	DATE DE CREATION : 14 Septembre 2014
REGIME D'IMPOSITION : Régime Normal d'Imposition	COMPTE CONTRIBUABLE : 1434817 H
REGISTRE DE COMMERCE : CI-ABJ-2014-B-18683	CAPITAL : 10 000 000 F CFA
SIEGE : Cocody Riviera Attoban Abri 200 Emeraude II – Villa 39	ADRESSE : 06 BP 319 Abidjan 06 Côte d'Ivoire
TELEPHONE : (+225) 27 22 43 13 49 (+225) 07 48 13 17 00	FAX : (+225) 27 22 43 13 48
Email : iccatex.inter@gmail.com	AGREMENT CHANIE : 039/2016
REFERENCE BANCAIRE : CI 131 01001 011032390002	ASSURANCE : - Responsabilité Civile - Multirisques

Figure 4 : Fiche signalétique d'ICCATEX International

Source : ICCATEX International



CONCLUSION PARTIELLE

En conclusion, le bureau d'études ICCATEX International, par son expertise et son savoir-faire s'est imposé comme une des entreprises majeures dans le domaine du bâtiment sur le territoire national. Cette maîtrise a forgé les relations entre elles et d'autres entreprises du milieu, offrant ainsi un marché de grande envergure. C'est dans cette optique que M. FANNY Adama, sollicite le bureau d'études ICCATEX International pour la conception des plans de structure de son projet.

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU PROJET

I. PRESENTATION DU SITE : LE PLATEAU

1. Localisation du site

La commune du Plateau fait partie de l'une des treize (13) communes de la ville d'Abidjan. Cette commune est connue comme celle des affaires et abrite le siège social de plusieurs grandes entreprises nationales. Elle est située à la latitude 5° 19' 27" Nord et à la longitude 4° 01' 14" Ouest. Son maire est M. EHOUE Jacques.

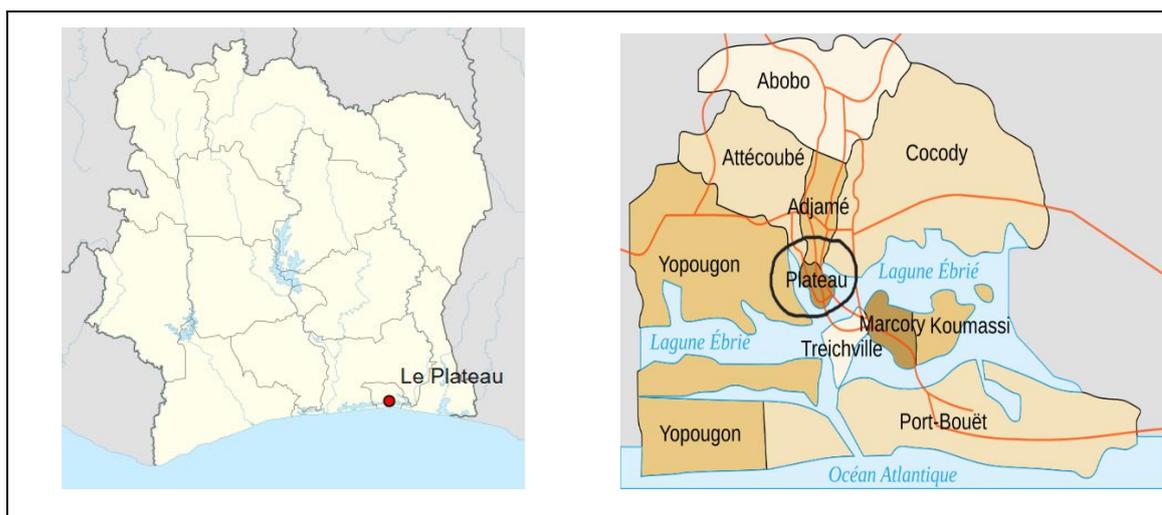


Figure 5 : La localisation du plateau

2. Environnement physique

- **Le relief**

La commune du Plateau est une presqu'île de 2,5 Km² de superficie. En effet elle est bordée de la lagune Ébrié. Son relief, comme son nom l'indique est relativement plat.

- **Le climat**

Le climat du Plateau est un climat tropical de mousson. La température moyenne de cette commune est de 25,9 °C et la pluviométrie moyenne de 1441 mm. Selon la classification de Köppen-Geiger, les conditions météorologiques de la commune du plateau sont classées sous Am. Cela signifie que les températures sont élevées durant toute l'année. Ce type de climat se caractérise par une forte saison des pluies et une courte saison sèche. Ces saisons se distinguent comme suit :

- Une grande saison des pluies de Mars à Juillet
- Une petite saison sèche durant le mois d'Août
- Une petite saison des pluies de Septembre à Novembre
- Une grande saison sèche de Décembre à Février

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep- tembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	26.7	27	27.2	27.1	26.4	25.3	24.6	24.1	24.5	25.4	26.1	26.6
Température minimale moyenne (°C)	24.9	25.4	25.6	25.5	24.9	24	23.5	23	23.3	23.9	24.5	25
Température maximale (°C)	29.1	29.2	29.4	29.2	28.3	26.9	26.1	25.7	26.3	27.3	28.3	28.7
Précipitations (mm)	57	62	87	119	217	266	147	74	100	123	111	78
Humidité(%)	81%	83%	83%	84%	85%	86%	85%	87%	88%	86%	85%	83%
Jours de pluie (jrée)	12	13	16	18	21	20	16	13	16	20	19	16
Heures de soleil (h)	8.2	8.1	8.1	7.9	7.0	6.0	5.6	4.6	5.5	6.7	7.2	7.6

Tableau 1: Tableau climatique du Plateau

Source : Climate data

Au regard des variations climatiques s'intensifiant au fil des années, la commune du Plateau est, comme plusieurs zones du monde sujettes à des perturbations de saisons. Ces perturbations sont dues à l'urbanisation grandissante, à la déforestation ainsi qu'à la libération en gros volume de gaz à effet de serre. Ces perturbations occasionnent des fois une alternance pluie-soleil dans la même journée indépendamment de la saison dans laquelle l'on se trouve. Les jours ensoleillés peuvent atteindre un pic de chaleur de 29,4 °C.

II. PRESENTATION DU PROJET

1. L'objet

❖ La demande

Notre projet s'intitule “ **Bâtiment R+7-2 à usage de bureaux et de commerce** ”. Celui-ci a été initié par M. FANNY Adama en vue de concevoir un local permettant le déroulement d'activités administratives et commerciales. Pour ce faire, il demanda l'expertise d'ICCATEX International en tant que bureau d'études. Le projet envisagé sera fait sur un terrain d'une superficie de 783 m² environ dans la commune du Plateau. À terme, le projet comprendra :

- À chaque sous-sol (sous-sols 1 & 2) :
 - Une (01) aire de stationnement ;
 - Un (01) local Chartered Financial Officer (CFO) ;
 - Un (01) local Chartered Financial Analyst CFA ;
 - Un (01) local technique.

- Au rez-de-chaussée :
 - Une (01) guérite ;
 - Une (01) entrée piétonne ;
 - Une (01) cour intérieure ;
 - Une (01) cour extérieure ;
 - Un (01) local de surveillance comportant un (01) local technique et une (01) toilette ;
 - Un (01) local technique ;
 - Un (01) local CFO ;
 - Un (01) local CFA ;
 - Un (01) bureau à louer comportant un (01) bloc de toilettes ;
 - Deux (02) magasins de vente dotés chacun d'une (01) toilette ;

- A chaque étage (étages 1 & 2) :
 - Deux (02) bureaux à louer dont un comportant un (01) local rangement
 - Deux (02) locaux techniques ;
 - Un (01) local CFO ;
 - Un (01) local CFA ;
 - Une (01) toilette Femme ;
 - Une (01) toilette PMR.

- A chaque étage (étages 3 à 7) :
 - Un (01) local CFO ;
 - Un (01) local CFA ;
 - Deux (02) bureaux à louer comportant chacun :
 - Un (01) local technique ;
 - Une (01) toilette Homme ;
 - Une (01) toilette Femme ;
 - Une (01) toilette Personne à Mobilité Réduite (PMR)

2. Situation du site

Le terrain qui abritera notre projet est situé à Abidjan plus précisément dans la commune du Plateau. Le terrain est bordé :

- Au Nord par Les résidences ATTA
- Au Sud par le siège de TSA Assurances
- À l'Est par la direction générale du trésor
- À l'Ouest par le commissariat du 1^{er} arrondissement

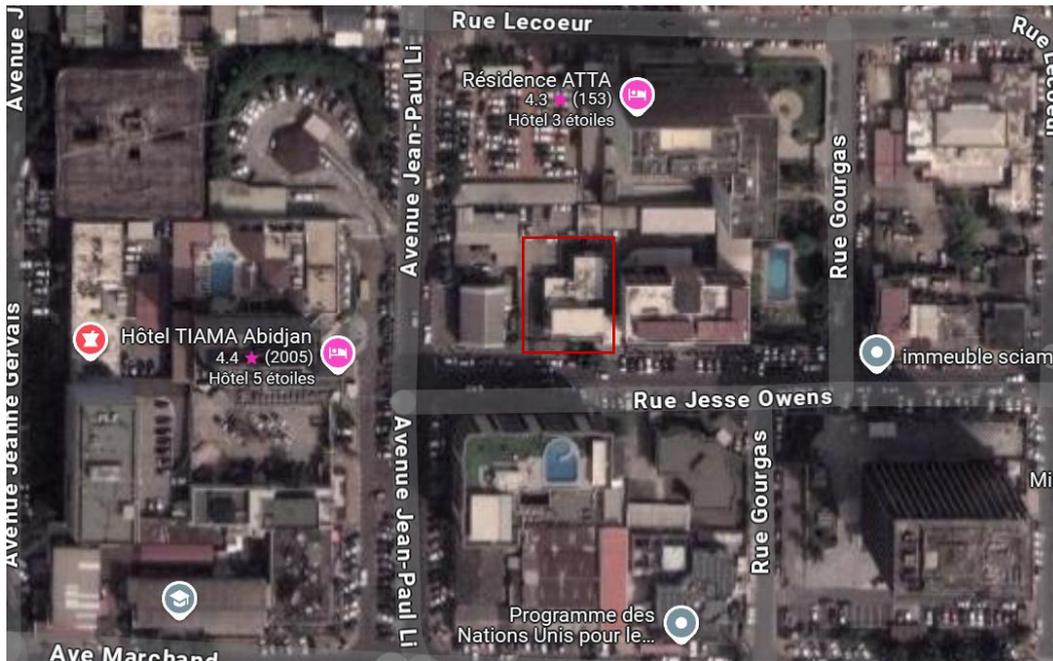


Figure 6 : Situation géographique du site

Source : Google Maps

Légende : : Site de construction du bâtiment

3. Missions de l'entreprise

La tâche confiée à ICCATEX International sur ce projet est une mission d'études de structure. Cette mission commence à la phase de conception et se termine à la phase de réalisation du projet. Elle consiste à :

- Concevoir les plans de structure,
- Concevoir les plans d'exécution des lots techniques,
- Faire les Devis Quantitatifs et Estimatifs (DQE)

III. LE PLAN D'ACTION

1. Les acteurs du projet

La réalisation d'un projet de construction nécessite la participation de plusieurs entités. Chaque entité est d'une grande importance dans le bon déroulement du projet. Les différents acteurs intervenants dans notre projet sont :

- **Le maître d'ouvrage :**

C'est l'entité physique ou morale pour laquelle le projet est construit. Elle commande, finance et définit les besoins du projet. En d'autres termes le maître d'ouvrage est la personne pour qui le projet est effectué. La personne faisant office de maître d'ouvrage dans notre projet est M. FANNY Adama.

- **Le maître d'œuvre :**

Le maître d'œuvre est la personne physique ou morale choisie par le maître d'ouvrage en vue de l'épauler dans sa tâche. Cette entité dirige, coordonne et contrôle les différents acteurs du projet afin que le délai d'exécution soit respecté. Elle conseille aussi le maître d'ouvrage dans ses prises de décisions.

- **Le bureau d'études :**

Il est chargé d'analyser la structure et concevoir les plans de structure de sorte à assurer l'intégrité de la structure. Son rôle est de fournir des solutions efficaces aux différents besoins du projet. Le bureau d'études choisi pour ce projet est le bureau d'études ICCATEX International. Il intervient généralement de la phase de conception à celle de planification.

- **Le bureau de contrôle :**

Cette entité se voit confier la tâche de vérification. Elle s'assure de la conformité des travaux effectués selon les normes et réglementations en vigueur. Le bureau de contrôle intervient tout au long du projet afin de s'assurer de la conformité des plans validés préalablement par rapport aux travaux réalisés.

- **Un cabinet d'étude géotechnique agréé :**

Le cabinet d'étude géotechnique a pour objectif de déterminer les différentes propriétés du sol à l'aide de différents essais géotechniques. Ces différents essais seront soumis au bureau d'études afin d'effectuer les calculs de fondations. Pour ce faire, le cabinet LABOSOL BTP GEOTECHNIQUE a été choisi.

- **Les entreprises**

Les entreprises sont chargées d'exécuter les différents travaux. La sélection de ces entreprises s'effectuera à la suite d'un processus de soumission à l'appel d'offres.

Une fois les entreprises sélectionnées, un **compte prorata** sera établi afin de gérer les frais d'exploitation de chantier.

Une fois la demande de construction d'un bâtiment par le client enregistré, l'étude du projet est lancée.

- **L'étude de faisabilité**

C'est la toute première étape de l'étude du projet. Elle consiste à définir les principales lignes directrices du projet et aussi à valider le programme définitif du client. Au cours de cette phase, l'on :

- Identifie les différentes données et contraintes du projet,
- Programme de manière détaillée les différents besoins,
- Effectue les études géotechniques ainsi que les relevés de terrain,
- Identifie le site ainsi que les services disponibles.

Pour mener à bien cette étape, il devient alors indispensable d'effectuer une visite de site.

- **La phase d'esquisse (ESQ)**

Au cours de cette étape, les plans d'ensemble sont proposés. En d'autres termes, l'organisation des différents espaces, des aspects techniques, de la faisabilité du projet ainsi que des coûts potentiels pouvant survenir suite aux constats évoqués lors de l'étude de faisabilité. Cette dernière permet aussi d'établir les premières esquisses du projet, c'est-à-dire définir les différentes directives architecturales.

- **L'Avant – Projet**

L'avant-projet se divise en deux (2) parties que sont :

- **L'Avant – Projet Sommaire :** Après avoir défini les différentes directives architecturales et valider la proposition satisfaisant au mieux les différents besoins du projet, l'Avant-Projet Sommaire a pour rôle de définir les différents plans de : masses, niveaux, coupes et façades. Elle présente également les dispositions techniques à prendre en compte permettant ainsi d'effectuer une estimation sommaire.

- **L'Avant – Projet Détaillé :** Une fois l'Avant-Projet Sommaire terminé, l'on commence à tenir compte des résultats des études techniques et structurales.

L'on tient aussi compte des principes et détails techniques, des calendriers des travaux et de l'estimation globale du projet. Cette phase survenant après l'Avant-Projet Sommaire et qui comprend ces différentes étapes est nommée l'Avant-Projet Détaillé.

- **Le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE)**

C'est un dossier comprenant tous les éléments dont un prestataire a besoin pour comprendre le projet. Il comprend : un descriptif, une présentation descriptive et imagée du projet, les plans architecturaux et techniques, les plans de structures c'est-à-dire les plans de ferrailage et de coffrage, le planning d'exécution des travaux ainsi que le cadre quantitatif du projet. Ce dossier nous servira dans la sélection des entreprises pour l'exécution des travaux via un appel d'offre.

- **La Consultation des Entreprises**

C'est une étape très importante, elle consiste à inviter et sélectionner les entreprises qui exécuteront notre projet de construction. Elle comprend trois (3) étapes que sont :

- La phase de pré-sélection : Au cours de cette phase, le maître d'ouvrage publie un appel à candidature dans le but d'attirer les différentes entreprises intéressées. Ces entreprises soumettent alors un dossier de candidature qui sera évalué afin de vérifier si les candidatures répondent aux critères établis auparavant. Une fois le dossier de candidatures évalué, les entreprises sélectionnées sont appelées à soumettre une offre.

- La phase de soumission des offres : Durant cette phase, les entreprises sélectionnées reçoivent le Dossier de Consultation des Entreprises. Après cela, celles-ci effectuent une visite du site afin de mieux comprendre les conditions du projet. Une fois la visite terminée, les entreprises préparent et soumettent leurs offres techniques et financières en réponse au DCE.

- La sélection des entreprises : C'est la phase finale de l'étape de consultation des entreprises. Au cours de celle-ci, l'on évalue les offres émises en fonction de plusieurs critères (prix, délais, qualité technique, situation fiscale, ...). Une fois évaluées, des discussions sont menées avec les différentes entreprises sélectionnées afin de mettre au clair certains points et préoccupations ou encore améliorer certaines conditions. Après cette analyse, les entreprises les mieux classées sont sélectionnées pour la phase exécutive des

travaux. Après la sélection des entreprises, il s'en suit la signature des différents contrats élaborés préalablement.

