

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT Génie Civil



FILIERE : GÉNIE CIVIL
OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Ferhaoui Hemza
Diafat Abderraouf

Intitulé

Apport de la surveillance pour l'optimisation de
dimensionnement et la maitrise des risques géotechnique

Soutenu devant le jury composé de:

Enseignants

Encadre Par

Dr. AISSI Adel

Mr. Bounab El-oualid

Président: Pr.KHEMISSA Mohamed

Examineur:Dr.TALLAH Noui

Université de M'sila

URFA- CRTI Sétif

Université de M'sila

Université de M'sila

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

***Nous avons surtout remercié « Allah », le Tout-Puissant et Miséricordieux, pour la volonté
et là***

***Patience qu'il nous a données et qui nous ont permis de terminer nos études et de nous
guider***

Vers le bon chemin de la vie.

Nos sincères remerciements à :

***Notre encadrant, Dr : Aissi Adel , pour nous avoir aidés à réaliser les travaux nécessaires à
ce projet de fin d'études.***

Merci à nos généreux parents, frères et amis pour le soutien qu'ils nous ont apporté.

Tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce travail.

ABSTRACT

This thesis explores the importance of geotechnical instrumentation in the design, construction, and monitoring of civil engineering structures in Algeria, where geological challenges (seismicity, expansive soils, karst) and large-scale infrastructure projects require advanced monitoring techniques.

The primary objectives of the research conducted in this thesis are:

To initially validate computational models through in-situ measurements, also to detect risks early (settlements, landslides, pore water pressures). finally to propose recommendations tailored to local conditions and proposal of solutions for strengthening.

The results demonstrate that geotechnical instrumentation is essential for ensuring the safety of structures. Technical aspects, field feedback, and strategic recommendations are also provided

.Keywords: Monitoring avancées, Retours terrain, Strengthening

RESUME

Cette mémoire explore l'importance de l'instrumentation géotechnique dans la conception, la réalisation et la surveillance des ouvrages en Algérie, où les défis géologiques (sismicité, sols gonflants, karst) et les mégaprojets d'infrastructure nécessitent des techniques de monitoring avancées. Les objectifs principaux des travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse est de valider initialement les modèles de calcul par des mesures in situ, et de détecter précocement les risques (tassements, glissements, sous-pressions). cette étape est suivi par Proposition des recommandations adaptée aux conditions locales.

Les résultats obtenus montrent que L'instrumentation géotechnique est indispensable pour garantir la sécurité des ouvrages, les aspects techniques, les retours terrain et les recommandations stratégiques sont également fournies.

Mots clés : *surveillance avancée, retour d'expérience sur le terrain, renforcement*

ملخص

هذه المذكرة تستكشف أهمية الأدوات الجيوتقنية في تصميم وإنشاء ومراقبة المنشآت في الجزائر، حيث التحديات الجيولوجية (الزلازل، التربة الانتفاخية، الكارست) والمشاريع الضخمة للبنية التحتية تتطلب تقنيات مراقبة متطورة. الأهداف الرئيسية للأبحاث المنجزة في إطار هذه الأطروحة هي التحقق أولاً من نماذج الحساب بواسطة القياسات الميدانية، والكشف المبكر عن المخاطر (هبوط التربة، انزلاقات، ضغوط تحتية). (تلي هذه المرحلة تقديم توصيات ملائمة للظروف المحلية.

النتائج المتحصل عليها تُظهر أن الأدوات الجيوتقنية ضرورية لضمان سلامة المنشآت، كما يتم تقديم الجوانب التقنية، الملاحظات الميدانية والتوصيات الاستراتيجية.

الكلمات المفتاحية: التدعيم، المراقبة، ردود الخبرة

Sommaire

Remerciement.....	01
A B S T R A C T.....	02
RESUME.....	03
Mots clés.....	03
ملخص.....	03

CHAPITRE I .Introduction générale

I.1.Intrduction.....	14
----------------------	----

CHAPITRE II : Instrumentation Des Ouvrages Géotechniques

II.1.Introduction.....	18
II.2. Objectifs de l'Instrumentation Géotechnique.....	18
II.3. Classification des Instruments Géotechniques.....	18
II.3.1. Mesure des Déplacements et Déformations.....	18
II.3.1.1. Extensomètres.....	18
II.3.1.2 Types d'Extensomètres et Applications.....	19
II.3.1.2.1. Extensomètres de Surface.....	19
II.3.1.2.2. Extensomètres de Forage.....	19
II.3.1.2.3. Extensomètres à Fils Vibrants.....	19
II.3.1.2.4. Extensomètres à Fibre Optique.....	19
II.3.1.3. Installation et Bonnes Pratiques.....	19
II.3.1.3.1. Méthodes d'Installation.....	19
II.3.1.3.2. Facteurs Critiques.....	20
II.3.2. Inclinomètres.....	20
II.3.2.1 introduction.....	20
II.3.2.2. Principe de Fonctionnement des Inclinomètres.....	20

II.3.2.3. Méthodologie d'Installation.....	22
II.3.2.3.1. Implantation du Forage.....	22
II.3.2.3.2. Procédure d'Installation.....	22
II.3.2.3.3. Contrôles Qualité.....	22
II.3.2.4. Traitement des Résultats.....	23
II.3.2.5 Représentation Graphique.....	23
II.3.2.6. Identification des Phénomènes.....	23
II.3.2.7. Seuils d'Alerte.....	23
II.3.2.8. Limites.....	24
II.3.2.9. Perspectives Technologiques.....	24
II.3.2.10. Recommandations Pratiques.....	24
II.3.2.11. Conclusion.....	25
II.3.3. Nivellements et Mesures de Tassements.....	25
II.3.3.1. Méthodes de Mesure.....	25
II.3.3.1.1. Nivellement Géodésique.....	25
II.3.3.1.2 Mesures de Tassements-Tassomètre-.....	26
II.3.3.1.2.1 Types de tassomètres	26
II.3.3.1.2.2. Principe de Fonctionnement.....	26
II.3.3.1.2.3. Méthode de mesure.....	26
II.3.3.1.2.4. Applications.....	27
II.3.4. Mesure des Pressions et Contraintes.....	28
II.3.4.1. Piézomètres.....	28
II.3.4.1.1. Principe de Fonctionnement.....	28
II.3.4.2. Objectifs.....	29
II.3.4.3. Méthodes d'Installation.....	29

II.3.4.4. Interprétation des Données Piézométriques.....	30
II.3.4.5. Avantages et Limites.....	30
II.3.4.6. Conclusion et Perspectives.....	31
II.3.4.7. Évolutions futures.....	31
II.3.5 Jauges de Déformation (Strain Gauges).....	31
II.3.5.1. Surveillance des ouvrages (ponts, barrages, tunnels).....	31
II.3.5.2. Principe de Fonctionnement.....	31
II.3.5.3. Installation et Bonnes Pratiques.....	32
II.3.5.4. Applications en Géotechnique.....	33
II.3.5.5. Analyse des Données.....	33
II.3.5.6. Avantages et Limites.....	34
II.3.6. Capteurs de Charge.....	34
II.3.6.1. Principe de Fonctionnement.....	34
II.3.6.2. Relation fondamentale :.....	34
II.3.6.3. Applications en Géotechnique.....	35
II.3.6.4. Installation et Bonnes Pratiques.....	36
II.3.6.5. Analyse des Données.....	36
II.3.6.6. Avantages et Limites.....	36
II.3.7. Mesure des Vibrations et Accélérations.....	37
II.3.7.1. Capteurs Utilisés.....	37
II.3.7.1.1 Accéléromètres.....	37
II.3.7.1.2 Géophones.....	37
II.3.7.2. Méthodologie de Mesure.....	37
II.3.7.2.1 Paramètres Clés.....	38
II.3.7.3 Installation.....	38

II.3.7.4. Applications Pratiques.....	38
II.3.7.4.1 Génie Civil.....	38
II .3.7.4.2 Géotechnique.....	38
II.3.7.5. Analyse des Données.....	39
II.3.7.5.1 Traitement du Signal.....	39
II.3.7.5.2 Critères Réglementaires.....	39
II.3.8 Innovations Récentes.....	39
II.3.9. Bonnes Pratiques.....	39
II.3.10. Conclusion.....	39
II.3.11. Perspectives.....	40
II.4. Choix des Instruments.....	40
II.5. Conclusion.....	40

CHAPITRE III :ETUDE DE CAS: Talus de Batna et du mur M6

III.1. Introduction.....	42
III.2. Contexte géologique.....	44
III.3. Campagne de reconnaissance géotechnique	45
III.3.1. Sondages pressiométriques.....	53
III.3.2. Mesures piézométriques.....	53
III.3 .3. Essais en laboratoire.....	55
III.3 .3.1. Caractéristiques physiques des sols et roches.....	55
III.3.3.1.1. Caractéristiques mécaniques des sols.....	56
III.4 . Instrumentation et surveillance sur terrain.....	57
III.5.Évaluation de la position de cercle critique par la méthode des abaques.....	60
III.5.1. Choix des abaques.....	60
III.5.2.Résultats de l'instrumentation	62

III.5.3. Evaluation de stabilité par la méthode des abaques.....	64
III.6.Synthés de quelque application dans les projet algérien	66
III.6.1. Barrage de Beni Haroun (Mila).....	66
III.6.2.Tunnel de Chaabet El Aneur (Bouira).....	66
III.6.3. Fondations du Grand Mosque d’Alger.....	67
III.6.4. Projet GNL d’Arzew (Sonatrach).....	67
III.7. Retours d’Expérience.....	68
III.7.1 Bonnes Pratiques.....	68
III.7.2 Échecs Notables.....	68
III.8. Perspectives.....	69
Conclusion générale.....	70
Bibliographie.....	71

Notation et abréviation

Il est courant d'utiliser dans notre travail les abréviations suivantes :

G.T.R	Guide de Terrassement Routier
LCPC	Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées
R.P.A	Règlements Parasismiques Algériens
De	La Hauteur D'encastrement Equivalente
CPT	Cône Pénétration Test
MDE	Le Coefficient Micro-Deval En Présence D'eau
LA	Le Coefficient Los Angeles
FS	Le Coefficient De Friabilité Des Sables
DG	Le Coefficient de Dégradabilité
w_L	Limite De Liquidité
ω_{opn}	L'Optimum Proctor Normal
w_p	Limite de Plasticité
IC	L'indice de Consistance
IPI	L'indice Portant Immédiat
C_v	Le Coefficient de Consolidation
IP	Indice de Plasticité
T_v	Temps de Consolidation
C_c	L'indice de Compression
C_s	L'indice de Gonflement
C_u	Cohésion Non Drainé
e	L'indice de Vide
e₀	L'indice de Vide Initiale
K₀	Coefficient de Terre Au Repos

Kh	Perméabilité Horizontal
Kv	Perméabilité Vertical
ϕ	Angle de Frottement Interne

LISTE DE FIGURE

Figure: III.1: Carte géologique du talus de batna.....	45
Figure: III.2: Localisation des sondages in-situ sur le site Talus Batna et le mur M6.....	46
Figure:III.3: modèles géotechniques du site de Talus de Batna et mur M6.....	48
Figure: III.4: Emplacement de ces profils géotechnique.....	49
Figure: III.5: <i>Profil en travers- PK 8 + 850</i>	50
Figure III.6 : Coupes géotechniques adoptées pour le site talus de Batna et le mur M6.....	52
Figure III.7 : les courbes des fluctuations du niveau de la nappe.....	57
Figure III.8. Localisation des inclinomètres existants 2013-2016.....	58
Figure III.9 : a) Coupe LB02 au milieu du mur M6, b) Mouvement en plan du mur M6 (cibles topographiques).....	59
Figure III.10. Position de centre du cercle critique (cas saturé ou partiellement saturé).....	61
Figure III.11. Cercle critique par la méthode des abaques.....	61
Figure III.12. Mesures inclinométriques.....	63
Figure: III. 13. Chois des cas d'étude selon les condition hydrogéologique.....	64
Figure III.14. Abaque pour l'évaluation de Fs	65

LISTE DES TABLEAUX

Tab.II 1. Technologies de Mesure-Extensomètres-.....	19
Tab.II.2. Technologies de Mesure -inclinomètre-.....	21
Tab.II.3. Types d'instrumentation en géotechnique.....	24
Tab.II.4. caractéristique de nivellement géodésique	26
Tab.II.5. Modèle d'appareils de mesure du tassement.....	28
TabII.6. Types de Piézomètres et Leurs Applications.....	29
TabII.7. Types de Jauges de Déformation.....	32
Tab.II.8. Types de Capteurs de Charge.....	35
Tab.II.9. Type appareille de mesure des vibrations et accélérations.....	37
Tab II.10. Critère et norme de contrôle de vibrations et accélérations.....	39
Tab.III. 01. Résumé de la lithologie des sondages carottés réalisés.	47
Tab.III.2. Position des instruments de contrôle	49
Tab.III.3. Caractéristique géotechnique de la zone d'étude	51
Tab.III.4. Récapitulatif des résultats des essais pressiométriques pour chaque couche de sols rencontrés.....	53
Tab.III.5. Lectures piézométriques au niveau des piézomètres.....	54
Tab.III.6. Propriétés physiques pour chaque couche de sol	56
Tab.III.7. Récapitulatif des caractéristiques mécaniques effectives des deux premières couches de sols rencontrées.....	57
Tab.III.8. Déplacement maximal des inclinomètres 2013-2016.....	58
Tab.III.9. Défis Spécifiques à l'Algérie.....	68

CHAPITRE I :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Introduction générale :

La géotechnique est une discipline clé dans la conception et la réalisation des ouvrages de génie civil (tunnels, barrages, fondations, pentes, etc.). Cependant, les incertitudes liées au comportement des sols et des roches, ainsi qu'aux interactions sol-structure, rendent indispensable l'utilisation de techniques de surveillance avancées (Frank, R.2004). L'instrumentation géotechnique joue ainsi un rôle crucial en permettant une mesure en temps réel des paramètres mécaniques, hydrauliques et géométriques des ouvrages.

Malgré les progrès des méthodes de calcul et des modèles numériques, les écarts entre les prévisions et le comportement réel des sols persistent. Ces écarts peuvent engendrer des risques de rupture, des surcoûts ou des retards dans les projets. L'instrumentation offre une solution en fournissant des données fiables pour la validation des modèles et l'ajustement des méthodes de construction ainsi que la sécurité et la performance des structures.

Les Principaux rôles de l'instrumentation géotechnique c'est la surveillance pendant et après la construction afin de vérifier que le comportement du sol ou de l'ouvrage correspond aux prévisions ainsi que détecter éventuels désordres (tassements excessifs, glissements, etc.).

La validation des modèles de calcul dont la comparaison des mesures in situ avec les simulations numériques est une opération clé pour améliorer les futures conceptions.

L'opération de l'instrumentation peuvent jouer un rôle important pour la sécurité et prévention des risques toute en installe un système d'alerte en cas de dépassement des seuils critiques (déformation anormale, augmentation de la pression des terres, etc.).

