الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي- تبسة

مقرر رقم : 191 مؤرخ في : 04 جوان 2025

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 والمؤرخ في 05ماي 2021المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

-وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرّخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدّكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرّخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و11 منه،

-وبموجب القرار رقم 1380 المؤرّخ في 09 أوت 2016 والمتضمّن مواءمة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا".

-وبموجب القرار رقم رقم 921 المؤرّخ في 25 أوت 2021 المعدل لملحق القرار 1080المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن مواءمة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا"، اختصاص جيوتقني

-وبعد الاطّلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم رقم 03 المؤرّخ في 12 ديسمبر 2024،

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيَّنُ بموجب هذا المقرّر لجنة مناقشة مذكّرة الماستر المحضّرة من طرف الطّالب (ة): حمايدية وفاء،

المولود (ة) بتاريخ 2002/02/10 بـ- تبسة ،

والموسومة بـ **Influence des variations du sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations des stations de métro : cas d'études métro d'Alger**

والمسجّل (ة) بمعهدالمناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللّقب	الرتبة	مؤسّسة الانتماء	الصّفة
1	براح ياسين	أستاذ محاضر - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	كرباطي نور رهواجة	أستاذ محاضر - ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	حمدان علي	أستاذ مساعد – أ-	جامعة العربي التبسي - تبسة	مساعد مشرف
4	بن غازي زياد	أستاذ محاضر - أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

المادة 3: يكلّف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيابتنفيذ هذا المقرّر الّذي يُسلّم نسخةٌ عنه إلى كلّ من الطّالب المعني والمشرف على المذكّرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرّر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في: 04 جوان 2025

عن المدير، وبتفويض منه

مدير معهد

مدير معهد المناجم
د.عولمي زوبير

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي تبسة
معهد المناجم

CS Scanned with CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة العربي التبسي- تبسة

مقرر رقم: 192 مؤرخ في: 04 جوان 2025

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 والمؤرخ في 05ماي 2021المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

-وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرّخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدّكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرّخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

-وبموجب القرار رقم 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة.

-وبموجب القرار رقم 375 المؤرّخ في 15 جوان 2020 المعدل لملحق القرار 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص جيوتقني

-وبموجب المقرّر رقم 192المؤرّخ في 2025/06/04 والمتضمّن تعيين لجنة مناقشة مذكّرة الماستر،

-وبعد الاطّلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرّخ في 2025/06/04

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى:يُرخّصُ للطالب(ة)حمايدية وفاء، المولود (ة) بتاريخ 2002/02/10بـ- تبسة ،بمناقشة مذكّرة الماستر والموسُومة بـ

Influence des variations du sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations des stations de métro : cas d'études métro d'Alger

المادة 2: يكلّف رئيس قسمالمناجم والجيوتكنولوجيابتنفيذ هذا المقرّر الّذي يسلّم نسخة عنه إلى الطّالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسّسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرّر ضمن الملفّ البيداغوجي للطّالب المعني وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في: 04 جوان 2025

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي تبسة

معهد المناجم

مدير معهد المناجم
فرعون لحي روبير

CS Scanned with CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
que Algérienne Dé mocratique Et Populai
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessa – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département Mines et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Géotechnique

Influence des variations de sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations des stations de métro : cas d'étude métro d'Alger

Par :

HAMAIDIA Wafa

Devant le jury :

Berrah Yacine	**Président**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Kerbati Noor Rahouadja	**Encadreur**	**MCB**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Benghazi Zied	**Examinateur**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Hamdane Ali	**Co-Encadreur**	**MAA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

موسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

انا الممضي أدناه،

السيد (ة). **حمايدية وفاء** الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : **طالبة**

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 110020036400570003 و الصادرة بتاريخ 2022.04.24

المسجل بمعهد :**المناجم** قسم : **جيوتقني**

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة ماستر) عنوانها :

Influence des variations de sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations des stations de métro : cas d'étude métro d'Alger.

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: **05.06.2025**

إمضاء المعني (ة)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة
معهد المناجم
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2024/2025Tébessa le : 05/06/2025

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

HAMAIDIA Wafa

Niveau : **2ème année master** Option : **Géotechnique**

Thème : **Influence des variations de sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations des stations de métro : cas d'étude métro d'Alger**

Nom et prénom de l'encadrant : **Kerbati Nour Rahouadja**

Co- Encadrant : **Hamdane Ali**

Chapitres réalisés	Signature de l'encadrant
Chapitre 1 : État de l'art	
Chapitre II: Contexte géologique du site	
Chapitre III: Contexte géotechnique du site	
Chapitre VI : Modélisation numérique, résultats et interprétations	

Dédicace

À celle qui m'a portée dans son cœur bien avant de me porter dans ses bras,

À celle dont les prières m'ont accompagnée dans chaque pas, À ma douce maman…

Tu as veillé sur moi quand tout le monde dormait,

tu as essuyé mes larmes en silence, et tu as cru en moi même lorsque je doutais de moi-même.

Maman, aucun mot ne saura jamais traduire ce que je te dois.

Cette étape de ma vie est le fruit de ton amour, de ta patience et de ton sacrifice infini.

À mon père, ce pilier discret mais solide, Toi qui t'es battu chaque jour pour m'offrir une vie digne et un avenir meilleur

, Ta fatigue a construit mes chances, ton silence a caché des milliers de luttes.

Papa, ce succès est aussi le tien. À mes chers frères et sœurs : Rzigue, Hiba et Achref. Merci pour votre affection, vos mots simples mais pleins de chaleur, pour votre présence dans les moments où j'en avais le plus besoin.

Et à mes amies et compagnons de route, Nour, Abir, Djihane, Israa, Chaïma, Safa, Batta, Rahma, Wafa et Kholoud, Vous avez mis de la lumière dans mes journées sombres, Vous avez partagé mes rires, mes doutes et mes espoirs. Merci d'avoir été là, tout simplement. Sans vous tous, cette étape n'aurait jamais eu la même saveur.

Ce travail vous est dédié, avec tout mon cœur.

Remerciements

Ma profonde gratitude est pour le bon dieu. Je remercie madame **Nour El Houda KERBATI** mon encadreure qui nous a donné beaucoup d'informations. Aussi tout particulièrement mon co-encadreur Monsieur **Ali HAMDANE**, maître de conférences de l'instutit des mines qui m'a accordé sa confiance dans l'élaboration de cette memoire. Tout en suivant de près ma démarche scientifique, il m'a fait partager son expérience enrichissante dans le domaine géotechnique et m'a prodigué de précieux conseils et encouragements pour mener à bien ce travail. Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepter d'examiner mon travail. Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à tous ceux qui m'ont aidé dans la Préparation de cette memoire collègues, techniciens et surtout à mes parents qui pousser et encourager pour mener mes études dans les meilleurs conditions.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif d'étudier le comportement et la stabilité d'une station de métro souterraine relevant du projet du métro d'Alger, située à proximité de l'aéroport Houari Boumediene, en combinant les données géologiques et géotechniques à une modélisation numérique via le logiciel PLAXIS 2D. Dans une première étape, une présentation générale du projet de métro a été faite, suivie d'une caractérisation détaillée du site d'implantation, en termes de formations géologiques, propriétés physiques et mécaniques des sols, et régime d'écoulement des eaux souterraines. L'étude s'est appuyée sur une modélisation numérique détaillée de la station à l'aide de la méthode des éléments finis, en simulant les différentes phases de creusement et de soutènement, tout en intégrant les effets des charges, des pressions hydrostatiques et des sollicitations sismiques. La réponse du sol et des structures a été analysée à travers l'évolution des contraintes, des déformations, des déplacements et de l'apparition des zones plastiques. Les résultats obtenus montrent que le comportement de l'ouvrage reste globalement stable, avec des déplacements et déformations dans des limites admissibles, assurant ainsi la sécurité de la structure. La modélisation confirme également l'efficacité du système de soutènement adopté (parois moulées, radier, butons successifs). En conclusion, l'étude démontre que l'utilisation de la modélisation numérique, basée sur des données géotechniques fiables, constitue un outil indispensable pour un dimensionnement sûr et optimisé des infrastructures souterraines complexes, telles que les stations de métro en milieu urbain.

الملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة سلوك واستقرار محطة مترو تحت أرضية تابعة لمشروع مترو الجزائر، تقع بمحاذاة مطار هواري بومدين، وذلك من خلال الجمع بين المعطيات الجيولوجية والجيوتقنية، واعتماد النمذجة العددية باستخدام برنامج PLAXIS 2D. تم في المرحلة الأولى تقديم لمحة عامة عن مشروع المترو وأهميته في السياق الحضري، ثم انتقلنا إلى توصيف شامل لموقع الدراسة من حيث التكوينات الجيولوجية والخصائص الجيوتقنية للتربة، بما في ذلك توزيع الطبقات، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، ونمط سريان المياه الجوفية. اعتمدت الدراسة على نمذجة عددية تفصيلية لمحطة المترو باستخدام طريقة العناصر المحدودة، حيث تم تمثيل مختلف مراحل الحفر والتدعيم، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير الأحمال، الضغوط الهيدروستاتيكية، والظروف الزلزالية. وقد تم تحليل الاستجابة البنيوية للتربة والمنشآت، من خلال تتبع تطور الضغوط، التشوهات، الإزاحات، وحالات الانهيار البلاستيكي في التربة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن تصرف المنشأة يظل ضمن الحدود الآمنة من حيث الاستقرار العام، وأن التصميم المعتمد يضمن مقاومة مناسبة للضغوط المختلفة، مع تسجيل إزاحات وتشوهات في مستويات مقبولة لا تهدد سلامة المنشأة. كما أكدت النمذجة فعالية نظام الدعم المعتمد (الجدران المقولبة، البلاطة السفلية، الدعامات المرحلية...) في السيطرة على تشوهات التربة. وعليه، خلصت الدراسة إلى أن استخدام النمذجة العددية بالاعتماد على معطيات جيوتكنيكية دقيقة يمثل أداة فعالة وضرورية لضمان تصميم محكم وآمن للمنشآت التحتية المعقدة، مثل محطات المترو في البيئة الحضرية.

Summary

This thesis aims to study the behavior and stability of an underground metro station from the Algiers Metro Project, located near Houari Boumediene Airport, by combining geological and geotechnical data with numerical modeling using PLAXIS 2D software. The first part of the work provides a general overview of the metro project, followed by a thorough characterization of the study site, including geological formations, physical and mechanical properties of the soil, and the groundwater flow regime. The core of the study involves detailed numerical modeling of the station using the finite element method, simulating the various excavation and support phases, and considering the effects of applied loads, hydrostatic pressures, and seismic actions. Soil and structural responses were analyzed through stress evolution, deformations, displacements, and the development of plastic zones. The results indicate that the structure remains globally stable, with displacements and deformations within acceptable limits, ensuring structural safety. The modeling also confirms the effectiveness of the chosen support system (diaphragm walls, base slab, sequential struts). In conclusion, the study demonstrates that numerical modeling based on reliable geotechnical data is an essential tool for safe and optimized design of complex underground infrastructure, such as metro stations in urban environments.

Sommaire

	Introduction Générale	**1**
	Chapitre I : État de l'art	
1	Introduction	**2**
2	Généralités sur les projets de métro	**2**
2.1	Définition et typologie du métro	**2**
2.2	Historique du métro : le premier projet au monde	**3**
2.2.1	Contexte et construction	**3**
2.2.2	Évolution du métro au fil du temp	**3**
2.3	Les différents types de systèmes de métro	**3**
2.3.1	Le métro souterrain	**3**
2.3.2	Le métro aérien (ou surélevé)	**4**
2.3.3	Le métro automatique	**4**
3	Objectifs et importance du métro en milieu urbain.	**6**
3.1	Optimisation de la mobilité urbaine.	**6**
3.2	Diminution de la pollution et des embouteillages	**6**
3.3	Effets sur l'environnement et les modes de vie	**6**
4	Composantes principales d'un projet de métro	**6**
4.1	Infrastructure	**7**
4.2	Systèmes techniques	**8**
4.3	Matériel roulant	**9**
5	Exigences d'un projet de métro	**9**
5.1	Études préliminaires	**9**
5.2	Ressources financières	**10**
5.3	Exigences administratives et législatives	**10**
6	Contraintes et difficultés liées au métro	**10**
6.1	Contraintes techniques	**10**
6.1.1	Problèmes liés au forage dans différents types de sols	**10**
6.1.2	Intersection des réseaux (eau , gaz, électricité)	**11**
6.1.3	Stabilité des stations et des infrastructures	**11**
6.2	Contraintes économiques	**11**
6.2.1	Coût du projet	**11**
6.2.2	Financement	**12**
6.2.3	Retour sur investissement	**12**
6.3	Contraintes sociales et environnementales	**12**
6.3.1	Relocalisation ou impact sur les populations	**12**
6.3.2	Bruit pendant les travaux	**12**

7	d'études similaires dans d'autres contextes	**13**
7.1	Le métro de Singapour	**13**
7.2	Solution pour le métro de Singapour	**13**
7.2.1	Gestion des eaux souterraines	**13**
7.2.2	Systèmes de soutènement sophistiqués	**14**
7.2.3	Technologies avancées et contrôle en temps réel	**14**
7.3	Le métro de São Paulo	**14**
7.4	Solution pour le métro São Paulo	**14**
7.5	Le métro de Londres	**15**
7.6	Solution Le métro de Londres	**16**
7.7	Le métro de Tokyo	**17**
7.8	Solution Le métro de Tokyo	**17**
	Conclusion	**18**

	Chapitre II: Contexte géologique du site	
1	Introduction	20
2	Généralités sur les projets de métro	21
2.1	Défis de conception des stations	23
3	Présentation de l'ouvrage étudié	25
4.1	Géologie régionale	26
4.2	Géologie du tracé	32
4.3	Hydrologie	33
4.3.1	Climatologie	33
4.3.2	Température	33
4.3.3	Précipitations	33
4.4	Hydrogéologie générale	34
4.4.1	Conditions hydrogéologique	37
4.4.2	Tectonique et sismicité	38
4.5.1	Sismicité Historique	40
4.5.2	Les Zones Sismogènes de la région d'Alger	41
4.5.3	Condition sismique du cas d'étude	42
4.5.1	Classification Du site	43
4.5.2	Coefficient D'accélération	43
	Conclusion	44
	Chapitre III: Contexte géotechnique du site	
1	Introduction	46
2	Méthodologies adoptées dans le paramétrage effectué	46
3	Reconnaissance géotechnique	49
4	Essais in-situ	51
5	Résultats des Essais Pressiométriques	52
6	Les essais en laboratoire	53
6.1	Les essais réalisés en laboratoire sur le sol et les roches	53
7	Interprétation de résultats	55
7.1	Identification et Localisation	55
7.2	Granulométrie et Classification des sols	55
7.3	Propriétés Physiques du Sol	55
7.4	Propriétés Mécaniques	55

7.5	Perméabilité	56
7.6	Comportement en Gonflement	56
7.7	Résistance et Cisaillement	56
8	Description des solutions adoptées	56
9	La méthode d'excavation top-down	59
9.1	Principes de la méthode top-down	59
9.2	Étapes générales de la méthode top-down	59
10	CORPS PRINCIPAL	59
	Conclusion	67
	Chapitre VI : Modélisation numérique,résultats et interprétations	
1	Introduction	69
2	Présentation du projet	69
2.4	Les données géologiques	71
	Conclusion Générale	
	Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

	Chapitre I : État de l'art	
I.1	Le métro souterrain Métro d'Alger	4
I.2	Le métro aérien	5
I.3	Le métro automatique	6
I.4	Tunnel Métro d'Alger	7
I.5	Stations de Métro	8
I.6	Voies de Métro.	8
I.7	Le métro de Singapour	13
I.8	Le métro de São Paulo	14
I.9	Le métro de Londres	16
I.10	Le métro de Tokyo	17
	Chapitre II: Contexte géologique du site	
II.1	Présentation de la ligne métro d'Alger extension El-Harrach – AéroportInternational d'Alger	22
II.2	Extension EL Harrach Centre – AéroportInternational d'Alger	25
II.3	Le tracé du métro d'Alger – extension El Harrach Centre – Bab Ezzouar –Aéroport International d'Alger (Google Earth).	26
II.4	Carte géologique simplifiée du Maghreb (D.Belhai, 2001)	27
II.5	Extrait des Cartes Géologique feuille nº21 d'Alger et feuille nº 42.	28
II.6	Profil en long de la zone d'étude.	32
II.7	Carte des bassins versants et stations de jaugeage	34
II.8	Extrait de la Carte Hydrogéologique de la région d'Alger. 1 :200 000	36
II.9	Exemple de lectures des piézomètres dans le temps « Saisonnalité »	38
II.10	Interprétation 3D des principales failles « offshore/ onshore » de la régiond'Alger (extrait de A. Yelles et al, 2009)	40
II.11	Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) et de la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005 (source, Benouar, 1995 etISC)	41
II.12	Carte des structures actives de la région d'Alger (Djerouit 2009)	42
II.13	Carte du Zonage Sismique du Territoire National – RPA99/Apres Addenda	43
	Chapitre III: Contexte géotechnique du site	
III.1	Schéma général des différents corps de la Station Aéroport	57
III.2	Schéma type avec la solution de drainage de la couche perméable	60
III.3	Schéma type du système de butonnage préconisée pour le corps principal de la station	61
III.4	Solution type de blindage pour l'accès Nord. Système de butonnage	61
III.5	Solution type de blindage pour l'accès Sud. Système de butonnage	62
III.6	Solution type de blindage pour l'accès Est. Système de butonnage	63
III.7	Schéma type avec les différents niveaux d'excavation préconisés pour le corps principal de la Station Aéroport	64
III.8	Exemple d'une hydrofraise	64
III.9	Murettes-guide. Définition géométrique et exemple	65
III.10	Mode d'exécution des panneaux considéré pour la Station Aéroport	65
III.11	Section de calcul	66

Chapitre VI : Modélisation numérique,résultats et interprétations		
VI.1	Vue générale de la zone d'implantation de la station Aéroport	69
VI.2	Structure Les couches constituant le modèle géométrique.	70
VI.3	Géométrie du modèle de calcul.	71
VI.4	Maillage et conditions aux limites du corps de la station	72
VI.5	Position de la nappe phréatique.	73
VI.6	Phasage de modélisation numérique	75
VI.7	Phase 1 Deformed mesh,Total displacement.	75
VI.8	Phase 2 Deformed mesh,Total displacement.	76
VI.9	Phase 3Deformed mesh,Total displacement.	77
VI.10	Phase 4 Deformed mesh,Total displacement.	78
VI.11	Phase 5.Deformed mesh,Total displacement.	79
VI.12	Phase 6.Deformed mesh,Total displacement.	80
VI.13	Phase 7 .Deformed mesh,Total displacement.	81
VI.14	Phase 8 .Deformed mesh,Total displacement.	82
VI.15	Phase 9 .Deformed mesh,Total displacement.	83
VI.16	Phase 10 .Deformed mesh, Total displacement.	84
VI.17	La courbe représente le changement de Fs.	85

LISTE DESTABLEAU

Chapitre II: Contexte géologique du site		
II.1	Tableau II .1 : Longueurs des tunnels	22
II.2	Tableau II.2. Les principales unités litho stratigraphiques au long du tracé	31
II.3	Tableau II.3. Perméabilité en plan au long du tracé basé en la Carte Hydrogéologique de larégion d'Alger	37
II.4	Tableau II.4 - Coefficient d'accélération selon la classe ouvrages et la zone de sismicité.	44
Chapitre III: Contexte géotechnique du site		
III.1	Tableau .III.1. Résumé des travaux de prospection et essais in situ	51
III.2	Résumé des lectures piézométriques dans la station Aéroportt	51
III.3	Résumé des résultats des essais in situ réalisés dans la Campagne deProspection Complémentaire	52
III.4	Résumé des résultats des essais en laboratoire réalisés dans le Campagne de Prospection Complémentaire.	54
	Chapitre VI : Modélisation numérique, résultats et interprétations	
	Tableau VI.1. Paramètres géotechniques de calcul – sols	71
	Tableau VI.2. Caractéristiques des éléments structurels type « plate ».	72

LISTE DES SYMBOLES

Z : Profondeur moyenne

W : Poids propre du massif de sol

φ': l'angle de frottement effectif

C : Cohésion

ν: coefficient de poisson

Kh: Coefficient de réaction

σ: Contrainte normal

τ: contrainte tangentielle

u : pressions interstitielles

Ψ: Angle de dilatance.

Xk :valeur caractéristique inférieure .

ν : coefficient de Poisson

σc : la tension de rupture

E : module de déformabilité

Cu : résistance (cohésion) non drainée

E' : module de déformabilité drainé

C' : cohésion effective

φ : l'angle de frottement

C : Cohésion

Fs : Facteur de sécurité

Eu : module de déformabilité non drainé

Introduction Générale

Dans un contexte urbain en perpétuelle expansion, la maîtrise des techniques de construction souterraine s'impose comme un enjeu majeur pour répondre aux besoins croissants en matière de mobilité. Le métro, en tant que moyen de transport collectif rapide, fiable et durable, représente une solution stratégique face aux problématiques de congestion, de pollution et de saturation des réseaux de surface. Toutefois, la construction d'ouvrages souterrains, notamment les stations de métro, exige une compréhension approfondie des conditions géotechniques et hydrogéologiques du sol, afin de garantir la stabilité et la sécurité des excavations.

En effet, les variations lithologiques, les hétérogénéités du sol, la présence de nappes phréatiques, ainsi que les contraintes structurelles liées à l'environnement urbain, rendent les travaux souterrains particulièrement délicats. Toute négligence dans l'analyse préalable de ces paramètres peut entraîner des désordres importants tels que des tassements, des effondrements ou une instabilité des parois.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en étudiant l'influence des variations du sol et des conditions hydrogéologiques sur la stabilité des excavations destinées aux stations de métro, à travers le cas particulier de la station du métro d'Alger située au niveau de l'aéroport international. Ce site présente des défis spécifiques en raison de la stratigraphie hétérogène du sol, de la proximité de la nappe phréatique, ainsi que des exigences de sécurité propres à un environnement aéroportuaire sensible.

Le contenu de ce travail est structuré comme suit :

Le **premier chapitre** présente les généralités sur les systèmes de métro, les principes de conception des stations souterraines, ainsi que les différentes méthodes d'excavation utilisées en milieu urbain.

Le **deuxième chapitre** décrit le projet du métro d'Alger, en mettant l'accent sur le tronçon reliant El Harrach à l'aéroport, et en détaillant les caractéristiques techniques et environnementales du site d'étude.

Le **troisième chapitre** est consacré à l'étude géotechnique et hydrogéologique du terrain : analyses des sondages, identification des couches de sol, comportement mécanique, et interprétation des données relatives à la nappe phréatique.

Enfin, le **quatrième chapitre** propose une modélisation numérique à l'aide d'un logiciel spécialisé, afin de simuler le comportement de la station en fonction des différentes conditions de sol et d'eau souterraine. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les risques de déformation et d'instabilité, et de suggérer des techniques de renforcement appropriées.

À travers ce mémoire, nous cherchons à démontrer que la prise en compte rigoureuse des propriétés du sol et des conditions hydrogéologiques est essentielle à toute démarche de conception et de réalisation de stations de métro. Ce travail s'inscrit ainsi dans une logique de prévention, d'optimisation des solutions techniques et de sécurisation des ouvrages souterrains en milieu urbain complexe

Conclusion Générale

Ce mémoire a permis d'approfondir l'analyse des différents paramètres influençant la stabilité des excavations des stations de métro, à travers l'examen du cas concret du projet du métro d'Alger. La station localisée à proximité de l'aéroport international constitue un exemple particulièrement révélateur des défis techniques engendrés par la variabilité des sols et la présence d'une nappe phréatique active.

L'étude géotechnique a mis en évidence une grande hétérogénéité du sous-sol, composé de couches aux résistances contrastées, certaines étant sensibles à l'humidité, ce qui impose des mesures spécifiques en matière de creusement et de soutènement. Parallèlement, l'analyse hydrogéologique a révélé que les fluctuations du niveau de la nappe influent significativement sur les pressions latérales exercées sur les parois, augmentant ainsi les risques d'instabilité ou d'infiltrations.

La modélisation numérique a permis de simuler divers scénarios de creusement et de visualiser les déformations potentielles du sol et des ouvrages. Les résultats ont confirmé que la stabilité dépend étroitement de la qualité des données géotechniques, de la rigueur dans la mise en œuvre des méthodes d'excavation, et de l'anticipation des effets liés à l'eau souterraine. Ces outils numériques s'imposent donc comme des instruments essentiels pour fiabiliser la conception et prévenir les désordres.

En définitive, cette étude met en lumière l'importance d'une approche intégrée et multidisciplinaire, conjuguant données géotechniques, modélisation numérique et expertise technique, afin de garantir le succès des projets de métro en milieu urbain complexe. Des investigations complémentaires en trois dimensions, des essais in situ à plus grande échelle, ainsi qu'un suivi rigoureux en phase d'exécution, permettraient d'accroître encore la robustesse et la fiabilité des solutions adoptées.

Ce travail se veut ainsi une base de réflexion et un outil d'aide à la décision pour les ingénieurs, concepteurs et acteurs impliqués dans la planification et la réalisation de réseaux de transport souterrain, en Algérie comme dans d'autres contextes urbains similaires.