- **L'Exécution des travaux**

C'est la dernière étape de la conception du projet, elle comprend :

- Les terrassements généraux : Cette phase regroupe tous les travaux concernant la préparation du terrain.
- La communication entre les parties : C'est la coordination entre le maître d'ouvrage, le bureau contrôle et les entreprises exécutantes.
- Le suivi et la validation des travaux : Elle concerne la validation des états d'avancement avant le déboursement des acomptes.
- La gestion du compte prorata : Elle concerne la gestion des frais d'exploitation.
- L'assistance jusqu'au parfait achèvement : Elle regroupe l'accompagnement du maître d'ouvrage.

CONCLUSION PARTIELLE

La présentation de ce projet nous a permis d'identifier son contexte, ses objectifs mais aussi les contraintes géographiques et techniques à prendre en compte. Les caractéristiques du site et les différentes spécificités énoncés nous permettent d'établir les bases adéquates pour une étude approfondie des solutions de confortement de paroi afin d'en tirer la plus adéquate.

CONCLUSION

Cette partie, à travers les différents chapitres que sont la présentation de l'entreprise et la présentation du projet nous a permis de poser un cadre clair et précis pour l'étude à venir. L'analyse du profil de l'entreprise a mis en exergue son savoir-faire et sa fiabilité. La description du projet quant-à-elle a servi à présenter les différents enjeux techniques et



conceptuels. Ces éléments constituent une base indispensable pour nos analyses et justifications à venir, notamment concernant le choix de la méthode de renforcement de paroi adéquate. Les parties à venir se focaliseront sur l'étude approfondie des méthodes et des calculs nécessaires pour réaliser le projet dans le respect des normes et contraintes structurelles et environnementales

DEUXIÈME PARTIE : ANALYSES ET CHOIX DE LA MÉTHODE ADÉQUATE POUR NOTRE STRUCTURE

Cette partie s'intéressera aux différentes méthodes utilisées dans le cadre du renforcement de paroi. Elle traitera des **différentes méthodes de renforcement de paroi** utilisées, **des besoins** que requiert notre projet, **de l'analyse comparative** de ces différentes méthodes et du **choix** de la méthode adéquate.

CHAPITRE 3 : LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DE PAROIS DU SOL

INTRODUCTION

La stabilité du sol dépend principalement de l'équilibre entre la résistance au frottement interne et la force de liaison à l'intérieur de ce sol. Une fois son équilibre perdu, il peut s'effondrer, entraînant des accidents mettant en danger la sécurité des personnes, perturbant les délais du projet, mais aussi menaçant les structures environnantes. Pour pallier à cela, l'on exige que tous travaux de construction nécessitent l'appui de techniques de mesures de prévention. Ces techniques ont pour objectif de lutter contre les effondrements afin de prévenir les risques pouvant affecter la stabilité de la paroi. Ces méthodes garantissent la stabilité des parois du sol et constitue un facteur important dans la protection des ouvrages environnants. Elles permettent aussi d'ajuster les ouvrages aux contraintes géotechniques et structurelles.

Ce chapitre a pour objet la présentation panoramique des différentes techniques de renforcement de parois, tout en mettant en exergue leurs principes de fonctionnement, leurs champs d'application mais aussi leurs atouts et leurs inconvénients. Il s'agira pour nous dans un premier temps de classer les principales méthodes de renforcement de paroi utilisées en ingénierie géotechnique. Dans un second temps nous présenterons les différentes techniques qui compose ses méthodes.

I. CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DU SOL

1. Définition

On appelle méthodes de renforcement des parois, l'ensemble des procédés techniques utilisés dans le but de rendre plus stable et accroître la résistance d'une paroi de sol.

Ces procédés permettent à la paroi dans un premier temps de rester stable face aux charges de l'ouvrage, et dans un second temps de faire face aux différentes contraintes géotechniques auxquelles elle est soumise. Ces méthodes sont utilisées dans le but de renforcer un sol dont les caractéristiques ne garantissent pas la sécurité et la pérennité de l'ouvrage. Il existe deux (2) types de parois :

- **Naturelles** : Les talus, les falaises...
- **Artificielles** : Les murs de soutènements, les parois d'excavation...

Ces techniques de renforcement ont pour but d'augmenter la pérennité des structures, la stabilité de la structure mais aussi la réduction des risques de déformation ou d'instabilité. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines telles que :

- **Les travaux souterrains** : Ce sont les tunnels, les parkings souterrains, les sous-sols, les bunkers...
- **Les infrastructures de transport** : Les tranchées, les remblais...
- **Les ouvrages hydrauliques** : Les digues, les barrages...
- **Les bâtiments avoisinants** : Principalement le renforcement des fondations dans le cas de surcharge.

2. Classification des méthodes

Les méthodes de renforcement de paroi peuvent être classifiées en fonction de leurs modes d'action en trois (3) catégories qui sont :

➤ **Les méthodes actives** :

Ces méthodes sont caractérisées par le fait qu'elles agissent en exerçant directement une pression au niveau de la paroi. Cette pression au niveau de la paroi a pour objectif de stabiliser la paroi et de contrer les différentes charges externes telles que les pressions de terre environnantes, les forces sismiques.... Ces méthodes permettent d'augmenter la stabilité tout en maintenant la paroi. Ce sont les pieux en béton projeté, les pieux interloqués, les parois moulées ...

Ces méthodes offrent à la fois **une stabilité immédiate** dès l'installation et aussi **une bonne résistance aux conditions de surcharge**. Néanmoins l'utilisation de ces méthodes pour la réalisation d'un ouvrage relève d'une précision élevée lors de la conception ainsi que des frais élevés lors de la réalisation.

➤ **Les méthodes passives :**

On appelle méthodes passives de renforcement de paroi, toutes méthodes dont le mode d'action consiste à renforcer à rendre plus résistant la structure ou le sol environnant sans exercer une quelconque force ou pression particulière à la paroi. Elles agissent de manière indirecte et ne nécessitent aucune force extérieure pour être efficaces. Ce sont les contreforts, les palplanches ...

Le coût de ces méthodes est généralement inférieur à celui des méthodes actives et la mise en œuvre s'effectue plus rapidement. Toutefois elles demeurent moins efficaces que les méthodes actives en présence de charges dynamiques et nécessitent aussi un entretien régulier.

➤ **Les méthodes combinées :**

Ce sont des méthodes qui comme le nom l'indique combine les procédés des méthodes actives et passives afin de tirer parti de leurs atouts. Elles sont utilisées pour des cas où les conditions techniques ne favorisent pas l'utilisation proprement dite d'une des deux méthodes précédentes. C'est en cela que, les méthodes combinées par leurs approches multifactorielles apparaissent comme des solutions incontournables aux problèmes de stabilité dans ces situations complexes.

Ces méthodes offrent **une flexibilité et une efficacité optimale** dans la conception et la réalisation d'ouvrages complexes. Cependant ces méthodes sont difficiles à réaliser et sont très coûteuses.

II. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DE PAROIS

1. Les méthodes actives

Ce sont :

➤ **Les pieux en béton projeté**

Cette méthode combine l'utilisation de béton projeté et de pieux dans le but de renforcer et stabiliser les parois excavées. Elle consiste à forer et installer des pieux en béton projeté avant l'excavation tout en respectant certaines configurations de disposition tels que : **l'espacement, le continu et le double alignement**. Après avoir installé les pieux, l'on installe des poutres de liaison en béton à leur sommet.



Figure 7 : Les pieux en béton projeté

Source : Baidu

Cette méthode est adaptée à un grand nombre de variétés de sols tels que **les sols meubles, les grandes excavations dont la profondeur est supérieure à 6m**, ainsi que les zones restreintes. Elle est facile à mettre en œuvre et minimise les risques pendant les travaux. Toutefois les pieux en béton projeté ne peuvent pas supporter de grandes charges et les machines utilisées pour son installation en plus d'être onéreuses génèrent des nuisances sonores.

➤ **Le jet grouting**

Le jet grouting est un procédé dont l'objectif est de renforcer les performances géomécaniques d'un sol. Ce procédé consiste à injecter un fluide ou coulis à haute pression dans les pores du sol afin de modifier sa structure. Ce coulis est généralement composé de **ciment, de résine, d'eau et d'additifs chimiques**. Il existe trois types de jet grouting : le **mono-jet** utilisant uniquement un jet de coulis de ciment, le **bi-jet** associant le coulis de ciment à de l'air et le **tri-jet** combinant des jets de ciment, d'eau et d'air. Pour injecter cette substance, un forage est effectué à une certaine profondeur. Après avoir foré, l'on insère

des tiges avec à leur extrémité un dispositif appelé **buse rotative**, ce dispositif permet à la fois d'éroder le sol et de mélanger le coulis à très haute pression. À la suite de cette étape l'on remonte la buse de manière progressive afin de former des colonnes continues.

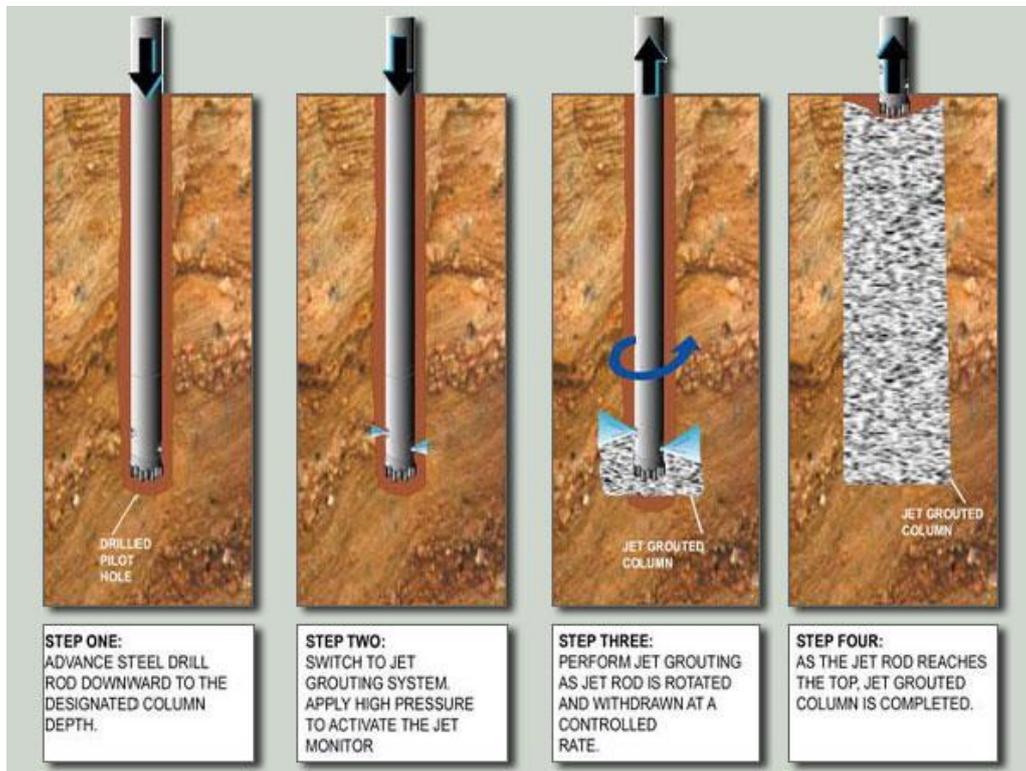


Figure 8 : Mise en place du jet grouting

Source : Soletanche Bachy

Cette méthode offre une grande stabilité à l'ouvrage et s'adapte à différents types de sols tels que les sols argileux, les sols sableux, les sols gaillonneux et les rochers tendres. Elle permet de répartir les différentes charges de façon uniforme de sorte à réduire les déformations. Le jet grouting est idéal pour les excavations profondes et offre une étanchéité accrue aux parois. Cette méthode est aussi idéale pour les chantiers avec peu d'espaces car elle nécessite une faible emprise au sol.

Cette méthode est coûteuse du fait des équipements requis pour sa bonne exécution. Elle peut impacter l'intégrité des sols environnants et les bruits générés par l'injection de coulis peut générer les habitants des ouvrages avoisinants.

➤ **Les pieux interloqués**

Également appelé **pieux sécants**, cette méthode vise à mettre en place des pieux juxtaposés afin d'obtenir une paroi aussi solide qu'étanches. Cette paroi aura pour objectif de garantir la sécurité des ouvriers, de l'ouvrage ainsi que des ouvrages environnants. Les pieux sont réalisés avec un phasage nommé **phasage primaire/secondaire**. Ce phasage consiste à couler les pieux dits **primaires** avec un **béton maigre non armé** puis couler les pieux dits **secondaires**. Ces derniers sont coulés entre les pieux primaires de sorte qu'ils se chevauchent et créent une paroi continue. Les pieux secondaires contrairement aux pieux primaires, sont coulés en **béton armé** avec **insertion de profilés en acier** afin de les rendre plus résistants.

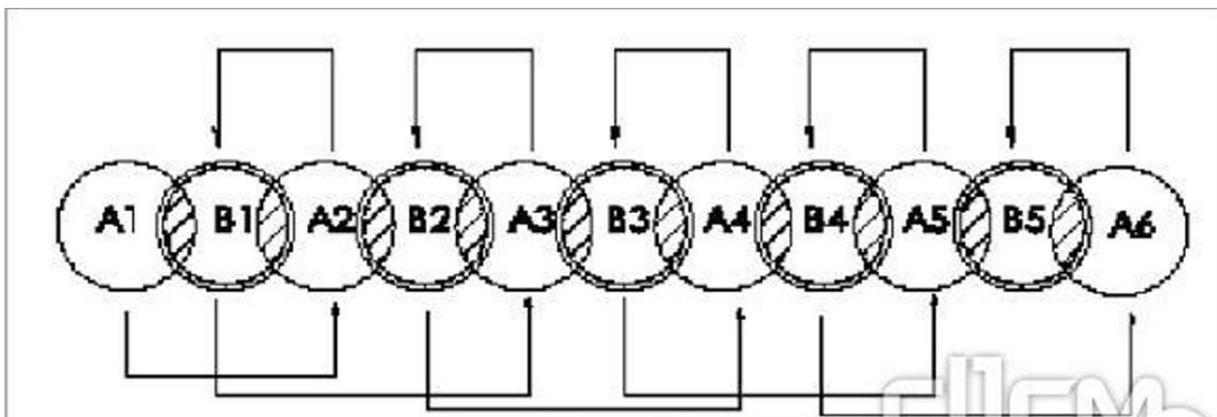


Figure 9 : Ordre de coulage des pieux sécants

Source : Baidu

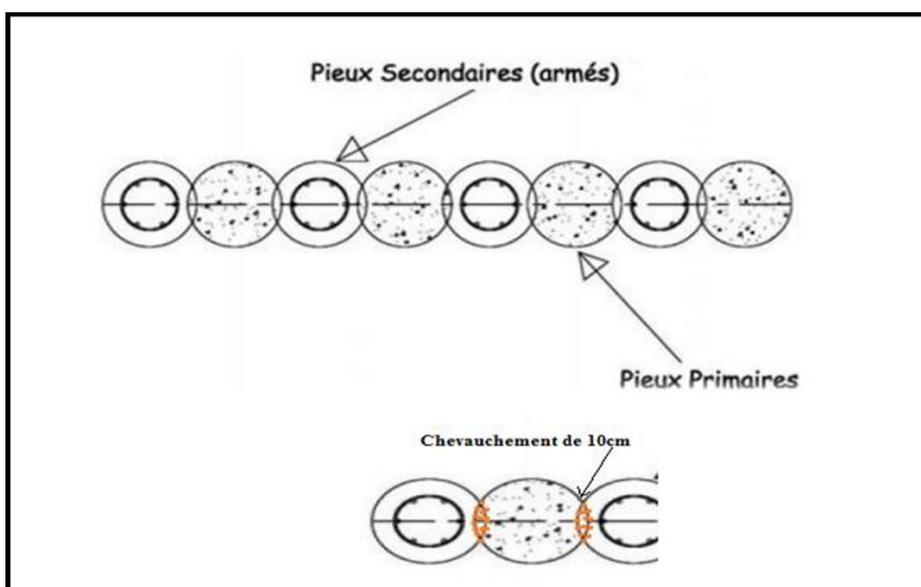


Figure 10 : Détail des pieux sécants

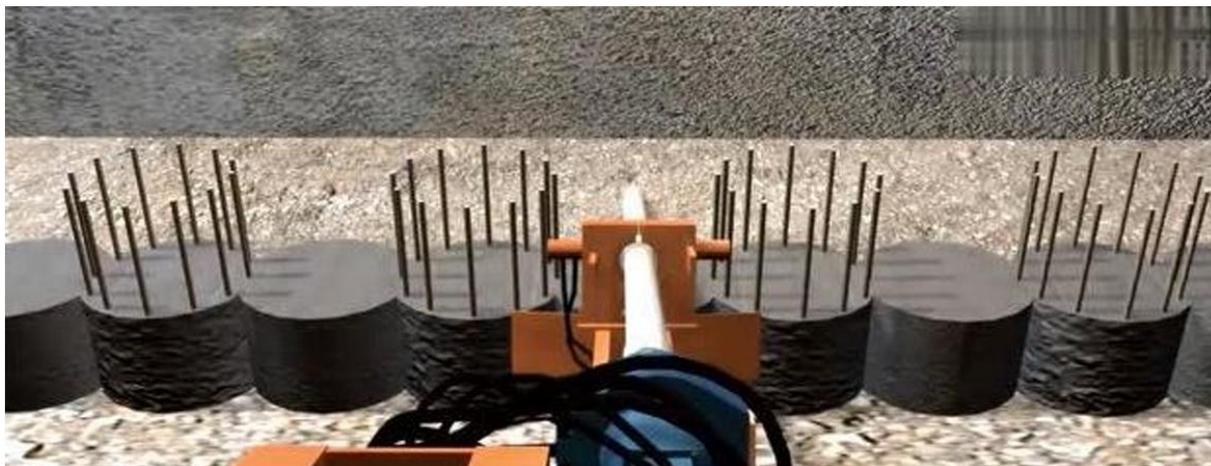


Figure 11 : Pieux sécants

Source : Baidu

Ces pieux, de par leurs dispositions, constituent une **paroi étanche** limitant les infiltrations d'eau. Ils offrent ainsi une grande stabilité à l'ouvrage et sont adaptés aux **sols meubles, sablonneux, argileux**. Ils sont aussi adaptés aux zones restreintes et les vibrations émises lors de leurs installations sont minimales comparées aux autres installations.