Les défis majeurs liés à l'instrumentation géotechnique incluent :

- Le choix des **capteurs adaptés** en fonction des conditions géologiques et des objectifs de surveillance.
- L'**interprétation des données** en temps réel pour une prise de décision rapide.
- L'intégration des **technologies émergentes** (capteurs intelligents, IoT, intelligence artificielle) pour améliorer la précision et l'efficacité des mesures.

Cette mémoire a pour principaux objectifs **Proposer des recommandations** pour une instrumentation plus efficace, basée sur des cas réels (tunnels, barrages, soutènements).

La recherche s'appuiera sur :

- Une **revue bibliographique** des techniques d'instrumentation et des retours d'expérience.
- Des mémoires **de cas** sur des chantiers instrumentés (analyse des données in situ).

La présent étude est une synthèse des résultats de la campagne de reconnaissance géotechnique (récurrent) réalisée sur le site du talus de Batna et du mur M6. Ce rapport comprend une analyse des résultats des essais géotechniques in-situ et en laboratoire. Une analyse statistique a été effectuée et elle permet de préciser le choix des valeurs des paramètres physiques et mécaniques à utiliser pour les futurs calculs de stabilité du site. Le modèle géotechnique du talus est développé sur la base des résultats de cette nouvelle investigation géotechniques, tout en prenant en considération les données disponibles des investigations géotechniques antérieures.

Cette mémoire présente tous les éléments lithologiques, stratigraphiques, hydrogéologiques, géotechniques et géomécaniques acquis lors de cette nouvelle investigation géotechnique (campagne complémentaire).

la stratigraphie près de la surface de la zone d'étude est caractérisée par un remblai granulaire et des colluvions de matériaux mixtes granulaires et à grains fins reposant sur des sols marneux altérés.

Suite à l'apparition de niveaux d'eaux souterraines extrêmes, supérieurs à ceux anticipés par le concepteur des murs de soutènement, des mouvements de terrain se sont produits sur les pentes en aval de la route de Batna. Les niveaux d'eau souterraine plus élevés que prévu sont

Des signes d'instabilités ont été détectés visuellement (apparition de fissures) entre les murs et la route. Par conséquent, un système de monitoring (19 inclinomètres) a été installé sur le site pour détecter et suivre les éventuels mouvements de terrain. Ce système qui date de Septembre 2013 a montré qu'il y avait des mouvements importants mais qui ne sont pas profonds au niveau du mur M6. Ces mouvements sont par contre profonds au niveau du mur M4 et au niveau de la pile P4 du viaduc.

Un niveau de nappe phréatique près de la surface a été détecté ce qui a remis en cause la stabilité des murs qui étaient étudiés sous des conditions plus favorables du point de vue hydraulique.

Par conséquent, une mémoire géotechnique et géologique complémentaire devrait être réalisée pour vérifier les causes d'instabilité du site et étudier le système de confortement adéquat.

CHAPITRE II :

INSTRUMENTATION DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

II.1. Introduction

L'instrumentation géotechnique joue un rôle crucial dans la surveillance et la gestion des ouvrages de génie civil (fondations [9] [17], tunnels [8] [18], barrages, pentes, etc.). Elle permet de mesurer les déformations, les pressions, les déplacements et autres paramètres critiques pour assurer la sécurité et la durabilité des structures [19].

Ce chapitre détaille les principaux types d'instruments utilisés en géotechnique, leurs principes de fonctionnement et leurs applications.

II.2. Objectifs de l'Instrumentation Géotechnique

Contrôle pendant et après la construction.

Validation des hypothèses de conception.

Surveillance à long terme des ouvrages.

Prévention des risques (glissements, tassements excessifs, etc.).

II.3. Classification des Instruments Géotechniques

Les instruments peuvent être classés selon les paramètres mesurés :

II.3.1. Mesure des Déplacements et Déformations

II.3.1.1. Extensomètres

Les extensomètres sont des instruments essentiels en géotechnique pour mesurer les déplacements et déformations des sols et des structures. Ils jouent un rôle critique dans la surveillance des ouvrages (tunnels, barrages, fondations, pentes) en fournissant des données précises sur leur comportement mécanique.

Un extensomètre mesure la variation de distance entre deux points ancrés dans le sol ou une structure. Il détecte :

- **L'allongement** (en traction, ex. : glissement de terrain).
- **Le raccourcissement** (en compression, ex. : tassement de fondation).

Tab.II 1. Technologies de Mesure-Extensomètres-

Type	Principe	Précision
Mécanique	Tige rigide ou fil tendu avec comparateur	±0.1 mm
À corde vibrante	Variation de fréquence d'une corde sous tension	±0.01 mm
À fibre optique	Modulation du signal lumineux (BOFDA/OFDR)	±0.001 mm
Électronique (LVDT)	Capteur inductif linéaire	±0.05 mm

II.3.1.2 Types d'Extensomètres et Applications

II.3.1.2.1. Extensomètres de Surface

Utilisation : Surveillance des fissures dans les murs, barrages en béton.

Exemple : *Jauges de fissuration* (suivi des mouvements différentiels).

II.3.1.2.2. Extensomètres de Forage

Utilisation : Mesure des déformations [7] profondes (tunnels, pentes).

Exemple : *Extensomètre à ancrages multiples* (3 à 5 points de mesure par sonde).

II.3.1.2.3. Extensomètres à Fils Vibrants

Avantage : Stabilité à long terme, résistance aux perturbations électromagnétiques.

Application : Barrages (ex. : *Barrage des Trois Gorges, Chine*).

II.3.1.2.4. Extensomètres à Fibre Optique [22][27][28]

Avantage : Résolution sub-millimétrique, immunité aux interférences.

Application : Surveillance des tunnels [8] [18] (ex. *Projet Crossrail, Londres*).

II.3.1.3. Installation et Bonnes Pratiques

II.3.1.3.1. Méthodes d'Installation

En forage :

Percer un trou au diamètre adapté.

Fixer les ancrages avec coulis de ciment.

Connecter le système d'acquisition.

En surface :

Collage direct sur les structures (ex. : jauges adhésives).

II.3.1.3.2. Facteurs Critiques

Profondeur des ancrages : Doit dépasser la zone influencée par les déformations.

Calibration : Nécessaire avant mise en service (ex. : *ASTM D4408*). [10] [21]

Protection : Contre l'eau, les chocs, et la corrosion (gainage inox).

II.3.2. Inclinomètres

II.3.2.1 introduction

Les inclinomètres [1][2][5] sont parmi les instruments les plus utilisés pour détecter et surveiller les mouvements de terrain grâce à leur capacité à mesurer les déviations angulaires avec une grande précision. Ce titre détaille leur principe, leur mise en œuvre et leur interprétation dans le contexte des glissements

Les glissements de terrain représentent un risque géotechnique majeur pour les infrastructures et les zones habitées. Les inclinomètres sont parmi les instruments les plus utilisés pour détecter et surveiller les mouvements de terrain grâce à leur capacité à mesurer les déviations angulaires avec une grande précision. Ce chapitre détaille leur principe, leur mise en œuvre et leur interprétation dans le contexte des glissements.

II.3.2.2. Principe de Fonctionnement des Inclinomètres

Un inclinomètre mesure l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale en différents points d'un forage. Il permet de :

- Détecter les mouvements latéraux du sol
- Localiser la profondeur des surfaces de rupture
- Quantifier l'amplitude et la vitesse du déplacement

Tab.II.2. Technologies de Mesure -inclinomètre-

Technologie	Principe de Mesure	Précision	Plage de Mesure	Fréquence d'Acquisition	Applications Typiques	Avantages	Inconvénients
Inclinomètre mécanique (pendulaire)	Disque gradué et pendule	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 10^\circ$	Manuel	Mesures ponctuelles, vérifications	Simple, robuste, indépendant de l'énergie	Faible précision, lecture visuelle
Inclinomètre électrolytique	Variation de résistance dans un électrolyte	$\pm 0.01^\circ$	$\pm 15^\circ$	Continu ou manuel	Surveillance de glissements, barrages	Bonne précision, compact	Sensible aux températures extrêmes
Inclinomètre MEMS (Micro-électromécanique)	Capteurs microscopiques à semi-conducteurs	$\pm 0.001^\circ$	$\pm 30^\circ$	Haute fréquence (100Hz+)	Surveillance en temps réel, automatique	Excellent résolution, miniaturisation	Dérive possible sur long terme
Inclinomètre à fibre optique	Modulation de la lumière dans une fibre	$\pm 0.002^\circ$	$\pm 5^\circ$	Continu	Environnements EM sensibles, zones ATEX	Insensible aux interférences EM	Coût élevé, installation complexe
Inclinomètre servo-accélérométrique	Masse témoin et système asservi	$\pm 0.005^\circ$	$\pm 20^\circ$	Continu	Mesures dynamiques (séismes)	Très stable, bonne linéarité	Consommation énergétique importante

							e
Inclinomètre à tube guide (sonde mobile)	Sonde dans tube rainuré	±0.02 mm/m (sur 0.5m)	-	Manuel (par profils)	Glissements profonds, tunnels	Mesure absolue, pas de dérive	Temps de mesure long

II.3.2.3. Méthodologie d'Installation

II.3.2.3.1. Implantation du Forage

- Diamètre: Généralement 100-150 mm
- Profondeur: Doit dépasser la zone stable (au moins 5 m sous la surface de rupture potentielle)
- Tubage : Tube ABS rainuré scellé avec coulis de bentonite/ciment

II.3.2.3.2. Procédure d'Installation

1. Forage jusqu'à la profondeur requise
2. Mise en place du tube guide avec centrage
3. Coulisage pour assurer un bon couplage sol-tube
4. Scellement de la tête de forage

II.3.2.3.3. Contrôles Qualité

1. Vérification de la verticalité initiale (<1°)
2. Mesure de référence (tare) avant mise en service
3. Protection contre les infiltrations d'eau
4. - Acquisition et Traitement des Données
 - Fréquence de Mesure
 - Phase critique : Quotidienne
 - Surveillance routine: Hebdomadaire/mensuelle
 - aisonnière: Adaptation aux périodes pluvieuses

II.3.2.4. Traitement des Résultats

Calcul des déplacements cumulés à partir des angles mesurés :

$$\text{Déplacement } (\delta) = L \times \sin(\theta)$$

où L = distance entre ancrages, θ = angle mesuré

II.3.2.5 Représentation Graphique

- Profils de déformation en fonction de la profondeur
- Courbes d'évolution temporelle aux points clés
- Cartographie des vecteurs de déplacement
- Interprétation Géotechnique

II.3.2.6. Identification des Phénomènes

- Mouvement rotationnel: Courbure progressive du profil
- Glissement plan : Discontinuité marquée dans le profil
- Fluage: Déformation continue sur toute la hauteur

II.3.2.7. Seuils d'Alerte

Ce tableau présente les seuils de référence pour l'interprétation des mesures inclinométriques dans la surveillance des mouvements de terrain, basés sur les normes internationales [11][12][23] et les retours d'expérience.

ce tableau présente les seuils de référence pour l'interprétation des mesures inclinométriques dans la surveillance des mouvements de terrain, basés sur les normes internationales et les retours d'expérience.

Tab.II.3. Types d'instrumentation en géotechnique

Types d'instrumentation en géotechnique				
Niveau d'Alerte	Vitesse de Déplacement	Déformation Cumulée	Interprétation Géotechnique	Actions
Niveau 0 (Stable)	< 0.1 mm/jour	< 5 mm	Mouvements naturels du sol	Surveillance
Niveau 1 (Vigilance)	0.1 - 1 mm/jour	5 - 20 mm	Début de déformation active	- Augmenter la surveillance - Vérifier
Niveau 2 (Alerte Précoce)	1 - 5 mm/jour	20 - 50 mm	Glissement en développement	- Surveiller de près - Alerte - Début d'intervention
Niveau 3 (Alerte Critique)	5 - 10 mm/jour	50 - 100 mm	Rupture imminente	- Évacuer - Mise en sécurité
Niveau 4 (Rupture)	> 10 mm/jour	> 100 mm	Glissement actif	- Arrêter les travaux - Intervention urgente

- Mesure directe des déplacements profonds
- Détection précoce des surfaces de rupture
- Possibilité d'automatisation complète

II.3.2.8. Limites

- Nécessite un forage de qualité
- Interprétation complexe en terrain hétérogène
- Coût d'installation élevé pour les systèmes fixes

II.3.2.9. Perspectives Technologiques

- Inclinomètres distribués: Fibre optique pour mesures continues sur toute la profondeur
- Couplage avec InSAR : Combinaison avec données satellitaires
- IA pour l'analyse : Détection automatique des seuils critiques

II.3.2.10. Recommandations Pratiques

1. Implanter au moins 3 inclinomètres par zone à risque
2. Combiner avec d'autres instruments (piézomètres, extensomètres)
3. Prévoir un plan d'intervention basé sur les seuils d'alerte

4. Former le personnel à l'interprétation des données

II.3.2.11. Conclusion

Les inclinomètres constituent un outil indispensable pour la surveillance des glissements de terrain. Leur bon usage nécessite :

- Une installation soignée
- Un suivi régulier
- Une interprétation experte des données

Leur intégration dans des systèmes de monitoring globaux permet une gestion proactive des risques. [16]

II.3.3. Nivellements et Mesures de Tassements

Les nivellements et les mesures de tassements sont des techniques essentielles en géodésie, génie civil et surveillance des structures [19] pour évaluer les déformations verticales du sol ou des ouvrages. Voici une présentation détaillée :

Les mesures de tassement sont essentielles pour :

- Contrôler la stabilité des ouvrages (fondations [9] [17], remblais, barrages)
- Vérifier les hypothèses de calcul
- Détecter précocement les désordres

II.3.3.1. Méthodes de Mesure

II.3.3.1.1. Nivellement Géodésique

Tab.II.4.caractéristique de nivellement géodésique

Caractéristique	Description
Précision	0.5 à 2 mm/km (selon classe IGN)
Matériel	Niveau numérique, mire invar
Avantages	Absolu, référencé au nivellement général
Limitations	Temps de mise en œuvre, coût humain

II.3.3.1.2 Mesures de Tassements-Tassomètre-

Le tassomètre [3][13] est un instrument spécialisé utilisé pour mesurer les tassements différentiels ou les affaissements du sol et des structures avec une grande précision. Il est couramment employé en géotechnique, génie civil et surveillance des ouvrages.

Un tassomètre est un dispositif de mesure permettant de quantifier les déplacements verticaux (tassements) d'un sol ou d'une structure par rapport à un point de référence stable.

II.3.3.1.2.1 Types de tassomètres :

- **Tassomètres mécaniques** (à comparateur ou micromètre) : Mesure manuelle avec une précision de l'ordre du 1/10 mm.
- Tassomètres électroniques** (à capteurs inductifs ou à jauges de contrainte) : Mesure automatisée, connectée à un système d'acquisition.
- Tassomètres hydrauliques** (principe des vases communicants) : Utilisés pour les mesures différentielles en temps réel.
- Tassomètres à fibre optique** : Détection des déformations par variation de la longueur d'onde (technologie récente et très précise).