Chapitre I : État de l’art

1. Introduction

Dans un contexte urbain en constante évolution, marqué par une croissance démographique soutenue, une densification des centres-villes et une augmentation continue du parc automobile, les grandes métropoles se trouvent confrontées à des défis majeurs en matière de mobilité. Le métro s'impose alors comme une solution de transport structurant, capable d'assurer un service rapide, régulier, fiable et respectueux de l'environnement. Le projet de métro vise à répondre efficacement aux besoins quotidiens de déplacement de milliers, voire de millions d'habitants, tout en contribuant à la décongestion du trafic routier et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Son implantation nécessite une planification rigoureuse, englobant plusieurs phases : études de faisabilité, levés topographiques, investigations géotechniques, conception des tracés, choix des techniques de creusement (comme le tunnelier ou le procédé cut-and-cover), construction des stations et des tunnels, et enfin, mise en place des systèmes d'exploitation et de sécurité. L'une des particularités majeures du métro réside dans la complexité de ses infrastructures souterraines, qui doivent s'adapter à un environnement géologique souvent hétérogène et contraignant. Cela requiert l'intervention de plusieurs disciplines de l'ingénierie – géotechnique, génie civil, électromécanique, systèmes de contrôle – et une coordination étroite entre les différents intervenants du projet. Outre son impact fonctionnel, le métro joue également un rôle clé dans la dynamique urbaine. Il valorise les espaces traversés, stimule l'investissement immobilier, facilite l'accès aux pôles d'activités et améliore globalement la qualité de vie des citoyens. Il s'agit donc d'un projet structurant à long terme, inscrit dans une vision de développement durable, intégrée et inclusive de la ville.

2. Généralités sur les projets de métro

2.1. Définition et typologie du métro

Le métro est un système de transport en commun, principalement ferroviaire et souvent souterrain, destiné à assurer des déplacements rapides, réguliers et massifs au sein des grandes agglomérations. Il est conçu pour répondre aux besoins de mobilité urbaine en transportant un grand nombre de passagers sur des lignes spécifiques, indépendantes du trafic routier en surface. Un projet de métro englobe l'ensemble des opérations nécessaires à la conception, la réalisation et l'exploitation d'un réseau structuré. Cela comprend les études de faisabilité, les investigations géotechniques, le percement de tunnels, la construction des stations, l'installation des voies ferrées, des systèmes de signalisation, de ventilation et de sécurité,

ainsi que l'intégration des équipements roulants. Ce type de projet s'inscrit dans une logique de développement durable, visant à améliorer la qualité de vie urbaine, à réduire les émissions de gaz à effet de serre, et à favoriser une mobilité plus fluide et équitable. En plus de ses bénéfices environnementaux, le métro constitue également un moteur de développement économique, en dynamisant les zones desservies et en créant de nombreux emplois directs et indirects. [1]

2.2. Historique du métro : le premier projet au monde

Le premier métro au monde a été inauguré à Londres le **10 janvier 1863**. Ce système, connu sous le nom de **Metropolitan Railway**, a été conçu pour réduire la congestion des rues de la ville, qui était alors en pleine expansion industrielle. Ce projet a marqué une étape révolutionnaire dans le transport urbain, car il a introduit l'idée de creuser des tunnels sous une ville dense pour permettre un transport rapide et efficace.[3]

2.2.1. Contexte et construction

L'idée de construire un métro à Londres a été proposée par Charles Pearson, un avocat de la ville, dans le cadre d'un plan d'amélioration urbaine.

Les travaux ont commencé en 1860, utilisant une méthode appelée **"cut-and-cover"** (couper et couvrir), qui consistait à creuser une tranchée, à construire le tunnel, puis à recouvrir la surface. Ce processus a causé d'importantes perturbations en surface, mais il a permis de créer une infrastructure souterraine essentielle pour le transport urbain.[4]

2.2.2.Évolution du métro au fil du temp

Après Londres, d'autres villes ont suivi avec leurs propres systèmes de métro :

- Istanbul a ouvert le Tünel en 1875, considéré comme le premier train souterrain d'Europe continentale.
- Chicago a inauguré son système surélevé, le Chicago "L", en 1892.
- Budapest a ouvert sa première ligne de métro en 1896, qui est aujourd'hui classée au patrimoine mondial de l'UNESCO.
- Paris a lancé son métro en 1900, avec une esthétique inspirée par le mouvement Art nouveau. [5][6]

2.3. Les différents types de systèmes de métro.

2.3.1. Le métro souterrain.

Ce mode de transport est le plus couramment utilisé dans les grandes agglomérations. Il est construit en grande partie, voire totalement, sous terre, ce qui permet de désengorger l'espace urbain en surface et d'éviter toute interaction avec le trafic routier. Sa mise en œuvre requiert

des travaux d'ingénierie complexes, tels que le creusement de tunnels et l'aménagement de stations souterraines.

Principaux avantages et inconvénients.

Indépendance totale vis-à-vis de la circulation en surface.

Réduction des nuisances visuelles et sonores en milieu urbain.

Coûts de construction très élevés en raison des travaux souterrains lourds.[2]



Figure I.1. Le métro souterrain

Métro d'Alger

2.3.2. Le métro aérien (ou surélevé).

Implanté sur des viaducs ou des structures élevées, le métro aérien constitue une alternative plus économique au métro souterrain, en particulier dans les zones où les conditions géologiques rendent le creusement difficile. Il est également plus rapide à construire.

Principaux avantages et inconvénients.

Moins onéreux à réaliser qu'un métro en sous-sol

. Plus visible et bruyant, ce qui peut engendrer des nuisances pour les riverains.

Sensible aux conditions climatiques (pluie, vent, etc.). [2]



Figure I.2. Le métro aérien.[2]

2.3.3. Le métro automatique

Ce système fonctionne sans conducteur à bord, grâce à une automatisation complète du pilotage. Il permet une gestion optimale de la fréquence des trains, garantissant ainsi un service fluide et ponctuel. Ce type de métro est de plus en plus adopté dans les villes modernes.

Principaux avantages et inconvénients

Fonctionnement autonome sans présence humaine dans les cabines.

Très grande régularité et fréquence élevée des passages.

Dépendance à des technologies avancées de contrôle et de sécurité.[2]



Figure I.3. Le métro automatique [3]

3. Objectifs et importance du métro en milieu urbain.

3.1. Optimisation de la mobilité urbaine.

Le métro constitue un moyen de transport rapide, fiable et indépendant des aléas du trafic routier. Il facilite l'accès aux zones périphériques et réduit considérablement les temps de déplacement. À Rennes, par exemple, l'extension du réseau a permis à 75 % de la population d'habiter à moins de 10 minutes à pied d'une station, améliorant ainsi l'accessibilité aux services et aux opportunités d'emploi. [7]

3.2. Diminution de la pollution et des embouteillages

En substituant l'usage des voitures individuelles, le métro joue un rôle majeur dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. À Paris, chaque personne optant pour le métro au lieu de la voiture économise environ 2 kg de CO_2 par jour. Par ailleurs, la diminution du trafic routier contribue à fluidifier la circulation et à atténuer les nuisances sonores en milieu urbain.[8]

3.3. Effets sur l'environnement et les modes de vie

L'expansion du réseau de métro encourage un urbanisme plus durable en limitant l'étalement urbain et en favorisant la densification autour des stations. Cela permet de préserver les zones naturelles en périphérie tout en améliorant la qualité de vie dans les centres urbains. En outre, l'usage du métro s'accompagne souvent d'une adoption de modes de vie plus actifs et écologiques, notamment grâce à la marche et au vélo.[9]

4. Composantes principales d'un projet de métro

Un projet de métro est une entreprise complexe qui nécessite une planification minutieuse et l'intégration de plusieurs composantes essentielles. Voici un aperçu des principales composantes d'un projet de métro, en se concentrant sur l'infrastructure, les systèmes techniques et le matériel roulant.[10]

4.1. Infrastructure

L'infrastructure d'un métro comprend plusieurs éléments clés :

Tunnels : Les tunnels sont creusés pour permettre le passage des trains sous terre. Ils peuvent être construits à l'aide de tunneliers ou par des méthodes de tranchée couverte. La conception des tunnels doit tenir compte des conditions géologiques et des impacts environnementaux.



Figure I.4. Tunnel Métro d'Alger

Stations : Les stations sont des points d'arrêt pour les passagers. Elles doivent être conçues pour être accessibles, sécurisées et confortables. Les aménagements intérieurs incluent des ascenseurs, des escaliers mécaniques, des systèmes de signalisation et des espaces d'attente.



Figure I.5. Stations de Métro [11]

Voies : Les voies sont constituées de rails et de traverses qui supportent le matériel roulant. Elles doivent être conçues pour assurer une circulation fluide et sécurisée des trains, avec des considérations pour la maintenance et la durabilité. [12]



Figure .I.1.Voies de Métro.[13]

4.2. Systèmes techniques

Les systèmes techniques sont cruciaux pour le fonctionnement efficace et sécurisé du métro :

Signalisation : Les systèmes de signalisation régulent le trafic des trains, assurant une distance de sécurité entre eux. Cela inclut des signaux lumineux, des systèmes de contrôle centralisé et des technologies avancées comme le CBTC (Communication-Based Train Control) qui permettent une automatisation accrue.

Alimentation électrique : Les métros peuvent être alimentés par différents systèmes, tels que le troisième rail ou la caténaire. L'alimentation doit être fiable et sécurisée pour garantir le fonctionnement continu des trains.

Ventilation : Les systèmes de ventilation sont essentiels pour maintenir une qualité d'air adéquate dans les tunnels et les stations, surtout en cas d'incendie ou d'autres urgences.[14]

4.3. Matériel roulant

Le matériel roulant comprend les trains qui circulent sur les voies :

Trains : Les rames de métro peuvent varier en taille et en configuration, allant des trains légers aux métros lourds. Le choix du matériel roulant dépend des besoins de capacité et de confort des usagers. Les nouvelles générations de trains intègrent souvent des technologies avancées pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des passagers.[15]

Maintenance : La maintenance du matériel roulant est cruciale pour assurer la sécurité et la fiabilité du service. Cela inclut des inspections régulières, des réparations et des mises à jour technologiques.[15]

5. Exigences d'un projet de métro

La réalisation d'un projet de métro nécessite une planification rigoureuse et une coordination entre plusieurs domaines. Voici une explication des principales exigences :

5.1. Études préliminaires

Les études préliminaires sont essentielles pour évaluer la faisabilité du projet et identifier les contraintes techniques et environnementales :

- . **Études géotechniques** : Elles permettent d'analyser les caractéristiques du sol et du sous-sol pour garantir la stabilité des infrastructures. Ces études incluent l'analyse des propriétés mécaniques des sols et des roches, ainsi que l'identification des risques comme les glissements de terrain ou les inondations.

- **Études topographiques** : Elles consistent à cartographier les caractéristiques physiques de la zone concernée, comme les reliefs, les routes existantes et les infrastructures environnantes. Ces données sont cruciales pour concevoir le tracé du métro et ses stations. [16]

5.2. Ressources financières

Le financement est un pilier fondamental pour la réussite du projet :

- **Sources de financement** : Les projets de métro sont souvent financés par des fonds publics, des partenariats public-privé (PPP) ou des prêts internationaux.
- **Analyse de rentabilité** : Une étude de rentabilité est réalisée pour évaluer les coûts et les bénéfices à long terme du projet. Cela inclut les coûts de construction, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les revenus potentiels issus des billets ou des subventions. [17]

5.3. Exigences administratives et législatives

Les aspects administratifs et législatifs jouent un rôle clé dans la mise en œuvre du projet :

- **Permis et autorisations** : Il est nécessaire d'obtenir des autorisations de construction, des permis environnementaux et des accords avec les autorités locales.
- **Cadre législatif** : Le projet doit respecter les lois et règlements en vigueur, notamment en matière de sécurité, d'urbanisme et de protection de l'environnement.
- **Gestion des parties prenantes** : Une coordination efficace entre les différents acteurs (gouvernements, entreprises, citoyens) est indispensable pour éviter les conflits et garantir l'adhésion au projet. [18]

6 .Contraintes et difficultés liées au métro

La construction d'un métro est un projet complexe qui rencontre plusieurs contraintes techniques, économiques, sociales et environnementales. Voici une explication détaillée des principaux défis :

6.1. Contraintes techniques

6.1.1. Problèmes liés au forage dans différents types de sols

- **Nature du sol** : Les sols peuvent varier entre des terrains rocheux, argileux, sableux ou instables. Chaque type de sol nécessite des techniques spécifiques de forage et de

stabilisation. Par exemple, les sols argileux peuvent se dilater, tandis que les sols sableux sont sujets à des effondrements.

- **olutions** : Utilisation de techniques adaptées comme le soutènement des parois, le drainage des eaux souterraines, ou encore le compactage des sols pour éviter les effondrements et garantir la stabilité des structures. [19][20]

6.1.2. Intersection des réseaux (eau , gaz, électricité)

- **Défis** : Les réseaux enterrés (eau, gaz, électricité) peuvent interférer avec les travaux de construction. Cela nécessite une cartographie précise des infrastructures existantes pour éviter les dommages.
- **Solutions** : Coordination avec les gestionnaires de réseaux pour déplacer ou protéger les conduites et câbles existants. Respect des normes d'enfouissement pour garantir la sécurité et la continuité des services. [21]

6.1.3. Stabilité des stations et des infrastructures

- **Défis** : Les stations doivent être conçues pour résister aux charges dynamiques (trafic, vibrations) et aux conditions géologiques locales.
- **Solutions** : Études géotechniques approfondies pour déterminer la capacité portante du sol et concevoir des fondations adaptées. Utilisation de matériaux renforcés et techniques modernes pour garantir la durabilité des structures. [22]

6.2. Contraintes économiques

6.2.1.Coût du projet

- **Défis** : Les projets de métro sont extrêmement coûteux en raison des travaux de génie civil, des équipements technologiques, et des études préliminaires.

- **Solutions** : Planification budgétaire rigoureuse et optimisation des ressources pour éviter les dépassements de coûts. Utilisation de matériaux locaux et techniques efficaces pour réduire les dépenses. [23]

6.2.2. Financement

- **Défis** : Trouver des sources de financement fiables est crucial. Les projets de métro sont souvent financés par des partenariats public-privé, des subventions gouvernementales ou des prêts internationaux.

- **Solutions** : Élaboration d'un plan de financement solide, incluant des analyses de rentabilité pour convaincre les investisseurs et les parties prenantes. [24]

6.2.3. Retour sur investissement

- **Défis** : Le métro doit générer des bénéfices suffisants pour couvrir les coûts d'exploitation et de maintenance.

- **Solutions** : Maximisation des revenus grâce à des stratégies comme l'augmentation du nombre de passagers, la publicité dans les stations, et l'intégration avec d'autres modes de transport pour attirer davantage d'utilisateurs. [25]

6.3. Contraintes sociales et environnementales

6.3.1. Relocalisation ou impact sur les populations

- **Défis** : La construction du métro peut nécessiter le déplacement de populations ou affecter les quartiers environnants. Cela peut entraîner des tensions sociales.
- **Solutions** : Consultation des communautés locales, indemnisation équitable des personnes déplacées, et intégration de solutions pour minimiser les perturbations. [26]

6.3.2.Bruit pendant les travaux

- **Défis** : Les travaux de construction génèrent des nuisances sonores importantes, affectant la qualité de vie des habitants.

- **Solutions** : Utilisation d'équipements moins bruyants, mise en place de barrières acoustiques, et limitation des horaires de travail pour réduire les nuisances. [27]

Acceptation du projet par les habitants

- **Défis** : Les habitants peuvent être réticents à accepter le projet en raison des perturbations temporaires ou des coûts élevés.

- **Solutions** : Campagnes de sensibilisation pour expliquer les avantages du métro (réduction du trafic, amélioration de la mobilité), et implication des citoyens dans la planification pour renforcer leur adhésion. [28]

7. d'études similaires dans d'autres contextes

Différents projets de métro à travers le monde ont rencontré des problématiques similaires en matière de stabilité des excavations. Parmi eux :

7.1. Le métro de Singapour

Gestion des eaux souterraines et mise en place de soutènements sophistiqués.



Figure I.7.. Le métro de Singapour [29]

7.2. Solution pour le métro de Singapour

Gestion des eaux souterraines et soutènements sophistiqués

7.2.1. Gestion des eaux souterraines

À Singapour, où la nappe phréatique est élevée et les pluies abondantes, plusieurs techniques sont utilisées :

- **Drainage temporaire** avec pompes haute capacité et canaux de dérivation.

- **Cuvelage étanche** à l'aide de revêtements en béton ou segments préfabriqués.
- **Tunneliers pressurisés** (EPB ou slurry TBM) pour limiter les infiltrations.
- **Surveillance en temps réel** du niveau de la nappe via capteurs.
- **Barrières hydrauliques** (parois moulées) pour protéger les zones sensibles.[29]

7.2.2. Systèmes de soutènement sophistiqués

Dans des sols complexes et zones urbaines denses :

- **Parois moulées profondes** servant à la fois de soutènement et d'élément structurel.
- **Butons et ancrages actifs** pour stabiliser les parois.
- **Méthode top-down** : construction du toit avant excavation descendante.
- **Segments préfabriqués** avec joints et gaskets pour assurer stabilité et étanchéité. [29]

7.2.3. Technologies avancées et contrôle en temps réel

- **BIM 3D** pour coordonner soutènements, réseaux et étanchéité.
- **Instrumentation géotechnique dense** : capteurs de déplacement, inclinomètres, etc.
- **Systèmes d'alerte automatisés** en cas de mouvements ou pressions anormales.[29]

7.3. Le métro de São Paulo

Solutions adaptées aux terrains meubles et argileux.



Figure I.8. Le métro de São Paulo

7.4. Solution pour le métro São Paulo

Tunnelier à pression de boue (Slurry Shield TBM) et techniques de confinement du sol

Le métro de São Paulo traverse des sols composés majoritairement d'**argile molle, de terrains meubles alluvionnaires** et parfois de zones humides. Pour faire face à ces conditions, plusieurs techniques ont été mises en œuvre :

- **Utilisation de tunneliers Slurry Shield (TBM à pression de boue)** : Ces tunneliers utilisent un mélange de bentonite et d'eau pour stabiliser le front de taille, empêchant ainsi les infiltrations d'eau et les effondrements dans les sols meubles.
- **Soutènement immédiat par anneaux préfabriqués** : Des segments en béton sont installés immédiatement après le passage du tunnelier pour garantir la stabilité des parois.
- **Consolidation préalable du sol par injection (Jet Grouting ou Soil Mixing)** : Permet de renforcer localement les sols très meubles avant l'excavation, particulièrement dans les zones sensibles (passages sous les bâtiments, croisement avec d'autres lignes, etc.).
- **Gestion active de la pression au front** : Les TBM sont équipés de systèmes de contrôle sophistiqués pour adapter en temps réel la pression de la boue selon les caractéristiques du sol.
- **Systèmes de drainage et de pompage** : Essentiels pour réduire la pression interstitielle et éviter la montée soudaine des nappes phréatiques. [30]

7.5. Le métro de Londres

Construction sous des conditions géologiques complexes avec des couches d'argile et de craie.



Figure I.9. Le métro de Londres [31]

7.6. Solution Le métro de Londres

Excavation contrôlée avec tunnelier (TBM) et techniques de soutènement adaptées aux terrains hétérogènes

Le métro de Londres, notamment dans ses extensions récentes (ex. : Crossrail), a fait appel à des méthodes spécifiques pour gérer la complexité géologique :

- **Utilisation de tunneliers à pression de terre (EPB-TBM)** : Adaptés aux sols meubles et instables comme l'**argile de Londres**, ces tunneliers permettent de maintenir la pression du front de taille, évitant les effondrements et les déformations excessives.
- **Injection de coulis (grouting)** derrière le tunnelier : Permet de combler les vides créés autour du tunnel pour assurer une bonne stabilisation dans les zones de transition entre argile et craie.
- **Revêtements segmentaires préfabriqués** en béton armé : Assemblés directement à l'intérieur du tunnel creusé, ils assurent la stabilité immédiate de l'excavation.
- **Système de surveillance géotechnique en temps réel** : Mesure les mouvements du sol et des structures avoisinantes pour ajuster en continu les paramètres d'excavation.
- **Études géotechniques très détaillées** en amont : Modélisation 3D des couches géologiques, sondages profonds, tests de laboratoire pour bien caractériser l'interaction entre l'argile plastique et la craie poreuse.[31]

7.7. Le métro de Tokyo

Adaptation aux risques sismiques grâce à des techniques de renforcement avancées.

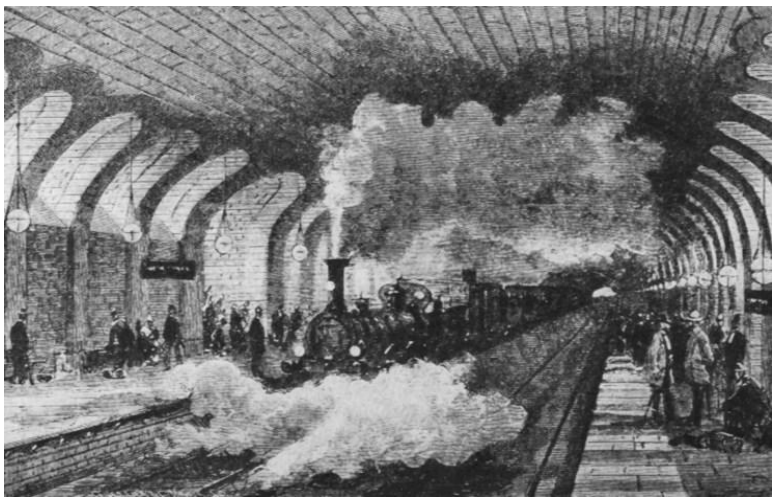


Figure I.10. Le métro de Tokyo [32]

7.8. Solution Le métro de Tokyo

Renforcement parasismique avancé et conception flexible

Le métro de Tokyo intègre des **techniques de renforcement parasismique avancées** afin de résister aux fréquents tremblements de terre. Ces techniques comprennent :

- **Joints de dilatation sismiques** : Permettent aux structures de se déplacer légèrement sans subir de dommages lors des secousses.
- **Fondations sur amortisseurs sismiques** (isolateurs de base) : Absorbent l'énergie des vibrations pour réduire l'impact sur les tunnels et les stations.
- **Structures en béton armé à haute ductilité** : Offrent une capacité de déformation importante sans rupture.
- **Systèmes de surveillance en temps réel** : Capteurs installés dans le réseau pour détecter l'activité sismique et enclencher des mesures d'urgence (freinage automatique, évacuation, etc.).
- **Conception modulaire et flexible des tunnels** : Permet une déformation contrôlée des segments sans provoquer d'effondrement ni de fissures critiques. [32]

Conclusion

Le projet de métro constitue l'un des investissements d'infrastructure les plus importants dans les grandes villes, en raison de son rôle essentiel dans l'amélioration du transport urbain et la régulation du trafic. Il se distingue par sa capacité à transporter un grand nombre de passagers rapidement et en toute sécurité, grâce à des voies dédiées, souvent souterraines ou aériennes, à l'abri de la circulation routière. Les systèmes de métro varient selon le contexte urbain et les objectifs du projet : métro souterrain, métro aérien ou métro automatique, chacun présentant des caractéristiques techniques et des coûts différents. Le métro se distingue également d'autres moyens de transport comme le tramway ou le RER par sa fréquence, sa capacité et son infrastructure. L'objectif principal de ce type de projet est de répondre à la demande croissante en mobilité urbaine, en offrant un moyen de transport efficace, confortable et respectueux de l'environnement. Toutefois, la réalisation d'un métro nécessite une planification rigoureuse, des ressources financières et techniques importantes, et fait face à plusieurs défis d'ordre technique, économique et social.

Chapitre II: Contexte géologique du site

1. Introduction

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont des critères très importants pour le choix de la technique, de la méthode ainsi que du type de creusement. C'est pourquoi une campagne de reconnaissance est nécessaire pour la réalisation des ouvrages souterrains. Le type de soutènement requis dépend toujours de ces conditions.

La reconnaissance des terrains s'effectue généralement au début de chaque étude géotechnique pour les ouvrages creusés en souterrain. L'appréciation des conditions du terrain doit intervenir à tous les stades de l'avancement du projet.

Dans le cas d'un tunnel, la reconnaissance a pour objet de contrôler la présence éventuelle d'hétérogénéités dans une enveloppe d'environ six mètres autour de l'ouvrage. Une méthode d'exploration se caractérise par sa fiabilité, c'est-à-dire la probabilité que les résultats de l'exploration reflètent les conditions réelles (Einstein, 1991).

Elle doit permettre de réaliser une investigation adéquate du site, de laquelle dériveront les cartes géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques ainsi que les profils du sol. Elle est également nécessaire pour choisir la forme appropriée du tunnel et la méthode d'excavation.

Il est aussi essentiel de connaître l'état de contrainte (direction et intensité des contraintes principales), l'orientation et la forme des grandes cavités souterraines, ainsi que la conception et le dimensionnement du soutènement provisoire et définitif. Ces éléments sont fondamentaux pour optimiser la situation du tunnel.