Cette méthode bien qu'efficace, a des frais de mise en place très élevés du fait des équipements et matériaux utilisés. Son installation est aussi très complexe et sa durabilité peut être affectée du fait de la corrosivité des matériaux utilisés.

➤ **Les parois moulées**

Le concept des parois moulées a été imaginé par l'ingénieur autrichien **Christian Veder** en **1938**. Cette méthode consiste à remplir une tranchée de sol avec du **béton armé** ou encore de la **boue bentonitique** afin de créer des murs continus étanches offrant une grande stabilité. La première étape consiste à réaliser deux petits murets dits **murette-guide** espacés de l'épaisseur de la future paroi et servira de supports aux armatures. Cette épaisseur est généralement **supérieure à 10 cm** afin de faciliter l'excavation. Ensuite l'on creuse des tranchées à l'aide d'un **trépan-benne, une hydro haveuse ou une pelle spécialisée**. Après cette phase suit la phase de la stabilisation, elle consiste à ajouter de la **bentonitique** jusqu'à la profondeur requise. Cette boue, qui grâce à sa propriété nommée **thixotropie** va stabiliser les parois. À la suite de cette étape commence la pose des cages d'armatures en acier dans

les tranchées, ces armatures viendront renforcer le béton qui sera coulé juste après. Une fois les armatures installées, l'on procède au coulage du béton qui progressivement, va remplacer la boue bentonitique ajoutée auparavant. Ainsi le béton de densité de $2,5 \text{ t/m}^3$ (tonnes par mètre cube) vient se substituer à la boue de densité $1,05 \text{ tonne/m}^3$. Cette opération doit être effectuée de manière continue afin de garantir la solidité et l'imperméabilité de la paroi.

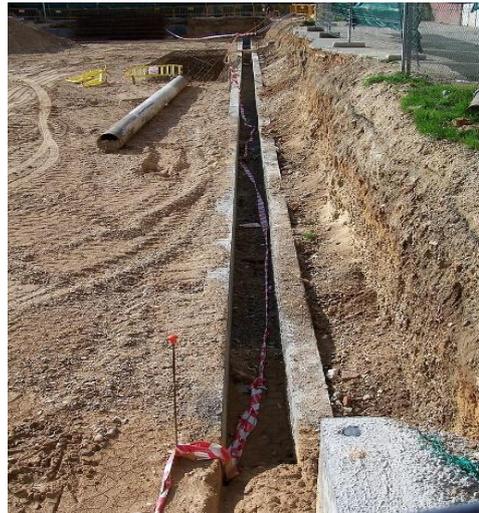


Figure 12 : Les murettes-guides

Source : Wikipédia

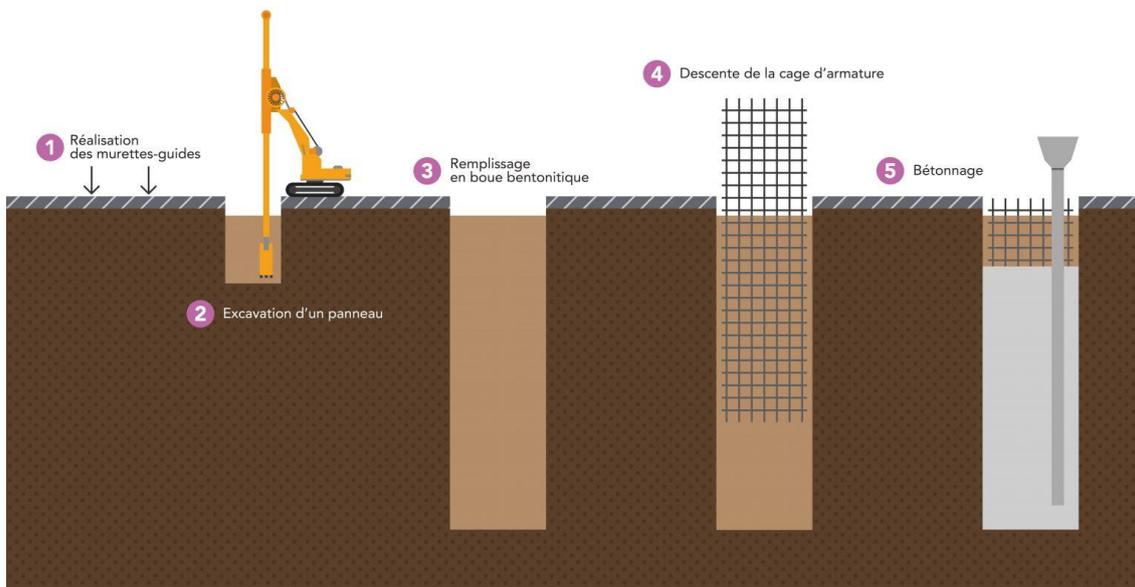


Figure 13 : La construction d'une paroi moulée

Source : Google

Les parois moulées offrent une bonne étanchéité à l'ouvrage du fait qu'elle se comporte comme une barrière empêchant les infiltrations d'eau. Cet aspect des parois moulées est idéal pour les zones avec des nappes phréatiques élevées. Elles offrent aussi une grande stabilité aux parois et conviennent aux excavations profondes ainsi qu'aux projets hydrauliques. Cependant, l'installation est très complexe et les coûts d'installations sont très élevés. Bien qu'étanches, ces parois peuvent nécessiter souvent des systèmes de drainage supplémentaires. La durabilité des parois peut être affectés en raison du caractère corrosif des matériaux métalliques utilisés.

2. Les méthodes passives

Comme exemple nous pouvons citer :

➤ Les parois berlinoises

Elles ont été développées au **XIXe siècle** à Berlin en Allemagne pour répondre aux besoins d'excavations dans les zones urbaines restreintes. C'est un type de soutènements composé de **profilés métalliques de section I ou H**, d'un **blindage en bois** et de **dalle ou des plaques métalliques**. Son procédé d'installation consiste à enfoncer des profilés métalliques dans le sol. Ces profilés sont installés sont espacés d'une distance comprise entre **1,5 et 2,5 mètres**. Après que les profilés aient atteint la profondeur d'assise, des planches de bois sont installées entre les profilés au fur et à mesure du terrassement. Le terrassement est effectué en phase successive et chaque phase est stabilisée par l'insertion de panneaux métalliques. L'on ajoute éventuellement des ancrages en fonction de la profondeur d'excavation.

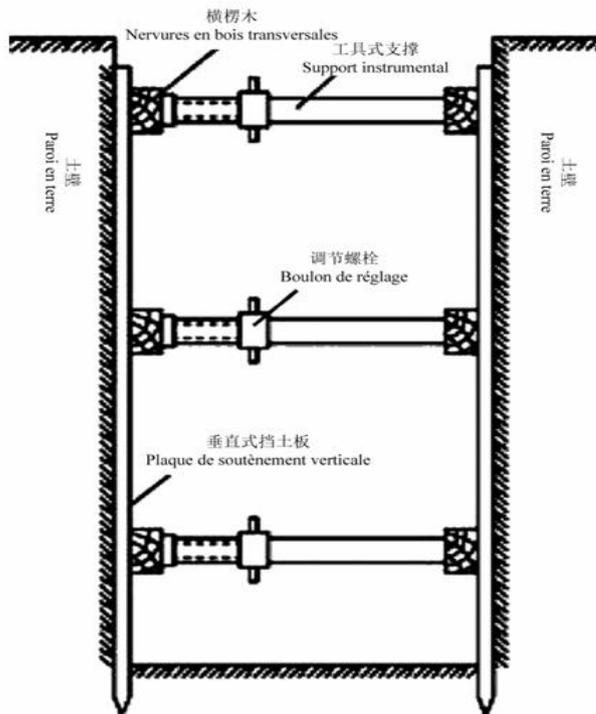


Figure 14 : Les parois berlinoises

Source : Google

Elle convient aux **sols argileux peu humides** ainsi qu'aux **sols secs** avec une profondeur d'excavation **inférieure à 3 mètres** pour des **parois sans ancrages**, et à **8m** pour des parois avec **ajouts d'ancrages**. C'est une méthode **très économique** qui offre une **bonne stabilité** à la structure. Nonobstant cela, les parois berlinoises sont peu étanches et nécessite un système de drainage, ce qui peut augmenter le cout de l'installation. Sa durabilité peut être réduite du fait de la corrosion des matériaux métalliques utilisées, surtout dans des zones ou la nappe phréatique est élevée. L'installation des parois berlinoises, comme celle des parois clouées génère énormément de bruits.



Figure 15 : Les parois berlinoises

Source : Google

➤ **Les contreforts**

Un contrefort est un élément structural en béton ou en maçonnerie disposé perpendiculairement ou à un angle par rapport à une paroi dans le but d'en renforcer la stabilité. Son principe de fonctionnement consiste à absorber les pressions latérales exercées par le sol ou d'autres charges puis de les redistribuer dans le sol ou les fondations.

Cet ouvrage, en plus d'être facilement réalisable est **d'une grande durabilité**. Toutefois le contrefort est limité en termes de forme et nécessite un grand espace pour sa mise en place ce qui est problématique dans des zones restreintes. Son coût de construction est élevé et son esthétique laisse à désirer.



Figure 16 : Les contreforts

Source : Google

➤ Les parois préfabriquées

Ce sont des éléments confectionnés dans des usines et mis en œuvre sur place. Ceux-ci peuvent être en béton armé ou non. Ces éléments sont conçus et dimensionnés selon les besoins du projet, elles peuvent prendre des formes des de caissons, de poutrelles ou encore de panneaux.

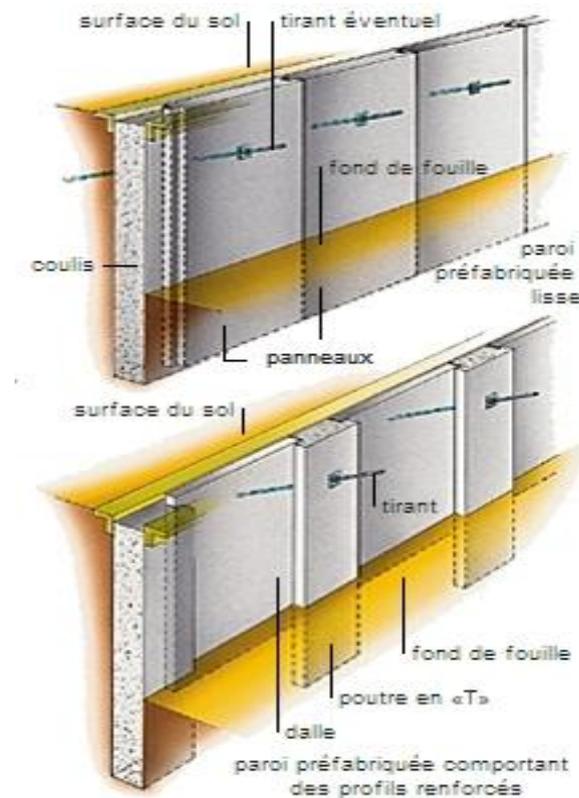


Figure 17 : Une paroi préfabriquée

Source : Google

L'installation des parois préfabriquées est **rapide**, ce qui réduit considérablement les délais de construction. Elle est aussi **économique** car elle requiert moins de matériaux et de main d'œuvre sur le chantier. Les parois préfabriquées offrent aussi une **très grande qualité**, du fait qu'elles soient fabriquées et testées dans des conditions contrôlées.

Toutefois les frais de conception, de transport et de manutention des parois préfabriquées sont très élevés. Elles sont moins adaptables aux conditions du site et nécessitent des traitements supplémentaires pour augmenter leurs étanchéités.

➤ **Les palplanches**

Les palplanches, apparues au XXe siècle, étaient à l'origine des **planches** servant à consolider des parois. De nos jours, ce terme désigne des **pieux profilés** conçus pour être **battus en terre** et qui se joignent les unes aux autres par l'intermédiaire de nervures latérales nommées **serrures**. Les palplanches, peuvent être en **acier**, en **béton** ou en **bois**. Les plus courantes sont celles en acier car elles offrent une grande résistance et une bonne durabilité. Elles sont installées par **battage** à l'aide d'un **marteau hydraulique** ou d'un **marteau diesel**. Après cette opération, les palplanches sont enfoncées par vibrations par **vibrofonçage** ou par usage d'une **presse hydraulique**. Une fois enfoncées, elles sont imbriquées les unes aux autres à l'aide de **serrures** ou de **cadre de tête** afin de rendre la paroi formée résistante et continue.



Figure 18 : Des serrures a la jonction de deux palplanches

Source : Google



Figure 19 : Des palplanches en acier

Source : Google

2. Les méthodes combinées

➤ Les parois clouées

La paroi clouée est une technique de soutènement permettant de renforcer les zones soumises à des poussées importantes et de stabiliser la zone d'excavation. Elle est composée de **béton projeté, de clous et de treillis métallique**. Sa mise en œuvre consiste dans un premier temps, à faire un terrassement de la première passe d'**une profondeur de 1 à 2 mètres**. À la suite de cela, l'on procède au forage des trous à des angles spécifiques et à des espacements réguliers afin d'y installer les clous. Une fois l'insertion des clous terminée, l'on procède au terrassement des autres passes. L'on applique ensuite une couche de **béton projeté** sur la zone excavée afin de fixer les clous et stabiliser la paroi. Dans le but d'augmenter la résistance de la paroi, on ajoute un **treillis métallique**.



Figure 20 : Les parois clouées

Source : Google

Les parois clouées permettent d'**augmenter la résistance** des sols. Elles sont aussi **flexibles** et leur mise en place est **rapide**. Toutefois elles consomment énormément de matériaux ce qui les rend coûteuses. La mise en place est très complexe et est très bruyante ce qui peut causer des nuisances sonores perturbant les riverains.

➤ **Le soutènement d'ancrage :**

Le soutènement d'ancrage est une méthode très utilisée dans le génie civil qui a pour but de renforcer la structure en lui permettant de résister aux forces qui tendent à faire bouger le terrain. Cette méthode fonctionne avec l'utilisation d'un élément structurel en barre ou en câbles d'acier avec une bonne résistance à la traction nommée **tirants**. Il en existe deux types :

- **Les tirants actifs** : Ce type de tirants, composé le plus souvent de faisceaux de câbles en acier possède une partie libre et une partie scellée. Une force de tension lui est toujours appliqué avant sa pose afin de réduire les déformations.