II.3.3.1.2.2. Principe de Fonctionnement

II.3.3.1.2.3. Méthode de mesure :

-Installation :

- Fixation de **repères de tassement** (plots en béton, ancrages dans le sol ou la structure).

- Positionnement du tassomètre sur un **point stable** (hors zone de tassement).

-Lecture des déplacements :

- Mesure périodique avec un comparateur mécanique ou un capteur électronique.

- Enregistrement automatique possible avec des systèmes numériques.

- Analyse des données :

- Comparaison avec les mesures précédentes pour calculer le **taux de tassement**.

- Génération de **courbes d'évolution** (tassement en fonction du temps).

3.3.1.2.4. Applications

➤ **Domaines d'utilisation :**

Géotechnique :

Surveillance des tassements des remblais, des remblaiements, des fondations.

Étude de la consolidation des sols compressibles (argiles, tourbes).

Génie civil :

Contrôle des **fondations de bâtiments**, ponts, barrages.

Détection des **tassements différentiels** (risque de fissuration).

Mines et carrières :

Suivi des affaissements miniers.

Infrastructures routières et ferroviaires :

Surveillance des remblais et des remblaiements sous les voies

➤ **Avantages :**

Précision élevée (jusqu'au 1/100 mm pour certains modèles électroniques).

Adaptabilité : Peut être utilisé en intérieur (bâtiments) ou en extérieur (sols, ouvrages).

Automatisation possible avec enregistrement continu des données.

➤ **Limites :**

Nécessite une **référence stable** (point fixe hors zone de tassement).

Mesures ponctuelles (nécessité de compléter avec d'autres techniques comme l'**InSAR** ou le **Nivellement** pour une couverture large).

Tab.II.5. Modèle d'appareils de mesure du tassement

Méthode	Précision	Avantages	Inconvénients
Tassomètre	0,01–0,1 mm	Haute précision, adapté aux structures	Mesures locales
Nivellement	0,1–1 mm	Couverture étendue	Moins précis
InSAR (satellite)	1–10 mm	Surveillance large zone	Coût élevé, dépend des conditions
Extensomètres	0,01 mm	Mesure en continu	Installation complexe

II.3.4. Mesure des Pressions et Contraintes

II.3.4.1. Piézomètres

Les **piézomètres** [24] [29] sont des instruments essentiels en géotechnique pour mesurer la **pression interstitielle** (pression de l'eau dans les sols). Ils jouent un rôle crucial dans la **stabilité des ouvrages**, la **prévision des tassements** et la **prévention des risques** (glissements de terrain, ruptures de barrages).

II.3.4.1.1. Principe de Fonctionnement

➤ **Définition :**

Un piézomètre mesure la **pression de l'eau interstitielle (u)** dans les sols, liée à la **hauteur piézométrique** (niveau d'eau libre dans le sol).

➤ **Loi de Terzaghi :**

La **contrainte effective (σ')** gouvernant le comportement mécanique du sol est donnée par :

$$\sigma' = \sigma - u \quad \sigma' = \sigma - u$$

où :

σ = Contrainte totale

u = Pression interstitielle (mesurée par le piézomètre)

II.3.4.2. Objectifs :

- Évaluer les **risques de liquéfaction** (sols saturés sous séisme).
- Surveiller la **consolidation des sols compressibles** (argiles, tourbes).
- Analyser la **stabilité des pentes** et des ouvrages (barrages, tunnels).

TabII.6. Types de Piézomètres et Leurs Applications

Type de Piézomètre	Principe	Précision	Applications
Piézomètre à tube ouvert	Niveau d'eau manuel (règle graduée)	± 1 cm	Études simples, faible coût
Piézomètre à corde vibrante (<i>Vibrating Wire</i>)	Variation de fréquence sous pression	$\pm 0,1\%$ FS	Barrages, fondations profondes
Piézomètre pneumatique	Pression d'air équilibrant l'eau	$\pm 0,5\%$ FS	Milieus corrosifs (décharges, sites industriels)
Piézomètre électrique (à membrane)	Détection par capteur électronique	$\pm 0,1$ kPa	Surveillance en temps réel (automation)
Piézomètre à fibre optique (FBG)	Variation de longueur d'onde sous pression	$\pm 0,01$ kPa	Grands ouvrages (barrages, tunnels)

FS = Full Scale (plage de mesure totale)

II.3.4.3. Méthodes d'Installation

➤ A. Forage et Mise en Place

Forage géotechnique (jusqu'à la couche à étudier).

Remplissage par un filtre (sable, gravier) pour assurer un bon contact sol-capteur.

Scellement à l'argile ou au ciment pour éviter les fuites.

➤ **B. Emplacements Critiques**

Pied des talus (détection de sous-pressions dangereuses).

Sous les fondations (suivi de la consolidation).

En aval des barrages (prévention de la rupture par soulèvement).

3.4.4. Interprétation des Données Piézométriques

➤ **A. Courbes Piézométriques**

Niveau piézométrique (h) : $h = u + \gamma_w z = \gamma_w (u/\gamma_w + z)$

(où γ_w = poids volumique de l'eau, z = altitude du capteur).

Suivi temporel : Détection de :

Drainage naturel (baisse progressive de u).

Surcharge hydraulique (montée dangereuse de u).

➤ **B. Applications aux Études Géotechniques**

Stabilité des pentes :

Si u augmente \rightarrow baisse de $\sigma' \rightarrow$ risque de glissement.

Tassements des sols compressibles :

La dissipation de u entraîne la consolidation (loi de Terzaghi).

Sécurité des barrages :

Une sous-pression excessive peut provoquer la rupture.

II.3.4.5. Avantages et Limites

➤ **Avantages** :

Précision (jusqu'à $\pm 0,01$ kPa pour les FBG).

Automatisation possible (surveillance continue).

Polyvalence (sols, roches, remblais).

➤ **Limites** :

Coût élevé pour les modèles électroniques.

Maintenance nécessaire (colmatage des filtres).

Interprétation complexe en sols hétérogènes.

II.3.4.6. Conclusion et Perspectives

Les **piézomètres** sont indispensables pour :

- **Évaluer les risques hydrauliques** en géotechnique.
- **Optimiser les conceptions d'ouvrages** (fondations, soutènements)
- **Surveiller la sécurité** des barrages et tunnels.

II.3.4.7. Évolutions futures :

Piezomètres connectés (IoT) pour une analyse Big Data.

Couplage avec l'InSAR pour une surveillance globale des nappes.

Principe : Mesure la pression interstitielle (niveau d'eau dans le sol).

Types :

Piezomètres à corde vibrante (haute précision).

Piezomètres à tube ouvert (simples, peu coûteux).

Applications : Stabilité des pentes, drainage, barrages.

II.3.5. Jauges de Déformation (Strain Gauges)

Les jauges de déformation (*strain gauges*) [6] sont des capteurs essentiels pour mesurer les déformations (allongements, raccourcissements) des matériaux sous sollicitations mécaniques, thermiques ou hydriques

Domaines d'application :

II.3.5.1. Surveillance des ouvrages (ponts, barrages, tunnels).

Essais géotechniques (pieux, parois moulées).

Études en laboratoire (éprouvettes de sol, roche, béton).

II.3.5.2. Principe de Fonctionnement

➤ A. Effet Piézorésistif

Une jauge est constituée d'un fil ou film résistif collé sur le matériau.

Lors d'une déformation, sa résistance électrique (R) varie selon :

$$\Delta R = k \cdot \epsilon R \quad \Delta R / R = k \cdot \epsilon$$

où :

ϵ = déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$ ou *microstrain*).

k = facteur de jauge (~ 2 pour les métaux).

➤ **B. Montage en Pont de Wheatstone**

Utilisé pour amplifier le signal et compenser les effets parasites (température).

Configurations courantes :

- 1/4 de pont (1 jauge active).
- Demi-pont (2 jauges en opposition).
- Pont complet (4 jauges, meilleure précision).

TabII.7. Types de Jauges de Déformation

Type	Avantages	Limites	Applications
Jauges à fil métallique	Bon marché, robustes	Sensibilité aux interférences	Structures simples
Jauges à semi-conducteur	Haute sensibilité ($k \approx 100-150$)	Fragiles, non linéaires	Microdéformations (recherche)
Jauges à couche mince	Miniaturisation, haute précision	Coût élevé	Capteurs intégrés (MEMS)
Jauges à fibre optique (FBG)	Immunité EM, multiplexage possible	Installation complexe	Ouvrages sensibles (barrages, tunnels)

II.3.5.3. Installation et Bonnes Pratiques

➤ **Étapes Clés :**

Préparation de la surface :

Nettoyage (solvant) et ponçage pour une adhérence optimale.

Collage :

Cyanoacrylate (montage rapide) ou époxy (haute stabilité).

Protection :

Revêtement silicone ou résine contre l'humidité/chocs.

➤ **Erreurs à Éviter :**

Mauvaise alignement → Mesures biaisées.

Décollement partiel → Dérive du signal.

Effet de température non compensé → Utiliser une jauge témoin (*dummy gauge*).

II.3.5.4. Applications en Géotechnique

➤ **A. Essais sur Pieux**

- Mesure des **contraintes axiales/latérales** sous chargement.
- Calcul du **frottement peau** et de la **capacité portante**.

➤ **B. Surveillance des Tunnels**

- Déformation du **revêtement** sous pression des terres.
- Détection précoce de **déformations anormales**.

➤ **C. Barrages et Ouvrages Hydrauliques**

Suivi des **contraintes dans le béton** (retrait, température, pression hydraulique).

➤ **D. Laboratoire (Triaxial, Cisaillement)**

Mesure des **déformations radiales/axiales** des éprouvettes de sol.

II.3.5.5. Analyse des Données

➤ **A. Calcul des Contraintes (Loi de Hooke)**

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

où E = module d'Young du matériau.

➤ **B. Courbes Contrainte-Déformation**

Détermination du **module élastique, limite élastique, rupture**.

➤ **C. Compensation Thermique**

$$\varepsilon_{\text{real}} = \varepsilon_{\text{measured}} - \alpha \cdot \Delta T \quad \varepsilon_{\text{real}} = \varepsilon_{\text{measured}} - \alpha \cdot \Delta T$$

(α = coefficient de dilatation thermique).

II.3.5.6. Avantages et Limites

➤ **Avantages :**

- **Précision** (jusqu'à 1 $\mu\text{m/m}$).
- **Polyvalence** (métaux, béton, sols renforcés).
- **Faible encombrement**

➤ **Limites :**

- **Durée de vie limitée** en milieux agressifs.
- **Nécessité d'un étalonnage** précis
- **Coût élevé** pour les jauges haute performance.

II.3.6. Capteurs de Charge

Les **capteurs de charge** (ou *load cells*) sont des dispositifs de mesure utilisés pour quantifier **les forces, pressions et charges appliquées** sur les structures ou dans le sol. Ils jouent un rôle clé dans le **dimensionnement, le contrôle et la surveillance** des ouvrages géotechniques.[14]

II.3.6.1. Principe de Fonctionnement

Les capteurs de charge convertissent une **force mécanique** en un **signal électrique** (mV/V, mA, ou numérique) via :

- **Jauges de contrainte** (*strain gauges*) → Déformation élastique d'un corps d'épreuve.
- **Effet piézoélectrique** (capteurs dynamiques).
- **Technologie à fibre optique** (FBG).

II.3.6.2. Relation fondamentale :

$$F = k \cdot \Delta x \text{ (Loi de Hooke)} \quad F = k \cdot \Delta x \text{ (Loi de Hooke)}$$

où :

FF = Force appliquée (kN, N, tf).

kk = Raideur du capteur.

Δx = Déformation mesurée.

Tab.II.8. Types de Capteurs de Charge

Type	Principe	Précision	Applications
Capteur à jauges	Déformation d'un corps d'épreuve	$\pm 0.1\%$ FS	Pieux, ancrages, pesage industriel
Piézoélectrique	Génération de charge sous pression	$\pm 1\%$ FS	Mesures dynamiques (vibrations, chocs)
Hydraulique	Pression d'huile proportionnelle à F	$\pm 0.5\%$ FS	Grandes charges (ponts roulants)
Capacitif	Variation de capacité sous charge	$\pm 0.05\%$ FS	Micro-forces (recherche)
Fibre optique (FBG)	Variation de longueur d'onde	$\pm 0.01\%$ FS	Environnements corrosifs/EX

FS = Pleine Échelle (*Full Scale*)

II.3.6.3. Applications en Géotechnique

➤ A. Essais sur Pieux

- **Mesure de la capacité portante** (essais de chargement statique ou dynamique).
- **Suivi des ancrages** (tirants d'ancrage, micropieux).

➤ B. Surveillance des Ouvrages

- **Pressions sur les soutènements** (parois berlinoises, rideaux de palplanches).
- **Charge sur les fondations** (radiers, semelles).

➤ C. Barrages et Dignes

- **Mesure des poussées hydrauliques.**
- **Contrôle des vérins de reprise de charge.**

➤ **D. Laboratoire**

- **Pressiomètres et appareils triaxiaux.**
- **Essais de cisaillement direct.**

II.3.6.4. Installation et Bonnes Pratiques

➤ **A. Méthodes d'Installation**

- **Intégration directe** (entre deux éléments structuraux).

Exemple : Entre un vérin et un pieu pendant un essai de chargement.

- **Encapsulation** (dans le béton ou le sol).

Exemple : Capteurs embarqués dans un radier.

- **Montage en surface** (pour mesures temporaires).

➤ **B. Précautions**

- **Étalonnage régulier** (avec masses certifiées).
- **Compensation thermique** (dérive due à la température).
- **Protection contre les surcharges** (limitateur mécanique).

II.3.6.5. Analyse des Données

➤ **A. Courbe Charge-Déplacement**

- Détermination de la **rigidité** et de la **charge de rupture**.
- Exemple : Essai de chargement d'un pieu.

➤ **B. Surveillance en Temps Réel**

- **Systèmes SCADA** pour l'alerte précoce de surcharges.
- **Couplage avec des modèles numériques** (FEM).

II.3.6.6. Avantages et Limites

➤ **Avantages**

- **Haute précision** (jusqu'à 0,01% FS pour les modèles étalons).
- **Grande plage de mesure** (de quelques N à plusieurs MN).
- **Résistance aux environnements difficiles** (IP68, ATEX).

➤ **Limites**

- **Coût élevé** pour les capteurs de haute précision.
- **Sensibilité aux perturbations EM** (blindage nécessaire).
- **Usure mécanique** en cas de cycles de charge répétés.