Dans le but de garantir une bonne compréhension du projet étudié, il est nécessaire d'utiliser un maximum d'informations, telles que la morphologie, la géologie et l'hydrogéologie, ainsi que de mener une reconnaissance géotechnique approfondie du terrain.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes données obtenues à partir des cartes géologiques et hydrogéologiques.

2 .Généralités sur les projets de métro

Dans le cadre des Dans le cadre des études d'exécution du projet de métro d'Alger Extension EL Harrach Centre - Aéroport International d'Alger, ce chapitre a pour objectif la présentation des hypothèses géotechniques, présente les hypothèses géotechniques, notamment les paramètres géomécaniques liés aux conditions géologiques et géotechniques qui caractérisent le massif, dans lequel sera creusé un tunnel, selon la méthode de construction à bouclier avec tunnelier, entre le pk 0+0,000 et pk 9+564,80. [33]

Le tracé aura une longueur de 9,564 km et il sera réalisé en 2 tranches. [33]

- Tronçon de première tranche de construction (L= 3,766 km) est un point d'origine du projet à la station Oued Smar.

- Tronçon de deuxième tranche de construction (L= 5,797 km), est de la station Oued Smar à point d'arrivée du projet.

Dans la 1ère tranche, est également comprise une partie de la ligne principale qui n'est pas réalisée dans le cadre du projet d'extension B (partie à relier avec la station EL HARRACH CENTRE-Aéroport international), et il est prévu d'exécuter les travaux pendant 58,2 mois (y compris 18 mois pour la fabrication, la livraison et le montage sur site des matériels).
Dans le cas où les travaux de construction du tunnel dans la 2ème tranche sont exécutés avec le même tunnelier employé dans la 1ère tranche, le délai des travaux est estimé à 80 mois. [33]

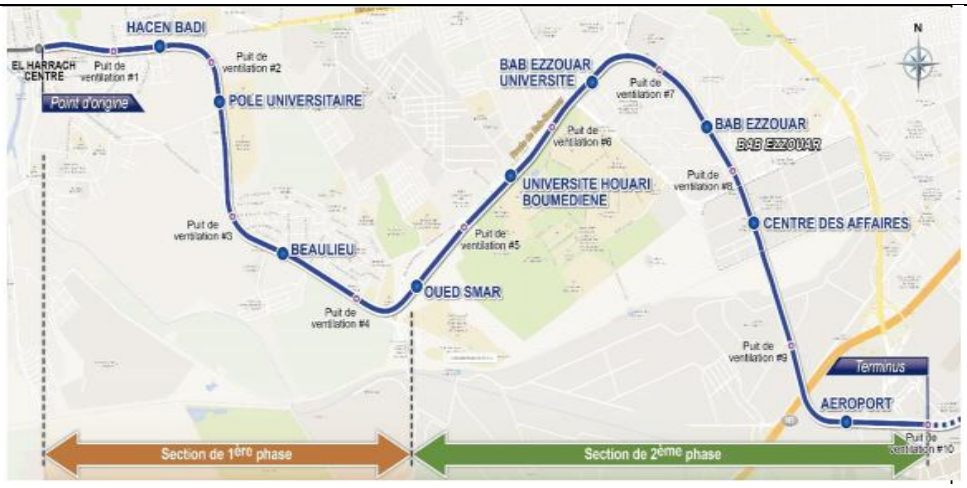


Figure 1Présentation de la ligne métro d'Alger extension El-Harrach - Aéroport International d'Alger [33]

1ère tranche: longueur d'3,766 km (station : 3 / puits de ventilation : 4)

2ème tranche: longer d' 5,808 km (station : 6 / puits de ventilation : 6)

Figure II.1. Présentation de la ligne métro d'Alger extension El-Harrach - Aéroport International d'Alger [33]

Concernant le projet il y a :

- 9 stations :

- Station Hacen Badi.
- Station pôle universitaire.
- Station beau lieu.
- Station Oued Smar.
- Station Université Houari Boumediene.
- Station Rabia Tahar.
- Station Smail Yefsah.
- Station Centre des affaires.
- Station Aéroport.

- 10 puits de ventilations.

Tableau II .1 : Longueurs des tunnels

Ouvrage souterrain N°	Longueur en mètres
01	843.13
02	642.52
03	692.52
04	1095
05	708.96
06	843.13
07	642.52
08	642.52
09	2044

Ces hypothèses géotechniques, se basent sur les résultats des différentes campagnes géotechniques effectuées tout au long de la section en étude, nommément, l'étude géotechnique de l'APD et dans les résultats des essais réalisés dans la campagne de prospection complémentaire (CPC), ainsi que sur l'expérience des projeteurs dans ce type de formations. [33]

Travaux de prospection et d'essais pour Tronçon nettement

- Tronçon 1 - Tunnel du pk 0+000 au pk 0+782,50 ;
- Tronçon 2 - Tunnel du pk 0+912,00 au pk 1+445,80 ;
- Tronçon 3 - Tunnel du pk 1+576,20 au pk 2+646,30 ;
- Tronçon 4 - Tunnel du pk 2+775,70 au pk 3+741,95 ;
- Tronçon 5 - Tunnel du pk 3+872,00 au pk 4+740,50 ;
- Tronçon 6 - Tunnel du pk 4+869,90 au pk 5+527,50.
- Tronçon 7 - Tunnel du pk 5+677,65 au pk 6+644,96.
- Tronçon 8 - Tunnel du pk 6+774,97 au pk 7+363,13.
- Tronçon 9 - Tunnel du pk 7+501,13 au pk 8+873,10.
- Tronçon 10 - Tunnel du pk 9+002,90 au pk 9+575,00.
- Point d'arrive du pk 0+000 au pk 0+018,00.

- Résultats des travaux de prospection et d'essais.

- Résultats de prospection géophysique.

- Conditions géologiques, hydrogéologiques et sismique pour Tronçon.

- Paramètres géotechniques des formations intersectées.

- Analyse Chimique.

2.1. Défis de conception des stations

Station Hassan Badi : installée sur l'avenue Boualem Ghiboub non loin de l'école nationale polytechnique et de l'Institut National Agronomique.

- **Station pole universitaire**: installée dans les emplacements destinés au parking de l'EPAU, aux alentours de l'Institut national agronomique, l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme, école vétérinaire ainsi que la résidence universitaire BOURAOUI.
- **Station Beaulieu** : installée entre l'avenue AHMED HAMIDOUCHE boulevard Sidi Okba. Au nord de la station se trouve la zone d'habitation Beaulieu à forte concentration résidentielle. Un champ militaire est situé au sud-ouest et le technicum El Birioui au sud **Station Oued Semar** : se trouvant entre la route de Bab Ezzouar et la cité universitaire Houari Boumediene. L'institut National de formation en informatique est localisé au sud de la station à une distance de 260 mètres.
- **Station université Houari Boumediene** : aux alentours de la station se situe l'université des sciences et techniques Houari Boumediene, la cité universitaire d'AL ALIA et le quartier résidentiel populaire « HAI AL JORF » à forte concentration démographique.
- **Station Bab Ezzouar Université** : installée aux environs de la station du tramway d'Alger ainsi que l'arrêt de bus. La station est à proximité des zones à forte concentration résidentielle : cité 1080 logts, cité Rabia Tahar.

Station Bab-Ezzouar : installée sur une voie de 26 mètres de large ayant aux alentours : les ilots résidentiels composés d'immeubles en tours tels que la cité 5 juillet et la cité Ismaïl Yefsah **Station Centre des affaires** : la station centre des affaires est localisée dans le centre d'affaires de Bab Ezzouar où sont concentrés plusieurs commerces à savoir le centre commercial et de nombreux Hôtels.

Station Aéroport : Dans le cadre de l'agrandissement de l'aéroport d'Alger, le terminal aéroportuaire a été implanté entre l'actuel bâtiment administratif de l'aéroport et le futur bâtiment administratif international. [34]



Figure II.2. Extension EL Harrach Centre - Aéroport International d'Alger [35]

3. Présentation de l'ouvrage étudié

Le cas d'étude choisi est la station terminale de l'Extension extension E : tronçon El Harrach – Aéroport de la ligne 1 du métro d'Alger, déployée entre les PK 8+872,9 et PK 9+002,9 dans une extension de 130 m, comme l'illustre la figure suivante:

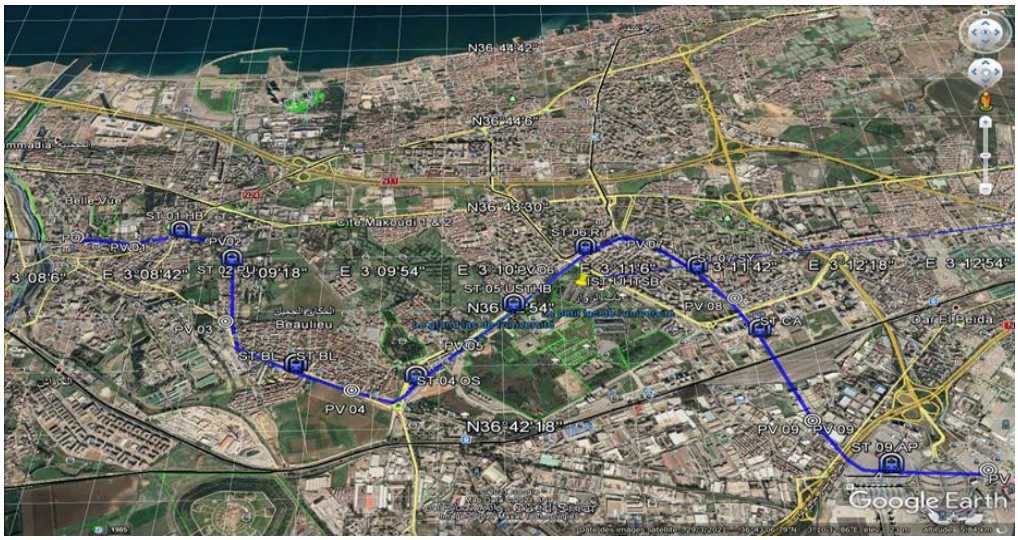


Figure II.3. Le tracé du métro d'Alger – extension El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger (Google Earth).

4.1. Géologie régionale

Au Nord, l'Algérie septentrionale présente une structure géologique complexe et sa disposition, englobant le domaine tellien, l'Atlas saharien et les hautes plaines (D. Belhai, 2001). Étant donné que la zone d'étude est située au nord du Pays, nous nous limiterons à l'étude de cette zone (domaine tellien).

Le domaine tellien fait partie de l'orogène alpin périméditerranéen. Il est subdivisé en plusieurs chaînons eux-mêmes appartenant à deux principaux ensembles. [36]

Le tell méridional, ou domaine externe des Maghrébides, est formé de terrains autochtones ou parautochtone d'extension réduite (Bibans), et de masses allochtones réparties en nappes telliennes formées de terrains marnocalcaires du Crétacé supérieur et de nappes argilo gréseuses du Crétacé au Miocène. L'ensemble est recouvert en discordance par des terrains post-nappes.

Le tell septentrional appelé domaine interne des Maghrébins constitué d'un socle cristallophyllien ou socle Kabyle surmonté par des formations sédimentaires du Paléozoïque ainsi que par la dorsale kabyle et l'Oligo-Miocène kabyle. Les terrains de couvertures post nappes discordants sur les formations anciennes sont d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

Le domaine des flysch constitués d'un ensemble de nappes à matériel détritique. Cet ensemble regroupe des formations allant du Jurassique moyen à l'Eocène. [36]

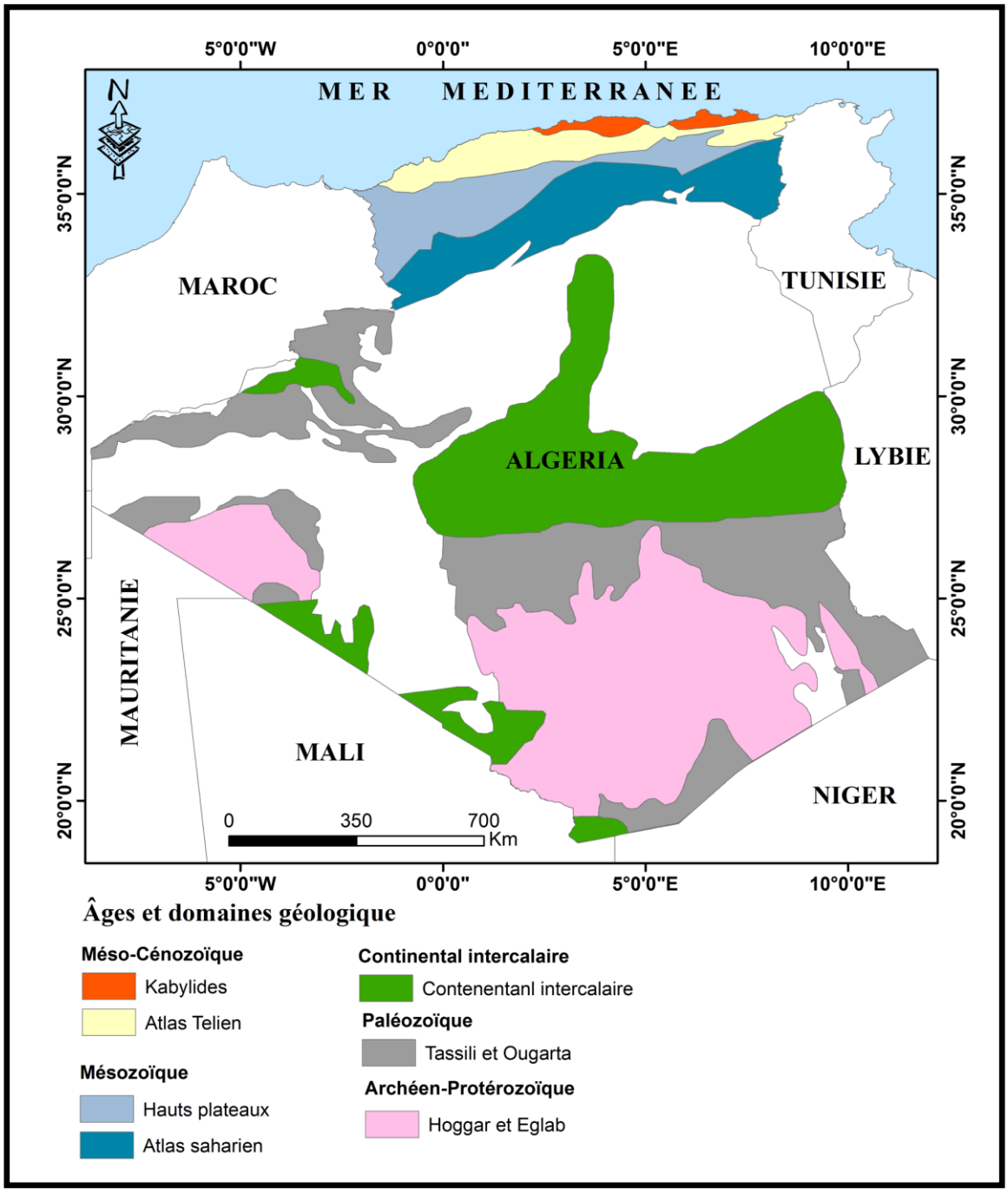


Figure II.4. Carte géologique simplifiée du Maghreb (D.Belhai, 2001)

Le tracé en étude est situé dans la partie orientale de la plaine de la Mitidja qui s'étend sur une superficie de 1300 km2 soit 100 km de long et une largeur qui varie entre 8

et 18 km, c'est une dépression allongée d'ouest en Est, de Hadjout à Blida et s'incurve en direction WSW-ENE de Blida jusqu'à l'oued El Hamiz et la mer. Cette plaine, limitée à l'ouest par l'Oued Nador et à l'Est par l'Oued Boudouaou, est délimitée au Nord par l'anticlinal du Sahel et au Sud par l'Atlas blidéen. [37].

La plaine de la Mitidja est formée de terrains tertiaire et comblée par du Quaternaire. Dans l'extrait des cartes géologiques à l'échelle 1 :50 000, feuille nº21 de Alger et feuille nº 42 d'Arba, on a implanté le tracé en étude, Figure 1, en plan, la zone d'étude est principalement constituée par des dépôts alluvionnaires récents, où il est possible de différencier deux formations. [37]

a^3- Alluvions marécageuses et parties inondables.

A^2- Alluvions limoneuses et p_2q – Marnes de Maison Carrée (Pliocéne récent et quaternaire)

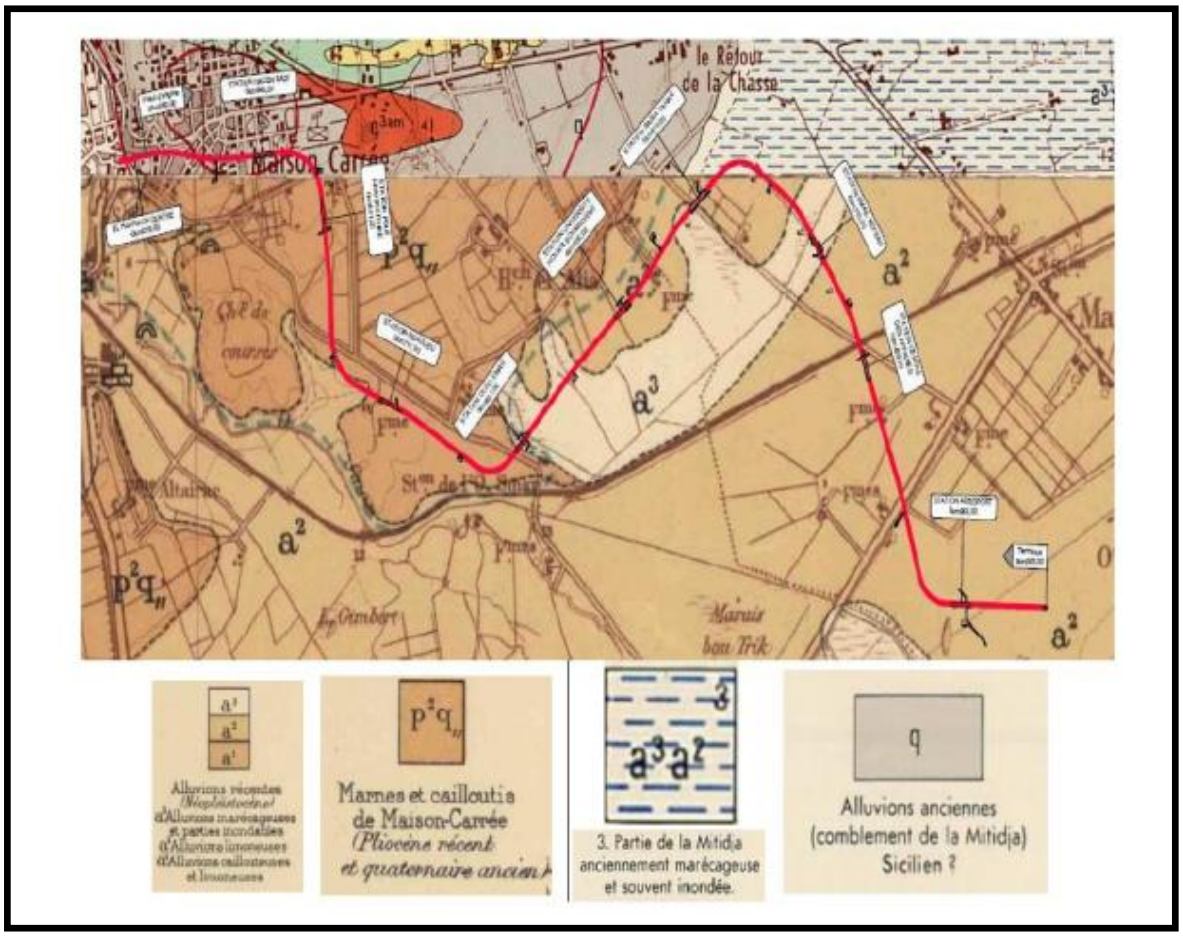


Figure II.5. Extrait des Cartes Géologique feuille nº21 d'Alger et feuille nº 42.

Implantation de Tracé par la suite on décrit en ordre chronologique, du plus ancien au plus récent, les unités lithologiques différenciées dans le tronçon en étude.

❖ **Tertiaire – Astien**

Il est caractérisé par des dépôts marins peu profonds, représentés par une succession lithologique qui comprend, de manière générale, de la base vers le haut les faciès suivants marno-sableuses, calcaréo-gréseuse, mollassique et sablo-argileuse, dénommée Molasse Astienne. Ces faciès présentent des intercalations et des fréquents changements latéraux. Elles ont été considérées au cours de l'étude géologique du tronçon en tunnel comme Unités TS, TG et TM.

o Unité TS – Sable fin, moyen à grossier, jaunâtre avec présence de grés sous forme des fragments.

Ces matériaux n'affleurent pas dans la zone de l'étude, bien qu'ils apparaissent en profondeur, notamment dans Tronçon 1 (pk 0+000 au pk 0+782,50), Tronçon 2 (pk 0+912,00 au pk 1+445,80) et Tronçon 3 (pk 1+576,20 au pk 2+646,30).

o Unité TG – Grés sain à fissuré blanchâtre avec niveaux des grés lumachéllique fissuré broyé par endroit de colleur marron claire a blanchâtre.

Ces matériaux n'affleurent pas dans la zone de l'étude, bien qu'ils apparaissent en profondeur, notamment dans Tronçon 2 (pk 0+912,00 au pk 1+445,80).

o Unité TM – Argile Marneuse à Marne verdâtre a grisâtre.

Ces matériaux n'affleurent pas dans la zone de l'étude, bien qu'ils apparaissent en profondeur, notamment dans Tronçon 1 (pk 0+000 au pk 0+782,50), Tronçon 2 (pk 0+912,00 au pk 1+445,80).

❖ **Quaternaire**

Après la sédimentation de l'Astien, l'érosion de l'Atlas Tellien a entraîné le dépôt du quaternaire dans les zones basses et dans le littoral marin. Celui-ci englobe une multitude de faciès, essentiellement détritiques et qui sont discordantes sur les couches plus anciennes. Les principaux facies ont été considérées au cours de l'étude géologique du tronçon en tunnel comme Unités QM, QS et QA ;

- Unité QM. Marnes jaunes d'El Harrach Une dernière transgression d'âge Calabrien est le résultat des variations climatiques et des procès d'eustatisme au début du Quaternaire,

se traduisant en dépôts de argiles et marnes jaunes, dites de El Harrach et de grès sableux jaunes à stratification entrecroisée, avec parfois des niveaux de galets et des lumachelles témoignant d'un milieu littoral agité, avant que la mer reprenne son retrait généralisé.

- Unité QS Le Quaternaire continental, Calabrien-Villafranchien, contemporain du Calabrien marin, repose sur le Pliocène continental avec lequel il présente d'étroites analogies de faciès qui rendent leur délimitation très délicate. Il se compose d'un ensemble détritique correspondant au démantèlement des reliefs en voie de surrection, constitué aussi bien de faciès argileuses, sableuses et à galets.

- Unité QA Il se compose d'un ensemble détritique correspondant à une importante sédimentation fluvio-continentale qui se poursuit dans les plaines alluviales, en complète continuité des phénomènes antérieurs. Ils sont constitués de faciès argileux de couleur rougeâtre et marron formé d'argiles, et d'argile sableux avec cailloux, qui peuvent facilement être confondus avec les remblais anthropiques présents dans la zone. Le tableau suivant, montre les principales unités litho stratigraphiques intersectée au long du tracé.

Tableau II.2. Les principales unités litho stratigraphiques au long du tracé [37].