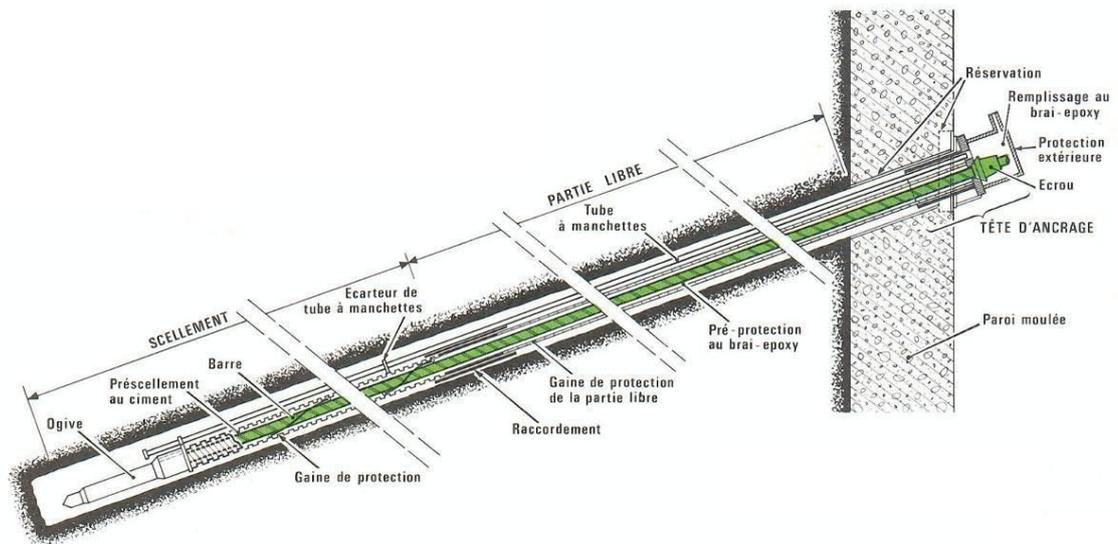


Figure 21 : Schéma détaillé d'un tirant

Source : Google

- **Les tirants passifs** : Ce type est composé généralement de barres d'acier ou de matériau composite et ne possède pas de partie libre. Il ne nécessite généralement pas de précontraintes avant sa mise en place et n'est sollicitée que lorsque l'ouvrage se déforme.

Pour mettre en place la méthode du soutènement d'ancrages dans le sol l'on effectue tout d'abord un forage afin d'obtenir un trou dans la couche de sol debout jusqu'à la profondeur requise. Une fois cette étape terminée l'on insère ensuite les tirants auxquels l'on ajoutera une gaine pour les protéger de la corrosion. Après l'insertion des barres d'acier (tirants), l'on injecte du mortier de ciment, de la boue chimique ou encore de la résine afin de remplir tous les trous. Une fois la substance injectée durcie, l'on procède à la mise en tension des tirants à l'aide de vérins hydrauliques améliorant considérablement la stabilité de la structure. Pour terminer l'on fixe les têtes d'ancrages, transférant ainsi la pression latérale du sol de paroi vers la couche de sol stable.

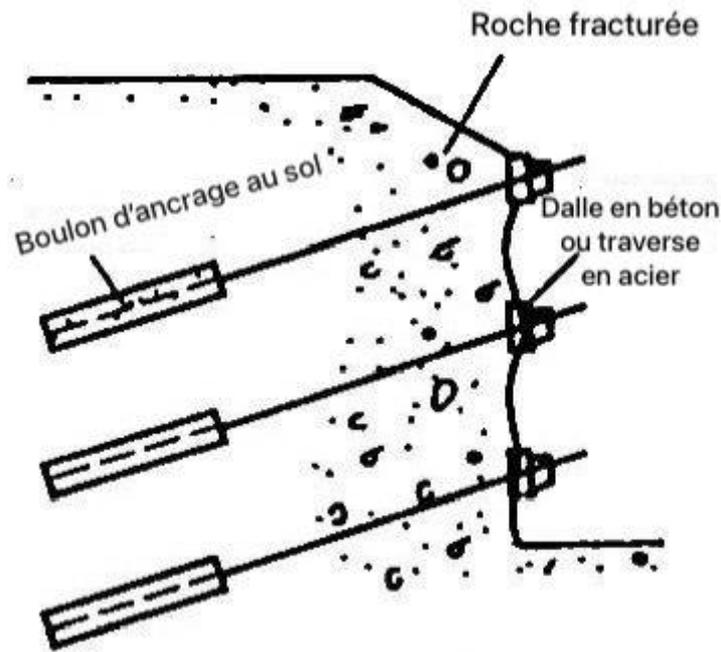


Figure 22 : Soutènement d'ancrage dans le sol

Source : Baidu

Cette méthode convient pour l'excavation de grandes fouilles dans les sols durs ou des roches fissurées, à condition que la stabilité du talus soit assurée. Elle leur confère une grande stabilité mais est très vorace en temps et en argent et nécessite une expertise technique régulière.

➤ Les soutènements de mur de tirants

Cette technique consiste à ancrer dans un mur des tirants dans un mur afin de contrebalancer les forces émises par le sol. Cette technique est très utilisée dans la stabilisation du sol. Pour la mettre en œuvre, l'on insère des barres d'ancrages dans des trous percés au préalable, cette insertion est suivie de l'injection de mortier de ratio eau-ciment-sable de **1 :2 :0,6** (également appelé ancrage de mortier). Ces éléments sont combinés avec des panneaux de béton projeté pour créer un mur de soutènement d'ancrages, similaire à un mur de gravité. Ce dispositif résistera ainsi à la pression du sol derrière le mur grâce à la force de friction, assurant ainsi la stabilité de la zone excavée. Il est également appelé **renforcement de talus par mur en ancrages**.



Figure 23 : Les différentes étapes de la mise en place de soutènements de mur de tirants

Source : Baidu

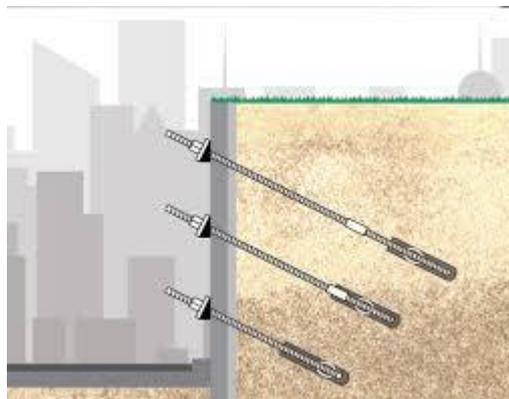


Figure 24 : Le soutènement de mur de tirants

Source : Baidu

Cette méthode est idéale pour les **excavations profondes**, peut être installée dans des **sols rocheux ou meubles** et du fait de sa verticalité est **peu consommatrice d'espace**. Toutefois comme la plupart des méthodes actives elle est très coûteuse. Les travaux de mise en place des tirants nécessitent un suivi régulier et peuvent influencer les sols à proximité.

➤ **Les parois ancrées**

C'est un procédé inventé au XXe siècle consistant à créer une structure de renforcement des parois. Cette méthode se différencie de la précédente par sa rigidité plus élevée. Sa structure verticale ou quasi-verticale est en déblai composée de **voile en béton armé** auquel l'on insère des **ancrages ou tirants**. Ces tirants sont tendus transférant ainsi les forces de traction de la paroi à une couche plus résistante.



Figure 25 : Paroi ancrée

Source : Google

Cette méthode comme la précédente est **peu consommatrice d'espace, flexible**, convient aux **excavations profondes, à la construction d'ouvrages souterrains et aux zones à forte pente**. Cela dit, son installation demande énormément de temps et nécessite un contrôle régulier pour éviter tout relâchement au niveau des ancrages. Elle est aussi très coûteuse et peut impacter les sols environnants.

➤ **Les pieux interloqués avec tirants ou ancrages**

Ceux-ci se diffèrent des pieux sécants par la mise en place des tirants ou ancrages afin de rendre la paroi encore plus résistante et optimiser la répartition des charges. Ceux si sont installés juste après les pieux secondaires. Après cette étape, l'on place une poutre en béton arme nommé **lierne** pour la répartition des charges.

Ces pieux tout comme les pieux interloqués constituent une paroi étanche limitant les infiltrations d'eau. Ils offrent ainsi une grande stabilité à l'ouvrage et sont adaptés aux sols meubles, sablonneux, argileux. Ils sont aussi adaptés aux zones restreintes et les vibrations émises lors de leurs installations sont minimales comparées aux autres installations.

Cette méthode bien qu'efficace, a des frais de mise en place très élevés du fait des équipements et matériaux utilisés. Son installation est aussi très complexe et sa durabilité peut être affecter du fait de la corrosivité des matériaux utilisés.

➤ **Les parois moulées avec ancrages**

Du fait de l'ajout des ancrages, la stabilité des parois moulées s'accroît ce qui favorise une répartition plus uniforme des charges et une réduction des déformations. Cette technique est idéale pour les zones avec des pressions latérales très élevées, les excavations très profondes et les talus instables.



Figure 26 : Une paroi moulée avec ancrages

Source : Google

L'installation de cette méthode est très complexe et minutieuse, ce qui en fait d'elle une méthode très coûteuse du fait des éléments spécialisés qu'elle requiert. Les parois moulées avec ancrages nécessitent un suivi régulier pour éviter des relâchements au niveau des ancrages du fait de la complexité de l'ouvrage.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre nous permet de mettre en exergue la diversité des différents ouvrages de soutènements de paroi. Celles-ci diffèrent les unes des autres de par leurs modes d'action, leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs inconvénients. Il en revient donc qu'une étude préalable des différentes conditions du projet est nécessaire pour le choix de la méthode de soutènement de paroi la plus appropriée.

CHAPITRE 4 : ANALYSE COMPARÉE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DE PAROI

INTRODUCTION

Le choix de la méthode de renforcement de paroi est une étape très cruciale dans la réalisation de ce projet de construction. De lui dépendra la stabilité de notre excavation, mais aussi la sécurité des personnes et des bâtiments avoisinants. Chaque méthode possède des avantages et des inconvénients qui répondent à des contraintes géotechniques, économiques et environnementales bien spécifiques. Il s'agira pour nous, dans ce chapitre, d'effectuer une étude comparative des différentes méthodes présentées dans le chapitre précédant. Cette analyse prendra en compte plusieurs paramètres tels que : les conditions géotechniques du projet, les conditions du site, les charges et contraintes que la paroi devra supporter, la complexité de la méthode ainsi que les coûts de conception et de maintenance de la paroi.

Cette étude permettra d'identifier la méthode qui correspond le plus aux paramètres géotechniques et environnementales de notre projet. À la suite de cette étape, nous proposerons une méthode qui assurera la stabilité des parois ainsi que la sécurité des personnes et ouvrages avoisinants.

I. CRITÈRES DE SÉLECTION DES MÉTHODES

1. Les conditions géotechniques

Elles se réfèrent aux propriétés et caractéristiques physiques du sol et des éléments qui se trouvent sur le site de notre projet. Ces propriétés sont déterminées à partir d'une étude géotechnique. Cette dernière nous permet aussi d'évaluer les conditions d'adaptation du projet à notre site ainsi que d'évaluer les risques pouvant survenir. Il existe une multitude d'essais permettant de connaître la nature du sol et éventuellement son comportement. Cependant nous nous contenterons des essais effectués sur le site de notre projet dont :

- **L'essai de pénétration dynamique :**

Cet essai permet de déterminer la résistance du sol. Il consiste à enfoncer une tige à l'aide d'un marteau d'une certaine masse à une certaine hauteur, puis déterminer la résistance en fonction du nombre de coups nécessaires pour enfoncer la tige à une certaine distance. Pour notre projet, l'entreprise LABOSOL a effectué **cinq (05) essais de pénétration dynamique**, notés PD1 à PD5 descendus à **12,00m de profondeur** par rapport au sol actuel. Ces essais sont fait selon la norme **NF P-94-115** du sondage pénétrométrique.

- **L'essai à la tarière manuelle :**

Le sondage à la tarière consiste à effectuer un forage à la main avec une tarière continue de **100 mm** de diamètre. Cela permet de réaliser la coupe géologique du sol et de déterminer le niveau de **la nappe phréatique**. Pour notre projet, **cinq (05) sondages à la tarière manuelle** notés ST1 à ST4 ont été effectués et descendus jusqu'à **4,00 m** de profondeur par rapport au sol actuel. Ces essais ont été effectués selon la norme **NF P-94-500**.

- **L'essai pressiométrique :**

Ils consistent à introduire une sonde dans un forage et exercer des pressions uniformes afin de mesurer les déplacements de la paroi de forage en fonction du temps. **Deux (02) sondages avec essais pressiométriques** à chaque mètre notés SP1 et SP2 descendus à **20,00m** et **30,00m** de profondeur avec élaboration de la coupe géologique et mesure des caractéristiques géomécaniques des sols en place. Ces essais sont faits selon la norme française **NF P 94-110-1** correspondants aux sondages avec essais pressiométriques Ménard.

Ces essais nous ont permis d'obtenir les caractéristiques suivantes.

- **La nature du sol :** Chaque sol ayant ses propres propriétés, il est important de connaître la nature du sol de notre projet afin d'en assurer la stabilité. Les essais effectués par l'entreprise sur le site et les analyses faites en laboratoire ont révélé la présence de plusieurs couches de sol dont :

- Une couche de **sables argileux** de couleurs **jaunâtres à rougeâtre** sur les **dix-sept (17) premiers mètres**.

- Une couche de **sables propre moyen** en dessous de la couche précédente jusqu'à **30m** de profondeur.
- Une couche de **gravats et de sols ciments** sur **50cm** de hauteur (selon le forage effectué pour les essais pressiométriques).

▪ **La capacité portante** : Elle est la capacité qu'a un sol à résister aux tassements. Elle est très importante car elle nous permet de savoir la valeur maximale des charges que peut supporter notre sol sans subir de tassements ou de rupture. Les données relevées grâce aux essais effectués nous ont révélés que la capacité portante de notre sol est de :

- **0,17 MPa** (mégapascal) à l'**ELS**
- **0,23 MPa** (mégapascal) à l'**ELU**.

▪ **Le niveau de la nappe phréatique** : La nappe phréatique est une couche d'eau souterraine se trouvant dans les interstices du sol. Concernant notre projet, des venues d'eau ont été observées vers **18,50m** de profondeur. Ces venues ont été observées lors des investigations menées sur le site du 19/07 au 06/08/2022 aux droits de nos sondages et essais. Cependant il s'agit d'observations à très court terme. Ces niveaux d'eaux sont susceptibles de varier en fonction des saisons.

▪ **La résistance dynamique** : C'est la capacité du sol à résister à des forces dynamiques. Cette résistance a été mesurée lors des essais de pénétration dynamique. Les valeurs enregistrées sont comprises entre **14,4 bars** et **50,1 bars** sur une profondeur comprise entre **0** et **12m**.

▪ **L'angle de frottement (ϕ phi)** : Il représente l'angle au-delà duquel les particules du sol commencent à glisser entre elles. C'est une valeur importante intervenant dans la résistance au cisaillement. Il est généralement obtenu grâce aux essais **triaxiaux et de cisaillement direct**.. Son unité est le **degré (°)**. L'angle de frottement du sol de notre projet est de **30°**.

- **La cohésion c** : Elle représente la force d'attraction permettant aux différentes particules du sol de rester ensemble et d'éviter la rupture. Cette valeur est importante pour la résistance au cisaillement. Tout comme l'angle de frottement, la cohésion est généralement obtenue grâce aux essais **triaxiaux et de cisaillement direct**. Son unité principale est le **Pascal (Pa)**. La valeur de la cohésion de notre sol est de **20 kPa**.

2. Conditions économiques et socio-environnementales

➤ Conditions économiques

Le budget est l'un des aspects les plus déterminants lors de la construction d'un projet. En effet il est important de trouver une méthode minimisant au mieux les dépenses en termes de matériaux, d'équipements et de main d'œuvre.

➤ Conditions socio-environnementales

- Conditions sociales

Le projet s'effectuant dans une zone urbaine et administrative, il est important de ne pas perturber les bâtiments avoisinants ainsi les activités qui s'y déroulent. Il en revient alors de choisir une méthode nous permettant de réduire au mieux les effets nuisibles sur la communauté avoisinante.

Les effets à éviter sont les suivants :

- **Les nuisances sonores** : Ce sont des troubles de bruit dépassant le seuil auditif. Elles sont causées par le bruit des appareils, des engins ... Ces bruits sont perturbants et indisposant. Il convient alors de limiter la création de bruits, surtout dans une zone administrative comme le Plateau. Pour réduire l'émission de bruits, il serait plus économique et préférable de réduire l'utilisations des engins émettant de grandes sonorités.

- **L'impact sur la circulation** : Les travaux de construction nécessitent dans la plupart du temps des gros engins. Pour éviter des accidents, il est souvent demandé de fermer certaines voies afin que ces véhicules puissent circuler facilement. Ces fermetures de routes peuvent perturber l'itinéraire des usagers des ouvrages voisins et affecter les voies

d'accès des services d'urgences. Il serait alors bénéfique de limiter l'utilisation de gros engins afin de limiter les perturbations concernant le trafic routier.

- **Conditions environnementales**

- **La pollution de l'air** : Les travaux de construction peuvent générer énormément de poussières polluantes ainsi l'air. Cette pollution peut causer des maladies chez les personnes occupant les bâtiments avoisinants.

- **Les vibrations** : Une vibration est un mouvement de secousse. Elle est caractérisée par sa fréquence, son énergie et son amplitude. Elle peut être causée par des phénomènes naturels ou encore par des appareils ou engins. Les vibrations peuvent causer des fissures et des dégâts sur les murs des bâtiments voisins. Il en revient alors pour nous, de limiter les engins émettant des vibrations importantes tels que les marteaux piqueurs, les compacteurs afin de préserver l'intégrité des autres bâtiments.

II. COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES ET CHOIX DE LA PLUS ADAPTÉE

Pour choisir la méthode la plus adaptée, nous procéderons d'abord par une classification globale selon les avantages qu'offrent les différentes méthodes ainsi que leurs limites. Après nous classerons ces différentes méthodes selon les critères que sont la résistance aux déplacements latéraux, la stabilité ainsi que les coûts nécessaires pour la mise en œuvre.

Type de soutènement	Avantages	Inconvénients
---------------------	-----------	---------------

Les contreforts	<ul style="list-style-type: none"> - Une conception facile - Très économique pour des murs de faible hauteur - Offrent une bonne résistance 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas adaptés pour les ouvrages en grande hauteur car extrêmement coûteux pour des grandes hauteurs - Nécessitent énormément d'espace - Peu esthétique
Les pieux en béton projeté	<ul style="list-style-type: none"> - Rapide à mettre en œuvre - Convient aux sols cohérents (argile et limon) - Offrent une bonne résistance et une bonne stabilité - Conviennent aux murs de grandes hauteurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne conviennent pas aux sols peu cohésifs (sables, graviers) - Leurs durabilités est souvent limitée - Sa conception est complexe et coûteuse
Le jet grouting	<ul style="list-style-type: none"> - Très étanche - Améliore et renforce les propriétés physiques du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - La mise en œuvre est complexe - Nécessite des équipements spécialisés - Le coût de conception est très élevé
Les parois berlinoises	<ul style="list-style-type: none"> - Une mise en place rapide - Une construction à faible coût - Ils sont adaptés au soutènement temporaire ainsi qu'aux zones urbaines 	<ul style="list-style-type: none"> - La structure n'est pas étanche - La résistance latérale est faible - Nécessite un ajout de barres d'ancrages pour les bâtiments de grande hauteur
Les pieux interloqués	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne étanchéité - Bonne résistance latérale - Conviennent aux terrains en milieu urbain 	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût de la construction est élevé - La mise en œuvre nécessite des moyens spécialisés
Les parois moulées	<ul style="list-style-type: none"> - Offrent une très bonne résistance - Conviennent aux excavations de 	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût de construction est élevé - Nécessitent une emprise importante

	<p>grandes profondeurs</p> <ul style="list-style-type: none"> - Conviennent aux milieux urbains 	<ul style="list-style-type: none"> - Peuvent bloquer la nappe phréatique
Les parois préfabriquées	<ul style="list-style-type: none"> - La mise en œuvre est très rapide - Bonne gestion de la nappe phréatique - Conviennent uniquement aux sols homogènes - Offrent une bonne stabilité à la structure - Bonne gestion des déplacements 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de construction élevé - Cette technique est limitée du fait des valeurs standards qu'elle utilise - Emprise importante - Peut obstruer la nappe phréatique
Les palplanches	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne gestion de la nappe phréatique - Bonne portance - Esthétique - Un coût de construction moyennement élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Peut obstruer le chemin de la nappe phréatique - Ne convient pas aux terrains possédant des blocs durs - La mise en place occasionne des nuisances sonores (lors du battage)
Les parois clouées	<ul style="list-style-type: none"> - Très économique - Conviennent aux pentes raides et aux sols cohérents - Mise en œuvre rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins adaptée aux sols meubles - Nécessitent des ancrages et des clous de grande longueur - Possibilité de déplacement
Le soutènement d'ancrage	<ul style="list-style-type: none"> - Offre une grande stabilité - Permet de stabiliser les pentes raides - Convient aux ouvrages de grandes hauteurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût de construction est moyennement élevé - La mise en place des ancrages est complexe et nécessite des éléments spécialisés.

Les soutènements de mur de tirants	<ul style="list-style-type: none"> - Convient aux ouvrages de grandes hauteurs - Les déplacements de structure sont réduits 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de construction élevé - La mise en œuvre est complexe et nécessite des équipements spécialisés
Les parois ancrées	<ul style="list-style-type: none"> - Les déplacements de structure sont réduits - Offre une très bonne résistance - Convient aux bâtiments de grande hauteur 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de construction élevé - La construction est complexe et nécessite des équipements spécialisés
Les pieux interloqués avec tirants ou ancrages	<ul style="list-style-type: none"> - Structure étanche - Offre une bonne stabilité - Convient aux terrains urbains 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de construction élevé - La construction est complexe et nécessite des équipements spécialisés
Les parois moulées avec ancrages	<ul style="list-style-type: none"> - Très résistante - Convient aux excavations complexes - Offre une bonne étanchéité - Convient aux terrains urbains 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de construction extrêmement élevé - Mise en œuvre complexe - Nécessite des éléments sophistiqués - Nécessite une emprise importante

Tableau 2 : Tableau de classification des méthodes selon leurs avantages et inconvénients

Type de soutènement	Résistance aux déplacements	Stabilité	Coût et moyens
Les contreforts	Résistance moyenne	Faible stabilité	Coût faible à moyen selon la hauteur
Les pieux en béton projeté	Résistance moyenne	Stabilité élevée	Coût moyen à élevé
Le jet grouting	Résistance élevée	Stabilité élevée	Coût très élevé

Les parois berlinoises	Résistance moyenne	Stabilité modérée	Coût moyen
Les pieux interloqués	Bonne résistance	Bonne stabilité	Coût élevé
Les parois moulées	Résistance élevée	Faible stabilité	Coût élevé à très élevé
Les parois préfabriquées	Résistance élevée	Stabilité modérée	Coût élevé
Les palplanches	Résistance moyenne	Faible stabilité	Coût faible à moyen
Les parois clouées	Résistance modérée	Stabilité modérée	Coût faible à moyen
Le soutènement d'ancrage	Résistance élevée	Stabilité élevée	Coût élevé
Les soutènements de mur de tirants	Résistance élevée	Bonne stabilité	Coût élevé
Les parois ancrées	Résistance élevée	Bonne stabilité	Coût élevé
Les pieux interloqués avec tirants ou ancrages	Résistance très élevée	Stabilité élevée	Coût élevé
Les parois moulées avec ancrages	Résistance très élevée	Stabilité élevée	Coût très élevé

Tableau 3 : Tableau de classification des méthodes selon les facteurs que sont la résistance aux déplacements, la stabilité et les coûts.

Aux vues de ces différents tableaux, les méthodes répondant aux exigences de notre projet et qui offrent un meilleur ratio qualité/prix sont les suivantes :

Type de soutènement	Rapport qualité/prix	Justifications
---------------------	----------------------	----------------

Pieux interloqués avec ancrages	Excellent	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance très élevée - Stabilité élevée - Structure étanche - Conviennent aux terrains urbains - Très coûteux mais moins coûteux que les parois moulées avec ancrages - Offrent une bonne étanchéité - La présence d'ancrages peut avoir un impact négatif sur les ouvrages avoisinants - Mise en œuvre complexe
Parois moulées avec ancrages	Très bon	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance très élevée - Stabilité élevée - Structure étanche - Conviennent aux terrains urbains - Offrent une bonne étanchéité - La présence d'ancrages peut avoir un impact négatif sur les ouvrages avoisinants - Mise en œuvre complexe
Pieux interloqués	Bon	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance - Bonne stabilité - Bonne étanchéité - Conviennent aux terrains en milieu urbain - Coût moyen à élevé
Soutènement de murs de tirants	Correct	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne stabilité - Bonne résistance latérale - Moins étanche - Coût moyen à élevé - La présence d'ancrages peut avoir un impact négatif sur les ouvrages avoisinants - Mise en œuvre complexe

Tableau 4 : Tableau de classification des méthodes répondant aux exigences du projet selon le ratio qualité/prix.

Au regard de toutes ces différentes méthodes, nous avons choisi la **méthode des pieux sécants** comme méthode de soutènement.

CONCLUSION PARTIELLE

Grâce à ce chapitre, nous avons appris les avantages et inconvénients des méthodes à travers un tableau de classification. Il nous a permis de faire un choix éclairé pour le cas de notre projet.

CONCLUSION

Au cours de cette partie, nous avons procédé à l'étude des différentes méthodes de confortement de paroi de sol. Cette analyse a permis de répertorier les techniques de soutènement adaptées à chaque sol en fonction des contraintes géotechniques du site, des contraintes environnementales ainsi que des contraintes économiques du projet. Cette étude nous a permis de mettre en exergue les avantages et les limites des méthodes compatibles avec notre projet à savoir les parois moulées, les pieux sécants avec et sans ancrages et les soutènements de tirants. Après une analyse approfondie, nous avons retenu la méthode des pieux sécants. Celle-ci par sa flexibilité d'adaptation en fait une technique appropriée.

Ceci conclut donc cette partie et nous conduit ainsi à la partie suivante dans laquelle nous évaluerons les différentes charges appliquées à notre paroi. Après les avoir évaluées, nous effectuerons à l'aide d'un logiciel, le dimensionnement de notre méthode afin de la valider.

TROISIÈME PARTIE : DIMENSIONNEMENT **TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE** **PROPOSÉE**

Cette partie s'articulera d'abord autour de l'évaluation des charges s'appliquant sur notre paroi, puis après au dimensionnement de cette paroi afin qu'elle puisse garantir la sécurité des personnes et ouvrages avoisinants.

CHAPITRE 5 : CALCULS ET MODÉLISATIONS DES CHARGES APPLIQUÉES À LA PAROI

Introduction

La conception et la réalisation des parois de soutènement est une étape importante dans la réalisation d'un projet. Ces structures doivent résister aux nombreuses charges qui leurs sont appliquées, aux différentes pressions exercées par les sols, aux charges sismiques ainsi qu'aux surcharges générées par les bâtiments avoisinants. Elles doivent aussi pouvoir résister aux effets causés par l'environnement. C'est en cela que notre chapitre s'articule autour de l'évaluation et le calcul des différentes charges. Durant ce chapitre, nous analyserons les différentes charges appliquées à notre paroi, puis après quoi nous procéderons aux calculs de ces différentes charges ainsi qu'à leurs modélisations. Ce chapitre, vise à fournir une base solide pour le dimensionnement efficace de notre méthode de soutènement afin de garantir sa stabilité et sa durabilité.

I. LES DIFFÉRENTES CHARGES AGISSANT SUR NOTRE PAROI DU SOL

Notre paroi de terre est soumise à différentes charges, qui peuvent être classifiées comme suit :

1. Les charges permanentes

Une **charge permanente**, est une action constante qui agit sur une structure de manière continue tout au long de sa durée de vie. Elles sont aussi appelées **charges fixes** ou encore **charges mortes**. Les charges permanentes sont généralement le poids propre de la structure, des matériaux constitutifs rattachés à la structure ainsi que des éléments fixes agissant sur la structure. Dans notre cas, les charges permanentes seront composées du **poids propre de notre paroi de pieux sécants, de celui de la poutre** et des **forces de poussées**.

- **Le poids propre de la paroi** est l'action produite par la gravité terrestre sur la masse de la paroi. Le poids propre de la paroi est fonction des caractéristiques géométriques de la paroi (**la hauteur**, ainsi que **la section**) mais aussi de la densité des différents matériaux utilisés (le béton, l'acier, etc.). La paroi de pieux sécants est une paroi composée de pieux interloqués entre eux. Parmi ces pieux, ceux dits primaires sont faits en béton et ceux dits seconds sont faits en béton armé. Le dimensionnement n'étant pas effectué, des valeurs de section dites valeurs de prédimensionnement seront utilisés. Il s'exprime en **kiloNewton (kN)**.

Pour un pieu de diamètre 80cm :

Soit **P**, le poids propre de la paroi, **$P = A \times H \times \gamma$**

A : L'aire de la section du pieu

H : La hauteur du pieu

γ : Le poids volumique du matériau

$A = \pi d^2 / 4$, avec d en mètre et **$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$** pour le béton armé

$A = \pi \times 0,80^2 / 4$

$A = 0,5026 \text{ m}^2$

$P = 0,5026 \times 12 \times 25$

$P = 150,80 \text{ kN}$

- **Le poids propre de la poutre** : C'est l'action induite sur la masse de la poutre. En effet nous avons décidé d'ajouter une poutre de section **80 x 60** tout le long de la paroi. Cette poutre aura pour rôle de répartir uniformément les différentes charges appliquées à notre paroi.

Soit **p** le poids propre de la poutre,

$p = \gamma \times l \times h$

h : La hauteur de la poutre

l : La largeur de la poutre

γ : La densité du béton

$$p = 25 \times 0,8 \times 0,6$$

$$p = 12 \text{ kN/ml}$$

- **La poussée du sol** est la force exercée par le sol sur une structure, dans notre cas l'ouvrage de soutènement. Il en existe deux types :

- **La poussée au repos** : Dans cet état il n'y a pas de déformations, le sol reste stable. Le sol exerce une pression naturelle sans se déformer.

- **La poussée active** : C'est la force exercée par le sol lorsqu'il tend à se déplacer. Durant ce phénomène, la structure quitte le remblai et est déplacé vers l'avant jusqu'à ce que le sol atteigne un état d'**équilibre ultime**, l'équilibre ultime étant l'état dans lequel le sol atteint sa capacité maximale de résistance. Elle s'exprime en **kiloNewton par mètre** (kN/m).

$$Pa = 0,5 \times \gamma \times H^2 \times Ka \quad ,$$

Ka : Le coefficient de poussée active

H : La profondeur de couche

γ : Le poids volumique du sol

$$Ka = (1 - \sin(\phi)) / (1 + \sin(\phi))$$

$$Ka = (1 - \sin 30^\circ) / (1 + \sin 30^\circ)$$

$$Ka = 0,33$$

$$Pa = 0,5 \times 18 \times 12^2 \times 0,33$$

$$Pa = 427,68 \text{ kN/ml}$$

- **La poussée passive** : C'est la force exercée par le sol lorsque celui-ci tend à résister à un mouvement. Durant ce phénomène, la structure se déplace dans la direction du remblai jusqu'à ce que le sol atteigne un état d'équilibre ultime. Elle s'exprime aussi en **kiloNewton par mètre** (kN/mm).

$$P_p = 0,5 \times \gamma \times H^2 \times K_p ,$$

K_p : Le coefficient de poussée passive

H : La profondeur de couche

γ : Le poids volumique du sol

Le terrain étant horizontal, **K_p** = $(1 + \sin(\phi)) / (1 - \sin(\phi))$

$$K_p = (1 + \sin 30^\circ) / (1 - \sin 30^\circ)$$

$$K_p = 3$$

$$P_p = 0,5 \times 18 \times 6,4^2 \times 3$$

$$P_p = 1105,92 \text{ kN/ml}$$

2. Les surcharges

Une **surcharge** est une charge extérieure appliquée à la structure due à son utilisation normale. Elles comprennent les charges dues aux trafics routiers, les charges dues aux bâtiments avoisinants. Ces ouvrages, de par leurs présences génèrent des charges supplémentaires.

Les bâtiments avoisinant notre projet sont des bâtiments de type R+7

$$Q = K_a \times H \times q$$

K_a : Le coefficient de poussée active

H : La hauteur de la paroi

q : La charge des ouvrages avoisinant

$$Q = 0,33 \times 12 \times 80$$

$$Q = 316,8 \text{ kN/m}$$

II. MODÉLISATIONS DES DIFFÉRENTES CHARGES APPLIQUÉES À NOTRE PAROI

1. Combinaisons des charges

La combinaison des charges est un concept essentiel pour la conception des structures. Elles prennent en compte les différentes charges ainsi que les effets simultanés causés par celles-ci afin de s'assurer que la structure est conçue de manière sûre et efficace. Elles listent les différentes charges que sont : **les charges permanentes, les charges d'exploitation, les charges climatiques et les charges accidentelles**. Elles consistent à additionner ces différentes charges en utilisant des coefficients de sécurité pour assurer la stabilité et la fonctionnalité de la structure sous l'effet de ces différentes charges. L'objectif de la combinaison des charges est de garantir la résistance de la structure quelles que soient les charges, les variations ainsi que les incertitudes pouvant arriver. En d'autres termes elle permet de s'assurer de la stabilité de la structure dans toutes les conditions d'utilisations. Le principe de combinaison de charges est défini par le **BAEL 91 modifié 99**.

La combinaison des charges se fait selon deux états qui sont :

- **L'ELU (État Limite Ultime)** : C'est un concept très important dans le domaine du génie civil et de la construction. Il représente l'état au-delà duquel la structure atteint une forme de rupture (effondrement, ruine...), c'est-à-dire qu'elle ne peut plus supporter les charges soumises. En d'autres termes c'est l'état dans lequel la structure atteint sa capacité maximale de résistance. Son objectif est d'assurer la résistance de la structure sous l'effet des charges maximales prévues sans qu'il n'y ait de rupture ou d'effondrements. Elle garantit ainsi la sécurité des personnes et des biens mais aussi la capacité portante du bâtiment. Pour déterminer les combinaisons de charges à l'ELU, l'on utilise des coefficients de sécurité pour tenir compte des incertitudes et des variations de charges possibles.