II.3.7. Mesure des Vibrations et Accélérations

Les **mesures de vibrations et d'accélérations** sont essentielles pour:

- ✓ Évaluer l'impact des **vibrations industrielles** et du trafic
- ✓ Contrôler la **sécurité des structures** pendant les travaux
- ✓ Analyser la **réponse dynamique des sols** (séismes, compactage)
- ✓ Diagnostiquer l'état des **machines tournantes**

II.3.7.1. Capteurs Utilisés

II.3.7.1.1 Accéléromètres [26][30]

TabII.9. Type appaillage de mesure des vibrations et accélérations

Type	Principe	Gamme	Applications
Piézoélectrique	Cristaux générant une charge	0.1-10kHz	Surveillance machines
MEMS	Micro-système silicium	0-1.5kHz	Monitoring structurel
Servo-asservi	Masse équilibrée par feedback	DC-500Hz	Mesures statiques

II.3.7.1.2 Géophones [12]

- Capteurs **passifs** (bobine/aimant)
- Gamme typique: **1-250Hz**
- Utilisés pour les **basses fréquences** (sismique, micro-tremblements)

II.3.7.2. Méthodologie de Mesure

II.3.7.2.1 Paramètres Clés

- **Accélération** (m/s², g)
- **Vitesse** (mm/s) - critère ISO 4866
- **Déplacement** (mm)
- **Fréquence** (Hz)

II.3.7.3 Installation

- **Fixation rigide** (vis, cire, aimant)
- **Orientation** (triaxiale recommandée)
- **Localisation:**
 - Points critiques des structures
 - Propagation dans le sol

II.3.7.4. Applications Pratiques

II.3.7.4.1 Génie Civil

Contrôle des vibrations:

- Travaux de terrassement
- Battage de pieux
- Tirs de mine

Diagnostic structurel:

- Ponts
- Tours
- Barrages

➤ 3.7.4.2 Géotechnique

Caractérisation dynamique:

- Modules élastiques
- Liquéfaction des sols

Surveillance sismique

II.3.7.5. Analyse des Données

II.3.7.5.1 Traitement du Signal

- **FFT** (analyse fréquentielle)
- **Spectres de réponse**
- **Niveaux crête/RMS**

II.3.7.5.2 Critères Réglementaires

Tab II.10. Critère et norme de contrôle de vibrations et accélérations

Norme	Domaine	Limite typique
ISO 4866	Bâtiments	5-15mm/s
SN 640 312	Dommages	3-8mm/s
DIN 4150	Protection structures	2-5mm/s

II.3.8 Innovations Récentes

- **Capteurs sans fil IoT**
- **Monitoring continu** avec IA
- **Systèmes embarqués** autonomes

II.3.9. Bonnes Pratiques

- ✓ **Étalonnage régulier**
- ✓ **Choix adapté** à la gamme fréquentielle
- ✓ **Documentation** précise des conditions de mesure

II.3.10. Conclusion

- Les mesures de vibrations permettent:
 - **Prévenir les dommages** aux structures
 - **Optimiser les méthodes** de construction
 - **Garantir la sécurité** des riverains

II.3.11. Perspectives:

- ✓ Intégration avec le BIM
- ✓ Développement de capteurs intelligents

II.4. Choix des Instruments

Les critères de sélection incluent :

- **Précision** nécessaire.
- **Conditions environnementales** (humidité, température).
- **Durée de surveillance** (court terme vs long terme).
- **Coût et facilité d'installation.**

II.5. Conclusion

L'instrumentation géotechnique est indispensable pour garantir la sécurité des ouvrages. Le choix des instruments dépend des paramètres à surveiller et des conditions du projet. Une bonne interprétation des données permet d'anticiper les risques et d'optimiser les solutions de renforcement

CHAPITRE III :

ETUDE DE CAS:

Talus de Batna et du mur

M6

III.1. Introduction

La conception et le dimensionnement des ouvrages géotechniques reposent traditionnellement sur des modèles théoriques et des hypothèses simplificatrices, qui ne tiennent pas toujours compte de la complexité et de l'hétérogénéité des sols en place. Les incertitudes liées aux propriétés mécaniques des terrains, aux conditions hydrauliques et aux interactions sol-structure peuvent conduire à des écarts significatifs entre les prévisions et le comportement réel des ouvrages. Dans ce contexte, **l'instrumentation et la surveillance géotechnique** jouent un rôle crucial en fournissant des données fiables pour :

- **Valider et ajuster les modèles de calcul** en temps réel.
- **Détecter précocement les risques** (tassements excessifs, instabilités, sous-pressions).
- **Optimiser les solutions de dimensionnement** en réduisant les marges d'incertitude.

Ce chapitre présente une **étude de cas** illustrant l'apport de l'instrumentation dans le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique en Algérie, où les conditions géologiques (sismicité [31], sols gonflants, présence de nappes phréatiques superficielles) amplifient les défis techniques. À travers l'analyse des données recueillies (extensomètres, inclinomètres, piézomètres), nous démontrons comment :

- **Les mesures in situ [15] [25] ont permis de réviser les hypothèses initiales** (ex. : niveau de la nappe sous-estimé dans le cas du talus de Batna).
- **La surveillance continue a guidé des interventions correctives** (renforcement des drains, ajustement des soutènements).
- **L'intégration des données instrumentées améliore la fiabilité des futures conceptions.**

Une attention particulière est portée sur :

- **La méthodologie de choix des instruments** (critères de précision, durabilité, adaptation aux conditions locales).
- **L'interprétation des données** et leur traduction en paramètres de calcul.
- **Les limites des techniques employées** (ex. : colmatage des piézomètres, coûts des systèmes haute précision).

En conclusion, ce chapitre souligne **l'indispensable synergie entre instrumentation et dimensionnement**, notamment dans des contextes géotechniques complexes. Les retours d'expérience issus de cette étude alimentent des recommandations pratiques pour les futurs projets, en vue d'une **approche plus prédictive et résiliente**.

Structure du chapitre :

- Contexte et objectifs de l'étude de cas.
- Méthodologie d'instrumentation et paramètres mesurés.
- Analyse des résultats et impact sur le dimensionnement.
- Recommandations et perspectives.

III.2. Contexte géologique

La région de Constantine appartient au domaine externe de la chaîne alpine d'Afrique du Nord (Maghrébine) qui a connu une histoire géologique extrêmement complexe [7] et [8].

Elle est formée par un empilement de nappes et de chevauchements de grande envergure.

Sur le plan litho-stratigraphique, le talus de Batna est constitué par les formations suivantes du bas vers le haut :

- Nappe Néritique Constantinoise : Des formations carbonatées Cénomaniennes qui peuvent atteindre 250 à 300 m d'épaisseur.
- Nappe Tellienne : Marnes sombres à débit en plaquettes, à rares minces bancs de calcaires roussâtres et à miches ou boules ovoïdes de calcaires jaunes. Ces marnes d'âge Maestrichtien à Paléocène, font partie de la nappe Tellienne qui surplombe par un contact de charriage les calcaires de la nappe Néritique Constantinoise. Ces marnes, sont localement brunâtres à rougeâtres, suite à une forte oxydation, avec un remplissage de fracturation par de la calcite et de la pyrite.
- Nappes Ultra-Tellienne :
 - Priabonien à blocs : Marnes et Argiles grisâtres ou brunâtres, à blocs du Crétacé de taille variée.
 - Aptien-Albien : Marnes grises à patine jaune, très froissées, d'âge Aptien-Albien. Elles se présentent en feuillets millimétriques à centimétriques de marnes qui se débitent facilement suivant les joints de stratification (débit schisteux). L'observation de cette formation sur site et sur les carottes de sondages, permet de distinguer trois termes, sommital altéré, médiane dure mais fracturé et basal moins fracturé.
 - Aptien : Marnes grises plus ou moins foncées, alternant avec des Calcaires gris.
 - Barrémien : Calcaires clairs, alternant avec des Marnes gris clair.
 - Quaternaire :

- Remblai : quelques mètres d'ancien remblai d'origine anthropique, il s'agit de Marnes déblayées pour la réalisation des plateformes du chemin de fer et de l'ancienne route nationale RN 03.

- Calcaires lacustres du Mansourah : Ils sont d'âge quaternaire ancien et forment le plateau de Mansourah. Ils sont représentés par des dalles épaisses de plusieurs mètres de calcaire blanchâtres, vacuolaires, subhorizontaux et discordants sur les marnes altérées. Un conglomérat de 1 à 2 m d'épaisseur, affleure localement à la base de ces calcaires. L'érosion différentielle entre les marnes friables et les dalles robustes qui les recouvrent entraîne des écroulements fréquents de gros blocs parsemés le long du versant.

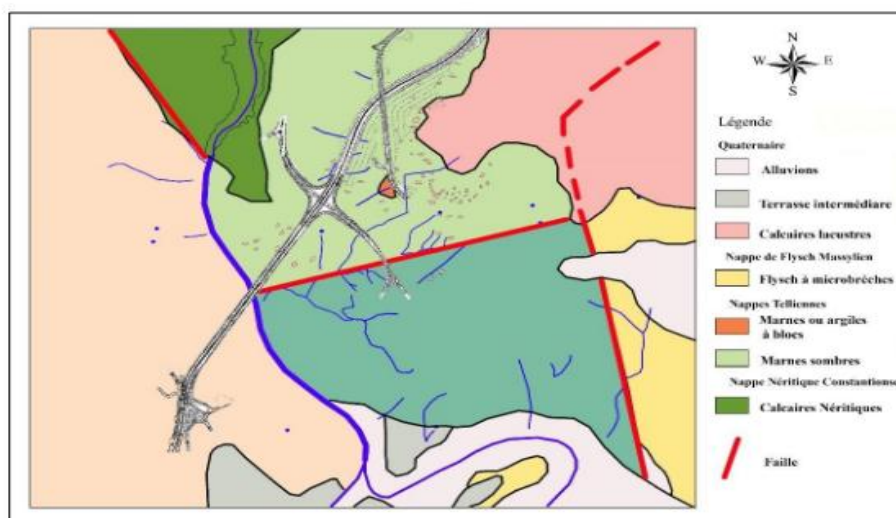


Figure: III.1 Carte géologique du talus de batna [31]

III.3 CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE

La campagne d'investigations géotechniques comprend :

- Treize (13) sondages carottés (SC-PZ2101, SC-PZ2102, SC-PZ2103, SC-PZ2104, SC-PZ2105, SC2106 SC-PZ2107, SC2108, SC-PZ2109, SC-PZ2110, SC-PZ2111, SC-PZ2112 et SC-PZ2113) de profondeurs variantes entre 60 et 100 m ;

- Douze (12) sondages pressiométriques (PS2101, PS2102, PS2103, PS2104, PS2105,

PS2106, PS2107, PS2107, PS2108, PS2109, PS2110, PS2111 et PS2112), d'une profondeur variable entre 30 et 45 m, avec réalisation d'un essai d'expansion de la sonde tous les mètres ;

- Treize (13) piézomètres (SC-PZ2101, SC-PZ2102, SC-PZ2103, SC-PZ2104, SC-PZ2105, PZ2106 SC-PZ2107, PZ2108 SC-PZ2109, SC-PZ2110, SC-PZ2111, SC-PZ2112 et SC-PZ2113) d'une profondeur de 60 à 100 m afin de connaître le niveau de la nappe phréatique ;

- Dix-huit (18) inclinomètres (INC2101, INC2102, INC2103, INC2104, INC2105, INC2106, INC2107, INC2108, INC2109, INC2110, INC2111, INC2112, INC2113, INC2114, INC2115, INC 2116, INC2117 et INC2118) d'une profondeur de 50m à 80m comme indiqué sur le Tableau 01,

- Sept (07) profils de tomographie de résistivité électrique (ERT) réalisés sur le talus de Batna, L'emplacement des sondages in-situ sont présentés sur la figure III.2.

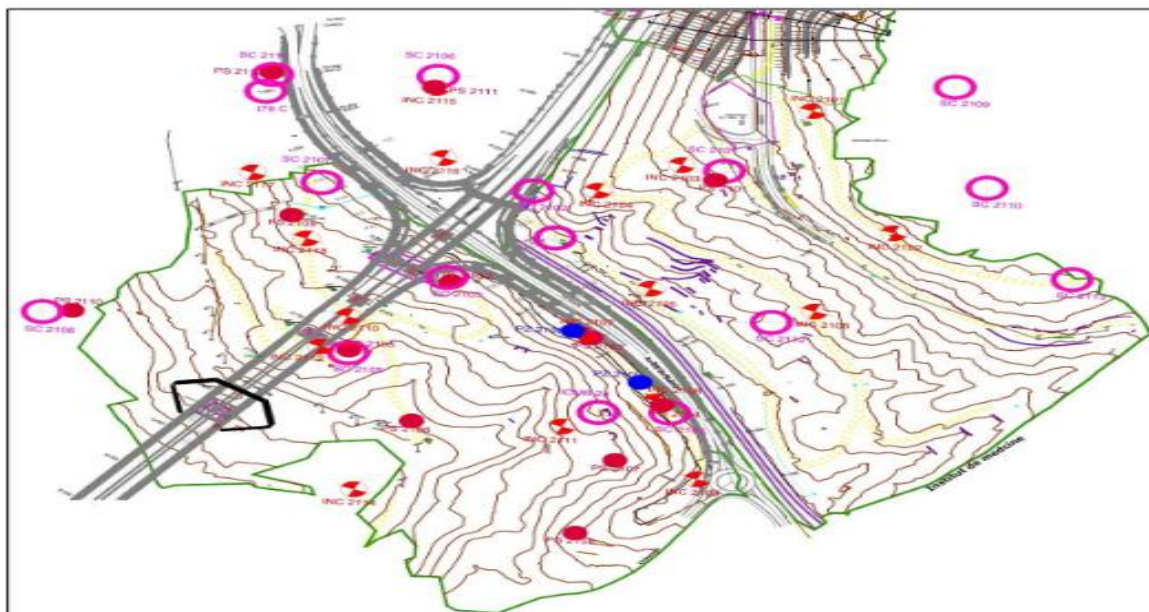


Figure: III.2: Localisation des sondages in-situ sur le site Talus Batna et le mur M6

Cette campagne d'investigation permettra l'évaluation des éléments suivants :

- Les coupes lithologiques des sols en place issues des sondages effectués et de la prospection géophysique ;

- Évaluation des niveaux de la nappe à l'aide des sondages piézométriques, en combinaison avec les profils de tomographie électrique ;
- Évaluation des modules de déformation et des pressions limites à l'aide des sondages Pressiométriques

Lithologie du site à partir des sondages carottés :

Les sondages carottés effectués sur le site du talus de Batna montrent que le terrain est principalement constitué de marnes altérées, fracturées à dures en profondeur surmontant des formations marno-calcaires à calcaire en profondeur. En surface, on trouve une couche de marne argileuse et des remblais.

Le tableau III.01 résume les lithologies des treize (13) sondages carottés réalisés sur le talus de Batna durant cette campagne de reconnaissance.

Tableau III. 01 : Résumé de la lithologie des sondages carottés réalisés.