Stratigraphie	Symbole	Lithologie	Observations
Récen	R	Remblai	Couche sans importance pour l'excavation, très superficielle
Quaternaire	QA	Argile limoneuse peu sableuse	Couche plus importante pour l'excavation du tunnel en le, tronçon 7, tronçon 8, tronçon 9 et tronçon 10
	QG	Galets à matrice argileuse et ou matrice sablo-argileux	Couche importante pour l'excavation du tunnel en le tronçon 9
	QS	Sables limoneux-argileux, parfois plus ou moins mêles de cailloux, avec présence des grés et conglomérat	Couche plus importante pour l'excavation du tunnel en le, tronçon 5, tronçon 6, tronçon 7, tronçon 8 et tronçon 9
Pliocène Superior Quaternaire ancienne	QM	Sables limono – argileux avec présence de cailloux	Couche plus importante pour l'excavation du tunnel en le tronçon 1, tronçon 2, tronçon 3, tronçon 4, tronçon 5, tronçon 6, tronçon 9 et tronçon 10
	QMsg	Sables limono – argileux avec présence de cailloux	Couche moins expressif pour l'excavation du tunnel en le Tronçon 1, Tronçon 3, Tronçon 4, Tronçon 5 et Tronçon 9, en l'intérieur de la couche QM
	QMs	Sable fin à moyenne limoneux de colleur brunâtre à marron foncé	Couche moins expressif pour l'excavation du tunnel en le Tronçon 1, Tronçon 4, Tronçon 10 en l'intérieur de la couche QM
Tertiaire	TS	Sable fin, moyen à grossier, jaunâtre avec présence de grés sous forme de fragment S	Couche importante pour l'excavation du tunnel en le Tronçon 1, Tronçon 2 et Tronçon 3
	TG	Grès sain à fissuré blanchâtre avec niveaux des grès lumachálique fissuré broyé par endroit de couleur marron clair à blanchâtre	Couche importante pour l'excavation du tunnel en le Tronçon 2

4.2. Géologie du tracé

Les principales unités excavées à l'intérieur du tunnel du tunnel, au long de l'Extension EL Harrach Centre- Bab Ezzouar - Aéroport International d'Alger sont présentées en le tableau ci-dessous, inclut l'extension et la profondeur de la couverture des tronçons et les unités ci-dessus de la voûte du tunnel. [37]

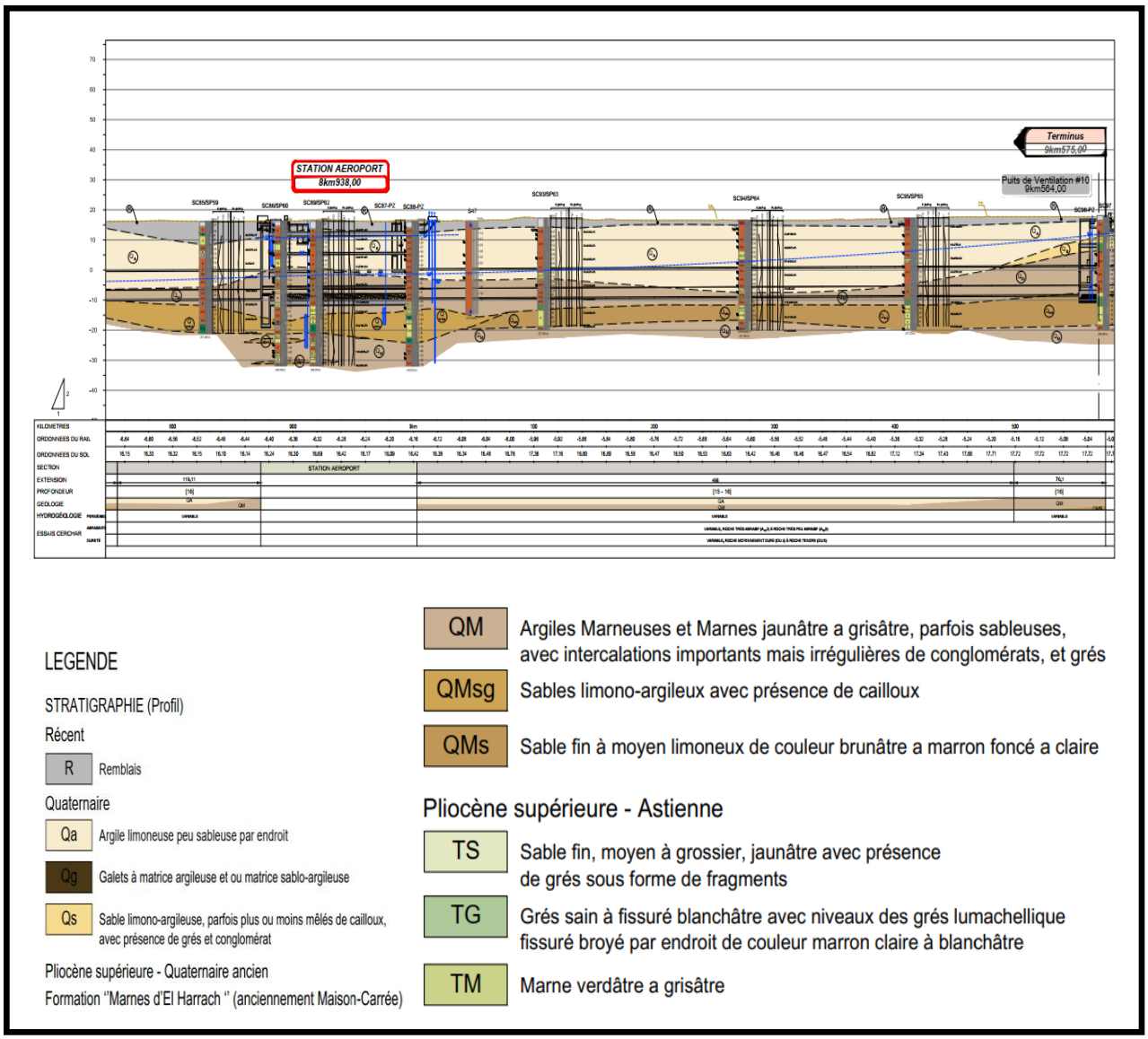


Figure II.6. Profil en long de la zone d'étude.

Ce type de formations sédimentaires avec des variations latérales et en profondeur de faciès sableux, peut ralentir l'avancement pour le creusement des tunnels, avec risque 'effondrement local, pouvant entraîner des fontis.

4.3. Hydrologie

4.3.1. Climatologie

Le secteur à l'étude s'inscrit au sein de la région d'Alger. Cette zone bioclimatique se définit par des caractéristiques typiques du climat méditerranéen où alternent des étés chauds et humides avec des hivers plus ou moins froids et pluvieux. Les sections qui suivent fournissent les principales caractéristiques des aspects météorologiques ré aspects météorologiques régionaux gionales du secteur à l'étude. Les données présentées proviennent des relevés de trois stations météorologiques de la région. [36]

4.3.2. Température

Les températures enregistrées au niveau des stations cité ci-dessus révèlent qu'en période hivernale, ce sont les mois de janvier et février qui sont les plus froids avec des valeurs de l'ordre de 5°C à Aéroport. En période estivale, ce sont les mois de juillet et août qui sont les plus chauds, avec des moyennes de température maximale atteignant 30°C pour Aéroport. Quant aux températures moyennes annuelles, elles.

4.3.3. Précipitations

Les précipitations sont caractérisées par une grande variabilité interannuelle et inter mensuelle marquée par une plus grande abondance en hiver et une nette sécheresse en été. [36]

La les précipitations sont modérées à abondantes dans les stations étudiées. La moyenne des précipitations annuelles enregistrées pour la période de 1999 à 2009 est de l'ordre de 582,53 mm pour la station d'Aéroport. [36].

Ces moyennes montrent une alternance régulière, mais non périodique entre les années sèches et les années humides, ne dépassant généralement pas 2 à 3 ans [36].

Les moyennes mensuelles pour la période de 1999 à 2009 mettent en évidence

Une période pluvieuse s'étalant d'octobre à mai où le maximum pluviométrique est observé pendant l'automne soit au mois de novembre avec 97 mm pendant l'hiver.

Les minimums sont observés durant la période estivale, c'est la caractéristique essentielle du régime pluviométrique du climat méditerranéen. Le nombre de jours de pluie pendant cette

saison est réduit, voire nuls pour certains mois, tel celui de juillet qui est invariablement le plus sec pour toute la région.

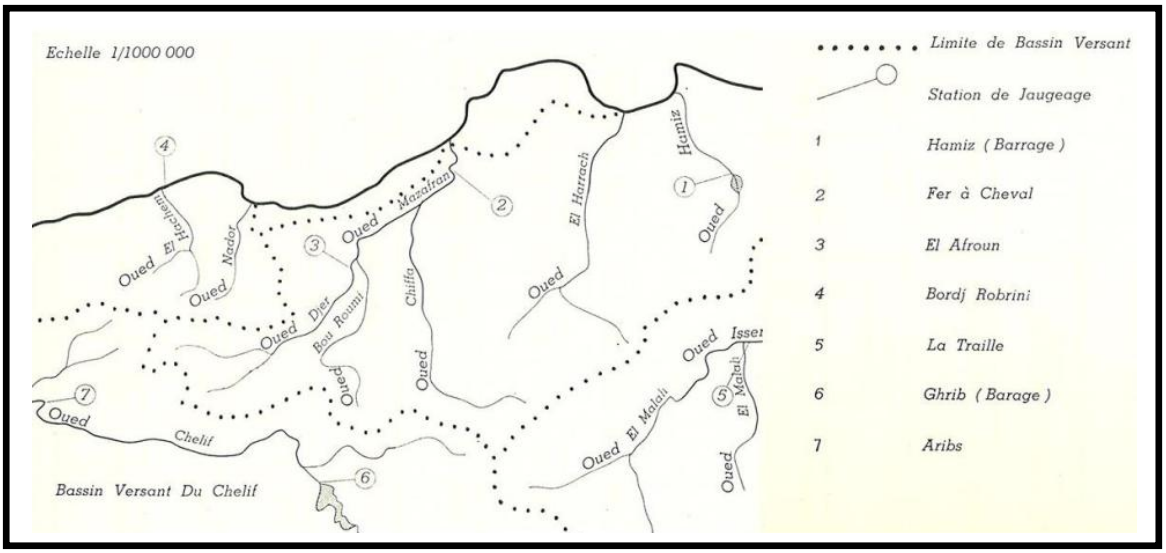


Figure II.7. Carte des bassins versants et stations de jaugeage [3].

Le bassin de la Mitidja, au sein duquel sera réalisée la future ligne de Métro, est alimenté du côté Ouest par le MAZAFRAN qui reçoit les eaux des oueds DJER, BouRoumi et CHIFFA, du côté Est on trouve Oued El Harrach et Oued El HAMIZ.

4.4. Hydrogéologie générale

Le tracé de l'extension complète de la ligne du métro d'Alger entre El -Harrach – Aéroport International d'Alger, actuellement en exécution, se développe dans la part Est de la vaste Plaine de la Mitidja, limité entre l'Oued El-Harrach et l'Oued El-Hamiz [2].

D'accord avec la bibliographie, la partie orientale de la Plaine de la Mitidja, au nord de l'Algérie, couvre environ 575 km2. Elle est limitée par la mer Méditerranée au nord, les montagnes de l'Atlas (1200-1600 m d'altitude) dans le sud, à l'ouest par l'oued El Harrach, à l'Est par l'oued Réghaia, au nord-est par « Le Petit Sahel » (200 à 250 d' altitude). L'altitude moyenne de la Plaine varie de 20 à 50 m [37].

Les principaux cours d'eau sont l'Oued El Harrach (Ouest), L'Oued El Hamiz (centre), et l'Oued EL Réghaia (Est).

Les plus importantes zones de captage d'eau sont Bouréah, Hamiz, Haouch Félit et Baraki.

Dans la partie orientale de la Plaine de la Mitidja, de haut jusqu'à bas, il y a deux aquifères principaux. [36]

- Les alluvions du Quaternaire

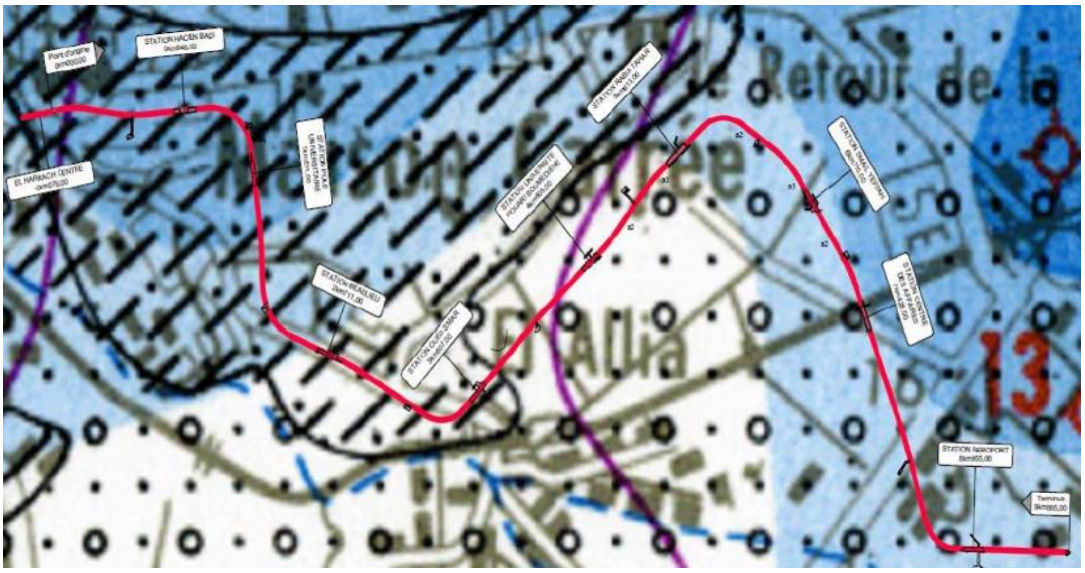
o Cet aquifère se situe dans des graviers et des sables plus ou moins consolidées et inter-stratifiés d'argile, il est alimenté par : Les précipitations ; l'infiltration à partir d'Oued El Harrach et l'Oued El Hamiz ; le réservoir Astien par drainante.
o Séparée de l'aquifère Astien par Formation d'El Harrach, sauf à L'Est du EL Hamiz où ils sont en contact direct ;

o La nappe libre s'étend sur tout le long du bassin de la Mitidja ;

- Le réservoir Astien

o Il se trouve en charge sous les marnes de « Maison-Carré » actuellement appelé de « Formation d'El Harrach, les éléments argileux dominent dans une alternance comprenant des marnes jaunes collantes, des argiles graveleuses et quelques lits de sable et graviers. », sauf dans la partie Est où il est en contact direct avec l'aquifère de la Mitidja.

En plan le tracé étudié, croise plusieurs formations géologiques, qui peuvent être classées en deux types hydrogéologiques de Terrains, (voir extrait de la carte hydrogéologique de la région d'Alger, á l'échelle 1 :200 000). [36]



	Lithologie : Alternance d'argile et de graviers(Mitidja) **Hydrogéologie : Perméabilité généralement élevée. Ressources en eaux important**
	Lithologie : Argile et cailloutis du Vilafranchien (Mitidja) **Hydrogéologie : Perméabilité faible. Substratum dela nappe des alluvions dans la Mitidja.**

Figure II.8. Extrait de la Carte Hydrogéologique de la région d'Alger. 1 :200 000 [37]

Classe I : Terrains à Perméabilité élevée. Ressources en eau généralement importantes ;

Classe II : Terrains à Perméabilité moyenne. Ressources en eau variables.

En plan au long du tracé, la perméabilité est caractérisée de la manière suivante, comme on peut le voir le tableau suivant.

Tableau II.3. Perméabilité en plan au long du tracé basé en la Carte Hydrogéologique de la région d'Alger [37]

Tunnel (Tronçon)	PKi	PK	Extension (m)	Hydrogéologie
T1	0+000,00	0+782,50	782,50	Perméabilité Moyenne
T2	0+912,00	1+445,80	533,8	Perméabilité Moyenne
T3	1+576,20	2+646,30	1070,1	Perméabilité Moyenne
T4	2+775,70	3+741,95	966,2	Perméabilité Moyenne
T5	3+872,00	4+740,50	868,5	Perméabilité Moyenne à Élevée
T6	4+869,90	5+527,50	657,6	Perméabilité Élevée
T7	5+677,65	6+644,96	967,3	Perméabilité Élevée
T8	6+774,97	7+363,13	588,2	Perméabilité Élevée
T9	7+501,13	8+873,10	1372	Perméabilité Élevée
T10	1372	1372	572,1	Perméabilité Élevée

4.4.1. Conditions hydrogéologique

L'information obtenue des piézomètres à tuyau ouvert installés dans les sondages SC86 (6,00 à 15,00 m de profondeur), SC87 (28,50 à 34,00 m de profondeur), SC89 (31,00 à 42,00 m de profondeur) et des piézomètres à corde vibrante installés dans le sondage SC88 (à 3 niveaux Distincts), montre l'existence de deux nappes à niveaux distincts: une nappe à 5,0 m de profondeur, environ, et l'autre à 18,0 m de profondeur, environ. La profondeur de la nappe plus superficielle est confirmée par les données sismiques, lesquelles montrent une augmentation de la vitesse sismique transversale ( ) aux 7,0 m de profondeur, environ. Ainsi, nous avons considéré l'existence de deux nappes phréatiques ; une, plus profonde, au niveau -2,0 m, environ, (18,0m de profondeur) et l'autre, suspendue, Installée au niveau 11,0 m, environ (profondeur 5,0 m).

Dans le Tableau 1 nous présentons les lectures des piézomètres à tuyau ouvert (SC86, SC87 et SC89) et des piézomètres à corde vibrante (SC88). [37]

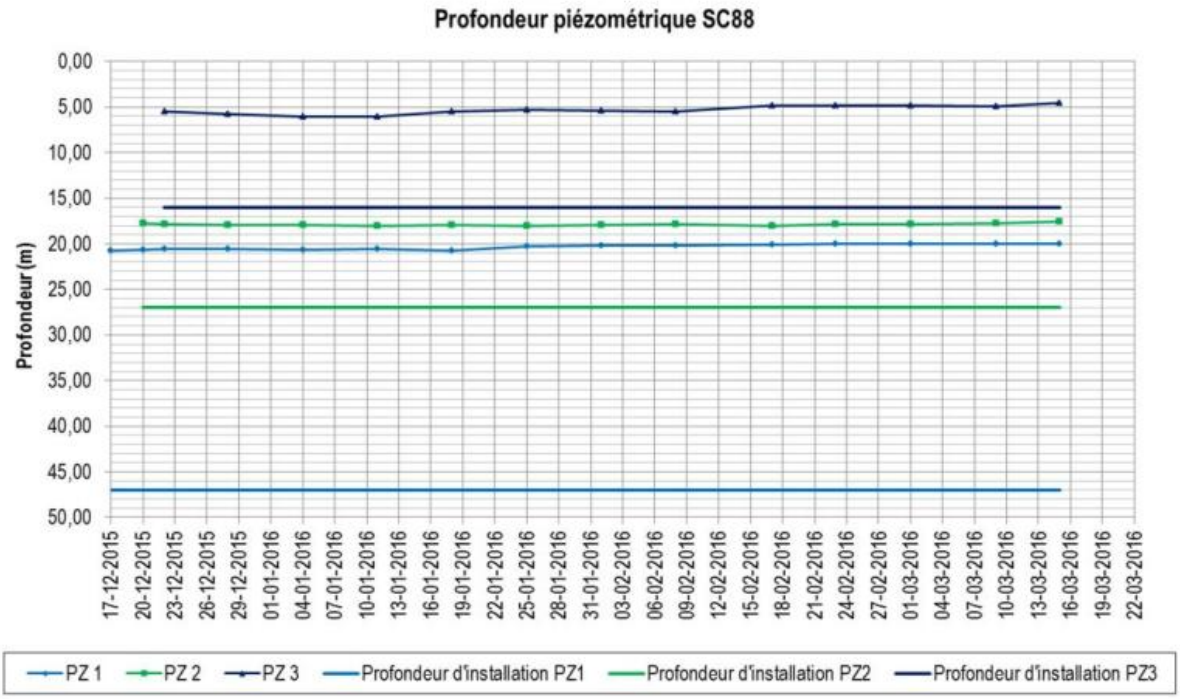


Figure II.9. Exemple de lectures des piézomètres dans le temps « Saisonnalité » [37]

En Résumé l'excavation du tunnel est influencée par l'existence des deux niveaux piézométriques : un niveau superficiel et un autre, plus profonde, qui, à court terme, ne semblent pas communiquer entre elles, probablement liés à la présence de matériaux argileux.

Dans l'unité QS, l'eau y existante est libre,

- Dans les unités QMsg, QMs, l'eau y existante est captive, de sorte qu'elle montre un comportement sous-artésienne traduite par une montée du niveau d'eau des piézomètres, car elle est confinée par l'unité QM de faible perméabilité.

- Dans l'unité Ts, niveau d'eau plus profond (le réservoir Astien), sous pression, sous les marnes de la formation d'El Harrach (anciennement "Maison-Carrée")

4.4.2. Tectonique et sismicité

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique [36]

A. Le nord du pays portant l'empreinte de la tectonique alpine.

B. La Plateforme Saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.
- Le Nord de l'Algérie - est délimité par les éléments suivants :

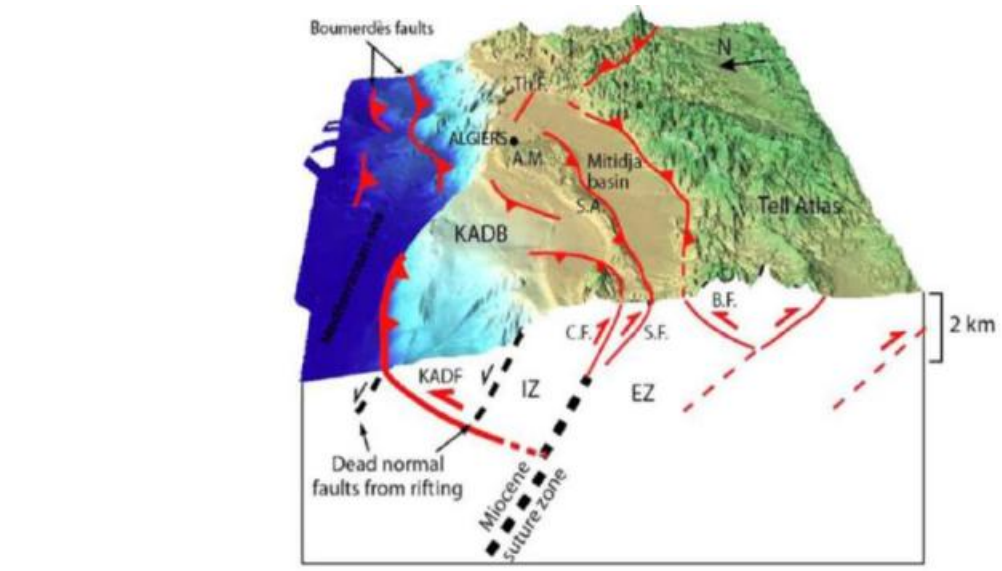
• Au sud, l'Atlas saharien, une chaîne de montagnes d'origine alpine.

• Au centre, des plateformes comme la Méséta Oranaise à l'ouest et le môle d'Ain Regada à l'est.

• Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs comme le Chélif et le Hodna se sont installés sur ces nappes. La Plateforme Saharienne est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs. Différents éléments tectoniques délimitent des bassins sédimentaires dans lesquels la litho stratigraphie est plus ou moins complète [37].

La zone en étude dans le Projet de métro d'Alger Extension EL Harrach Centre – Bab Ezzouar - Aéroport International d'Alger, se situe dans l'unité tectonique correspondant au nord de l'Algérie [37].

La déformation tectonique de la zone ouest-algérienne de l'Atlas tellien, la plus active d'Afrique du nord, est associée à la convergence actuelle des plaques Afrique Eurasie et se traduit par la fermeture progressive des bassins néogènes et par la poursuite de l'édification de la chaîne tellienne (Meghraoui et al, 1988 ; Boudiaf, 1996). La sismicité est superficielle (h < 20 km) et concentrée sur une bande étroite le long des bassins néogènes quaternaires intra montagneux comme ceux du Chellif ou de la Mitidja (Meghraoui, 1988). Ces bassins se déforment en donnant des structures plissées (synclinaux, anticlinaux) et parfois cassantes (pli–failles, failles inverses, chevauchements) orientées NE–SW à NNE–SSW. Cette sismicité se prolonge dans le domaine marin proche des côtes.
La figure suivante présente, de façon schématique, le cadre tectonique de la région d'Alger [37]



KADB : Banc de Khayr al- Din ;
KADF : faille de Khayr al- Din ;
Th.F.: faille de Thenia ;
A.M: Massif d'Alger ;

S.A.: anticlinal de Sahel ;
S.F. : faille de Sahel ;
C.M: Mont Chenoua ;
C.F : faille de Chenoua ;

B.F. : faille de blida
IZ: Zones internes ;
EZ: Zones externes

Figure II.10. Interprétation 3D des principales failles « offshore/ onshore » de la région
d'Alger (extrait de A. Yelles et al, 2009) [36]

4.5.1. Sismicité Historique

Le Nord de l'Algérie est connu historiquement comme une région sismiquement active, qui a généré parfois des pertes humaines et matérielles importantes [36].

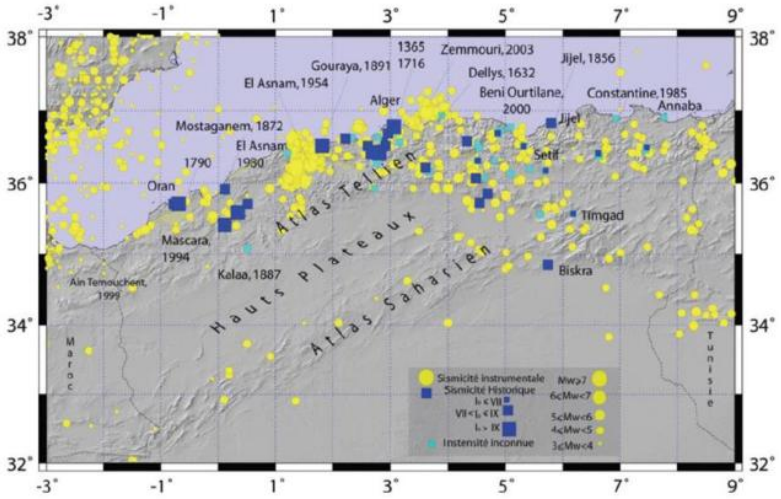


Figure II.11. Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) et de la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005 (source, Benouar, 1995 et ISC) [37].