L'une des combinaisons les plus utilisées à l'ELS est : **G + Q**

- **L'ELS (État Limite de Service)** : Ce concept est aussi très important dans le domaine du génie civil. Il représente l'état au-delà duquel une structure n'est plus fonctionnelle, c'est-à-dire ne peut plus fonctionner sans subir de déformations ou fissures excessives mais aussi sans subir de vibrations gênantes. En d'autres termes, l'ELS a pour but vérifier le **confort, la durabilité et l'aptitude au service**. Les combinaisons de l'ELS se font selon le **BAEL 91**. Pour faire une descente de charge à l'ELS, l'on utilise des fait la somme des différents types de sollicitations.

L'une des combinaisons les plus utilisées à l'ELU est : $1.35G + 1.5Q$

Selon l'Eurocode 0, l'état à considérer pour dimensionner un ouvrage est l'État Limite Ultime (ELU).

2. La modélisation des différentes charges

Pour cette étape, l'on utilisera un logiciel de calcul nommé **Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014**. À travers ce logiciel, l'on effectuera les différents cas de charges afin de pouvoir en sortir les différents diagrammes.



Figure 27 : Modélisation du pieu

- **Introduction des charges et des surcharges**
 - Introduction de la poussée de terre active du sol :

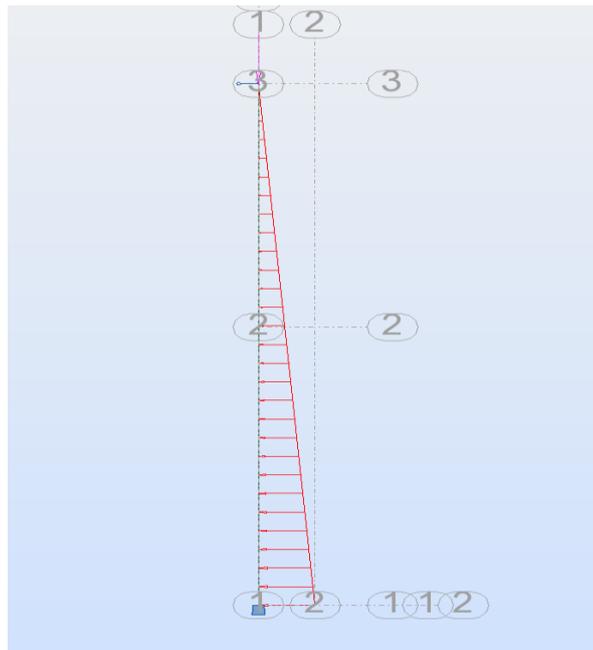


Figure 28 : Diagramme de la poussée active du sol

- Introduction de la poussée de terre passive ou butée du sol :

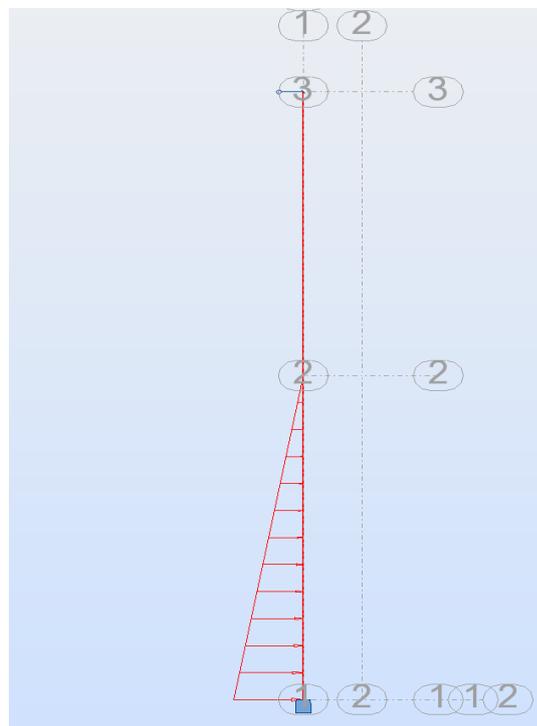


Figure 29 : Diagramme de la butée du sol

- Introduction de la charge supplémentaire :

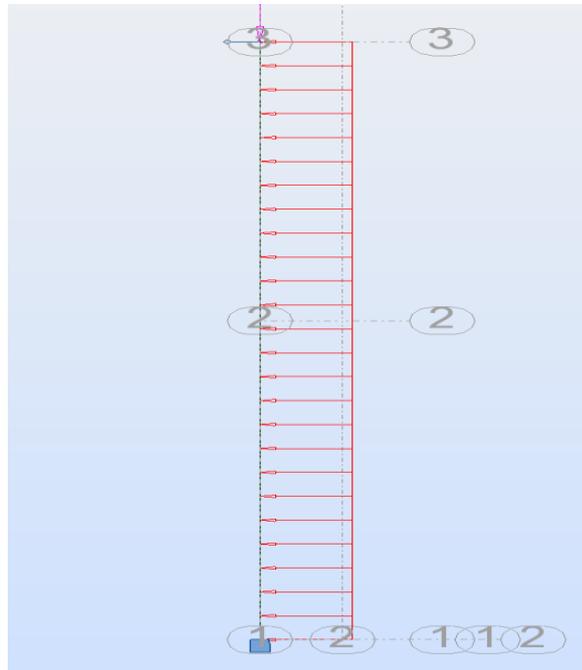


Figure 30 : Diagramme de la charge supplémentaire

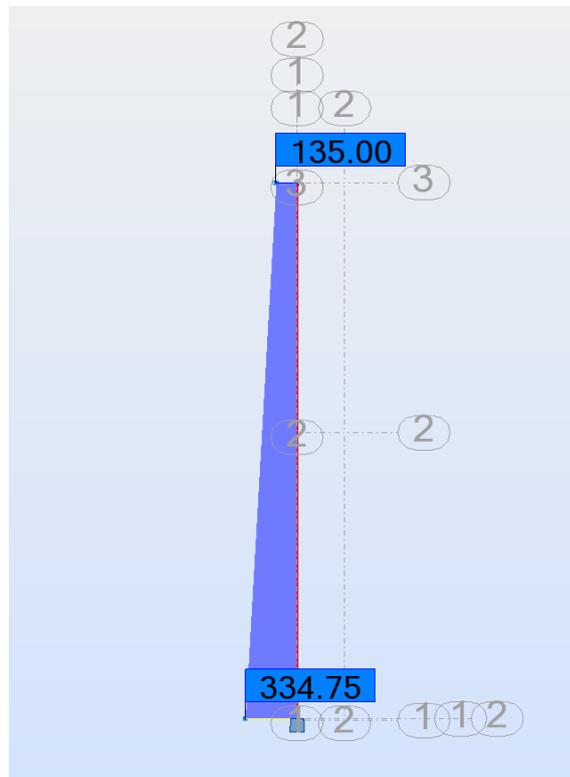


Figure 31: Diagramme de l'effort normal N sous la combinaison à l'ELU

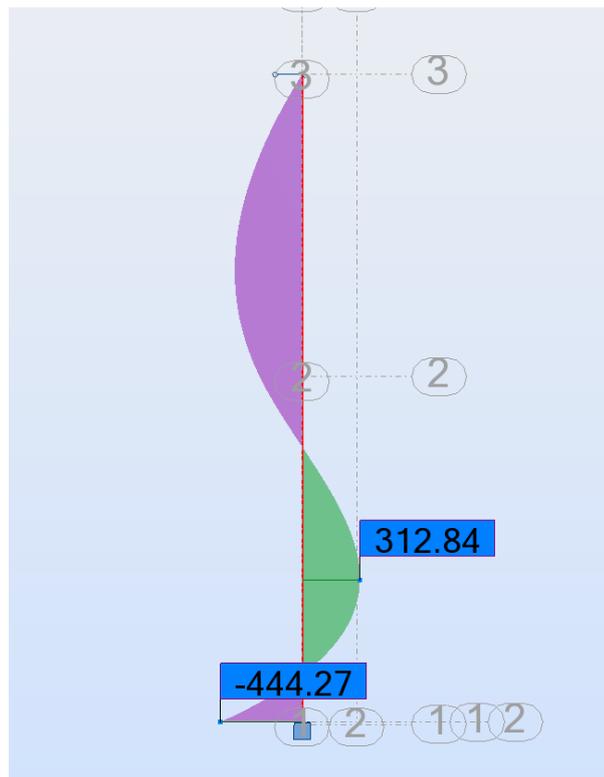


Figure 32 : Diagramme du moment M_y sous la combinaison à l'ELU

	Moment max M_y en kN.m	Effort normal N en kN
Pieux	447,27	334,75

Tableau 5 : Récapitulatif des moments et efforts sollicitant

À travers ces différents diagrammes, nous pouvons ainsi relever les différentes sollicitations de notre pieu. Le tableau ci-dessus quant-à-lui nous présente les différentes valeurs maximales de ces sollicitations.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre nous a permis d'identifier et de définir les différentes charges appliquées à notre structure. Ainsi donc nous avons pu modéliser et déterminer les différentes valeurs



des différentes sollicitations. Le chapitre suivant consistera à se servir de ces différentes données pour effectuer le dimensionnement de notre paroi.

CHAPITRE 6 : DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Introduction

Le dimensionnement technique est une étape cruciale de tout projet dans le domaine du génie civil. En effet il vise à garantir la stabilité, la pérennité et la sécurité des ouvrages face aux charges et différentes sollicitations auxquelles la structure est soumise. Un dimensionnement inadapté pourrait entraîner des défaillances structurelles, compromettant ainsi la durabilité du projet ainsi que la sécurité des usagers.

C'est dans cette optique que nous avons dans les chapitres précédents explorer les différentes méthodes de soutènement existantes, en analysant leurs principes, avantages et limites. Après avoir mené une analyse détaillée, nous avons sélectionné la méthode des pieux sécants interloqués comme solution optimale pour notre projet, en tenant compte des contraintes du site et des exigences structurelles. De plus, une évaluation rigoureuse des charges appliquées à la paroi a été réalisée afin de garantir la fiabilité des calculs.

Ce dernier chapitre sera donc consacré au dimensionnement technique et à la simulation de cette solution. Nous y présenterons les hypothèses de conception, les calculs structurels ainsi que les analyses numériques visant à valider la stabilité et l'efficacité du soutènement.

I. DIMENSIONNEMENT DES PIEUX INTERLOQUÉS

Le dimensionnement sera effectué selon le **BAEL 91 modifié 99**.

- La résistance du béton est de **30 MPa**.
- Les barres d'aciers utilisées sont des barres **HA500**.
- La fissuration est jugée **peu préjudiciable**.

1. Vérification par rapport aux facteurs externes

Dans l'évaluation de la stabilité de notre paroi face aux facteurs externes, nous allons analyser :

- La stabilité contre le glissement horizontal.
 - La stabilité contre le renversement.
- Vérification de la stabilité contre le glissement horizontal

Elle consiste à s'assurer que notre paroi ne se déplace pas latéralement sous l'effet des forces auxquelles elle est soumise. Pour ce faire l'on calcule le rapport entre la somme des actions stabilisantes (les forces qui s'opposent au déplacement) et la somme des actions renversantes (les forces qui auront tendance à déplacer la structure). Ce rapport est appelé **facteur de sécurité (FS)**.

$$F.S = (c.d + F_v. \tan \delta) / F_h > 1,5 \quad , \text{ avec } \delta = (2/3) \phi$$

c : La cohésion du sol

d : Le diamètre du pieu

F_h : Les forces horizontales

F_v : Les forces résistantes

δ : L'angle de friction

Si le facteur de sécurité est :

- Supérieur au facteur admissible cela signifie que notre paroi résiste au glissement.
- Inférieur ou égal cela signifie que notre paroi ne résiste pas au glissement. Dans ce cas, l'on prendra des mesures préventives telles que **l'augmentation de la profondeur d'encastrement, l'ajout de butons** ou encore **l'ajout des tirants**.

- Calcul des forces horizontales

- La poussée horizontale :

$$P_a = 0,5 \times \gamma \times H^2 \times K_a \text{ avec } K_a = 0,33$$

$$P_a = 0,5 \times 18 \times 12^2 \times 0,33$$

$$P_a = 427,68 \text{ kN/ml}$$

- La charge supplémentaire

$$Q = K_a \times H \times q$$

$$Q = 0,33 \times 12 \times 80$$

$$Q = 316,8 \text{ kN/ml}$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = P_a + Q$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = 427,68 + 316,8$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = 744,48 \text{ kN/ml}$$

- Calcul des forces résistantes

- La butée :

$$P_p = 0,5 \times \gamma \times H^2 \times K_p$$

$$P_p = 0,5 \times 18 \times 6,4^2 \times 3$$

$$P_p = 1105,92 \text{ kN}$$

- Le poids propre:

$$P = A \times H \times \gamma$$

$$P = 0,5026 \times 12 \times 25$$

$$P = 150,8 \text{ kN}$$

- Le poids propre de la poutre

$$p = \gamma \times l \times h$$

$$p = 25 \times 0,8 \times 0,6$$

$$p = 12 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = P_p + P + p$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = 1105,92 + 150,8 + 12$$

$$\Sigma \text{ Forces horizontales} = 1268,72 \text{ kN/ml}$$

- Calcul du facteur de sécurité

$$F.S = (c.d + F_v \cdot \tan \delta) / F_h$$

$$FS = (20 \times 0,6 + 1268,72) / 744,28, \text{ avec } \delta = 2 \times 30/3$$

$$FS = 1,72 > 1,5$$

D'après nos calculs, notre structure résiste au glissement horizontal.

➤ Vérification de la stabilité contre le renversement

Cette étape consiste à vérifier que notre structure ne bascule pas sous l'effet des différentes charges qui lui sont appliquées. Elle permet de garantir la sécurité et la durabilité de la structure. Pour ce faire l'on calcule le rapport entre la somme des moments stabilisants (le moment des forces qui s'opposent au renversement) et la somme des moments renversants (le moment des forces qui auront tendance à renverser la structure). Ce rapport est appelé **facteur de sécurité (FS)**.

$$FS = ((\sum \text{Moments stabilisants}) / (\sum \text{Moments renversants})) \geq 1,5$$

Si le facteur de sécurité est :

- Supérieur au facteur admissible cela signifie que notre paroi résiste au renversement.
- Inférieur ou égal cela signifie que notre paroi ne résiste pas au renversement. Dans ce cas, l'on prend des mesures préventives telles que **l'augmentation de la profondeur d'encastrement, l'ajout de butons** ou encore **l'ajout des tirants**.

- Calcul des moments stabilisants

- Le moment de la poussée $M(P_p)$: $M(P_p) = P_p \times d$, avec $d = 1/3 H'$ et

$$H' = 12 - 5,60$$

$$M(P_p) = 1105,92 \times 6,4 / 3$$

$$M(P_p) = 2359,296 \text{ kN.m/ml}$$

- Le moment du poids propre : $M(P) = P \times d$, avec $d = 0$

$$M(P) = 150,8 \times 0$$

$$M(P) = 0$$

- Le moment du poids propre de la poutre : $M(p) = p \times d$, avec $d = 0$

$$M(p) = 12 \times 0$$

$$M(p) = 0$$

$$\sum \text{Moments stabilisants} = M(Pp) + M(P) + M(p)$$

$$\sum \text{Moments stabilisants} = 2359,296 + 0 + 0$$

$$\sum \text{Moments stabilisants} = \mathbf{2359,296 \text{ kN.m/ml}}$$

- Calcul des moments renversants
- Le moment de la poussée active $M(Pa)$: $M(Pa) = Pa \times d$, avec $d = 1/3 H$

$$M(Pa) = 427,68 \times 5,6 / 3$$

$$M(Pa) = \mathbf{798,336 \text{ kN.m/ml}}$$

- Le moment de la charge supplémentaire : $M(Q) = Q \times d$, avec $d = 1/2 H$

$$M(Q) = 316,8 \times 12 / 2$$

$$M(Q) = \mathbf{1900,8 \text{ kN.m/ml}}$$

$$\sum \text{Moments renversants} = M(Pa) + M(Q)$$

$$\sum \text{Moments renversants} = 798,336 + 1900,8$$

$$\sum \text{Moments renversants} = \mathbf{2699,136 \text{ kN.m/ml}}$$

- Calcul du facteur de sécurité

$$F.S = \sum \text{Moments stabilisants} / \sum \text{Moments renversants}$$

$$FS = 2359,296 / 2699,136$$

$$FS = \mathbf{0,87 < 1,5}$$

D'après nos calculs, notre structure ne résiste pas au renversement. Pour pallier cela, **des butons d'un diamètre de 60 cm** seront ajoutés en tête pour bloquer le renversement.