Lithologie	Profondeur (m)												
	SC 2101	SC 2102	SC 2103	SC 2104	SC 2105	SC 2106	SC 2107	SC 2108	SC 2109	SC 2110	SC 2111	SC 2112	SC 2113
Remblai	-	-	0 - 6	0 - 1,9	-	0 - 0,9	0 - 7,5	0 - 5,6	-	-	-	-	-
Calcaires lacustres	-	-	-	-	3,5 - 5	-	-	-	2 - 6,7	6 - 17	-	-	-
Conglomérats	-	-	-	-	-	-	-	-	9,95 - 11,8	-	-	-	-
Marne argileuse	0 - 3,9	0 - 3	6 - 12	1,9 - 5	0 - 3,5 & 5 - 8	0,9 - 7,8	7,5 - 12,4	5,6 - 18,5	0 - 2 & 6,7 - 9,95 & 11,8 - 12,4	0 - 6 & 17 - 17,5	0 - 5,8	0 - 12,8	0 - 11,8
Marne altérée	3,9 - 12	3 - 12,2	12 - 21	5 - 12,2	8 - 14	7,8 - 20,8	12,4 - 36	18,5 - 23,4	12,35 - 22,5	17,5 - 37,5	5,8 - 22,5	12,8 - 22,6	11,8 - 20
Marne fracturée	12 - 30,5	12,2 - 42	21 - 33	12,2 - 64,2	14 - 32,9	20,8 - 45	36 - 46,5	23,4 - 32,3	22,5 - 40	37,5 - 51	22,5 - 30,4	22,6 - 48,7	20 - 33
Marne dure	30,5 - 80	42 - 70	33 - 70	64,2 - 70	32,9 - 45,8	45 - 60,2	46,5 - 54,3	32,3 - 45,5	40 - 100	51 - 100	30,4 - 38	48,7 - 70	33 - 80
Marno-Calcaires	-	-	-	-	45,8 - 49,4	60,2 - 64,4	54,3 - 58,2	45,5 - 60	-	-	38 - 44	-	-
Calcaires	-	-	-	-	49,4 - 60	64,4 - 66	58,2 - 71,5	-	-	-	44 - 70	-	-

Pour développer les modèles géotechniques du site de Talus de Batna et mur M6, il a été procédé à l'analyse des résultats de cette investigation géotechnique, ainsi qu'à l'examen et l'exploitation des données disponibles des investigations géotechniques antérieures réalisées sur ce site. Cette analyse nous a permis d'établir les profils géotechniques présentés sur la figure III.3.

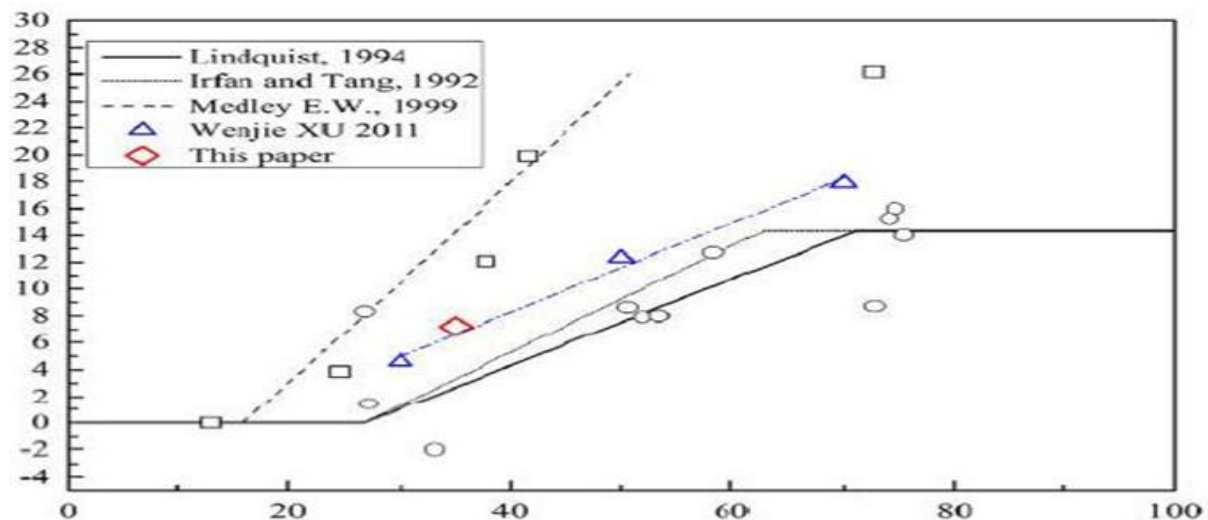


Figure:III.3: modèles géotechniques du site de Talus de Batna et mur M6

La hauteur du talus : $H = 15 \text{ M}$

La longueur du talus : $B = 45 \text{ M}$

$\tan \theta = 15/45$ Alors : $\theta = 22^\circ$

L'emplacement de ces profils est montré sur la figure III.4, qui ont été choisis soigneusement en fonction de la pente du talus et de la direction des mouvements enregistrés par les inclinomètres dans la période entre 2013 et 2016 comme indiqué dans les rapports.

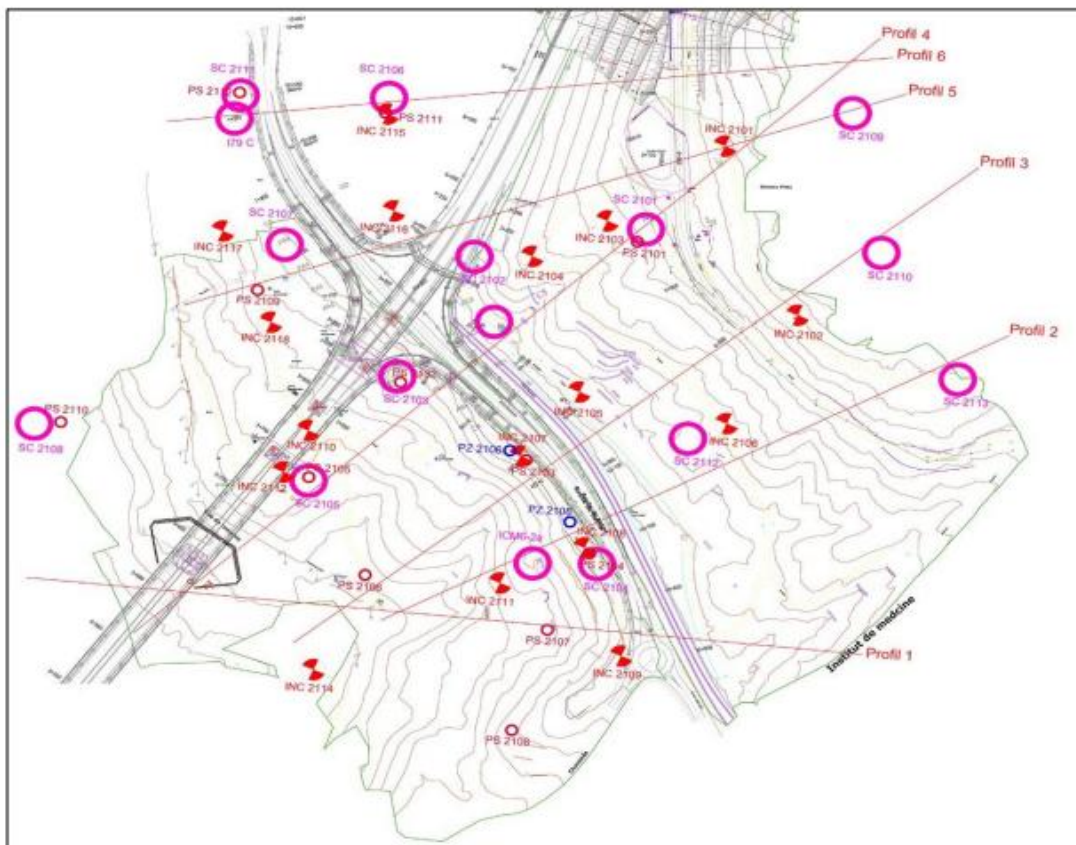


Figure: III.4: Emplacement de ces profils géotechnique

Suivant le schéma afficher en dessus en prendre les deux profiles suivants :

Profil N°01 :

Tab.III.2. Position des instruments de contrôle

Désignation	ZONE	Coordonnées			Profondeur (m)	PK correspondant
		X (m)	Y (m)	Z (m)		
INC 05			4028047,417	768,235	50	PK 8+800
SC-INC06			4028113,59	747,86	30	PK 8+800
SC-Piézo03			4028066,111	761,52	30	PK 8+750
SC-Piézo 06		287482,5	4028012,52	768,16	30	PK 8+750
SC 05 Bis		287489,256	4028082,396	752,52	40	PK 8+750

Profil N°02 :

INC3-BIS , INC1 , SP4 , SC 09

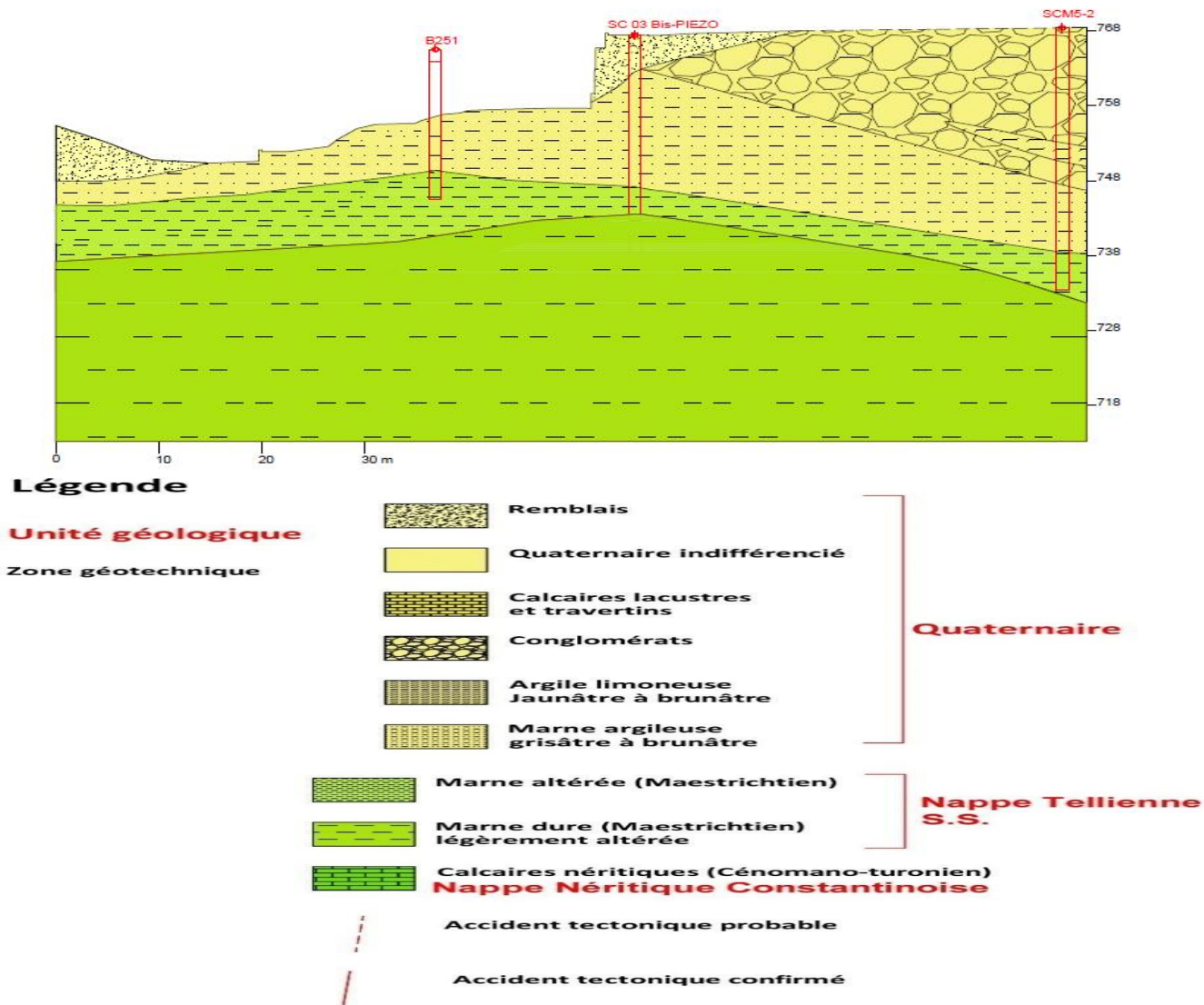


Figure: III.5: Profil en travers- PK 8 + 850

La coupe géologique montre la présence de deux couche:

- Remblais à 10 mètres de hauteur
- Marne argileuse grisâtre à brunâtre à 10 mètres de hauteur

La hauteur de talus : $H \gg 15$ m

La longueur de talus : $B \gg 45$ m

Angle de la pente : $\theta \gg 22^\circ$

Tab.III.3. Caractéristique géotechnique de la zone d'étude

Lithologie	γ (kN/m ³)	γ_h (kN/m ³)	EPMT (MPa)	α	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Remblai	19,2	21,4	20,40	0,50	40,18	8	21,75
Marne légèrement argileuse	17,9	20,6	25,05	0,67	37,58	30,55	22,46

Nature de la couche	σ_c (kPa)	σ_t (kPa)	C' (kPa)	Φ' (°)	E_r (GPa)
Marne altérée	1004,36	222,23	236,21	39,64	2,8
Marne dure saine	4202,12	533,5	748,63	50,80	10,3

		Section du mur					
		PK 8+925 à PK 9+007			PK 8 + 770 à PK 8+925 (Section concernée)		
Paramètre		c' (kPa)	ϕ' (°)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c_u (kPa)
Couche de sol	Remblai	8	21,75	50	8	21	63
	Marne argileuse	24,5	23,6	110	30	22	78
	Marne altérée	26,4	28,75	159,9	24	28	154
	Marne grise	145	36	265	130	34	302

La Figure présente les six (06) profils géotechniques établis et qui constitueront la base des calculs de la stabilité du site.