4.5.2. Les Zones Sismogènes de la région d'Alger

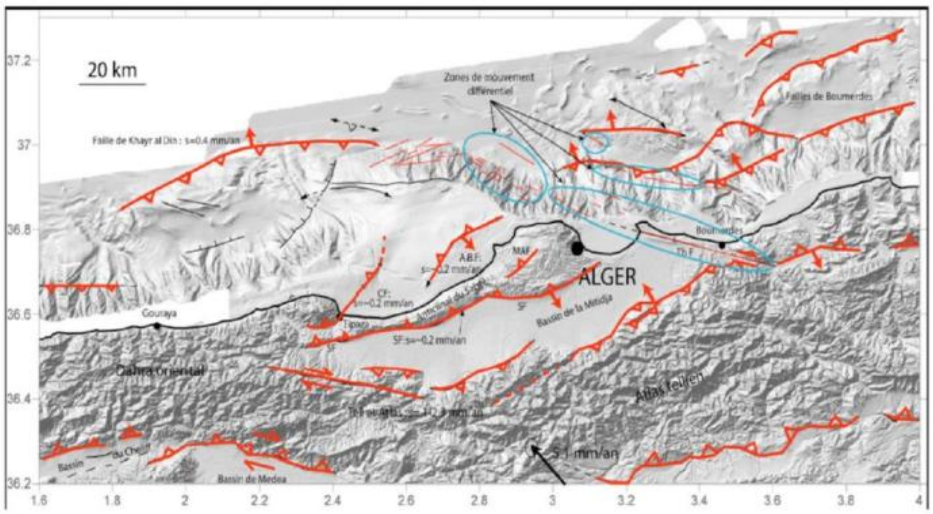
L'activité sismique en la région d'Alger est localisée dans le bassin Néogène de la Mitidja qui est caractérisé par d'importants séismes produits au cours de son histoire. Les études effectuées dans ce bassin (Boudiaf, 1996) montrent que la tectonique active se manifeste le long des bordures nord et sud du bassin par des failles et plis à jeu inverse de direction NE-SW (pli-faille du Sahel) recoupés par des accidents majeurs de direction NWSE qui déforment ces versants et surélevant la région littorale on distingue trois zones sismogènes (Djerouit, 2009) [36].

La région Ouest d'Alger, dans cette région on constate la présence de l'anticlinal du Sahel, structure majeure de près de 60Km de longueur et d'orientation NE-SW. Cette région est affectée par des déformations tectoniques récentes qui touchent les terrains plio-quaternaires. Ils sont aussi constatés des décrochements de direction NW-SE affectant l'anticlinal du Sahel.

Dans la mer, on note l'extension marine de la faille du Chenoua ainsi que l'existence de l'accident de Khair al Din cartographie par la campagne Maradja (Domzig et al, 2006) [36].

Exemple d'un séisme dans cette région : Le séisme Tipaza de 29/10/1989 (Ms=6). La région Sud d'Alger est marquée par le chapelet de failles qui bordent la zone de contact entre le bassin de la Mitidja et le massif de Blida. Il existe des indices de

déformations dans les bordures de ce bassin qui affectant les niveaux plio–quaternaires. Ces déformations correspondent à des décrochements dextres ou à des chevauchements vers le nord des niveaux crétacés sur les niveaux récents du Miocène et du Plio-Quaternaire [36].



En rouge, les principales failles ou plis de part et d'autre de la « prolongation en mer » de la faille de Thénia (Th F). CF : Faille du Chenoua ;SF : Faille du Sahel, MAF : Faille de Mahelma ; A.B.F : Faille d'Ain Benian.

Figure II.12. Carte des structures actives de la région d'Alger (Djerouit 2009) [36].

4.5.3. Condition sismique du cas d'étude

Le territoire Algérienne est divisé en cinq zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité et le tableau qui précise cette répartition par wilaya et par commune soit. [36]

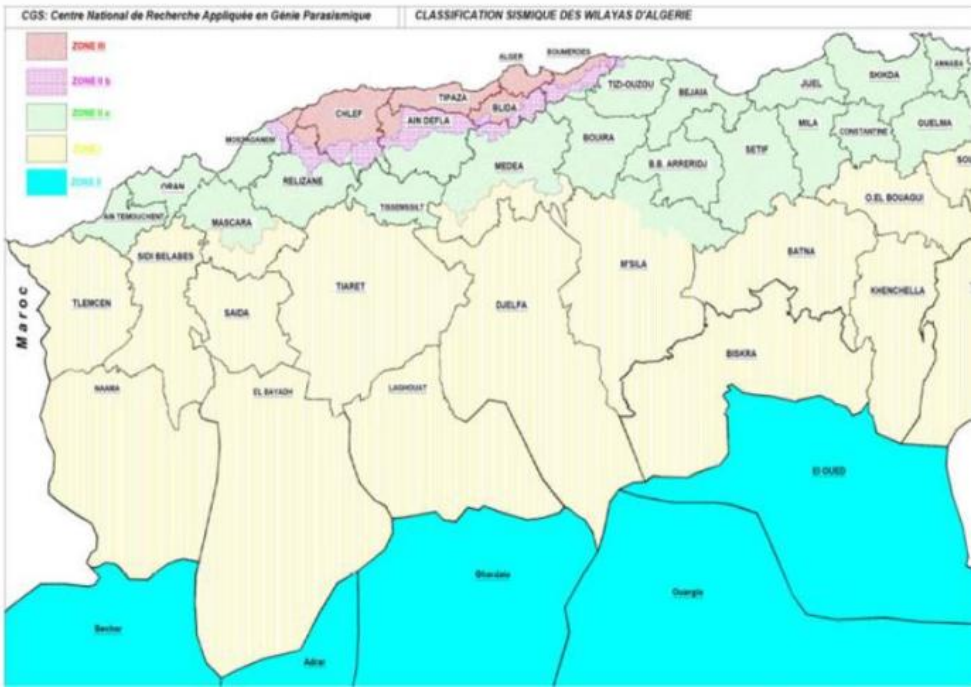


Figure II.13. Carte du Zonage Sismique du Territoire National – RPA99/Apres Addenda [37]

4.5.1. Classification Du site

Pour la prise en compte du risque sismique et en particulier de la valeur du coefficient d'accélération, les tunnels et puits, selon la partie II des RPOA 2008 – Règles Parasismiques Applicables au Domaine des Ouvrages d'Art, sont classés en deux groupes :

- Groupe 1 Tunnels stratégiques - Ce groupe recouvre les tunnels stratégiques devant rester circulables après avoir subi l'action sismique ultime réglementaire.
- Groupe 2 Tunnels importants - Dans ce groupe sont classés les tunnels qui se trouvent sur les chemins de wilaya, chemins communaux ou autre voies.

Cet ouvrage s'encadre dans le Groupe 1.

3.5.2. Coefficient D'accélération

Le coefficient d'accélération est défini en fonction de la zone sismique et de la classe des vrages selon le Tableau 4 ci-dessous :

Tableau II.4 - Coefficient d'accélération selon la classe ouvrages et la zone de sismicité.

Groupe	Zone sismique			
I	**IIa**	**IIb**	**III**	
1	0,15	0,25	0,30	0,40
2	0,12	0,20	0,25	0,30

Extensions du Métro d'Alger (lot 1) El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport Inte.

La région d'étude est située dans la zone sismique III et dans le groupe 1 – tunnels stratégiques, pour cette zone la valeur d'accélération sismique a adopté sera de 0,4g. Il est mpératif de tenir compte de la sismicité régionale avant d'entreprendre toute action de onstruction définitive dans la région d'étude. Cette valeur de 0,4g sera considérée pour tous es calculs des structures internes. Pour les phases provisoires, selon l'indication de l'EMA une valeur de 0,1g devra être considérée.

Conclusion

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont des facteurs importants, qui ont une grande influence sur le choix des méthodes d'excavation, soutènement et revêtement, mais de plus leur connaissance permet d'analyser les problèmes imprévus, donc une bonne reconnaissance du terrain le long du tracé est nécessaire. D'après les informations récoltées concernant la région de la ligne métro d'Alger on constate que :

Le cas d'étude « tronçon 9 » est constituée des quatre formations :

- QS (Sable limono-argileux, parfois plus ou moins mêlés de cailloux, avec présence de grés et conglomérat).
- QM (Argile Marneuses et marnes jaunâtres, parfois sableuses avec intercalation importantes mais irrégulière de conglomérats et grés.)

- QA (Argile limoneuse peu sableuse par endroit)

- QMsg (Sables limono –argileux avec présence de cailloux).

La zone d'étude « tronçon 9 » a une perméabilité moyenne à élever, ça demande l'installation d'un système d'étanchéité adéquat aux conditions rencontrés du terrain.

Chapitre III: Contexte géotechnique du site

Chapitre 3 : Analyse de la stabilité des excavations

Introduction :

L’étude de la stabilité des excavations constitue une étape cruciale dans la réalisation de projets de terrassement ou de construction, que ce soit en milieu urbain ou rural. Elle intervient dès la phase de conception et permet d’évaluer les risques liés aux mouvements de sol, notamment les déformations ou effondrements potentiels des parois excavées. Ces phénomènes sont principalement dus à la modification de l’état de contrainte du sol engendrée par l’excavation. Pour mener cette analyse de manière rigoureuse, il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs, parmi lesquels la nature du sol, sa stratification, ses propriétés mécaniques (comme la cohésion, l’angle de frottement ou la perméabilité), ainsi que la présence d’eau souterraine, qui peut considérablement influencer la stabilité par l’augmentation de la pression interstitielle. Les charges externes, telles que les infrastructures voisines ou les engins de chantier, doivent également être intégrées à l’évaluation. L’objectif de cette démarche est de concevoir des systèmes de soutènement adaptés – comme les parois moulées, les palplanches ou les ancrages – afin d’assurer la sécurité des ouvriers et des structures environnantes. Au-delà de son importance technique, cette étude contribue aussi à la prévention des accidents, à la réduction des coûts liés aux imprévus géotechniques, et à la durabilité des ouvrages construits. [1]

1.Méthodologie d’analyse :

1.2.Collecte des données géotechniques :

La première étape de l’étude consiste à obtenir une compréhension approfondie des conditions géotechniques du site. Cela passe par une série d’investigations sur le terrain et des essais en laboratoire visant à évaluer les caractéristiques physiques et mécaniques des sols.

1.2.1Sondages géotechniques :

Réalisés sous forme de carottages ou de forages destructifs, ces sondages permettent de déterminer la composition, l'épaisseur et la disposition des différentes couches de sol en profondeur. Ils permettent également d'identifier la présence éventuelle de nappes phréatiques. Les échantillons de sol extraits servent ensuite pour les essais en laboratoire, tandis que les données récoltées aident à réaliser une coupe géologique du site, fondamentale pour l'analyse de stabilité.

1.2.2.Essais in situ :

Ces tests sont réalisés directement sur le terrain afin d'obtenir des mesures précises des propriétés mécaniques des sols dans leur état naturel, sans altération par le prélèvement.

1.2.3.Essai pressiométrique (par exemple, Ménard) :

Cet essai mesure la résistance du sol à la pression latérale et permet de déterminer des paramètres cruciaux comme le module de déformation et la pression limite.

1.2.4.Essais au pénétromètre :

Statique (CPT) : Mesure la résistance à la pénétration d'un cône dans le sol, particulièrement adapté aux sols fins.

Dynamique (SPT) : Enregistre le nombre de coups nécessaires pour enfoncer un échantillon dans le sol avec un marteau, utilisé principalement pour les sols grossiers. Ces essais apportent des informations sur la compacité, la portance, et l'hétérogénéité verticale des sols.

1.2.4.Essais en laboratoire :

Réalisés sur les échantillons prélevés lors des sondages, ces tests permettent d'évaluer précisément les propriétés physico-mécaniques des sols.

- **Limites d'Atterberg :**

Ces essais déterminent les états de consistance des sols fins, en fonction de leur teneur en eau, et aident à définir leur comportement sous différents niveaux d'humidité.

- **Essais triaxiaux :**

Ces tests simulent des conditions de contrainte tridimensionnelle, permettant de mesurer la résistance au cisaillement et de modéliser le comportement des sols sous contraintes.

- **Essais de cisaillement direct :**

Ils mesurent la résistance au glissement du sol le long de plans de rupture.

D'autres essais peuvent mesurer la **perméabilité** (vitesse d'écoulement de l'eau à travers le sol), la **densité sèche**, l'**humidité**, la **granulométrie** et les **propriétés chimiques** des sols.

➢ Les résultats de ces investigations permettent de déterminer les paramètres géotechniques essentiels pour l'analyse de stabilité, tels que la **cohésion (c)**, l'**angle de frottement interne (φ)**, la **densité (γ)**, la **perméabilité (k)**, et le **module de déformation (E)**. [2] [3]

1.3.Analyse de la stabilité :

Une fois les caractéristiques géotechniques bien établies, il est possible d'entreprendre l'analyse de la stabilité des excavations. Selon la complexité du site et les exigences du projet, deux grandes approches peuvent être adoptées.[3]

1.4.Méthodes analytiques (équilibre limite) :

Ces méthodes s'appuient sur des modèles théoriques pour analyser l'équilibre entre les forces stabilisatrices et déstabilisantes le long d'une surface de rupture présumée. Elles permettent de calculer un **facteur de sécurité (FoS)**, qui indique le niveau de stabilité du site. Les méthodes les plus couramment utilisées incluent :

- **Coulomb** : adaptée aux talus secs ou légèrement saturés,
- **Bishop** : qui prend mieux en compte les forces intertranches,
- **Janbu** : efficace pour des surfaces de glissement irrégulières,
- **Spencer** : méthode rigoureuse, garantissant un équilibre complet.
- Ces approches sont idéales pour les géométries simples et les sols homogènes.[3]

1.5.Modélisation numérique :

Cette approche est recommandée lorsque le site présente des conditions géotechniques complexes, telles que des sols hétérogènes, des nappes phréatiques influentes, ou des charges dynamiques. Elle permet de simuler de manière réaliste les phénomènes mécaniques et hydrauliques.

Des logiciels spécialisés sont utilisés :

- **PLAXIS**, pour la modélisation par éléments finis en 2D ou 3D,
- **FLAC/FLAC3D**, pour l'analyse explicite de problèmes complexes,
- **GeoStudio**, avec des modules comme SLOPE/W, SEEP/W, et SIGMA/W, pour modéliser des phénomènes spécifiques.
- Ces outils permettent de simuler les contraintes, les déplacements, l'évolution du facteur de sécurité, ainsi que les phénomènes de drainage, de consolidation, et d'écoulement d'eau. Ils intègrent des comportements non linéaires et des conditions limites complexes, offrant une vue détaillée et dynamique de la stabilité du site.[4]

2.Analyse des variations du sol :

2.1.Influence de la stratification et des hétérogénéités

Les sols naturels ont souvent une structure complexe, marquée par une stratification irrégulière. Autrement dit, les couches du sol ne sont pas uniformes et peuvent être constituées de types de sols variés, tels que des **argiles sur des sables** ou des **limons sur des graviers**. Cette stratification a un impact direct sur le comportement mécanique du sol lors des travaux d'excavation, chaque couche ayant des caractéristiques physiques et mécaniques propres. [5]

2.1.1Stratification des sols :

- **Argiles sur sables :** Les argiles, qui sont des sols cohésifs et peu perméables, se comportent différemment des sables, qui sont plus perméables et moins cohésifs. La résistance à la déformation et à la rupture varie donc entre ces deux matériaux.

L'interaction entre ces sols, notamment aux interfaces de chaque couche, peut influencer la stabilité de l'excavation.

- **Limons sur graviers :** Les limons, des sols fins sensibles aux changements d'humidité et aux charges, peuvent afficher des comportements différents lorsqu'ils reposent sur des graviers, qui sont généralement plus résistants et perméables. Cette différence de comportement sous pression peut altérer la réponse du sol à l'excavation. [5]

2.1.2.Zones hétérogènes :

- Certaines zones du sol peuvent présenter des **faiblesses** ou être composées de **matériaux non homogènes**, créant ainsi des zones de faible résistance. Lorsqu'elles sont soumises à des con2.traintes mécaniques, ces zones peuvent devenir des **surfaces de rupture potentielles**, entraînant des phénomènes de glissement ou des déformations localisées. Une attention particulière doit être accordée à ces zones lors de l'analyse de la stabilité, car elles peuvent compromettre la solidité et l'intégrité de la structure à long terme. [5]

2.1.3.Comportement du sol sous contraintes

Le comportement du sol face aux contraintes dépend de plusieurs facteurs, qui doivent être soigneusement pris en compte pour évaluer la stabilité et la déformation du sol lors des travaux d'excavation. [6]

Type de sol :

- **Sols cohésifs :** Des sols comme l'argile possèdent une **forte cohésion interne**, ce qui les rend généralement plus stables. Cependant, leur comportement peut devenir difficile à anticiper sous certaines conditions, en particulier en cas de surcharge ou de saturation, ce qui peut entraîner des déformations accrues.
- **Sols non cohésifs :** Les sables et les graviers, ayant une **faible cohésion interne**, sont principalement influencés par la compaction et la distribution des grains. Bien qu'ils soient moins susceptibles de se déformer sous des charges normales, ils peuvent se détériorer sous certaines conditions, comme en cas de **fluage** ou de **rupture**. [6]

2.3.Répartition des contraintes induites par l'excavation :

- Lors des travaux d'excavation, les **contraintes mécaniques** se transmettent aux couches de sol environnantes. La répartition de ces contraintes dépend de la **géométrie** de l'excavation et de la **stratification** des sols.
- Les contraintes appliquées à des sols cohésifs, comme l'argile, peuvent provoquer des réactions de **compression** ou de **cisaillement**, notamment si la nappe phréatique est proche, ce qui peut augmenter la pression interstitielle et affecter la stabilité du sol. En revanche, dans les sols non cohésifs tels que les sables ou les graviers, ces contraintes peuvent entraîner un **éboulement** ou des **glissements localisés** si la compaction n'est pas adéquate. [6]

2.4.Résistance au cisaillement :

- La **résistance au cisaillement** est un élément crucial dans l'analyse de la stabilité du sol, car elle définit la capacité du sol à résister aux forces parallèles appliquées à ses surfaces de rupture. [6]
- Cette résistance peut diminuer dans plusieurs circonstances, telles que :

- **Saturation du sol :** Lorsqu'un sol est saturé en eau, sa résistance au cisaillement diminue souvent, en raison de la réduction de la friction entre les particules solides du sol. Cela peut entraîner une instabilité, particulièrement dans les sols cohésifs comme les argiles.
- **Surcharge :** L'application d'une surcharge, comme un poids supplémentaire provenant d'une construction, peut également réduire la résistance au cisaillement du sol. Cela peut entraîner des **déformations excessives**, voire des **glissements de terrain** ou des **affaissements**, dans les cas les plus graves . [6]

3. Impact des conditions hydrogéologiques :

3.1.Effets de la pression interstitielle

La pression interstitielle désigne la pression exercée par l'eau contenue dans les pores d'un sol. Cette pression joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique des sols, et son influence se fait particulièrement ressentir lorsqu'il y a présence d'eau. En effet, l'eau modifie la distribution des forces dans le sol, ce qui affecte directement sa résistance au cisaillement et à la déformation. [7]

- **Augmentation de la pression interstitielle :** Lorsque l'eau pénètre dans le sol, elle exerce une pression supplémentaire sur les particules solides, ce qui entraîne une réduction de la cohésion entre elles. Cette diminution de la résistance au cisaillement rend le sol plus vulnérable à la déformation ou à la fissuration sous l'effet de charges appliquées. [7]
- **Instabilité dans certains types de sol :** La présence d'eau peut provoquer une instabilité soudaine, en particulier dans des sols comme les argiles sensibles ou les sables non consolidés. Dans les argiles sensibles, la pression interstitielle accrue peut entraîner un phénomène de liquéfaction, où le sol perd sa rigidité et se comporte presque comme un liquide. De même, dans les sables non consolidés, l'augmentation de la pression interstitielle peut diminuer la cohésion des grains, ce qui accroît les risques de glissement ou de compactage. [7]

3.2.Analyse en conditions saturées et non saturées

Les propriétés mécaniques des sols, telles que leur portance et leur stabilité, sont fortement influencées par leur saturation en eau. On peut distinguer deux grandes catégories de sols en fonction de leur niveau de saturation : les sols saturés et les sols non saturés. [8]

En sol saturé

- **Réduction de la portance et de la stabilité :** Un sol saturé se caractérise par des pores entièrement remplis d'eau. Cette saturation augmente la pression interstitielle, ce qui affaiblit la résistance effective du sol. Par conséquent, les particules du sol deviennent moins capables de supporter les charges appliquées, ce qui entraîne une diminution de la portance.[8]
- **Proximité de nappes phréatiques :** Si la nappe phréatique est proche de l'excavation, les effets de la saturation sont amplifiés. La pression de l'eau dans la nappe peut entraîner un risque accru d'affaissement ou d'instabilité, car elle exerce une pression supplémentaire sur les sols environnants. Les sols fins comme les argiles ou les limons, qui sont déjà sensibles à la saturation, peuvent subir des déformations importantes sous ces conditions. [8]
- **Liquéfaction dans les sols sableux :** Dans certains sols non cohésifs, tels que les sables, une saturation élevée peut entraîner un phénomène appelé liquéfaction. Cela se produit lorsque la pression interstitielle devient suffisamment élevée pour permettre aux particules du sol de se déplacer librement, transformant ainsi le sol en une masse semi-liquide. Ce phénomène est particulièrement problématique dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface. [8]

En sol non saturé

- **Rôle de la succion capillaire :** Dans les sols non saturés, l'eau présente dans les pores forme une pellicule autour des particules solides, générant ainsi une succion capillaire. Cette succion permet de maintenir une certaine cohésion entre les particules du sol, renforçant ainsi la stabilité du sol, notamment dans les sols fins comme les argiles et les limons. [8]
- **Instabilité et dissipation de la succion capillaire :** Cependant, cette stabilité est fragile et instable. La succion capillaire est sensible aux variations d'humidité et peut se dissiper sous l'effet de conditions climatiques, telles que de fortes pluies ou des pompages. Par exemple, après une pluie intense, l'eau peut pénétrer dans les pores du sol et réduire la succion capillaire, ce qui diminue la cohésion entre les particules et accroît le risque de déformation ou de glissement. [8]
- **Impact des pluies et des pompages :** Lorsqu'un pompage est effectué pour abaisser la nappe phréatique ou assécher une zone, la réduction de l'humidité peut altérer la structure du sol. De même, des pluies abondantes peuvent saturer rapidement les sols non saturés et réduire la succion capillaire, rendant ainsi le sol plus susceptible à des mouvements ou à des glissements localisés. [8]

4. Analyse des cas critiques

4.1.Identification des zones à risque élevé

Grâce aux résultats des sondages géotechniques et des modèles numériques, il est possible d'identifier les zones présentant un risque élevé. Ces zones comprennent :

- **Sols mous ou compressibles** : Ces sols, ayant une faible capacité portante, peuvent se déformer sous l'effet des charges et des excavations, entraînant des affaissements.
- **Pentes raides** : Les terrains en pente peuvent être sujets à des glissements de terrain, surtout lorsqu'ils sont perturbés par des travaux d'excavation. [9]
- **Zones à haute perméabilité (drainage rapide)** : Les sols permettant un écoulement rapide de l'eau sont susceptibles de présenter une faible cohésion, rendant ces zones plus vulnérables aux variations de l'humidité et à l'instabilité.

- **Proximité de structures existantes ou de réseaux enterrés** : Lorsque des travaux sont réalisés à proximité d'infrastructures sensibles (comme des bâtiments, des conduites ou des câbles), le risque d'endommagement est considérablement accru. [9]

4.2.Analyse des incidents passés :

L'analyse d'incidents passés et de projets similaires, tels que des glissements de terrain ou des effondrements, offre des informations cruciales. Ces retours d'expérience permettent d'ajuster les méthodes de calcul et les techniques de soutènement, afin de mieux anticiper les risques et garantir la sécurité des travaux. [9]

6. Résultats obtenus :

L'analyse géotechnique a permis d'obtenir des résultats cruciaux pour l'évaluation de la stabilité et de la sécurité du chantier, détaillant les points suivants :

1. **Facteurs de sécurité (FoS) pour différentes configurations :** Les facteurs de sécurité ont été calculés pour diverses conditions de terrain, telles que les états de sol sec, humide ou sous surcharge. Ces valeurs indiquent la marge de sécurité par rapport à un éventuel échec du sol, en prenant en compte les différentes contraintes mécaniques appliquées pendant les travaux d'excavation. Le FoS permet d'évaluer si les forces internes du sol résistent aux forces externes induites par les activités sur site. [10]
2. **Profondeurs critiques pour l'instabilité :** L'analyse a permis d'identifier les profondeurs où l'instabilité du sol pourrait survenir. Ces zones, souvent localisées dans les couches superficielles ou sous-jacentes, sont sensibles aux modifications de la pression ou de la composition du sol. Des travaux d'excavation dans ces zones requièrent une attention particulière, car toute perturbation pourrait entraîner des déformations importantes ou des glissements de terrain. [11]
3. **Recommandations de soutènement :** Selon les conditions géotechniques rencontrées, des solutions de soutènement ont été proposées pour garantir la stabilité du site durant les travaux. Parmi les techniques suggérées figurent les **parois clouées**, qui offrent une résistance accrue aux forces latérales, les **palplanches** pour créer une barrière contre les mouvements de sol, et les **butons** pour soutenir les parois des tranchées ou des excavations profondes. Ces méthodes permettent de limiter les risques d'effondrement et de maintenir une sécurité optimale sur le chantier. [12]
4. **Abaissement de nappe phréatique :** Dans certains cas, il peut être nécessaire de procéder à un abaissement de la nappe phréatique afin de réduire les effets de la pression interstitielle sur la stabilité du sol. Cette opération consiste à pomper l'eau pour abaisser son niveau, afin de minimiser les risques de liquéfaction du sol, de déformation ou de glissements dans les sols saturés. L'abaissement peut également améliorer les conditions de travail pour les excavations profondes. [13]
5. **Zones nécessitant une surveillance pendant les travaux :** Certaines zones, identifiées comme présentant un risque accru d'instabilité, devront être surveillées de près pendant les travaux. Des instruments comme des **inclinomètres** et des **piézomètres** seront utilisés pour mesurer les mouvements de terrain et les variations de la pression interstitielle. L'utilisation de ces dispositifs permet de détecter rapidement tout changement significatif dans la stabilité du sol, ce qui permet de réagir à temps pour éviter des incidents ou des accidents graves. [14]

1. La méthode "Top-Down" :

La **méthode "Top-Down"** (en français : méthode descendante) est une technique de construction où on **construit le bâtiment de haut en bas**, en particulier les sous-sols. C'est l'inverse de la méthode classique **"Bottom-Up"** (méthode montante), où on commence par creuser jusqu'au fond, puis on construit les étages en remontant. [16]

2. Pourquoi utiliser cette méthode ?

Elle est surtout utilisée en **milieu urbain**, dans les **villes denses**, où il est difficile de :

- Fermer des rues trop longtemps,
- Faire beaucoup de bruit,
- Avoir assez de place pour stocker la terre ou les matériaux.