2. Vérification par rapport aux facteurs internes

➤ Vérification à la flexion composée

La vérification à la flexion composée consiste à analyser une structure soumise simultanément à un effort normal N et à un moment de flexion. Elle permet de vérifier que les contraintes dans le béton et l'acier respectent les limites admissibles afin de garantir la sécurité et la stabilité. Pour ce faire l'on détermine le rapport entre l'effort axial et l'effort axial résistant, et l'on ajoute à ce résultat le rapport entre le moment de flexion et le moment de flexion résistant. Ce rapport doit être **inférieur à 1**.

$$\left(\frac{N_{ed}}{N_{rd}} \right) + \left(\frac{M_{ed}}{M_{rd}} \right) < 1$$

$$N_{rd} = f_{cd} \cdot A_c + f_{yd} \cdot A_s$$

$$M_{rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z$$

f_{cd} : Résistance de calcul du béton

f_{yd} : Résistance de calcul de l'acier

N_{rd} : Effort normal résistant

M_{rd} : Moment résistant

A_c : L'aire de la section comprimée du béton

N_{ed} : Effort normal

M_{ed} : Moment fléchissant

Pour vérifier notre structure à la flexion composée, nous allons suivre la démarche suivante :

- Condition de contrainte maximale dans le béton

Cette condition consiste à vérifier que le béton peut reprendre la contrainte qui lui est appliquée.

Elle se traduit par : $\sigma_c < f_{cd}$

- Calcul de l'excentricité

L'excentricité e est la distance entre la ligne d'action d'une charge appliquée et un point de référence spécifique (généralement l'axe de symétrie d'une section transversale d'un élément structurel).

$$e = M / N$$

e : L'excentricité (en mètres),

M : Le moment fléchissant (en Newton-mètre),

N : La force axiale (en Newtons).

D'après la modélisation effectuée sur le logiciel Robot, le moment fléchissant maximal M_{ed} est de 444,27 kN.m et la force axiale maximale N_{ed} est de 334,75 kN.

$$e = 444,27 / 334,75$$

$$e = 1,33 \text{ m} = 133 \text{ cm}$$

- Calcul du moment total

$$M_{tot} = M + e.N$$

$$M_{tot} = 444,27 + 1,33 \times 334,75$$

$$M_{tot} = 889,4875 \text{ kN.m}$$

- Calcul du module de résistance

$$W = \pi.D^3 / 32$$

$$W = \pi \times 0,8^3 / 32$$

$$W = 0,05 \text{ m}^3$$

- Calcul de la contrainte dans le béton

$$\sigma_c = (N/A) + (M_{tot} / W)$$

$$\sigma_c = (334,75 / 0,5026) + (889,4675 / 0,05)$$

$$\sigma_c = 18455,39 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_c = 18,455 \text{ MPa}$$

- Calcul de f_{cd}

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

$$f_{cd} = 30 / 1,5$$

$$f_{cd} = 20 \text{ MPa}$$

D'après nos résultats, $\sigma_c < f_{cd}$

Cela signifie que la contrainte dans le béton est respectée.

- Vérification du moment résistant ultime
- Calcul de l'axe neutre

$$x = A_s \cdot f_{yd} / 0,85 \cdot f_c \cdot d$$

Comme section d'acier nous prendrons $A_s = 36,19 \text{ cm}^2$

$$x = (36,18 \times 435) / (0,85 \times 20 \times 80)$$

$$x = 11,57 \text{ cm}$$

- Calcul du bras de levier

$$z = d - 0,5 \cdot x$$

$$z = 80 - 11,57 \times 0,5$$

$$z = 74,215 \text{ cm}$$

$$z = 0,74215 \text{ m}$$

- Calcul du moment résistant

$$M_{rd} = f_{yd} \cdot A_s \cdot z, \text{ avec } \eta = 0,85$$

$$M_{rd} = 435 \times 0,003619 \times 0,74215$$

$$M_{rd} = 1,168 \text{ MN.m}$$

$$M_{rd} = 1168,02 \text{ kN.m}$$

D'après nos résultats, $M < M_{rd}$

- Calcul de l'effort normal résistant

$$N_{rd} = f_{cd} \cdot A_c + f_{yd} \cdot A_s \text{ avec } A_c = \pi \cdot x \cdot (2r - x) / 2$$

$$N_{rd} = 20 \times [\pi \times 0,01157 \times (2 \times 0,40 - 0,01157)] + 435 \times 0,003619$$

$$N_{rd} = 20 \times 0,1243,65 + 435 \times 0,003619$$

$$N_{rd} = 2,4487 + 1,5742$$

$$N_{rd} = 4,02 \text{ MN}$$

$$N_{rd} = 4023 \text{ kN}$$

$$N_{ed} < N_{rd}$$

$$((N_{ed} / N_{rd}) + (M_{ed} / M_{rd}))$$

$$(334,75 / 4023) + (444,27 / 1168,02) = 0,46 < 1$$

$$((N_{ed} / N_{rd}) + (M_{ed} / M_{rd})) < 1$$

Notre structure est donc vérifiée à la flexion composée.

$$A_s = 0,72\% A_c$$

$$A_s = 36,19 \text{ cm}^2 \Rightarrow 18 \text{ barres de diamètre } 16.$$

➤ Vérification au flambement

On parle de flambement lorsqu'un élément comprimé se déforme latéralement de manière excessive sous une charge de compression avant d'atteindre sa résistance ultime. La vérification au flambement permet donc de s'assurer que notre structure ne sera pas **instable** sous l'effet d'une charge axiale. Elle est donnée par :

$$N_{ed} \leq 0,6 N_{cr}$$

N_{ed} : Effort normal de compression (kN)

N_{cr} : Effort normal critique (kN)

- Longueur de flambement L_{eq}

Le pieu est articulé en tête et encastré à la base, donc : $L_{eq} = 0,7 L$

$$L_{eq} = 0,7 \times 12$$

$$L_{eq} = 8,4 \text{ m}$$

- Calcul du rayon de giration i

$$i = d/4$$

$$i = 0,8/4$$

$$i = 0,2$$

- Calcul de l'élancement λ

L'élancement λ est donné par : $\lambda = L_{eq} / i$

$$\lambda = 8,4 / 0,2$$

$$\lambda = 42$$

- Vérification selon le BAEL

Selon le BAEL, un pieu est soumis au flambement si : $\lambda \leq \lambda_{lim}$

$$\text{Avec } \lambda_{lim} = 90 \times \sqrt{(f_{cd}/f_{yd})}$$

- Résistance du béton

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma$$

$$f_{cd} = 30 / 1,5$$

$$f_{cd} = 20 \text{ MPa}$$

- Résistance de l'acier

$$f_{yd} = 500 / 1,15$$

$$f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

- Calcul de λ_{lim}

$$\lambda_{lim} = 90 \times \sqrt{(20/435)}$$

$$\lambda_{lim} = 19,3$$

- Comparaison entre λ_{lim} et λ

$$\lambda > \lambda_{lim}$$

Cela signifie donc que notre pieu est soumis au flambement selon le BAEL. Nous allons donc vérifier cette inégalité $N_{ed} \leq 0,6 N_{cr}$ afin de s'assurer que notre pieu résiste au flambement.

- Calcul de l'effort critique N_{cr}

Selon le BAEL, on a :

$$N_{cr} = (\pi^2 EI) / L_{eq}^2 \quad , \text{ avec } E = 11000f_{cj}^{1/3} \text{ pour le béton armé selon le BAEL.}$$

- Le moment d'inertie I

Pour une section circulaire, le moment d'inertie est :

$$I = \pi d^4 / 64$$

$$I = \pi \times 0,8^4 / 64$$

$$I = 0,0201 \text{ m}^4$$

- Calcul de l'effort critique

$$N_{cr} = \pi^2 \times 1000 (11000 \times 30^{1/3}) \times 0,02011 / (8,4^2)$$

$$N_{cr} = 96143 \text{ kN}$$

- Vérification

$$N_{ed} = 334,75 \times 1,35$$

$$0,6 N_{cr} = 0,6 \times 96143$$

$$0,6 N_{cr} = 57685,8 \text{ kN}$$

$$N_{ed} \leq 0,6 N_{cr}$$

Notre pieu résiste donc au flambement selon le BAEL.

II. SIMULATION ET ESTIMATION DE LA PAROI DE SOUTÈNEMENT

La simulation est une étape importante dans le domaine de la construction. Elle permet d'analyser le comportement de la structure dans différents contextes. C'est dans cette optique que nous avons décidé de faire une modélisation proprement dite de notre structure afin d'analyser son comportement.

Cette modélisation peut se diviser en deux grandes étapes que sont la phase modélisation et la phase analyse.

1. La phase de modélisation

Cette phase consistera à modéliser notre paroi ainsi qu'à la soumettre aux différentes actions agissantes sur celles-ci.

Elle comporte :

- **Les lignes de construction**

Cette première étape consiste à définir les différentes lignes de construction. Ces lignes nous serviront de repère durant notre travail de modélisation. Pour ce faire, l'on clique sur l'onglet **lignes de références**  situé en haut à gauche. Après y avoir cliqué, nous entrons les différentes données tels que les distances entre axes, ...

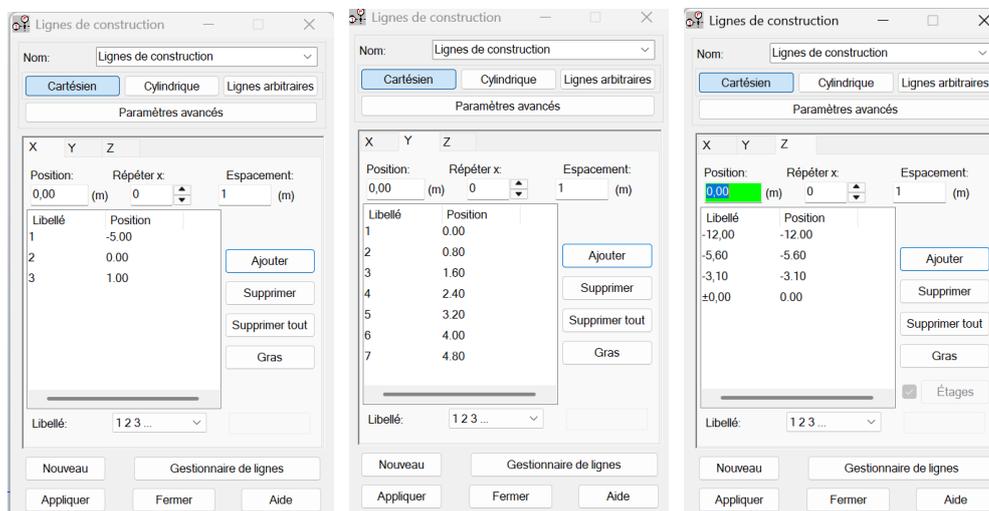


Figure 33 : Coordonnées de nos différentes lignes de construction

- **La paroi**

Cette étape consiste à modéliser la structure principale. Notre structure est un mur de pieux sécants, cela étant le modèle se rapprochant le plus de notre structure est un voile. Pour ce faire, l'on clique sur l'icône **structures** puis sur **voile**. Une fois effectuée, l'on remplit les différentes caractéristiques de notre voile : dimensions, coordonnées, classe du béton ... Après avoir modéliser notre paroi, l'on modélise les butons à travers des barres dans l'icône **barres** .

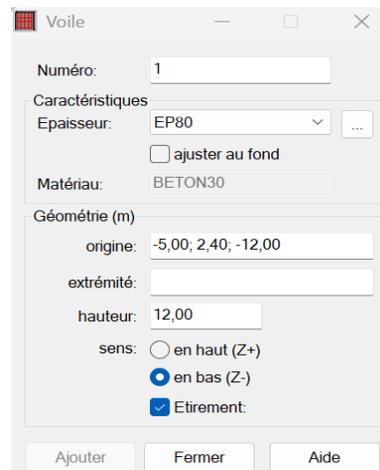


Figure 34 : Interface voile

- **Les appuis**

Cette étape consiste à modéliser les différents appuis de notre structure afin de bien modéliser les différentes conditions de stabilité. Pour ce faire, l'on clique sur **appuis** , puis l'on choisit les appuis reflétant les conditions réelles de notre structure. Étant donné que notre structure a une partie ancrée dans le sol, cela signifie qu'elle est encastree en bas. Notre structure possède aussi une poutre en tête qui bloque les déplacements selon X et Y. Pour ce faire nous avons utilisé un encastrement en bas et avons créé un appui respectant les conditions réelles.

NB : Il faut faire attention aux appuis que l'on choisit :

- Nodaux : Pour des structures où les charges sont concentrées en un point tel que les barres, poteaux...
- Linéaires : Pour des éléments dont les charges sont réparties le long d'une ligne tel que les poutres, les voiles, ...
- Surfaciques : Pour des éléments dont les charges sont réparties sur une zone étendue tel que les dalles, ...

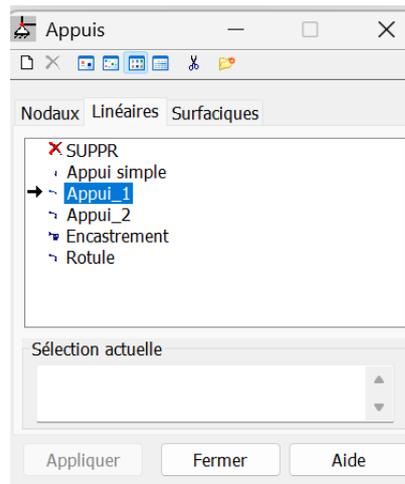


Figure 35 : Interface appuis

- **Les charges et combinaisons de charges**

L'application des charges est une étape très importante dans le processus de modélisation. En effet c'est sous l'action de ces différentes charges que l'on observera le comportement de la structure. Une bonne modélisation de celle-ci nous offre un modèle encore plus rapproché de la réalité. Pour ce faire l'on clique sur **cas de charges**  et l'on crée les différents cas de charges. Pour ajouter une charge à un cas de charge, l'on active ce cas de charges puis clique sur **définir charges** . Au cas où l'on ne trouve pas la charge idéale, l'on clique sur **autres charges**  afin de pouvoir voir une autre panoplie de charges. Une fois la charge choisie, l'on entre ses différentes caractéristiques et l'applique à la structure. Une fois toutes les charges insérées, l'on clique sur l'icône **chargements** puis sur **combinaisons manuelles**. Une fois effectué, l'on sélectionne les différentes charges faisant partie de notre combinaison puis l'on insère les coefficients. Une fois cette action terminée, l'on ferme la fenêtre combinaisons manuelles et clique sur **tableau-combinaisons** pour vérifier que nos combinaisons sont bonnes.

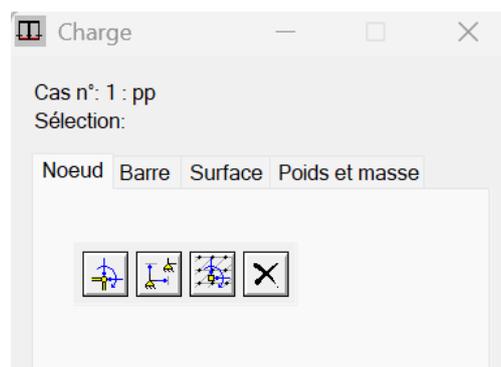
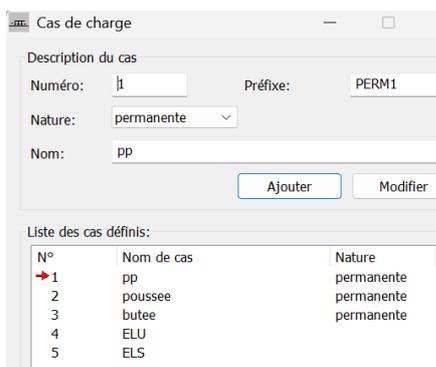


Figure 36: Interface cas de charges

Figure 37 : Interface définir charge

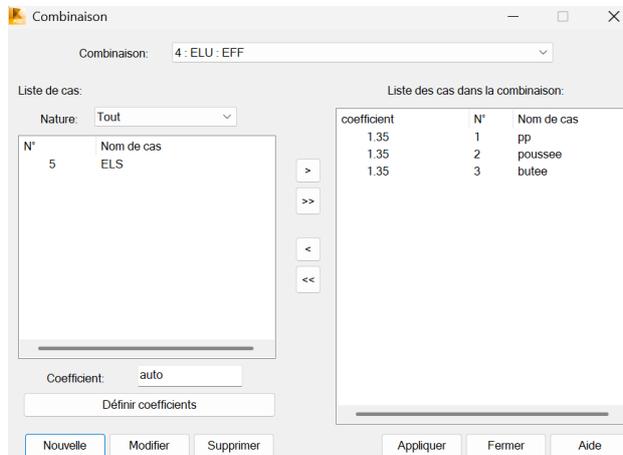


Figure 38 : Interface définir combinaisons

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Type de la	Nature du cas	Définition
4	ELU	ison non-lin.	EFF		$(1+2+3)*1.35$
5	ELS	ison non-lin.	DEP		$(1+2+3)*1.00$

Figure 39 : Interface tableau des combinaisons

2. La phase d'analyse

Cette partie concerne la partie analyse de la modélisation. En effet avant de passer au dimensionnement, l'on doit vérifier les déformations à l'ELS afin d'être sûr qu'elles soient dans l'ordres des déformations acceptables.