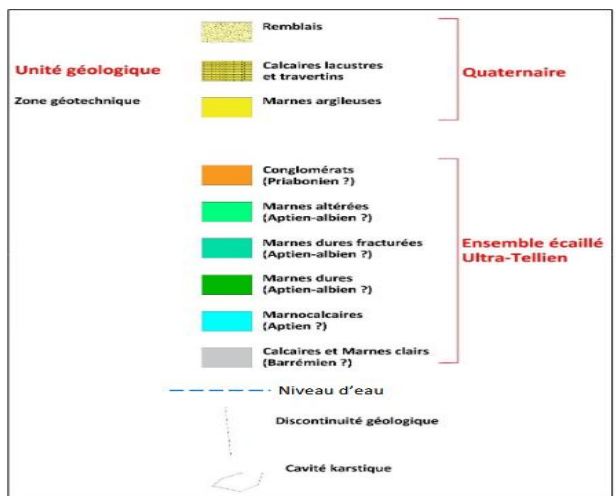
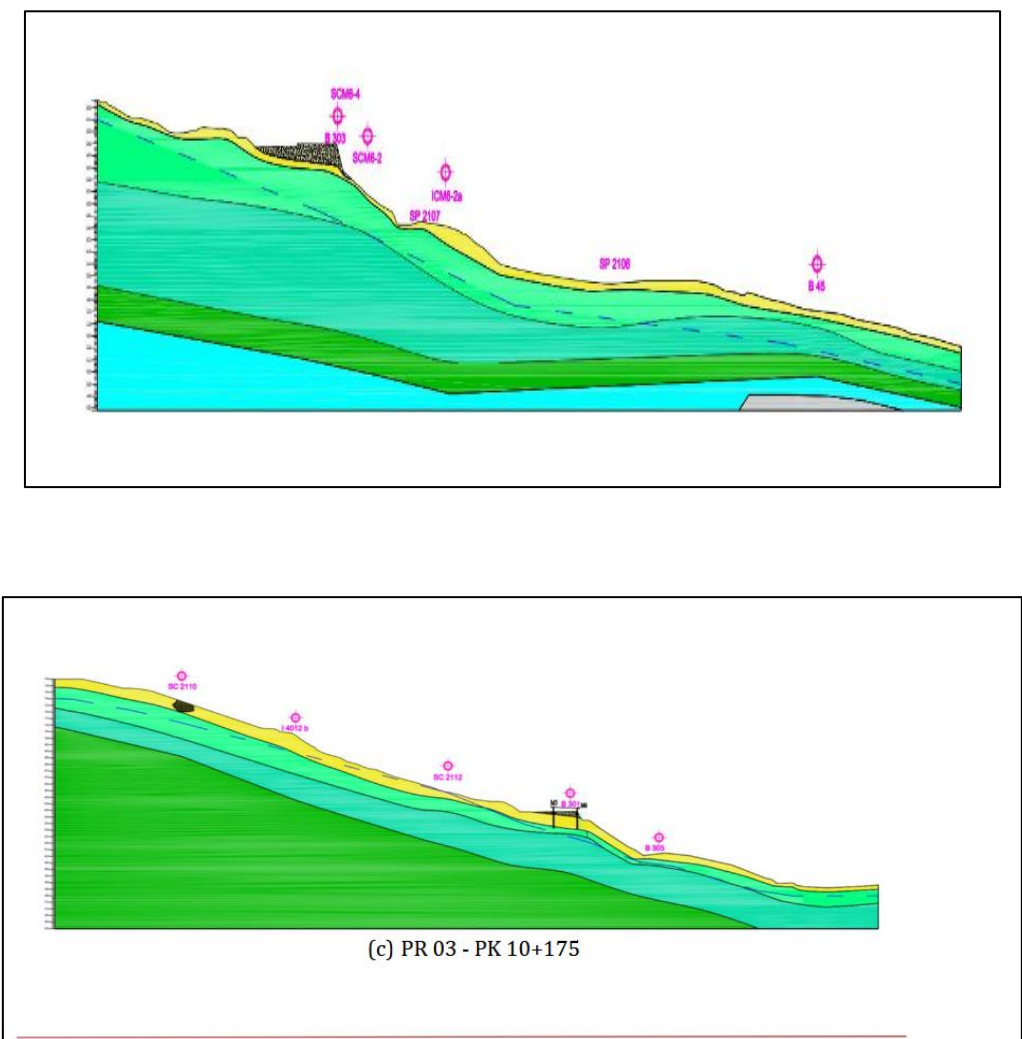


Figure III.6 : Coupes géotechniques adoptées pour le site talus de Batna et le mur M6

III.3.1. Sondages pressiométriques

Les douze (12) sondages pressiométriques réalisés sur le site de Talus de Batna et le mur M6 ont permis de mesurer les paramètres suivants :

- Module pressiométrique EM,
- Pression limite PL,
- Pression de fluage Pf.

Lors de la réalisation des sondages pressiométriques, vu la forte résistance du sol enregistrée à certaines profondeurs (notamment dans la marne dure), la pression maximale atteinte était de 50 bars sans pouvoir consommer le volume maximum de la sonde.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau 04.

Tab.III.4. Récapitulatif des résultats des essais pressiométriques pour chaque couche de sols rencontrés.

Paramètres (valeur caractéristique)		Nature de la couche						
		Remblai	Marne argileuse	Marne altérée	Marne fracturée	Marne dure	Marno-calcaire	Calcaire
E_M (MPa)	Mx	17,76	37,52	183,27	284,87	322,51	305,21	-
	Sx	149,45	40,55	126,26	80,28	27,516	62	-
	Xk	5,52	14,89	141,39	260,46	313,31	192,37	-
P_L (MPa)	Mx	1,2026	1,2	5,72	7,95	8,63	8,81	-
	Sx	0,886	0,89	3,25	1,08	0,003	0,01	-
	Xk	0,47	0,88	4,64	7,62	8,62	8,79	-

III.3.2. Mesures piézométriques

Les lectures piézométriques au niveau des piézomètres (PZ2101, PZ2102, PZ2103 PZ2104, PZ2105, PZ2106, PZ2107, PZ2108, PZ2109, PZ2110, PZ2111, PZ2112 et PZ2113) mis en

place sur site (Figure 10), effectuées depuis le mois de janvier 2022 sont présenté sur le tableau 6

Tab.III.5. Lectures piézométriques au niveau des piézomètres

DATE	PZ2104	PZ2110	PZ2113	PZ2108	PZ2106	PZ2109	PZ2112	PZ2101	PZ2107	PZ2111	PZ2102	PZ2103	PZ2105
07/01/2022	-12.33												
10/01/2022		-25.2											
24/01/2022		-33.35	-7.1	-5.46									
27/01/2022		-34.2	-11.23										
31/01/2022	-17.9	-34.45	-19.9	-6.05									
21/02/2022	-18.22	-35.05	-20.73	-5.95	-22.92								
26/02/2022	-17.92	-34.45	-20.53		-22.62			-13.03					
06/03/2022	-18.44	-34.38	-20.68	-5.8	-23.07	-12.54	-8	-13.54	-35.5	-43.86			
27/03/2022	-18.37	-33.99	-20.82		-24.2	-12.07	-10.91	-14	-36.03	-43.8			
18/05/2022	-18.49	-33.39	-20.96	-5.6	-28.43	-11.83	-10.94	-14.94	-35.87	-43.79	-22.94	-40.97	-23.62
04/06/2022	-18.43	-33.4	-20.9	-5.61	-28.35	-11.8	-10.9	-15.21	-35.85	-43.75	-22.75	-40.98	-23.48

La Figure III.6 ci-dessous montre les courbes des fluctuations du niveau de la nappe phréatique au niveau des piézomètres du PZ2101 au PZ2113. Ces courbes montrent que le niveau de la nappe phréatique est généralement stable, à une profondeur variante entre 4m et 44 m de profondeur par rapport à la surface du sol.

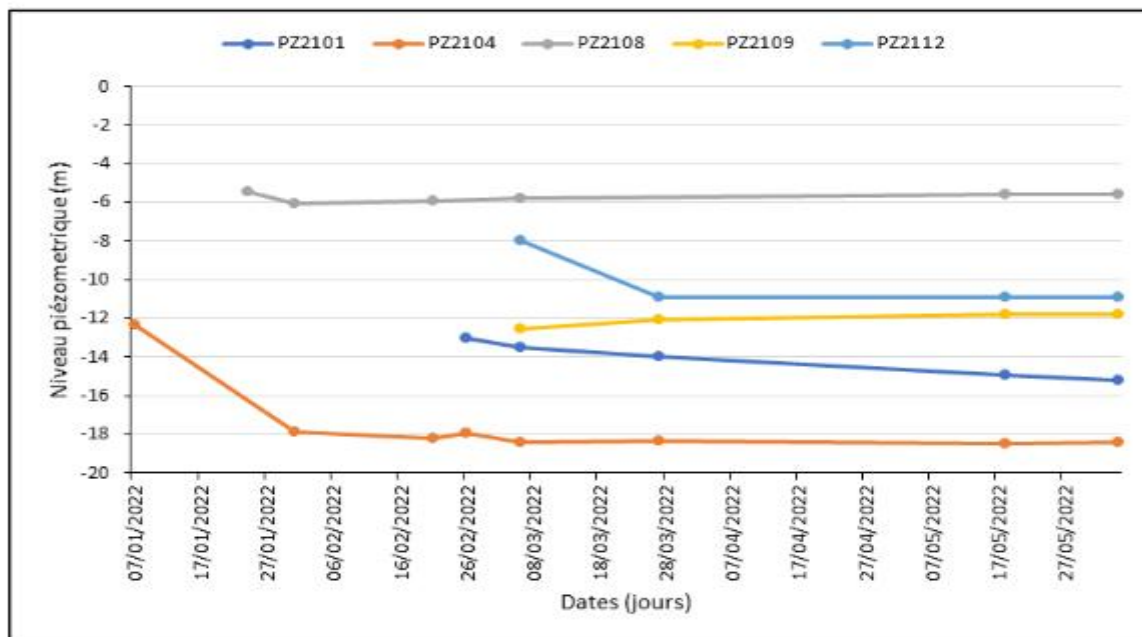


Figure III.7 : les courbes des fluctuations du niveau de la nappe

III.3 .3. Essais en laboratoire

Des échantillons prélevés au niveau des différents sondages ont été soumis à des essais d'identification physiques et mécaniques à savoir :

- **Identification physique**

- Mesure de la masse volumique,
- Mesure de la teneur en eau naturelle,
- Mesure des limites d'Atterberg,
- Analyses granulométriques,
- Mesure de perméabilité.

- **Essais mécaniques**

- Cisaillement direct pour les sols,
- Cisaillement en dispositif triaxial (UU),
- Essais de compression simple et essai brésilien pour les roches,
- Essai ultrasonique pour les roches.

III.3 .3.1. Caractéristiques physiques des sols et roches

Le Tableau III.6 résume les propriétés physiques pour chaque couche de sol après une analyse statistique. Les résultats bruts et les PV des essais sont présentés en Annexe de ce document.

Les valeurs de perméabilités indiquées dans le tableau ci-dessous obtenus à partir des résultats des essais Lugeon réalisés sur site montrent une perméabilité faible à très faible.

Tab.III.6. Propriétés physiques pour chaque couche de sol

Paramètres (valeurs caractéristique)	Remblai	Marne argileuse	Marne altérée	Marne fracturée	Marne dure	Marno- calcaire	Calcaire lacustres
W (%)	18,29	14,05	9,86	9,84	8,14	4,46	2,52
γ_d (t/m ³)	17,68	18,35	20,60	20,44	22,44	22,79	26,07
γ_h (t/m ³)	20,91	20,88	22,57	23,33	23,19	23,81	26,76
S_r (%)	-	53,32	88,85	-	-	-	-
w_l (%)	-	49,20	44,79	-	-	-	-
w_p (%)	-	27,26	9,89	-	-	-	-
I_p (%)	-	21,93	21,25				
Perméabilité (m/s)			$1,34 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-6}$

III.3.3.1.1. Caractéristiques mécaniques des sols

Le Tableau III.7 récapitule les propriétés mécaniques de la couche de Marne argileuse obtenues à l'aide des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande. Une analyse statistique faisant ressortir la moyenne et l'écart type sur les résultats a été réalisée pour calculer les valeurs caractéristiques, en utilisant la méthode de Schneider (1999) recommandée par la norme NF EN-1997-1, à l'aide de l'équation suivante :

$$X_k = M_x - 0,5, S_x$$

Où :

- M_x : est la valeur moyenne du paramètre "X"
- S_x : est l'écart type du paramètre "X"
- X_k : est la valeur caractéristique à adoptée pour le paramètre "X",

Les résultats obtenus par la méthode de Schneider induisent une sécurité plus importante de l'ouvrage par rapport au calcul des valeurs moyennes uniquement. Les résultats de cette analyse sont présentés au Tableau 08.

III.7. Récapitulatif des caractéristiques mécaniques effectives des deux premières couches de sols rencontrées

Paramètres (valeur caractéristique) de la couche de Marne argileuse																			
C' (kPa)					Φ' (°)					Cultime (kPa)					Φultime (°)				
Xmin	Xmax	Mx	Sx	Xk	Xmin	Xmax	Mx	Sx	Xk	Xmin	Xmax	Mx	Sx	Xk	Xmin	Xmax	Mx	Sx	Xk
15	28	20,7	6,7	17,4	16	31	25	7,9	21	9	29	19	14,1	11,9	14	32	23	12,7	16,6

Cette méthode statistique a été appliquée pour analyser les paramètres mécaniques de la marne argileuse, cette méthode est généralement préférable par rapport à la méthode de Baguelin & Kovarik [13] recommandée par la norme NF P 94 – 282 dans le cas où le nombre d’essais est limité, ce qui est le cas dans la présente mémoire.

III.4 . instrumentation et surveillance sur terrain

Depuis Septembre 2013 et par suite des premiers résultats de surveillance, des déplacements ont été enregistrés au niveau du talus inférieur de Batna. Les instabilités de ce site ont été déclenchées lors de la construction du Viaduc Transrhmel. Les phases de construction de ce viaduc ont été les suivantes : (1) Mise en place de matériaux de remblayage sur le côté aval de la pente « chemin Batna » afin de faciliter le remblayage pour l'érection d'échafaudages temporaires (2) Localement, à côté du P4, déblayage du talus pour construire la piste d'accès.

En analysant les données enregistrées par les inclinomètres installés sur tout le site, les mouvements détectés sur le site ont été enregistrés à des profondeurs faibles à élevées (3 à 50 m).

L’analyse des résultats des mesures inclinométriques disponibles dans les rapports de COWI montre l’existence des mouvements superficiels et d’autres relativement profonds. Le Tableau 1 présente les valeurs maximales des déplacements avec la profondeur pour chaque inclinomètre, enregistrées entre 2013 et 2016. La Figure III.7 montre l’emplacement de ces

inclinomètres et illustre les zones dont les mouvements sont considérés profonds.