Elle permet donc de **garder l'activité à la surface** (routes, trottoirs, bâtiments autour) **pendant les travaux de sous-sol**. [16]

3. Étapes détaillées de construction :

Étape 1 : Construction des parois de soutènement

- Avant de commencer à creuser, on construit **des murs autour du terrain**, pour **empêcher la terre de s'effondrer**.
- Ces murs peuvent être :
    - **Parois moulées** (béton coulé dans le sol),
    - **Pieux sécants** (pieux qui se recouvrent partiellement),
    - **Palplanches** (planches métalliques enfoncées dans le sol). [17]

Étape 2 : Pose des poteaux porteurs

- Ensuite, on met en place des **pieux ou colonnes profondes** qui vont supporter la structure du bâtiment.
- Ces poteaux sont **permanents** : ils resteront là même après la fin du chantier.
- Ils servent de **support pour les planchers (dalles)** qui seront construits plus tard. [17]

Étape 3 : Construction de la dalle de couverture (le plancher du rez-de-chaussée)

- On construit maintenant le **plancher supérieur** du bâtiment, **avant de creuser le sol en dessous**.
- On y laisse **des ouvertures** pour que les **engins puissent passer** et continuer à creuser. [17]

Étape 4 : Excavation sous la dalle

- Une fois que la dalle est posée, on commence à **creuser en dessous**, en passant par les ouvertures.
- Quand on atteint un certain niveau, on construit la **dalle de cet étage**, puis on continue à descendre.
- On répète ça **étage par étage**, jusqu'au niveau le plus bas. [17]

Étape 5 : Construction du radier (fondation)

- Enfin, arrivé tout en bas, on coule le **radier**, c'est-à-dire le **plancher de fondation** qui repose sur le sol. [17]

4. Avantages de la méthode "Top-Down" :

1. **Moins de perturbation en surface**
   - On peut continuer à utiliser les routes ou trottoirs pendant les travaux.
2. **Stabilisation plus rapide**
   - Les planchers construits agissent comme des **butons rigides** pour soutenir les murs, donc c'est **plus sécurisé**.
3. **Gain de temps**
   - On peut **construire en surface et creuser en même temps**, donc le projet avance plus vite.
4. **Sécurité dans les zones denses**
   - Moins de risque d'effondrement ou de problème pour les bâtiments voisins. [16]

5. Inconvénients :

1. **Planification complexe**
   - Il faut **coordonner plusieurs étapes en même temps** : creuser et construire.
2. **Ouvertures nécessaires**
   - Il faut laisser des **trous dans les dalles** pour les engins, ce qui complique un peu la structure.
3. **Coût plus élevé**
   - Surtout au début, pour préparer les murs et les poteaux.
4. **Moins de flexibilité**
   - Une fois les premières dalles posées, il est plus difficile de modifier le plan. [17]

6. Applications typiques :

- **Parkings souterrains** en centre-ville.
- **Stations de métro ou gares souterraines**.
- **Immeubles avec plusieurs niveaux de sous-sol** (ex : hôtels, hôpitaux, centres commerciaux).

- Projets dans des endroits **où l'espace est limité**, ou **où on doit faire peu de bruit**. [18]

Vyre

La référence

[1]Bowels, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, McGraw-Hill.
➤ Référence classique pour les analyses de stabilité et propriétés des sols.

[2] **Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G.** (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). Wiley-Interscience.

[3] **Lambe, T. W., & Whitman, R. V.** (1979). *Soil Mechanics* (3rd ed.). Wiley.

[4] **Craig, R. F.** (2004). *Soil Mechanics* (7th ed.). CRC Press.

[5] https://theses.hal.science/tel-00536237/file/HDR-deFOUQUET.pdf

[6] https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm

[7] **Lunne, T., & Palmström, A. (2002).** "Geotechnical Engineering." McGraw-Hill.

[8] **Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996).** "Soil Mechanics in Engineering Practice." Wiley.

[9] **foraterra.**frles-differentes-etapes-dune-etude-de-sol .

[10] **Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G.** (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). Wiley.
➤ Référence fondamentale sur la mécanique des sols, les facteurs de sécurité, la pression interstitielle et la stabilité des excavations.

[11] **Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M.** (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional.
➤ Traite de l'identification des couches critiques et de la reconnaissance de zones à risque.

[12] **Craig, R. F.** (2004). *Craig's Soil Mechanics* (7th ed.). Taylor & Francis.
➤ Contient des explications détaillées sur les méthodes de soutènement, la stabilité des talus, et le comportement des sols saturés ou non saturés.

[13] **Eurocode 7 :** *EN 1997-1: Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 1: General Rules*.
➤ Norme européenne couvrant les calculs de stabilité, les facteurs de sécurité (FoS), et les recommandations de surveillance en chantier.

[14] **CFMS (2022).** *Rapport du groupe de travail sur le rabattement de nappe phréatique*. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique.
➤ Fournit des recommandations sur les méthodes d'abaissement de nappe et leurs effets sur la stabilité du sol.
➤ Lien PDF

AFNOR (Association Française de Normalisation) – Normes de construction liées au soutènement et aux fondations.

[15]**"Techniques de construction – Tome 1 : Fondations et terrassements"**, de G. Chevalier, Éditions Eyrolles.

[16]**Documents techniques des entreprises de BTP** comme Bouygues Construction, Vinci,

[17]https://www.techniques-ingenieur.fr

[18]https://www.soldata.com (géotechnique et suivi de chantiers)

Chapitre VI
Modélisation numérique, résultats et interprétations

1. Introduction

L'objectif de l'utilisation du logiciel PLAXIS pour la modélisation est d'obtenir une représentation plus précise de la géométrie de l'édifice et des diverses couches du sol grâce aux paramètres du modèle comportemental. Cela permet également de contrôler les affaissements du sol suite à une activité sismique.

2. Présentation du projet

Ce travail consiste un étude d'une Station Aéroport située sur le côté Ouest du parking Houari Boumediene, lequel sert le terminal existant, à Nord du nouveau terminal actuellement en construction, dans une surface topographiquement plaine et sans la présence de bâtiments de caractère définitif.

La zone d'implantation de la station et des accès respectifs (Nord, Sud et Ouest) correspond à une surface d'environ 6700 m^2. [46]



Figure VI.1. Vue générale de la zone d'implantation de la station Aéroport [46]

Le modèle numérique à 161,6 m de largeur et 65 m de hauteur la profondeur des parois moulées est 42 m. tenant en compte le type de problème, un calcul en état plan de déformation a été considéré.

- Coupe transversale du modèle

Le modèle géométrique choisi pour la modélisation de la station est représenté sur la Figure VI.2.

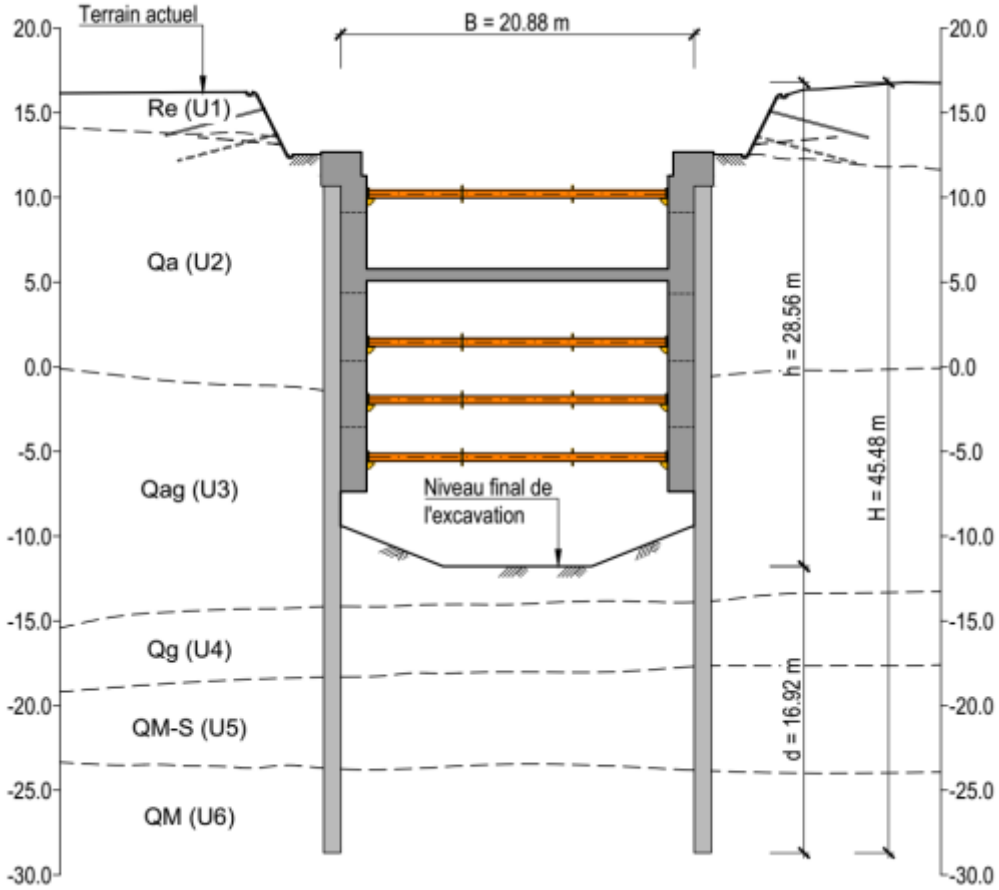


Figure VI. 2. Structure Les couches constituant le modèle géométrique.

Les caractéristiques des couches de sol et des interfaces sont résumées dans le Tableau suivante :

Tableau VI.1. Paramètres géotechniques de calcul – sols.

Couches	R	Qa et Qag	QM	QMs
Profondeurs moyennes	0.0-5.0	4.0-21.5	18.0-34.5>40.5	34.5-42
Poids vol. Humide γ_h (KN/m3)	20	20.0	20	20
Poids vol. Sèche γ_d (KN/m3)	17	17.0	17	17
Cohésion non drainé s_u(Mpa)	30	s_u=1.9 (z-4.0) +77	s_u =0.5 (z-18) +123	-
Module de déformation non drainé E_u (Mpa)	12	E_u =1.0 (z-4) +42	E_u =0.3 (z-18) +72	-
Angle de frottement effective Q (°)	20	21.0	22	32.0
Cohésion effective C (kpa)	0.0	25	35	5.0
Module de déformation draine E (Mpa)	10.0	41	67	70.0
Coefficient K_0	0.7	0.7	0.6	0.6

VI.2.4. Les données géologiques

A. Paramètres structurels

Les éléments en béton armé ont été modélisés dans le logiciel PLAXIS 2D comme des éléments type « plate », (dalle intermédiaire, dalle inferieure, et les parois moulées)

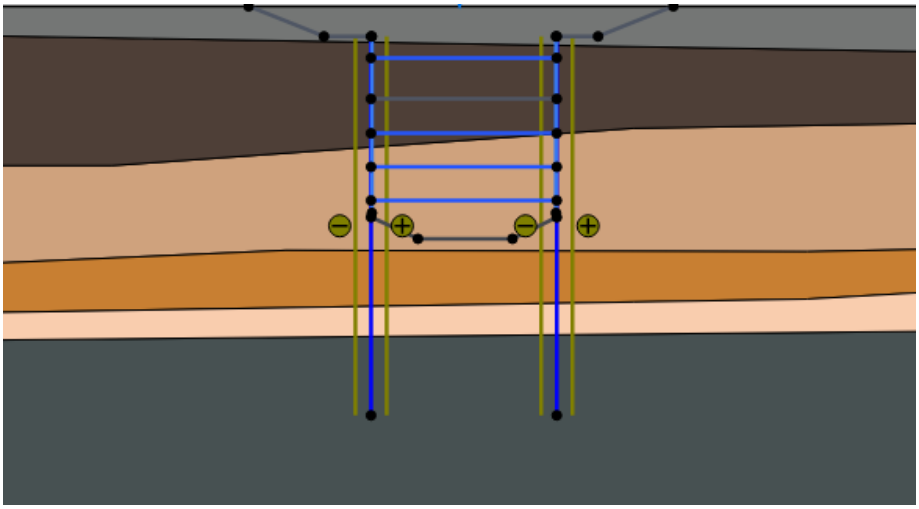


Figure VI.3. Géométrie du modèle de calcul.

Selon les spécifications du projet et selon les indications des normes applicables, notamment en ce qui concerne la capacité portante et la déformabilité. Ces éléments structurels présentent un comportement linéaire élastique.

Tableau VI.2. Caractéristiques des éléments structurels type « plate ».

Elément structurel	EA (KN/m)	EI (KN.m2/m)	υ
Paroi moulée	33x10$_6$	2.75x10$_6$	0.2
Dalle supérieur et inférieure	**19.10x10$_6$**	**944.70x10$_3$**	**0.2**

B. Maillage et conditions aux limites

Les éléments utilisés pour le maillage sont des éléments triangulaires à 15 nœuds. Ce maillage nous donne une distribution plus fine des nœuds, ce qui implique que les résultats vont être plus précis par rapport au même maillage avec 6 nœuds.

Cependant l'utilisation d'éléments à 15 nœuds prend plus de temps.

Les conditions aux limites sont souvent complexes et elles conditionnent naturellement la qualité et la précision de la modélisation. Les conditions aux limites mécaniques se basent sur les équations d'équilibre mécanique (soit cinématique, soit statique).

Dans notre cas, les déplacements sont imposés nuls (ux = uy = 0). A la base du modèle les déplacements horizontaux sont bloqués sur les frontières latérales avec des conditions aux limites absorbantes afin de minimiser l'effet du séisme (champ libre)

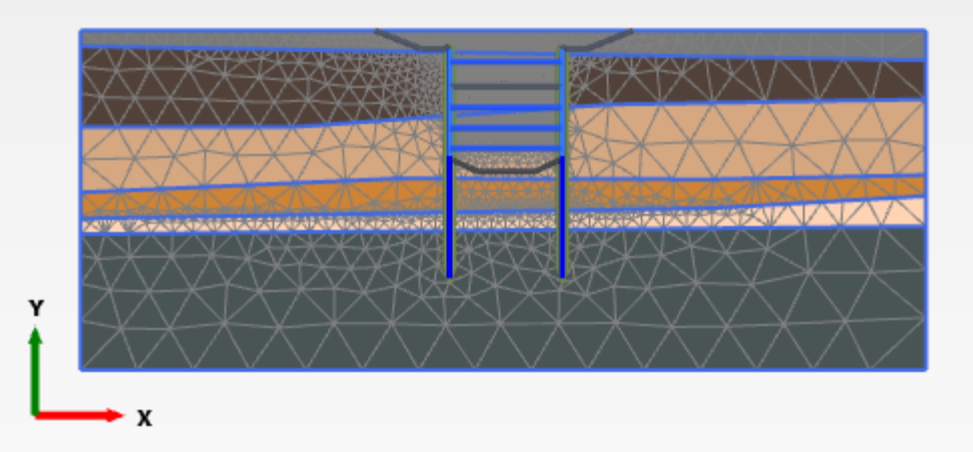


Figure VI.4. Maillage et conditions aux limites du corps de la station

Les conditions initiales ont pour but de déterminer les pressions interstitielles initiales et les contraintes initiales.

➢ **Conditions hydrauliques**

C'est la définition du niveau de la nappe phréatique. La nappe phréatique est positionnée à la surface du sol support.

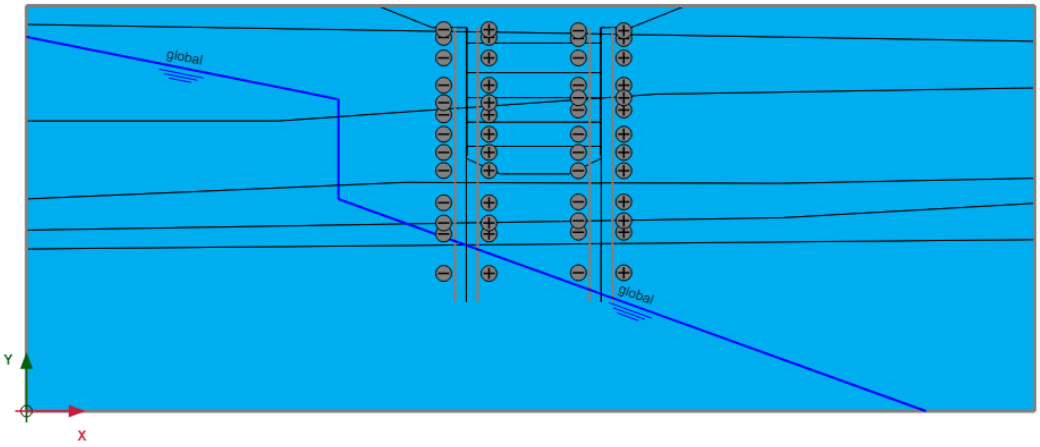


Figure VI.5. Position de la nappe phréatique.

➢ **Contraintes initiales**

Génération du champ de contraintes initiales dû au poids des terres se fait par la fixation d'une valeur particulière du coefficient du poids des terres au repos K_0 (K_0=1-sinφ), et puis activé le poids du sol intégralement.

. Phasage de modélisation numérique

Phase I: Génération de l'état de contrainte initial au travers de l'application du K0 pour une situation à long terme ;

Phase II: Application d'une surcharge de 11,10 kPa dans la surface ;

Phase III: Modification du type de réponse du terrain, de drainé pour non drainé ;

Phase VI: Dans la zone du chantier, substitution de la valeur de la surcharge appliquée dans la Phase II par 55,56 kPa;

Phase V: Exécution des parois moulées (Phase Va) et, le cas échant, de la solution de traitement du terrain au-dessous du fond de l'excavation (Phase Vb) ;

Phase VI: Première phase d'excavation, avec 3,5 m de hauteur, jusqu'au niveau de haut des parois moulées ;

Phase VII: Deuxième phase d'excavation, avec 4,0 m de hauteur, jusqu'à 1,5 m au-dessous de la cote d'installation du premier niveau de butonnage ;

Phase VIII: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation du premier niveau de butonnage. Troisième phase d'excavation, avec 4,25 m de hauteur, jusqu'à 1,0 m au-dessous de la cote d'exécution de la dalle intermédiaire ;

Phase IX: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation de la dalle intermédiaire. Quatrième phase d'excavation, avec 4,5 m de hauteur, jusqu'à 1,5 m au-dessous de la cote d'installation du troisième niveau de butonnage ;

Phase X: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation du troisième niveau de butonnage. Cinquième phase d'excavation, avec 3,9 m de hauteur, jusqu'à 1,5 m au-dessous de la cote d'installation du quatrième niveau de butonnage ;

Phase XI: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation du quatrième niveau de butonnage. Sixième phase d'excavation, avec 3,9 m de hauteur, jusqu'à 1,5 m au-dessous de la cote d'installation du cinquième niveau de butonnage ;

Phase XII: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation du cinquième niveau de butonnage. Septième phase d'excavation, avec 4,45 m de hauteur maximale, jusqu'à 0,5 m au-dessous de la cote théorique finale de l'excavation ;

Phase XIII: Augmentation de l'épaisseur des parois dans les tronçons exposés dans la phase précédente. Activation de la dalle de fond ;

Phase XIV: Désactivation du cinquième niveau de butonnage ;

Phase XV: Désactivation du quatrième niveau de butonnage ;

Phase XVI: Application d'une surcharge de 42,45 kPa sur la dalle intermédiaire de façon à simuler le procès de bétonnage de la dalle supérieure ;

Phase XVII: Activation de la dalle supérieure. Substitution de la valeur de la surcharge appliquée sur la dalle intermédiaire dans la Phase XVI par 25 kPa (surcharge de service, à définir dans projet des structures intérieures) ;

Phase XVIII: Désactivation du premier niveau de butonnage ;

Phase XIX: Activation de la dalle inférieure et application d'une surcharge de 25 kPa (surcharge de service, à définir dans projet des structures intérieures) ;

Phase XX: Désactivation du troisième niveau de butonnage ;

Phase XXI: Remblai sur la dalle supérieure jusqu'à la cote du terrain naturel et application d'une surcharge de 11,10 kPa dans la surface.

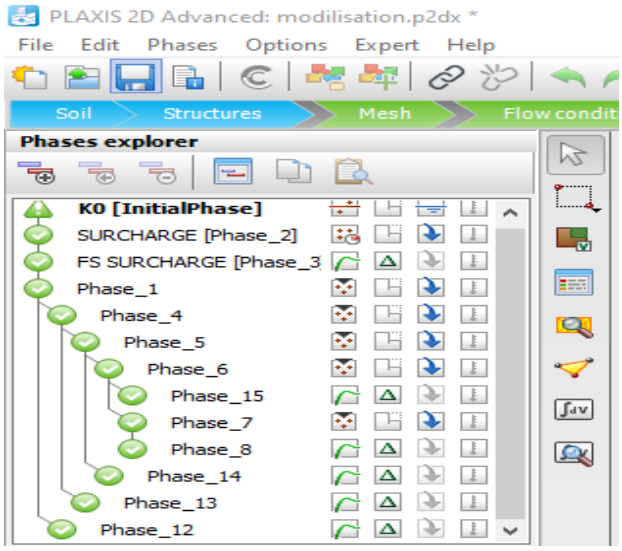


Figure VI.6. Phasage de modélisation numérique

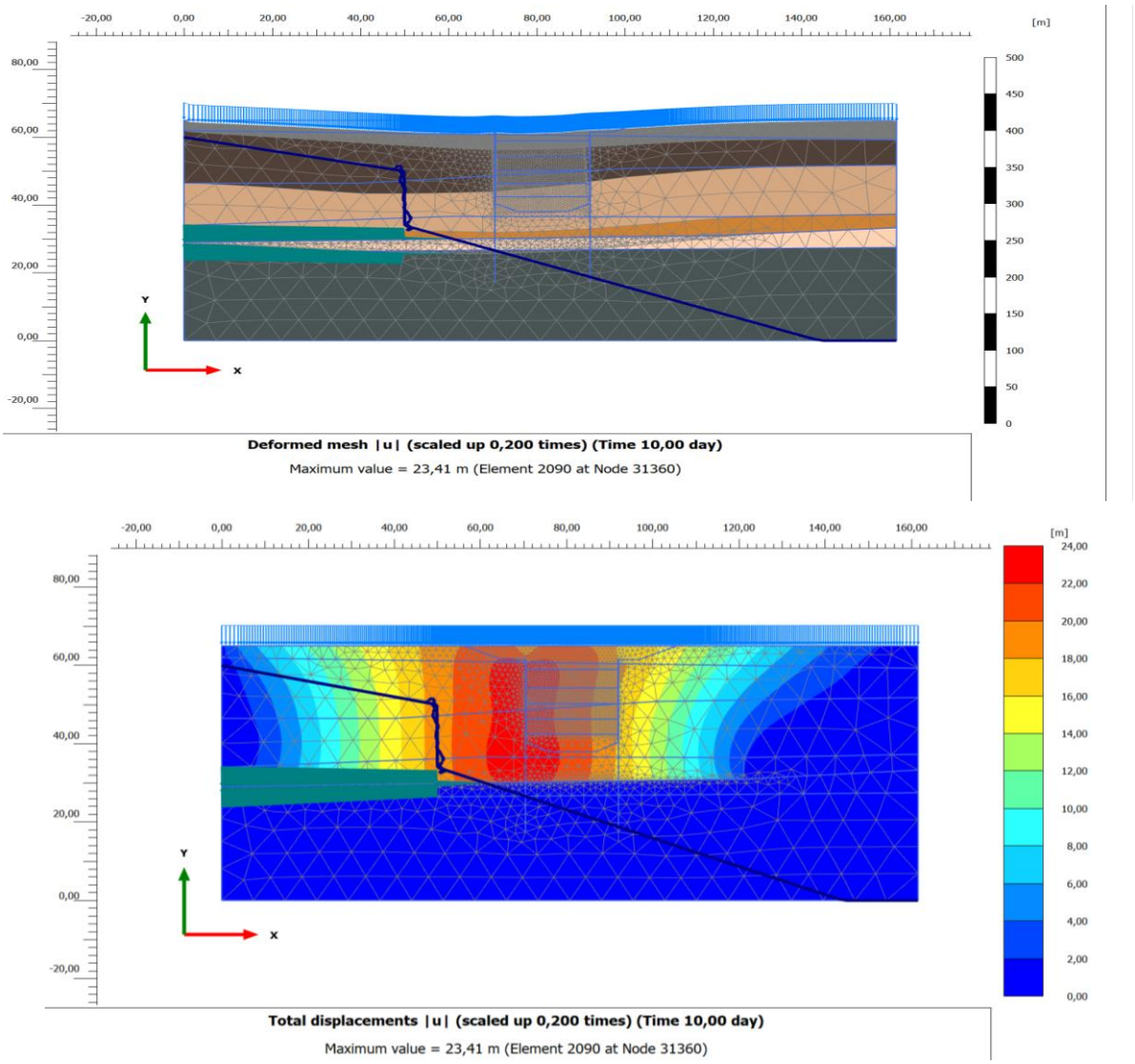


Figure VI. 7. Phase 1 Deformed mesh**,**Total displacement.