- **Les déformations**

La vérification des déformations est une phase vraiment cruciale dans la modélisation. En effet, celles-ci sont le résultat du comportement de notre structure sous l'influence des différentes charges. Pour ce faire, l'on active la combinaison ELS puis l'on lance le calcul à travers l'icône . Une fois le calcul terminé, l'on clique sur l'icône **résultats**, puis sur **diagrammes – barres**. Une fois effectuée, l'on clique sur **Déformée** et l'on active la déformée. Pour une meilleure vision des zones de déformations, l'on clique sur **cartographies – barres** à la place de diagrammes - barres. Une fois cliqué, l'on clique sur déformation. La différence entre cartographie – barre et diagramme – barre est que sur cartographie – barre l'on a une carte avec la valeur des déformations en tous point de la structure.

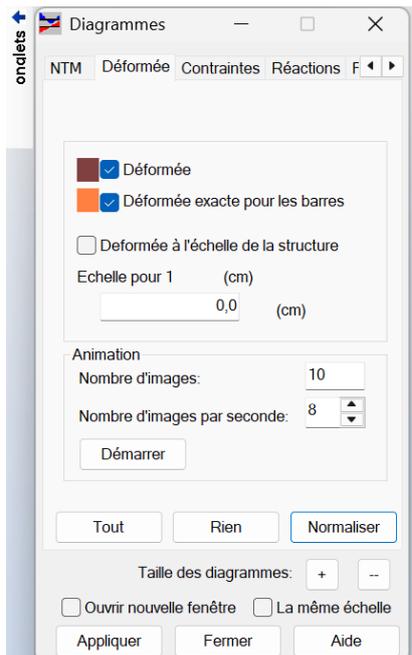


Figure 40 : Interface diagrammes

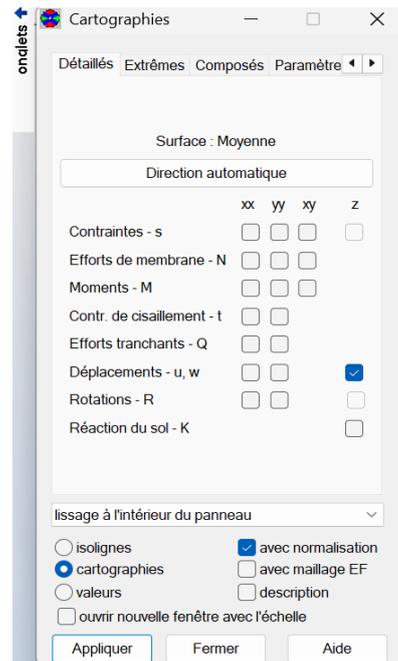


Figure 41 : cartographies

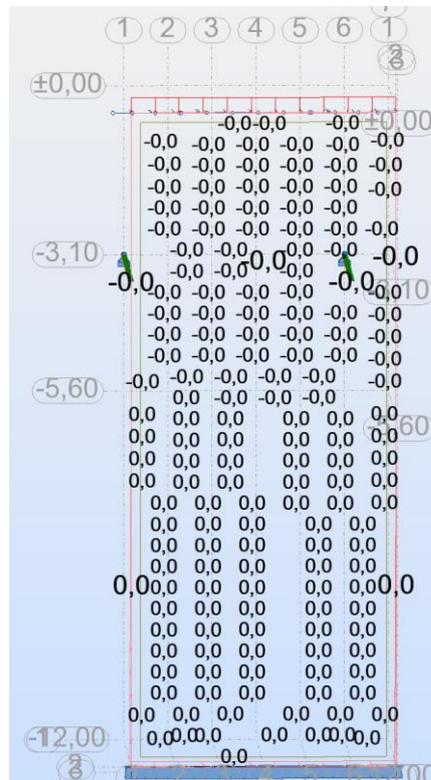


Figure 42 : Cartographie des déplacements

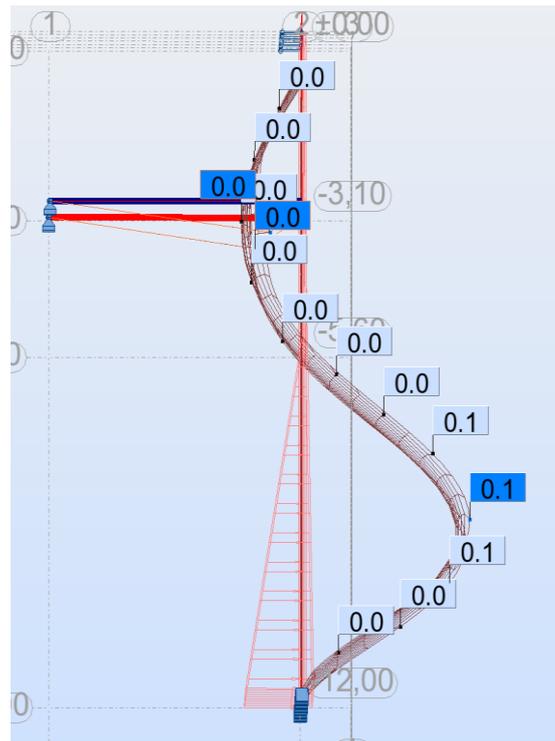


Figure 43 : Diagrammes des déplacements

À travers ces différents diagrammes, nous observons que le déplacement est pratiquement nul. Cela signifie que notre structure supporte toutes les charges auxquelles elle est soumise sans pour autant se déformer au-delà de l'admissible.

3. Devis quantitatif et estimatif

Après avoir modéliser notre paroi de soutènement, nous allons effectuer le DQE de notre méthode.

Article	CONCEPTION DES PIEUX DE FONDATION PAR LE CLIENT				
	DESCRIPTION	Unité	Quantité	Prix Unitaire	Montant Total
A	TRANSPORT POUR LA MACHINE À PIEUX				
A.1	Mobilisation de l'équipement		1	1 000 000	1 000 000
A.2	Démobilisation de l'équipement		1	1 000 000	1 000 000
B	CONCEPTION DE PIEUX Ø800 mm				
B.1	Pieux	ml	1560	60 000	93 600 000
C	FOURNITURE DE MATERIEL				
C.1	Fourniture de bentonite	T	12	250 000	3 000 000
C.2	Mélange de bentonite	T	12	100 000	1 200 000

C.3	Fourniture d'acier de renfort pour les cages à pieux	T	73	550 000	40 150 000
C.4	Fourniture du béton + pompe pour le coulage des pieux	m ³	1584,14	70 000	63 792 400
D	PRÉPARATION ET INSTALLATION DU MATÉRIEL				
D.1	Préparation de la cage	cage	113	50 000	5 650 000
D.2	Coulage de béton	cage	226	25 000	5 650 000
MONTANT TOTAL					331 259 800
TVA 18%					59 626 764
MONTANT TOTAL TTC					390 886 564

CONCLUSION PARTIELLE

Il était question dans ce chapitre, de dimensionner notre structure selon le BAEL 91. Ce dimensionnement s'est fait en deux étapes. La première consistait à vérifier manuellement notre structure à travers les données obtenues dans le logiciel ROBOT 2014. La seconde consistait à simuler notre structure à l'aide du logiciel ROBOT 2014, afin de vérifier le dimensionnement de notre structure et aussi d'effectuer un devis.

CONCLUSION

Cette partie nous a permis d'analyser les différentes charges appliquées à notre paroi et d'en déduire les sollicitations structurelles. Le dimensionnement technique et la simulation par le logiciel, nous ont permis de vérifier la résistance de notre paroi en conformité avec les normes en vigueur.

Les résultats obtenus confirment la stabilité de notre méthode et la pertinence des choix techniques effectués. Ces analyses fournissent ainsi une base solide pour la mise en œuvre du projet et d'éventuelles optimisations futures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans un contexte urbain où la stabilité des infrastructures est primordiale, les ouvrages de soutènement jouent un rôle clé dans la sécurisation des ouvrages souterrains. C'est dans ce cadre que nous avons mené une étude visant à identifier et à mettre en œuvre une solution optimale de paroi de confortement pour un bâtiment de type R+7 avec deux sous-sols. Le choix de cette paroi devait intégrer les contraintes techniques, économiques et environnementales, l'objectif principal étant de proposer une paroi de soutènement pour un bâtiment de type R+7 avec deux niveaux de sous-sols dans la commune du Plateau. Ainsi, l'analyse comparative des différentes techniques de soutènement a conduit au choix de la méthode des pieux interloqués. Cette méthode est reconnue pour sa capacité à résister efficacement aux poussées des terres et aux charges appliquées, pour sa bonne gestion de la nappe phréatique et pour son influence minimale sur son environnement. Le dimensionnement de cette solution a été effectué conformément aux normes en vigueur notamment le BAEL, permettant ainsi de garantir la fiabilité structurelle et la sécurité de l'ouvrage. Les résultats obtenus confirment la pertinence et l'efficacité de cette solution dans des conditions similaires. Ils soulignent aussi l'importance d'une approche intégrée combinant études géotechniques, calculs structurels et simulations numériques pour optimiser la conception des ouvrages de soutènement. Toutefois, certaines perspectives d'amélioration peuvent être envisagées. Une modélisation à l'aide de modèles numériques plus poussés aiderait à mieux appréhender les interactions sol-structure afin d'affiner davantage les résultats et d'optimiser le dimensionnement. Par ailleurs, une étude plus approfondie des aspects environnementaux et économiques des différentes solutions pourrait contribuer à un choix encore plus éclairé en matière de paroi de confortement. En définitive, ce travail met en lumière les défis inhérents à la conception des ouvrages de soutènement en milieu urbain et l'importance d'une approche méthodique et minutieuse pour garantir leur stabilité et leur pérennité. Il ouvre également la voie à de nouvelles pistes de réflexion sur l'évolution des techniques de soutènement face aux enjeux actuels du génie civil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- admin1369. « Le Jet Grouting, une technique pour consolider les sols », 4 mai 2022. <https://www.soletanche-bachy.com/offer-portfolio/jet-grouting/>.
- « Climat Le Plateau: Température de l'eau à, Température moyenne Le Plateau, Pluviométrie, diagramme ombrothermique pour Le Plateau ». Consulté le 18 novembre 2024. <https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire/abidjan/le-plateau-883883/>.
- Fixot, Jean. « Analyse comparative de la norme NF P 94 282 sur les écrans de soutènement », 16 décembre 2013, 189.
- ———. « Analyse Comparative de La Norme NF P 94 282 Sur Les Écrans de Soutènement | Policy Commons ». Consulté le 18 décembre 2024. <https://policycommons.net/artifacts/15764958/analyse-comparative-de-la-norme-nf-p-94-282-sur-les-ecrans-de-soutenement/16655815/>.
- « Jet Grouting ». In *Wikipédia*, 13 février 2024. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Jet_Grouting&oldid=212429880.
- Keller France. « Palplanches », 10 juillet 2018. <https://www.keller-france.com/expertise/techniques/palplanches>.
- « La paroi ancrée ABC-MACONNERIE ». Consulté le 28 novembre 2024. <https://www.abc-maconnerie.com/guide-des-murs-de-soutenement/part-2-mise-en-oeuvre-de-murs-de-soutenement/la-paroi-ancree.html>.
- « La paroi moulée, une technique de fondations et soutènement ». Consulté le 3 décembre 2024. <https://www.soletanche-bachy.com/offer-portfolio/paroi-moulee/>.
- « Le Plateau ». In *Wikipédia*, 11 mai 2024. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Le_Plateau&oldid=215005156.
- « Les murs en parois préfabriquées Le guide de la (...) ». Consulté le 3 décembre 2024. .
- « Palplanche ». In *Wikipédia*, 9 octobre 2024. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Palplanche&oldid=219310083>.

- « Paroi Berlinoise - Franki Foundations Belgium - Atlas Fondations ». Consulté le 29 novembre 2024. <https://www.atlas-fondations.fr/fr/techniques/parois/autres-parois/paroi-berlinoise>.
- « Paroi clouée - Franki Foundations Belgium - Atlas Fondations ». Consulté le 29 novembre 2024. <https://www.atlas-fondations.fr/fr/techniques/parois/autres-parois/paroi-clouee>.
- « Paroi moulée ». In *Wikipédia*, 23 janvier 2024. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Paroi_moul%C3%A9e&oldid=211777940.
- rédaction, L'équipe de. « Quel est le rôle d'un maître d'oeuvre et d'un maître d'ouvrage ? » *Blog Obat* (blog), 13 janvier 2023. <https://www.obat.fr/blog/maitre-doeuvre-maitre-douvrage/>.
- « Rezo-Ivoire .net | presentation et historique de la commune du plateau ». Consulté le 10 décembre 2024. <https://rezoivoire.net/ivoire/villes-villages/345/presentation-et-historique-de-la-commune-du-plateau.html>.
- « Soletanche Bachy Fondations Spéciales - technique de soutènements en pieux sécants ». Consulté le 2 décembre 2024. <https://sbfs.fr/techniques/soutenements-en-pieux-secants/>.
- Versus Challenge Tech. Consulté le 28 novembre 2024. https://www.facebook.com/permalink.php/?story_fbid=1589147244572824&id=1214578155363070.



ANNEXES

ANNEXE 1 : Images de notre projet

ANNEXE 2 : Résultats graphiques des essais pressiométriques Ménard

ANNEXE 3 : Résultats graphiques des essais de pénétration dynamique

ANNEXE 4 : Implantation des sondages

ANNEXE 5 : Les plans architecturaux de notre projet

ANNEXE 6 : Le plan d'exécution de la solution proposée pour notre projet

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

SOMMAIRE.....	i
DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
AVANT-PROPOS.....	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des sigles et abréviations.....	ix
RÉSUMÉ.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	4
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	5
I. HISTORIQUE ET OBJECTIFS.....	5
1. Historique de l'entreprise.....	5
2. Missions et objectifs d'ICCATEX International	5
3. Quelques projets réalisés par ICCATEX International	6
II. ICCATEX ET SON ORGANISATION HIÉRARCHIQUE	8
1. Situation géographique et coordonnées.....	8
2. Organisation hiérarchique	8

CONCLUSION PARTIELLE	11
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU PROJET	12
I. PRESENTATION DU SITE : LE PLATEAU.....	12
1. Localisation du site.....	12
2. Environnement physique.....	12
II. PRESENTATION DU PROJET	14
1. L'objet	14
2. Situation du site.....	15
3. Missions de l'entreprise	16
III. LE PLAN D'ACTION	16
1. Les acteurs du projet	16
CONCLUSION PARTIELLE	20
CONCLUSION	20
DEUXIÈME PARTIE : ANALYSES ET CHOIX DE LA MÉTHODE ADÉQUATE POUR NOTRE STRUCTURE	22
CHAPITRE 3 : LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DE PAROIS DU SOL.....	23
I. CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE RENFORCEMENT DU SOL	23
1. Définition	23
2. Classification des méthodes	24
II. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DE PAROIS	25
1. Les méthodes actives	25
2. Les méthodes passives.....	31
2. Les méthodes combinées.....	36
CONCLUSION PARTIELLE	42

CHAPITRE 4 : ANALYSE COMPARÉE DES DIFFERENTES METHODES DE RENFORCEMENT DE PAROI.....	43
I. CRITÈRES DE SÉLECTION DES MÉTHODES.....	43
1. Les conditions géotechniques.....	43
2. Conditions économiques et socio-environnementales	46
II. COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES ET CHOIX DE LA PLUS ADAPTÉE.....	47
CONCLUSION PARTIELLE	53
CONCLUSION	53
TROISIÈME PARTIE : DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE	54
CHAPITRE 5 : CALCULS ET MODÉLISATIONS DES CHARGES APPLIQUÉES À LA PAROI.....	55
I. LES DIFFÉRENTES CHARGES AGISSANT SUR NOTRE PAROI DU SOL	55
1. Les charges permanentes.....	55
2. Les surcharges	58
II. MODÉLISATIONS DES DIFFÉRENTES CHARGES APPLIQUÉES À NOTRE PAROI.....	59
1. Combinaisons des charges	59
2. La modélisation des différentes charges	60
CONCLUSION PARTIELLE	63
CHAPITRE 6 : DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE ET SIMULATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE.....	65
I. DIMENSIONNEMENT DES PIEUX INTERLOQUÉS.....	65
1. Vérification par rapport aux facteurs externes	66
2. Vérification par rapport aux facteurs internes.....	69
	90

II. SIMULATION ET ESTIMATION DE LA PAROI DE SOUTÈNEMENT	75
1. La phase de modélisation	76
2. La phase d'analyse.....	79
3. Devis quantitatif et estimatif	81
CONCLUSION PARTIELLE	82
CONCLUSION.....	82
CONCLUSION GÉNÉRALE	83
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
ANNEXES.....	86
ANNEXE 1 : Implantation des sondages	87
ANNEXE 2 : Résultats graphiques des essais pressiométriques Ménard	87
ANNEXE 3 : Résultats graphiques des essais de pénétration dynamique	87
ANNEXE 4 : Images de notre projet.....	87
ANNEXE 5 : Les plans architecturaux de notre projet	87
ANNEXE 6 : Le plan d'exécution de la solution proposée pour notre projet.....	87
TABLE DES MATIÈRES	88