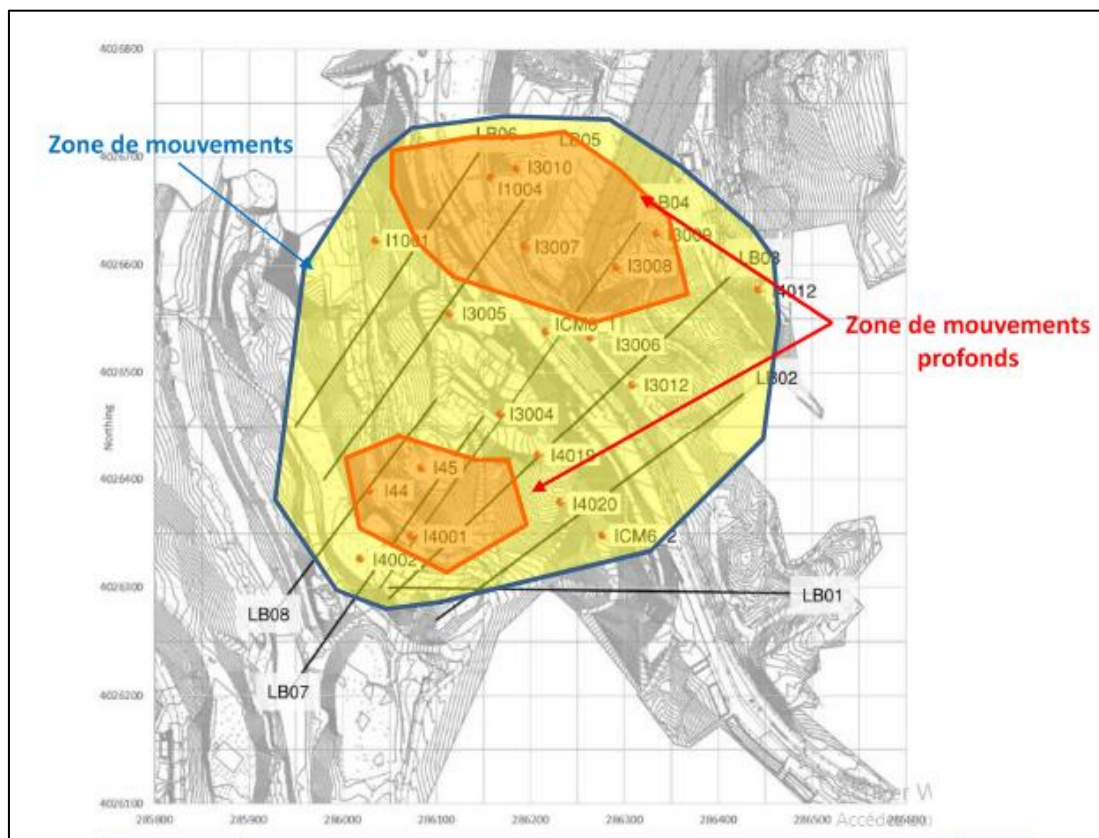


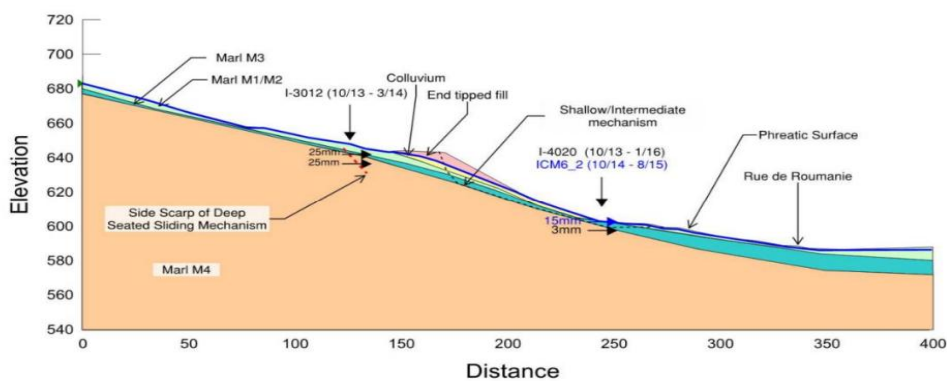
Figure III.8. Localisation des inclinomètres existants 2013-2016

Tableau: III.8. Déplacement maximal des inclinomètres 2013-2016

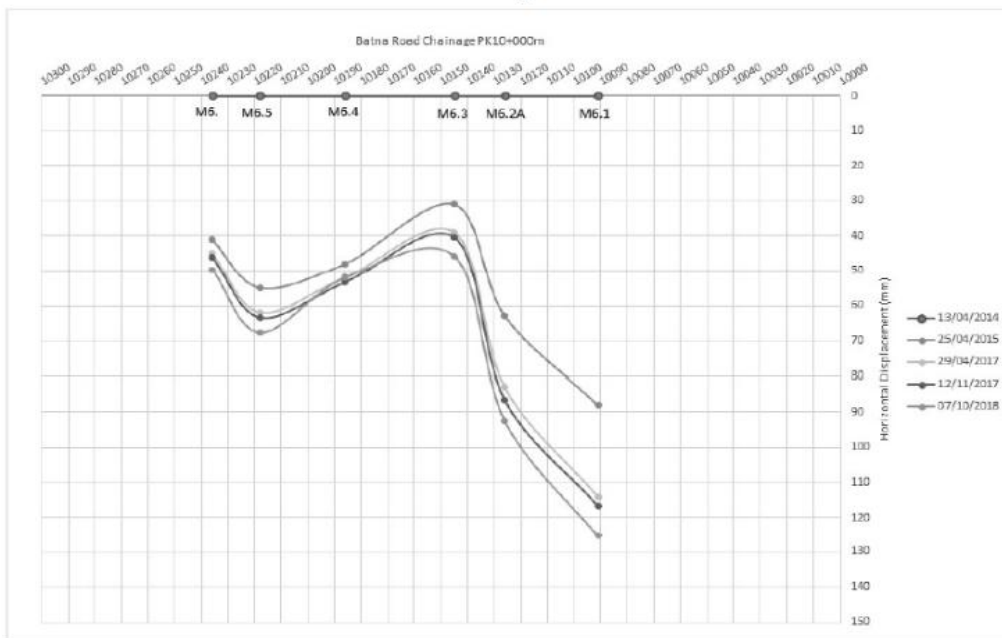
Inclinomètre	Déplacement (mm)	Profondeur (m)
I-3012	25	7
I-4020	6	3
ICM6 2	15	5
I-3009	20	60
I-3008	49	55
I-3006	13	55
I-3004	37	5
I-3010	3	60
I-3007	25	50
I-3005	25	10
I-1004	14	50
I-1001	13	3
I-45	83	45
I-44	15	35
I-4001	11	35
I-4002	15	15

Pour un meilleur suivi des mouvements du talus entier, il a été jugé nécessaire d'installer 18 nouveaux inclinomètres distribués sur toute la zone en question tout en prenant en considération les inclinomètres existants les plus sensibles.

Comme mentionnée précédemment, les mouvements ont été détectés visuellement avec l'apparition de fissures entre le mur M6 et la route de Batna ainsi que par des mesures inclinométriques (ICM6-2, I-4020 et I-3012) et les cibles topographiques (Figure III.8.b). Le mur M6 est un mur de soutènement en béton armé de 160 de longueur et de 7m d'hauteur fondé sur des pieux de 11m de profondeur



a)



b)

Figure III.9 : a) Coupe LB02 au milieu du mur M6, b) Mouvement en plan du mur M6 (cibles topographiques).

Les mesures inclinométriques mentionnées ont montré des mouvements entre les années 2013 et 2016 de l'ordre de 25 mm sur des faibles profondeurs (dans la couche de colluvion près de la surface), ce qui a provoqué un déconfinement du mur . Ce glissement a impacté la stabilité du mur et a provoqué des mouvements significatifs enregistrés entre les années 2014 et 2018 par le suivi des cibles topographiques installées sur le mur. Ce mouvement du mur n'est pas symétrique en plan, ce qui peut être dû au sens de mouvement de terrain qui a une inclinaison par rapport au mur.

Les résultats de l'étude supplémentaire montrent que le niveau de la nappe phréatique a été sous-estimé dans les calculs de confortement proposés. A cet effet un système de drainage subhorizontal et un aménagement de toute la zone instable par un système de drainage superficiel afin d'éviter l'érosion du talus et l'infiltration des eaux de surface.

III.5.Évaluation de la position de cercle critique par la méthode des abaques

(cas saturé ou partiellement saturé)

III.5.1. Choix des abaques (récurrent)

Suite aux résultats des lectures piézométriques au niveau des piézomètres présentés sur la figure III.6 mis en place sur site effectuées depuis le mois de janvier 2022 ,les courbes montrent que le niveau de la nappe phréatique est généralement stable, à une profondeur variant entre 4m et 44 m de profondeur par rapport à la surface du sol, par conséquent ont montré le cas partiellement saturé dans l'abaque présenté dans la Figure III.9.

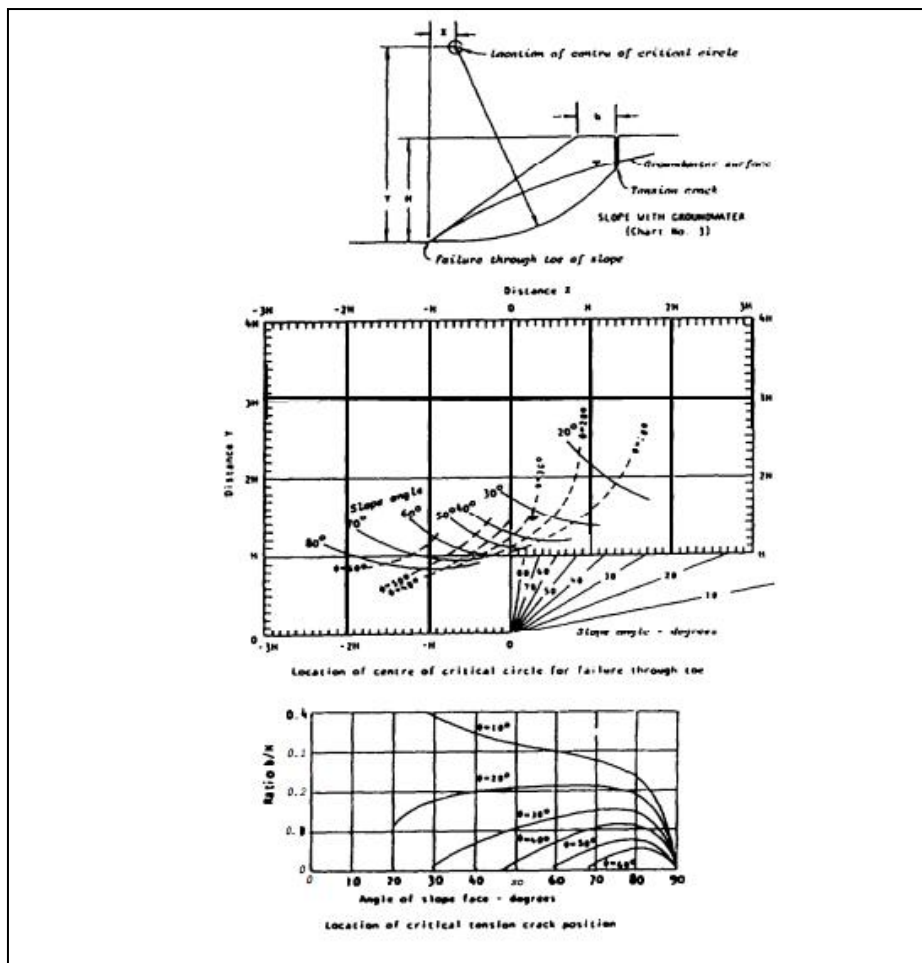


Figure III.10. Position de centre du cercle critique (cas saturé ou partiellement saturé)

L'application de la méthode des abaques pour l'évaluation de la position et la profondeur de cercle critique est présenté dans la figure III.10.

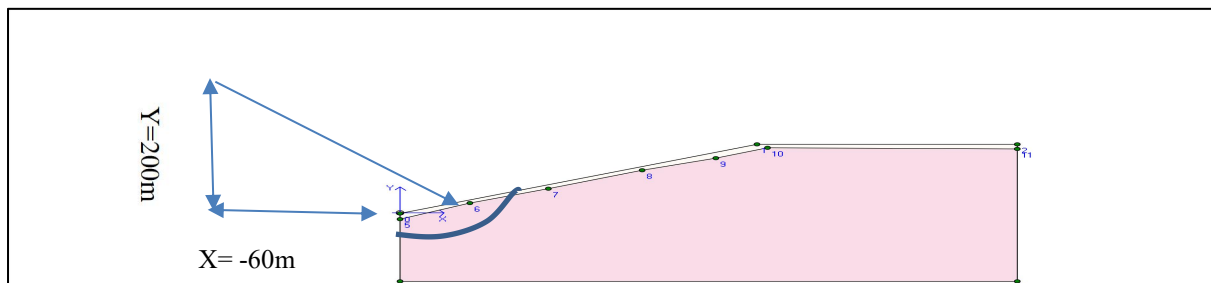
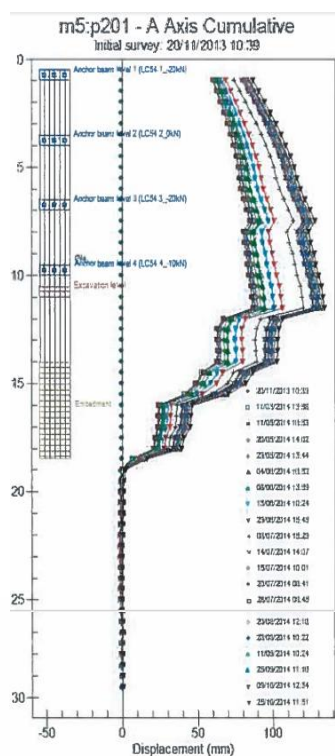


Figure III.11. Cercle critique par la méthode des abaques

Les résultats montrent la présence d'un cercle superficiel situé au pied de talus par conséquent le risque probable n'a pas important dont la profondeur de la cercle critique est estimé d'environ 6m, ces résultats sera comparé avec les lecteurs sur terrain réalisé à l'aide des inclinomètres.

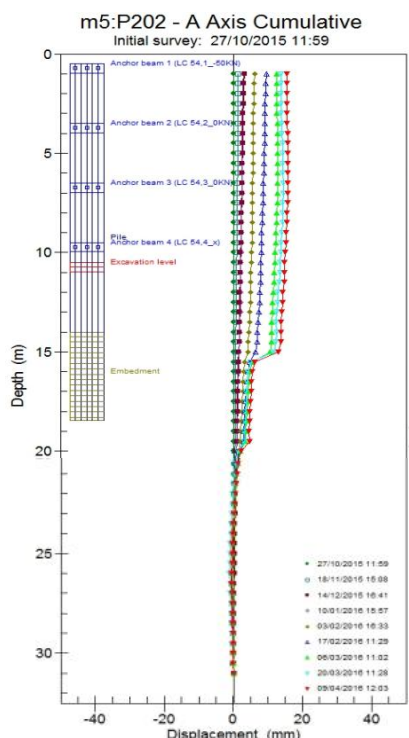
III.5.2.Résultats de l'instrumentation

Les mesures inclinométriques mentionnées ont montré des mouvements entre les années 2013 et 2016 de l'ordre de 25 mm sur des faibles profondeurs (dans la couche de colluvion près de la surface), voire la figure III.11.