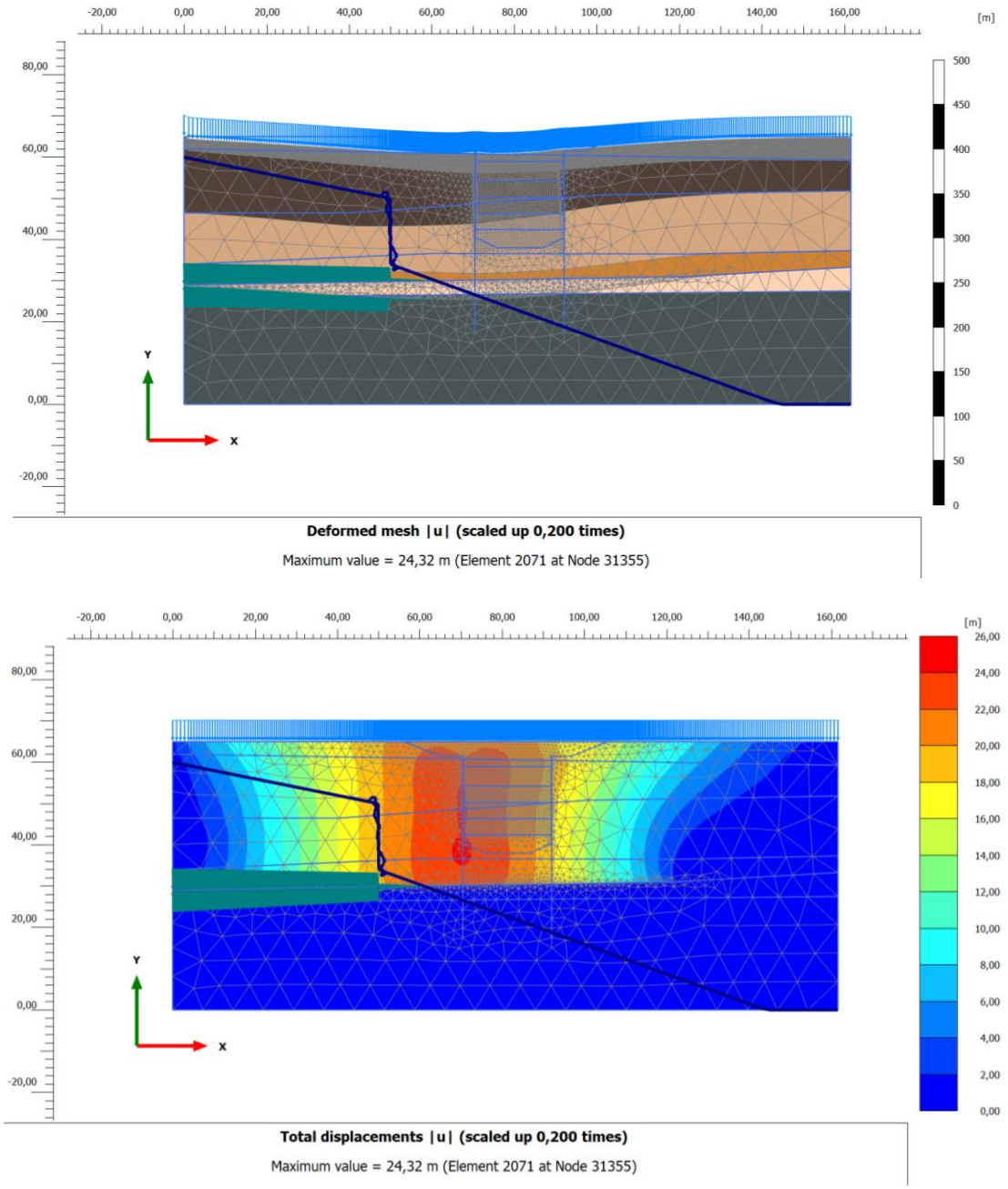


Figure VI.8. Phase 2 Deformed mesh**,**Total displacement.

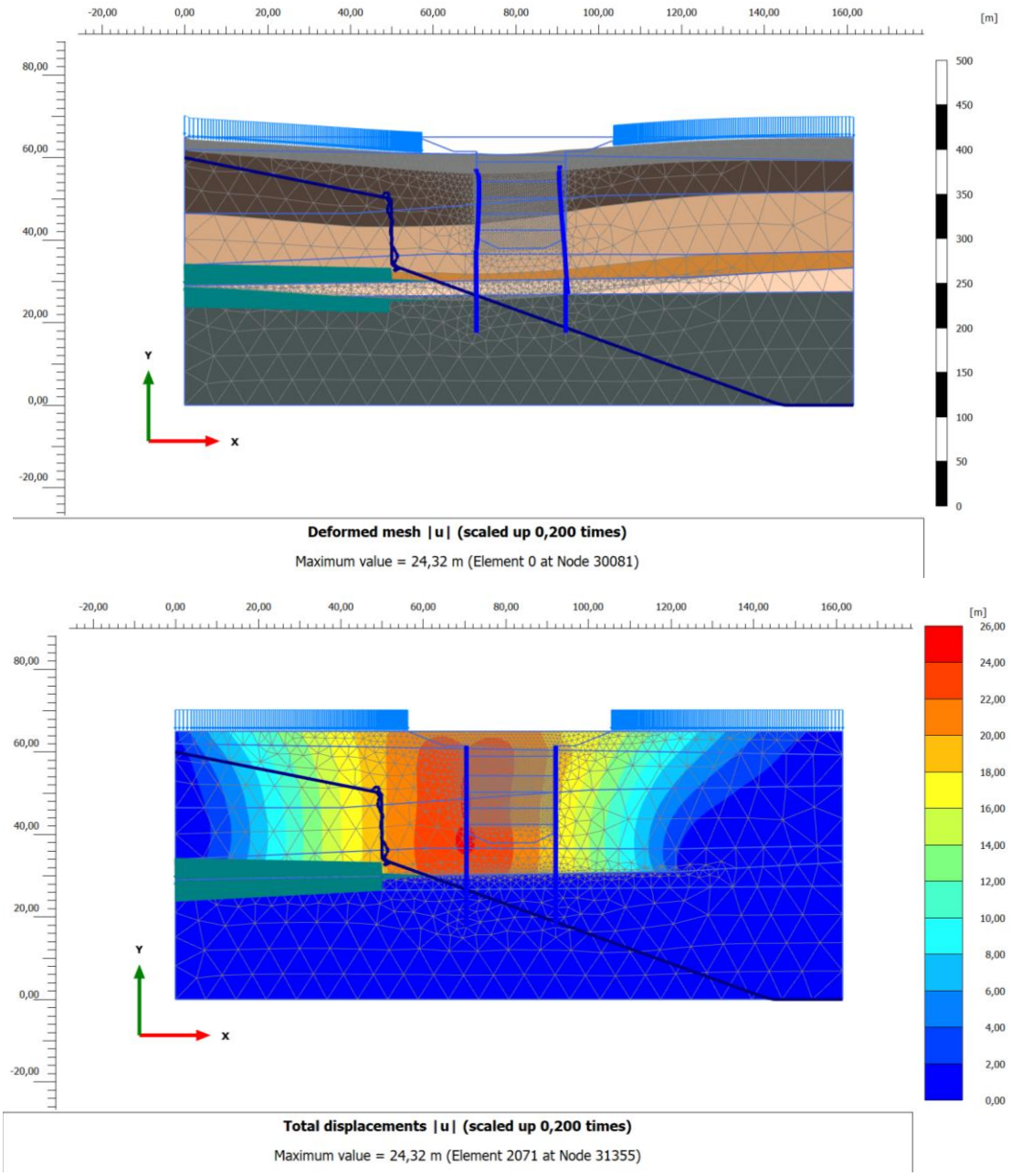


Figure VI .9. **Phase 3**Deformed mesh,Total displacement.

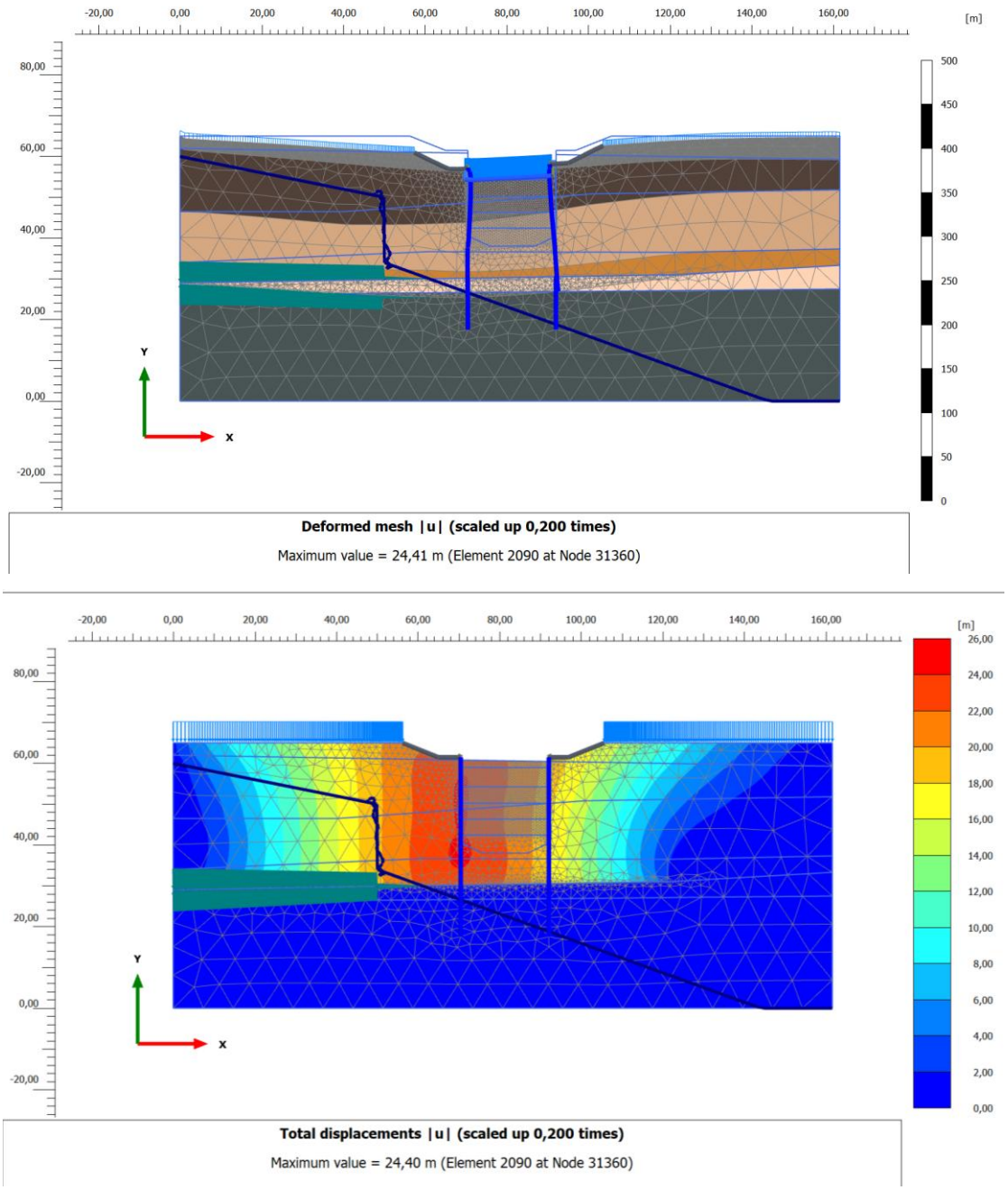


Figure VI.10. **Phase 4** Deformed mesh**,**Total displacement.

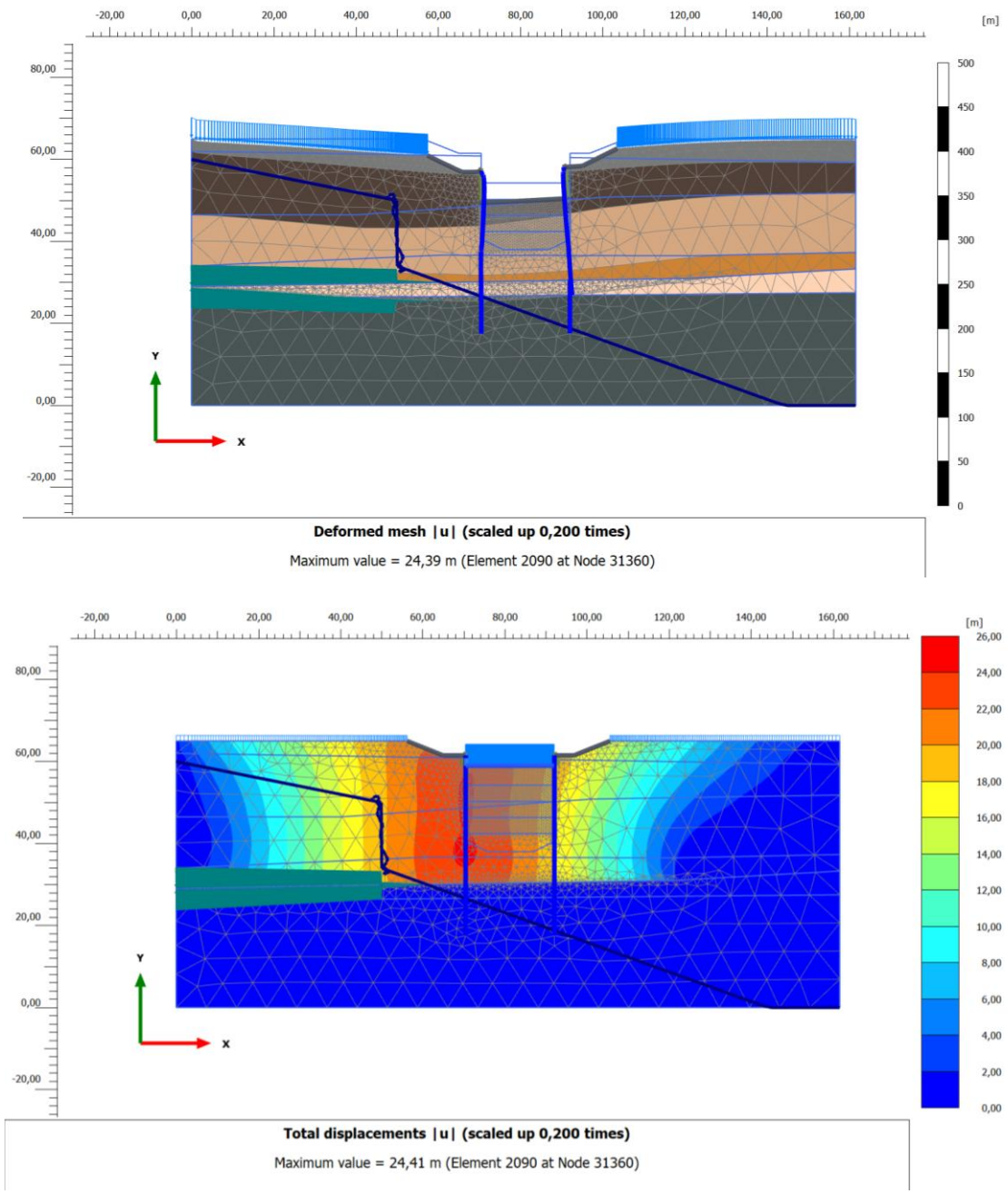
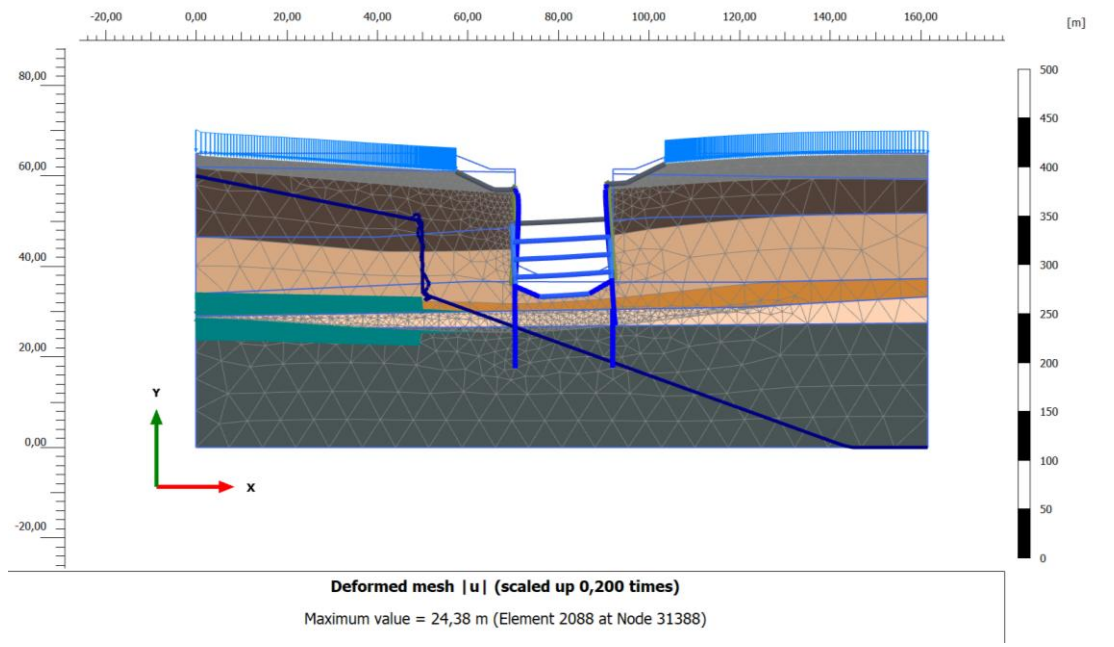


Figure VI .11 Phase 5.Deformed mesh**,**Total displacement.



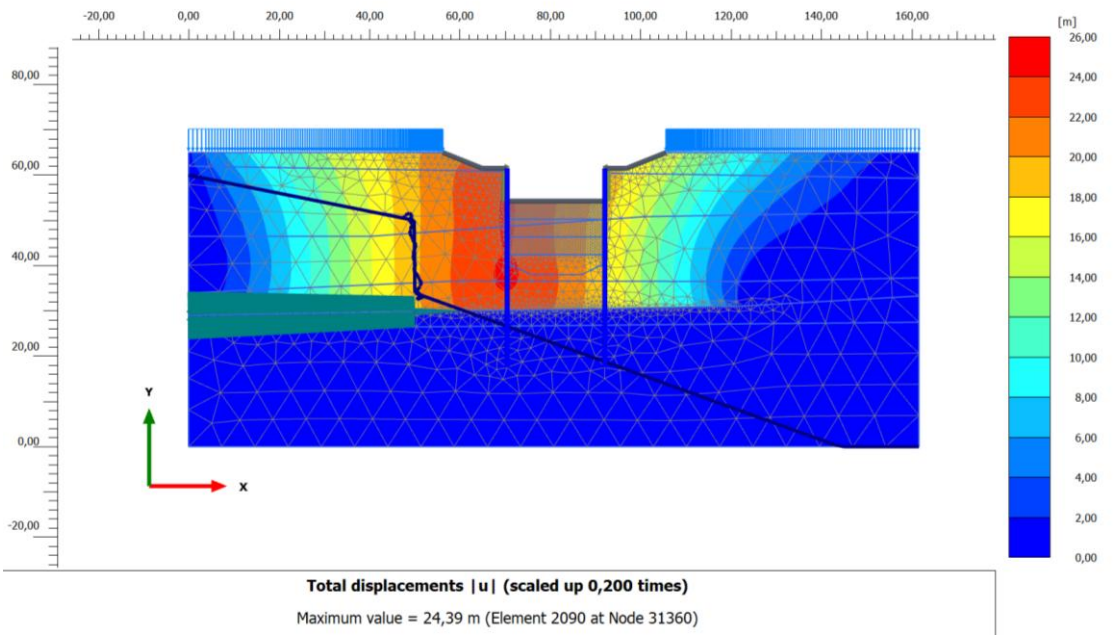


Figure VI .12 Phase 6.Deformed mesh**,**Total displacement.

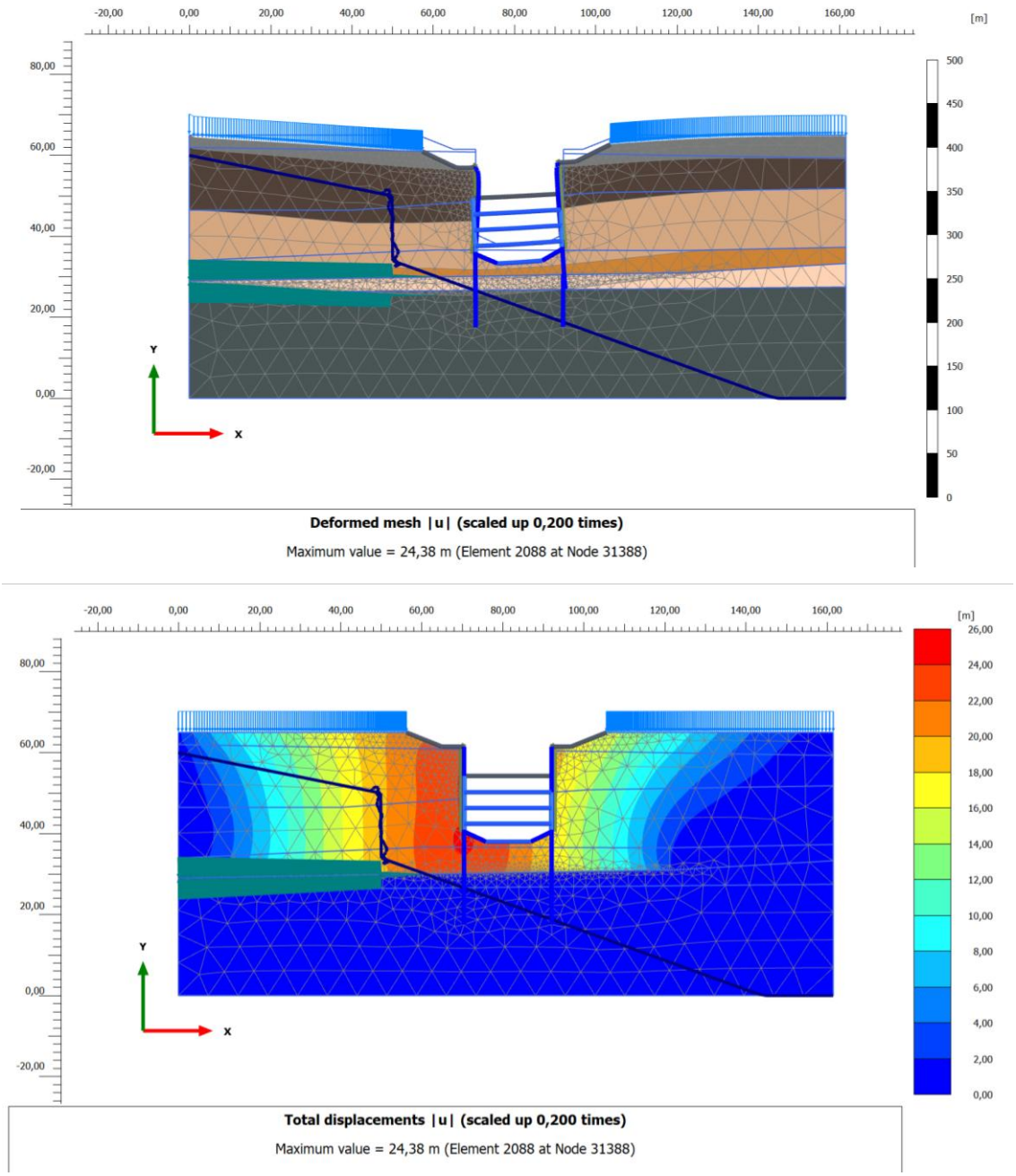


Figure VI .13 **Phase 7** .Deformed mesh,Total displacement.