PROJECT: VCO
 SITE: m5
 INSTALLATION: p201
 COMPANY: Betolste
 CLIENT: Andrade Gutierrez

NOTE: Status: Ok
 Sliding depth: 18.50m, direction 350 degrees;
 09-10-14: no movement
 25-10-14 reading: 1,20mm (2,25mm/month);
 Load cell readings: 26-10-14



PROJECT: VCO
 SITE: MLN5, pk9,000
 INSTALLATION: P-202
 COMPANY: Betolste
 CLIENT: Andrade Gutierrez

NOTE: Status: OK, sliding depth at 14.50 and 19.50m, direction 359 degrees;
 Load cell readings: 03-04-2016
 09-04-2016: Average:1.36mm (2.04mm/month) / 14.50m - 0.12mm, 19.50m - 0.56mm;

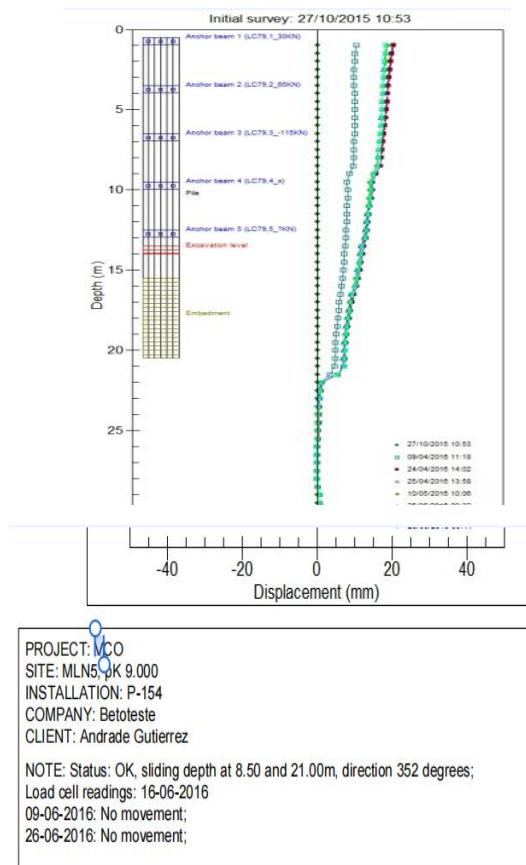


Figure III.12. Mesures inclinométriques

ce glissement a provoqué un déconfinement du mur (Figure III.8 : b) , impacté ainsi la stabilité du mur et provoqué des mouvements significatifs enregistrés entre les années 2014 et 2018 par le suivi des cibles topographiques installées sur le mur, les mouvements ont été détectés visuellement avec l'apparition de fissures entre le mur M6 et la route de Batna ainsi que par des mesures inclinométriques (ICM6-2, I-4020 et I-3012) et les cibles topographiques (Figure III.8 : b) . A noter que le mur M6 est un mur de soutènement en béton armé de 160 de longueur et de 7m d'hauteur fondé sur des pieux de 11m de profondeur.

III.5.3. Evaluation de stabilité par la méthode des abaques

Figure III.13. condition d'utilisation des abaques selon la position de la nappe phréatique

Cinque abaques sont disponibles selon la position de la nappe phréatique voire Figure III.11

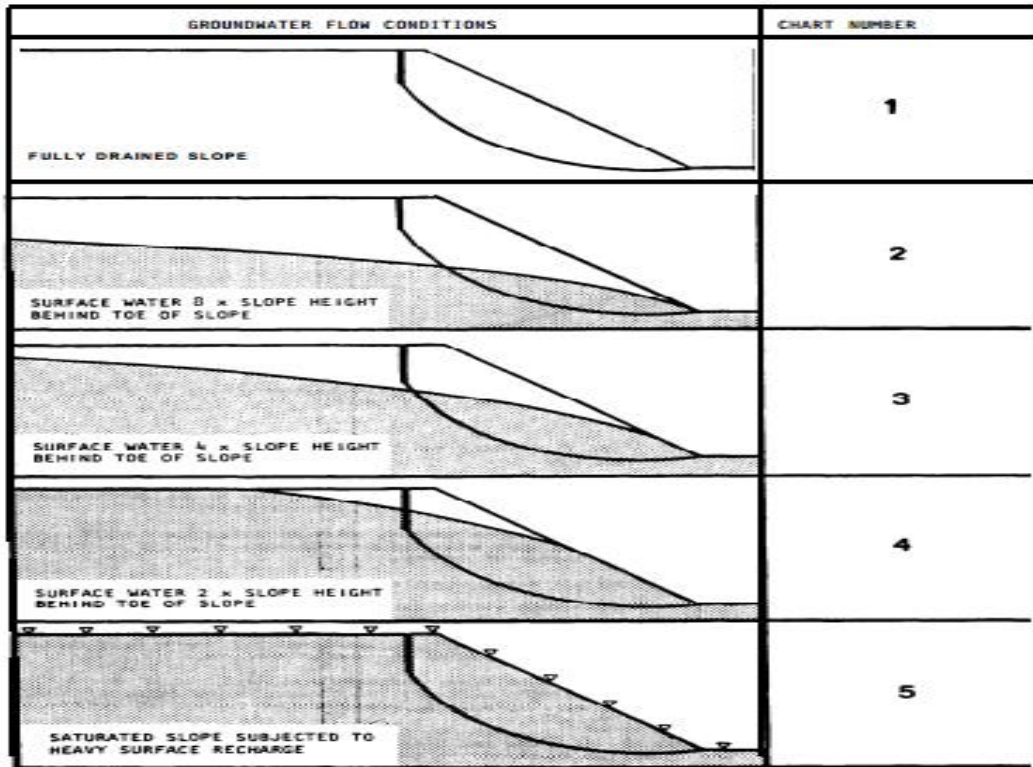


Figure: III. 13.Chois des cas d'étude selon les condition hydrogéologique

L'état de stabilité est évalué à partir des abaques de la figure III.12, après caractérisation de la nappe phréatique de la zone d'étude.

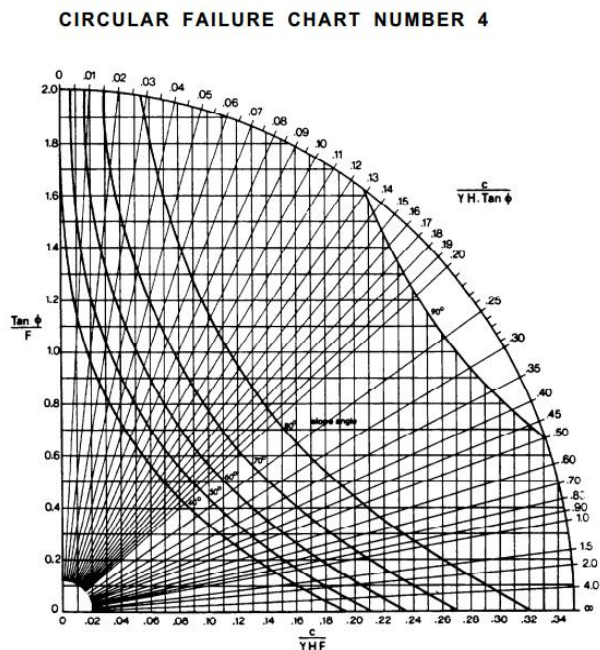


Figure III.14. Abaque pour l'évaluation de Fs

Dans la présente étude nous avons utilisé l'abaque N°4 suit au niveau de la nappe phréatique positionné superficiellement.

Après avoir exploité les données géotechnique de la zone en question nous avons obtenu une

Une valeur de $\frac{tg\phi}{fs} = 0,4$, donc $Fs= 1,44$ (clarifier la formule).

III.6.Synthés de quelques applications dans les projets algériens

L'Algérie, avec ses **diverses conditions géologiques** (zones sismiques, sols gypseux, régions arides) et ses **mégaprojets d'infrastructure**, offre plusieurs exemples pertinents d'application de l'instrumentation géotechnique. Cette analyse couvre :

- **Barrages** (risques sismiques/sous-pressions)
- **Tunnels** (zones montagneuses instables)
- **Fondations** (sols gonflants/gypseux)
- **Ouvrages pétroliers/gaziers**

III.6.1. Barrage de Beni Haroun (Mila)

Selon le *Rapport technique de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) 2019*

Problématique :

- Plus grand barrage d'Algérie (capacité 960 Mm³)
- Risques : **Sismicité (Zone III) + sols karstiques**

Instrumentation :

- **Réseau de 32 piézomètres** (type Vibrating Wire) → Surveillance des sous-pressions
- **Accéléromètres Kinometrics** → Monitoring sismique
- **Inclinomètres** → Stabilité des berges

Résultats :

Détection d'une **augmentation de 15% des pressions interstitielles** en 2018 →

Renforcement des drains

III.6.2.Tunnel de Chaabet El Aneur (Bouira)

Selon le rapport DTRF 2021 DE Ministère des Travaux Publics

Problématique :

Tunnel routier de 2.8 km dans des **formations schisteuses fracturées**

Instrumentation :

Extensomètres à câble (mesure de convergence)

Cellules de pression totale (Glötzl) → Pression du terrain

Microsismique passive → Détection précoce d'instabilités

Incident notable :

En 2020, les extensomètres ont enregistré une **convergence anormale de 12 mm/semaine** → Evacuation préventive

III.6.3. Fondations du Grand Mosque d'Alger

Source : CTIC (Centre des Techniques Industrielles et de Construction), 2022

Problématique :

Sols **gonflants** (argile de la plaine de la Mitidja) + **charges élevées**

Solutions :

Jauges de déformation (HBM) dans les pieux → Suivi des charges axiales

Tassomètres numériques (Leica DNA03) → Précision 0.1mm

Suivi satellitaire InSAR → Détection des tassements différentiels

Résultat :

Tassement maîtrisé à **8 mm/an** (< seuil critique de 15mm)

III.6.4. Projet GNL d'Arzew (Sonatrach)

Enjeu :

Stockage de GNL sur sols **liquéfiables**

Instrumentation :

Pénétrromètre dynamique (DCPT) → Profil de résistance

Sismomètres broadband → Vibrations induites

Capteurs de température à fibre optique → Surveillance des cuves

Impact :

Réduction de **30% des coûts de fondations profondes**

Source : Sonatrach-Raffinerie d’Arzew, Rapport HSE 2023

Tab.III.9. Défis Spécifiques à l’Algérie

Défi	Solution Instrumentée	Exemple de Projet
Sismicité	Accéléromètres + Réseaux GNSS permanents	Barrage de Koudiat Acedoune
Sols gypseux	Suivi par radar interférométrique	Autoroute Est-Ouest (section Biskra)
Pression urbaine	Monitoring en temps réel (IoT)	Métro d’Alger (station Tafourah)

III.7. Retours d’Expérience

III.7.1 Bonnes Pratiques

Combinaison de méthodes (ex : InSAR + capteurs in-situ pour les barrages)

Maintenance préventive des instruments (problème récurrent des piézomètres colmatés)

III.7.2 Échecs Notables

Projet de l’autoroute des Hauts Plateaux : Absence de suivi piézométrique → Glissement en 2017

Centrale solaire de Hassi R’mel : Corrosion des jauges (non adaptées au milieu salin)

III.8. Perspectives

- **Développement de l'IoT** (projet pilote à Boughezoul)
- **Intégration du BIM** (nouveau terminal de l'aéroport d'Oran)
- **Formation locale** (Partenariat ENP-IFSTTAR)

L'analyse des projets algériens démontre que **l'instrumentation géotechnique** est un **outil indispensable** pour garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages, particulièrement dans un contexte géologique complexe (sismicité, sols gonflants, karst).

Points Clés

Succès Techniques :

- Surveillance efficace des **barrages** (Beni Haroun) et **tunnels** (Chaabet El Aneur) grâce aux capteurs de pression et extensomètres.
- Maîtrise des **tassements différentiels** sur des projets sensibles (Grand Mosque d'Alger).

Défis Récurrents :

- **Maintenance des instruments** (ex : colmatage des piézomètres).
- **Adaptation aux conditions locales** (corrosion en milieux salins, données satellitaires sous-utilisées).

CONCLUSION GENERALE

L'instrumentation géotechnique est indispensable pour garantir la sécurité des ouvrages. Le choix des instruments dépend des paramètres à surveiller et des conditions du projet. Une bonne interprétation des données permet d'anticiper les risques et d'optimiser les solutions de renforcement.

L'établissement d'une base de données nationale des risques géotechniques est une étape essentielle dans les études. La Formation des cadre technique à l'interprétation des données sera utile pour les projet.

A la lumière des résultats des étude traité dans le cadre de ces travaux,et pour passer de la logique curative (réparation après incident) à une approche prédictive, en s'appuyant sur l'instrumentation avancée et le retour d'expérience des mégaprojets récents.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mikkelsen P.E. (2003) "Advances in Inclinometer Data Analysis"
- [2] LCPC (2005) "Guide d'utilisation des inclinomètres en géotechnique"
- [3] Dunnicliff J. (2012) "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance"
- [4] Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons.
- [5] Mair, R. J. (2008). *Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Practice*. ICE Publishing.
- [6] Dunnicliff, J., & Green, G. E. (1988). *Geotechnical Instrumentation in Practice*. Wiley.
- [7] Pecker, A., & Salençon, J. (1999). "Mesure des déformations dans les ouvrages géotechniques : méthodes et applications." *Revue Française de Géotechnique*, n°87.
- [8] Sulem, J., & Panet, M. (1987). "Influence de l'instrumentation sur le comportement des tunnels." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 2, No 3.
- [9] Burland, J. B., et al. (1977). "Behaviour of Foundations and Structures." Proc. 9th ICSMFE, Tokyo.
- [10] ASTM D4408 – *Standard Test Method for In Situ Axial Displacement Measurement of Extensometers*.
- [11] Eurocode 7 (EN 1997-2) – *Geotechnical Design – Part 2: Ground Investigation and Testing*.
- [12] FHWA-NHI-10-034 (2010). "Geotechnical Instrumentation for Highway Projects." Federal Highway Administration.
- [13] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). Wiley.
- [14] LCPC (2002). "Surveillance des ouvrages géotechniques – Recommandations pour l'instrumentation." Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

- [15] Nicholson, D., et al. (1999). *"The Observational Method in Ground Engineering."* CIRIA Report 185.
- [16] Mair, R. J. (2008). *Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Practice.* ICE Publishing.
- [17] Peck, R. B., et al. (1974). *Foundation Engineering.* Wiley.
- [18] Sulem, J., & Panet, M. (1987). *"Influence of Instrumentation on Tunnel Behavior."* Tunnelling and Underground Space Technology, 2(3), 237–244.
- [19] Burland, J. B., et al. (1977). *"Behaviour of Foundations and Structures."* Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, 495–506.
- [20] Garga, V. K., & Zhang, Y. (2005). *"New Developments in Extensometer Technology for Slope Monitoring."* Canadian Geotechnical Journal, 42(3), 714–725.
- [21] ASTM D4408 – *Standard Test Method for In Situ Axial Displacement Measurement of Extensometers.*
- [22] ISO 18674-3 (2017) – *Geotechnical Investigation and Testing – Monitoring by Extensometers.*
- [23] FHWA-NHI-10-034 (2010). *Geotechnical Instrumentation for Highway Projects.* Federal Highway Administration.
- [24] LCPC (2002). *"Surveillance des ouvrages géotechniques – Recommandations pour l'instrumentation."* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [25] CIRIA Report 185 (1999). *"The Observational Method in Ground Engineering."*
- [26] USBR (2014). *"Instrumentation Manual for Embankment Dams."* U.S. Bureau of Reclamation.
- [27] Klar, A., et al. (2014). *"Distributed Fiber Optic Extensometers for Soil Deformation Monitoring."* Géotechnique, 64(5), 343–352.
- [28] Mohamad, H., et al. (2010). *"Wireless Extensometers for Real-Time Monitoring."* Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 136(8), 1082–1091.

- [29] Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- [30] Nicholson, D., et al. (1999). "Monitoring the Heathrow Express Tunnel Collapse." *Géotechnique*, 49(6), 843–865.
- [31] ABACHA, I., 2015 : Étude de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie. Ph.D. Thesis, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, 235 p.
- [32] Synthèse de l'enquête géotechnique de Talus de Batna et Mur M6 Référence : M6-RAP006-REV01