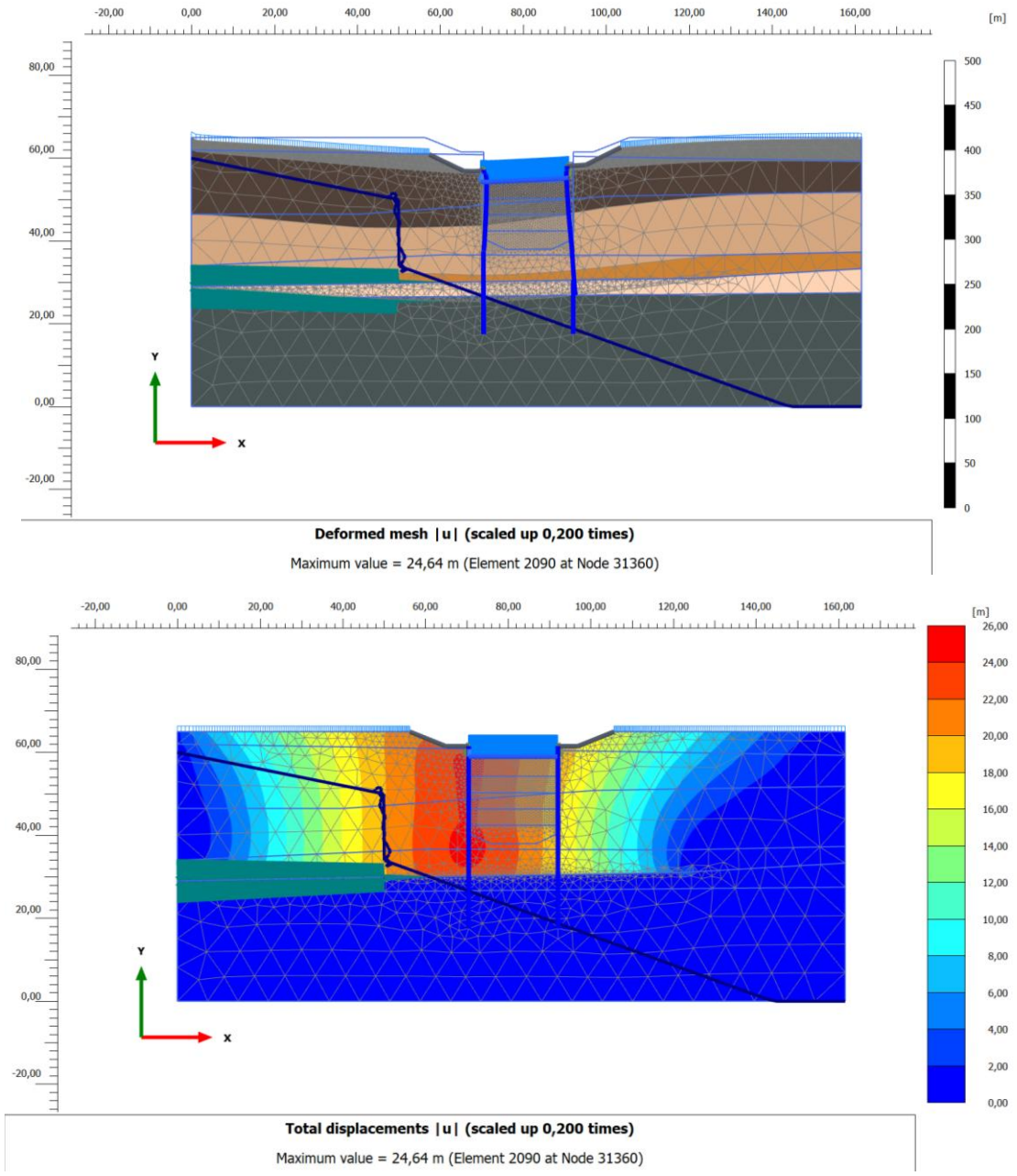


Figure VI .14 Phase 8 .Deformed mesh,Total displacement.

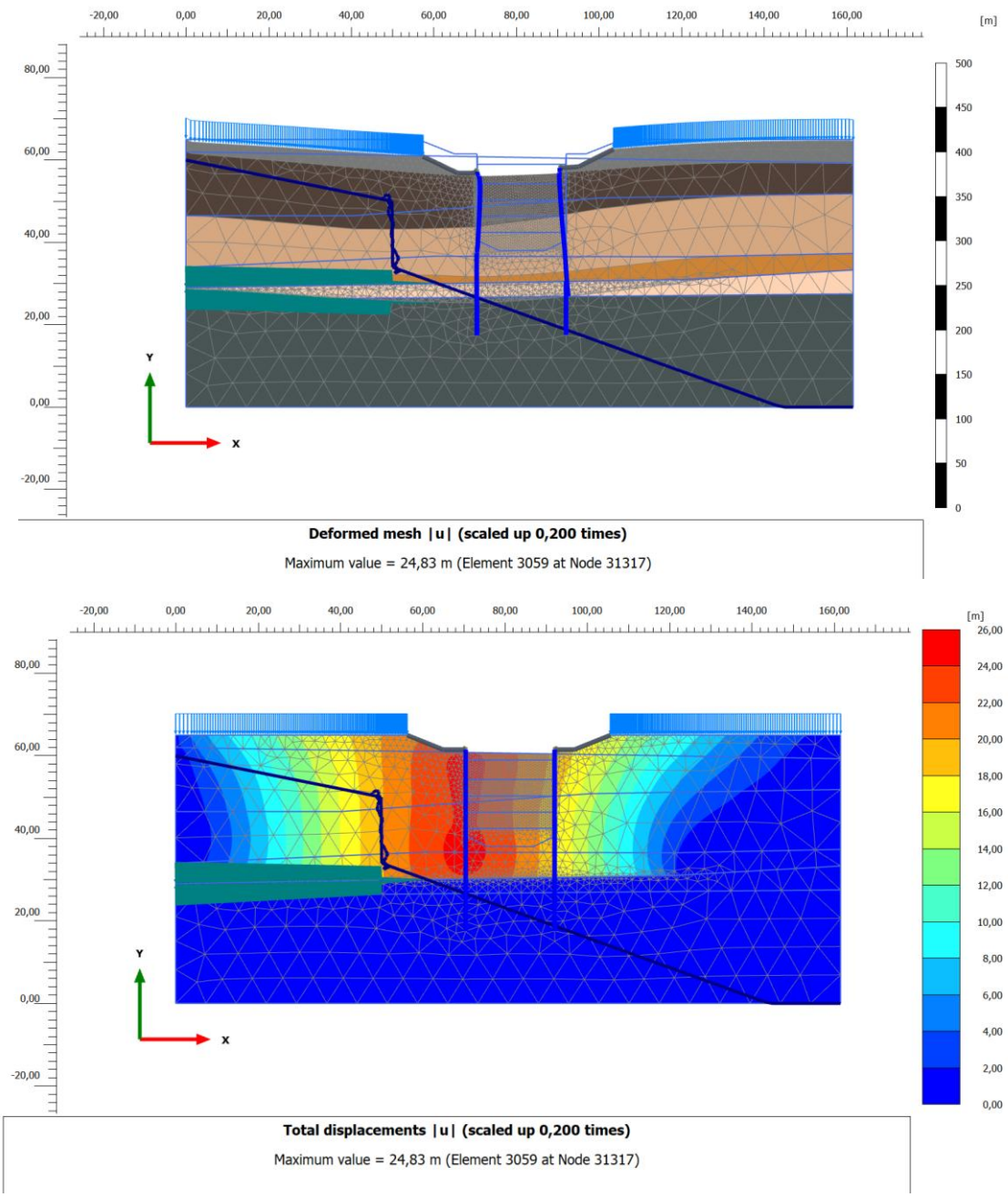
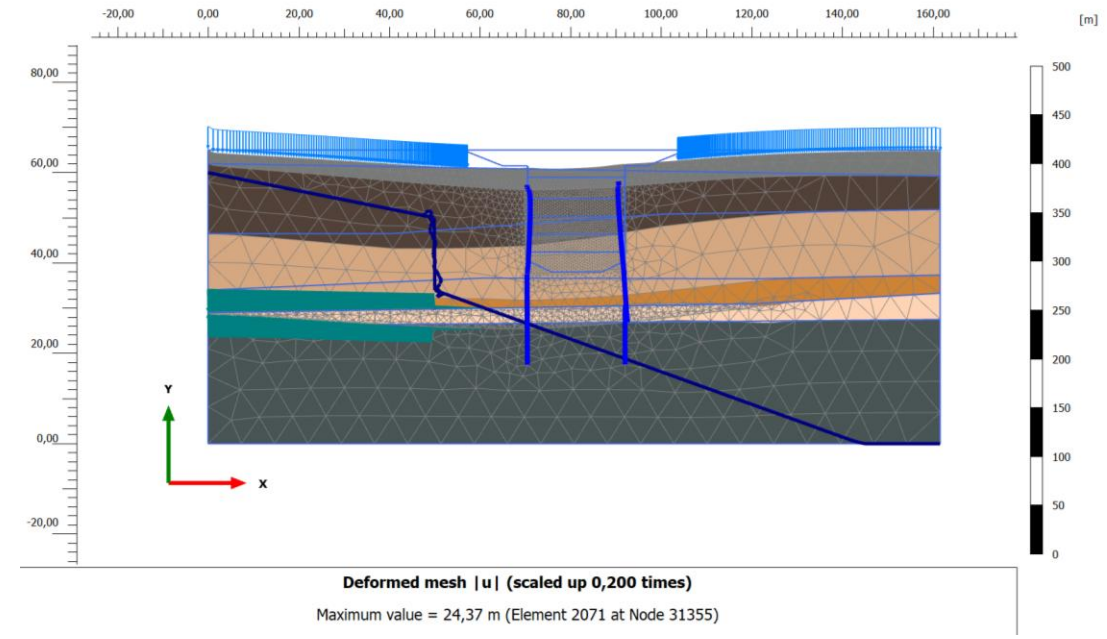


Figure VI .15 **Phase 9** .Deformed mesh,Total displacement.



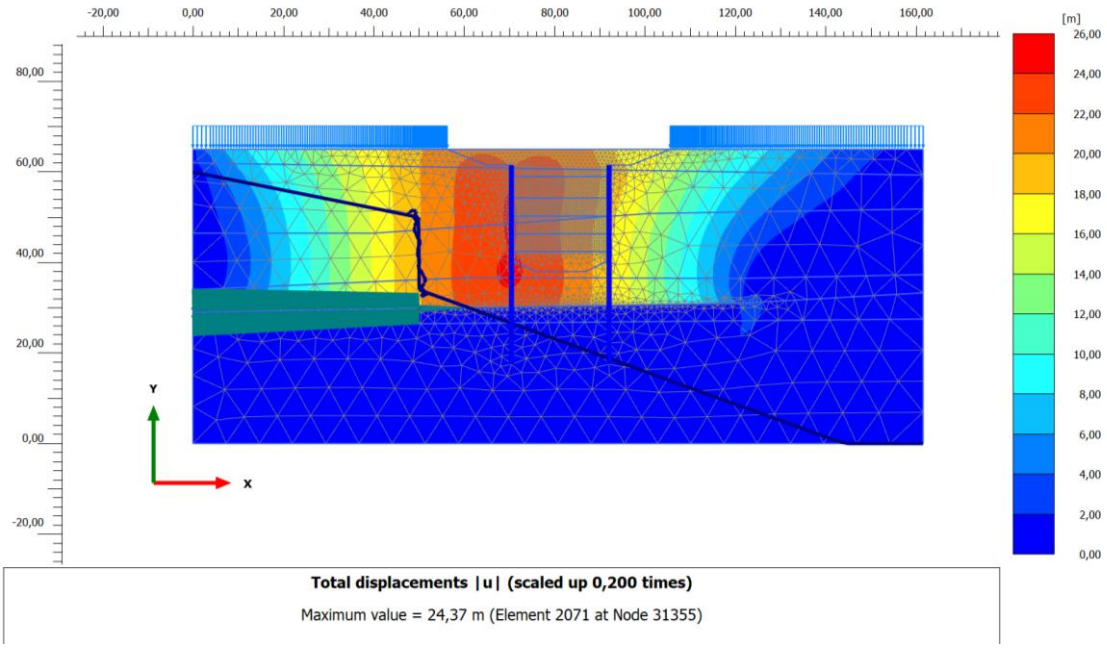


Figure VI .16 **Phase 10** .Deformed mesh**,** Total displacement.

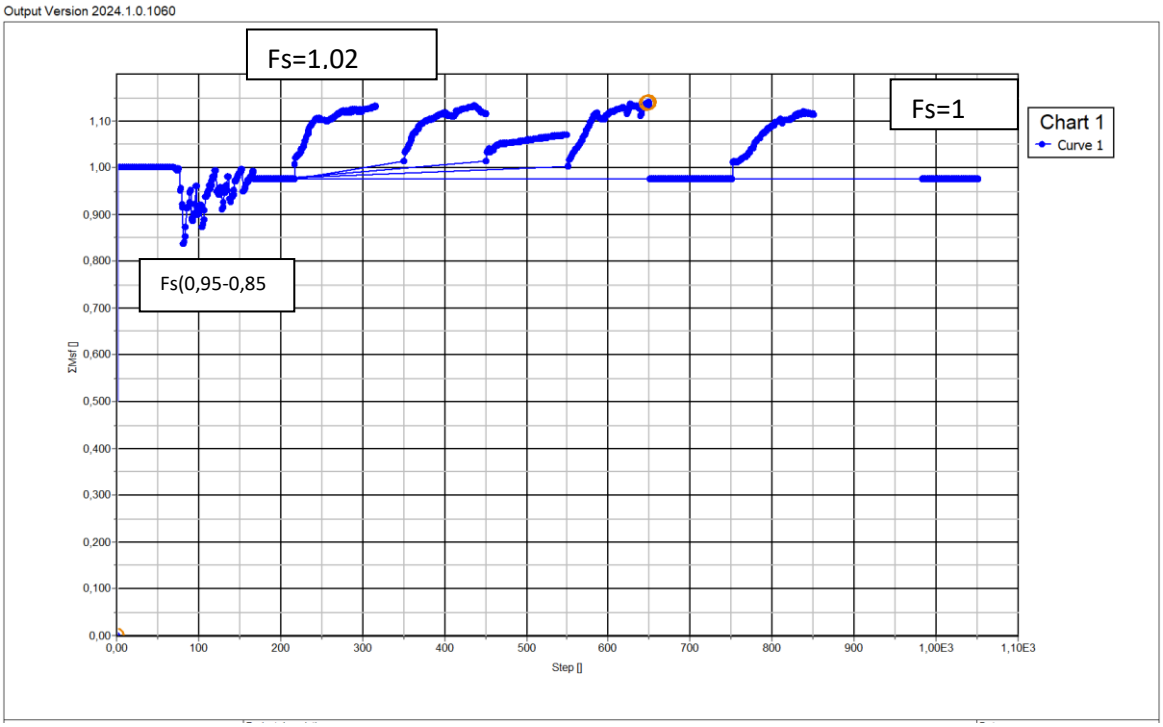


Figure VI .17. La courbe représente le changement de Fs.

La courbe représente la relation entre le facteur de sécurité (Fs) et le nombre de pas, fréquemment utilisée dans les simulations numériques pour contrôler la stabilité d'une pente ou autre structure géotechnique avec l'évolution du temps ou sous divers états de charge.

Interprétation de la courbe de stabilité (Facteur de sécurité Fs vs. Step)

1. Points Clés de la Courbe :

Stabilité Initiale (Fs : 1,0) :

Au début (autour du Step 0), le facteur de sécurité est proche de 1.0, indication une condition marginalité stable.

Cela généralement représente l'état de base du sol ou de la structure avant toute modification.

Augmentation du Facteur de sécurité (Fs x 1,2) :

Entre Étape 100 et Étape 200, sur l'observation d'une augmentation du facteur de sécurité, à la hauteur de la situation à la catégorie de sécurité, à l'étude à la norme Fs.

Cette amélioration de la stabilité possible être une réduction des charges appliquées, des mesures de renforcement, ou à une disposition plus favorable dans le sol.

Phase de stabilisation (Fs : 1,0) :

Après le pic, l'indicateur de sécurité redescend à environ 1.0, ce qui qui est une proposition de stabilité relative des conditions de charge.

Cette plaque de phase équilibre traduit un temporaire sans changement significatif dans les conditions géotechniques.

riale du Facteur de sécurité (Fs : 0,9) :

Vers l'étape 300, une chambre de chambre remarquable du statut de sécurité à Fs 0,9 est visible.

Cette baisse indique une réduction de la stabilité, substitutif par augmentation des charges, des changements hydrogéologiques, ou une dégradation des propriétés mécaniques du sol.

Fluctuations de la Stabilité :

Au-delà de l'étape 300, le facteur de sécurité des variations importantes.

Ces fluctuations de l'acte d'affectation des conditions deuration dynamiques : sollicitations encycliques, infiltrations d'eau, ou définition de la procuration des mécanismes de rupture.

2. Analyse et Interprétation :

Écélération des phases :

Lesutes Nos Fs - 1.0 Liz que le système est dans un état marginalement stable, sous des conditions constantes constantes.

Effet des mesures de stabilisation :

L'augmentation temporaire à Fs – 1,2 montre que les interventions ou des favorables conditions sur le site.

Phase d'Instabilité :

La chute vers Fs - 0,9 représente une phase critique, avisant non risque d'accumulation de rupture, qui nécessite des mesures correctives, temporaire.

Conditions dynamiques :

Les fluctuations après la course à l'échelle 300 montre que le sol est est soumis à modifications variables, ce qui peut être une évolution progressive des déformations ou un effet subalterne.

Conclusion Générale :

Ce travail de recherche a permis de mettre en évidence l'importance cruciale des conditions géotechniques et hydrogéologiques dans la stabilité des excavations profondes, en particulier dans le contexte complexe des stations de métro comme celle étudiée à Alger.

À travers l'analyse des données de reconnaissance géotechnique et les simulations numériques effectuées sur PLAXIS 2D, nous avons pu observer l'influence significative des variations des propriétés du sol, du niveau de la nappe phréatique et des charges externes sur le facteur de sécurité (Fs) des parois de la fouille.

L'étude de la courbe représentant l'évolution du facteur de sécurité en fonction des étapes de calcul a montré trois phases distinctes : Une phase initiale instable, où le facteur de sécurité est proche de 1.0, indiquant une situation critique, voire un début d'instabilité ; Une amélioration progressive, où Fs augmente jusqu'à 1.2, traduisant un renforcement de la stabilité grâce à l'installation des soutènements ou à l'évolution des conditions de chargement ; Enfin, une phase de stabilité relative, où Fs atteint environ 1.4, ce qui correspond à un état globalement stable de la fouille, dans les conditions simulées.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de prendre en compte, dès les phases de conception, les caractéristiques précises du sol et les variations hydrogéologiques possibles. Ils soulignent également l'intérêt des outils de modélisation numérique pour anticiper les comportements du terrain et concevoir des solutions de soutènement adaptées et sûres.

En conclusion, cette étude confirme que la sécurité des fouilles profondes dans un environnement urbain dense comme celui d'Alger repose sur une connaissance fine des sols, une surveillance rigoureuse des conditions de terrain et une utilisation judicieuse des outils de simulation avancés.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Janssoone, D. (2021). Technologie fonctionnelle du transport ferroviaire et urbain : train, métro, tramway, RER. Paris : Dunod.

[2] Cervero, R. (1998). The Transit Metropolis: A Global Inquiry. Washington, D.C.: Island Press.

[3] Wolmar, C. (2012). The Subterranean Railway: How the London Underground Was Built nd How It Changed the City Forever. Atlantic Books.

[4] Historail n°26 : Les 150 ans du métro de Londres. Historail, juillet 2013.

[5] Courrier International : La difficile naissance du métro londonien, 10 janvier 2013.

[6] Vanupied : Metro à Londres : Histoire et anecdotes de l'underground, mis à jour le 30 octobre 2024.

[7] Action Climatique – Impact des transports en commun sur la qualité de l'air en milieu urbain

[8] Action Climatique – Impact des transports publics sur la qualité de l'air urbain : rôles des collectivités

[9] Automobile Propre – Mobilité douce : 5 atouts et impact positif urbain

[10] Jean-Paul Teyssaire, Infrastructures de transport ferroviaire*,* Éditions Lavoisier, 2010.

[11] https://journalmetro.com/actualites/3101825/voici-les-pires-stations-de-metro-selon-les-usagers/

[12] UITP (Union internationale des transports publics), Urban Rail Systems: Safety and Efficiency*,* 2020.

[13] UIC 60 (60 kg/m, profil courant pour les lignes à grande vitesse ou à fort trafic).

[14] SNCF Réseau & RATP, Guides techniques du matériel roulant ferroviaire, consultables en ligne ou en bibliothèque technique.

[15] Le site du CEREMA – Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les onstructions publiques

[16] Géotechnique appliquée aux projets d'infrastructure (M. Schlosser)

[17] Project Finance in Construction (A. Yescombe)

[18] Guide pratique des grands projets publics (Coll. Le Moniteur)

[19] Tunneling and Underground Construction – David Chapman

[20] Géotechnique appliquée aux grands travaux – Michel Juignet

[21] Urban Underground Infrastructure – Jeffrey S. Russell

[22] Design of Reinforced Concrete Structures – Somnath Ghosh

[23] Project Finance in Construction – E. R. Yescombe

[24] Sociologie urbaine et transports – Marie-Hélène Bacqué

[25] Station Planning and Design – UITP Guidelines

[26] Économie des transports urbains – P. Zembri

[27] Environmental Impact Assessment – Larry Canter

[28] Public Participation in Urban Planning – Patsy Healey

[29] Présentation des tunneliers à bouclier Slurry par la Land Transport Authority (LTA) La LTA décrit le fonctionnement des tunneliers Slurry, utilisant une suspension de bentonite pour stabiliser le front de taille et évacuer les déblais, adaptés aux sols variés de Singapour.

[30] Ferraz, E., & Gomes, L. (2015). Use of Slurry Shield TBM in the construction of Line 5 – Lilac of São Paulo Metro. Proceedings of the World Tunnel Congress.

[31]] Harris, D. I., & Gibb, J. (2011). Tunnelling beneath London: challenges and solutions in the Crossrail project. Proceedings of the ICE - Civil Engineering, 164(3), 123–130.

[32]] Ishiyama, Y. (2004). Seismic Design and Retrofitting of Underground Structures in Japan. In Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19(4–5), pp. 305–312

[33] Heui-dai GU, Les études préliminaires, Avant-projet Sommaire et Avant-projet Détaillé des
extensions du métro d'Alger (Lot 1), El Harrach Centre - Bab Zouar- Aéroport International d'Alger, 15 Janvier 2015

[34] MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Le management de projets Cas : Projet de l'extension du métro d'ALGER, tronçon « El Harrach Centre - Aéroport International Houari Boumediene » COSIDER Travaux Publics.

[35] PLAN D'ENSEMBLE TRACÉ EN PLAN M-AL-E-APD-GCG-TRA-PL-111-001-0000-0

[36] Si sung CHUNG, Chang-sub Hwang, Jae-nam YOO, Les études préliminaires, Avant-Projet Sommaire et Avant-Projet Détaillé des extensions du métro d'Alger (Lot 1), El Harrach Centre Bab Ezzouar- Aéroport International d'Alger, Janvier 2015

[37] C. Jorge, HYPOTHESES GEOTECHNIQUES TUNNEL PK 0+000,00 – PK 9+575,00, Extension du métro d'Alger (Lot 1), El Harrach Centre - Bab Ezzouar- Aéroport International d'Alger, 31-10-2016

[38] Rankin, W. J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 5(1), 79-92

[39] Martos, F. (1958, October). Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In International strata control congress, Leipzig (pp. 191-205). Section fur Bergbau. Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin.

[40] Schlosser, F., Magnan, J.P., and Holtz, R.D., (1985) Construction géotechnique, Comptes
rendus du 11ème congrès int. de mécanique des sols et des travaux de fondation, San Francisco, pp. 211-254.

[41] Hypothèses géotechniques (2006), PK 0+000,00 - PK 9+575,00 Extensions du métro d'Alger (lot 1) Section : El Harrach Centre – Bab Ezzouar – Aéroport International d'Alger

[42] Documents techniques des entreprises de BTP comme Bouygues Construction, Vinci,

[43] Techniques de construction – Tome 1 : Fondations et terrassements", de G. Chevalier, Éditions Eyrolles

[44] CFMS (2022). Rapport du groupe de travail sur le rabattement de nappe phréatique. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique.

`la stabilité du sol7

AFNOR (Association Française de Normalisation) – Normes de construction liées au soutènement et aux fondations.

[45] ÉTUDE D'EXÉCUTION – STATION AÉROPORT Projet d'Excavation Note de Calcul Date: 02-05-2016 Document N°: L1B1-GCG-COSM28-3010-A2-13-004-A

[46] ÉTUDE D'EXÉCUTION – STATION AÉROPORT Projet de Blindage Note de Calcul Date: 27-09-2015 Document N°: L1B1-GCG-COSM28-3010-A2-13-001-A