

الجمهوريّة الجزائريّة
الديمقراطيّة الشعبيّة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر
UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté des Sciences et de la technologie

Département de génie civil et de l'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Etude de l'impact des variations climatiques sur les propriétés des sols expansifs (région de Saida)

Présenté par :

M. SALEM BILAL
M^{elle}. DAOUDI RADIA

Soutenu le 24/06/2025, devant le jury composé de :

M. HACHMI H.	Président
M. ZIDANI M. B.	Encadreur
M N.BENLEKEHAL	Examinateur

Année universitaire 2024/2025



Remerciements

Nous tenons à remercier DIEU, le tout puissant qui nous a permis d'apprendre à lire et à connaître le vrais sens de la vie.

Au terme de cette étude, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce travail.

A Monsieur Mr Zidani B, nous lui soyons très reconnaissants pour son aide ; son orientation, son encouragement, sa patience et ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les professeurs de géotechnique Enfin, nos remerciements vont aussi à tous les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste mémoire.

BILAL, RADIA

Dédicace

ALLHAMDOLILAH, Je dédie ce mode de travail à :

Mes très chers parents

Toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon parcours académique

Une dédicace spéciale à mon amie (radia) qui a mis le plus d'efforts Dans cette PFE

SALEM BILAL

Dédicace

« Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné force et courage. »

Je suis très heureuse de dédier cet ouvrage, fruit de mes études :

À ma chère mère

Pour toute l'affection que tu m'as donnée, source de tendresse,

À mon cher père

Celui qui veillait sur moi, était soucieux que je sois en paix, et s'est privé pour me plaire.

À mon collègue et binôme : SALEM BILAL

À Toute la promo de master 2 géotechnique 2024-2025.

« À toute personne qui m'aime

DAOUDI RADIA

ملخص :

تظهر التربة المتوعدة، الغنية بالمعادن الطينية مثل المونتموريونيت والإليت والكاولينيت، اختلافات كبيرة في الحجم اعتماداً على محتواها المائي، مما يشكل تحديات كبيرة للبناء. يهدف هذا العمل إلى تحليل سلوك هذه الترب في مواجهة تغير المناخ، مع تسليط الضوء على آليات الانتفاخ والانكماس، بالإضافة إلى تقنيات التثبيت لتحسين استقرارها في مشاريع البناء ونمذجتها في برنامج 2d plaxis.

الكلمات الرئيسية :

التربة المتوعدة، المعادن الطينية ، المونتموريونيت والإليت والكاولينيت.

RESUME

RESUME:

Les sols gonflants, riches en minéraux argileux tels que la montmorillonite, l'illite et la kaolinite, présentent d'importantes variations de volume en fonction de leur teneur en eau, ce qui pose des défis majeurs pour la construction. Ce travail vise à analyser le comportement de ces sols face au changement climatique, en mettant en évidence les mécanismes de gonflement et de retrait, ainsi que les techniques de stabilisation permettant d'améliorer leur stabilité dans les projets de construction et en les modélisant dans un logiciel plaxis 2d

Mots clés:

Les sols gonflants, minéraux argileux, la montmorillonite, l'illite et la kaolinite.

ABSTRACT

ABSTRACT:

Expansive soils, rich in clay minerals such as montmorillonite, illite, and kaolinite, exhibit large volume variations depending on their water content, posing significant challenges for construction. This work aims to analyze the behavior of these soils in the face of climate change, highlighting swelling and shrinkage mechanisms, as well as stabilization techniques to improve their stability in construction projects and modeling them in Plaxis 2D.

Keywords:

Expansive soils, clay minerals, montmorillonite, illite, and kaolinite.

SOMMAIRE

Résume.....	v.
Abstract.....	IV.
Introduction générale.....	5
Chapitre I : Généralité sur les argiles	
I. Introduction	7
II.1 Définition	7
II.2 Caractéristiques des Sols Expansifs	8
II.2.a Présence d'argiles gonflantes.....	8
II.2.b Variation volumétrique.	8
II.2.c Indice de plasticité élevé	8
II.3 Nature des Sols Expansifs	8
II.3.1 Argiles Gonflantes	8
II.3.2 Comportement de Gonflement et de Retrait	9
II.3.3 Mécanisme du Gonflement.....	9
II.3.4 Mécanisme du Retrait.....	10
II.3.5 Facteurs affectant le comportement de gonflement et de retrait.....	10
II.4 Minéraux Responsables du Gonflement.....	10
III. Effets des variations climatiques sur les sols expansifs	15
III. 1 Cycles de sécheresse et d'humidité.....	15
III.2 Comportement volumique des sols.....	15
IV. Techniques de stabilisation des sols expansifs	16
IV.1 Stabilisation chimique (chaux, ciment, silicates)	17
IV.1.1 La Chaux.....	17
IV.1.1. b Modification du sol	17
IV.1.1. a Assèchement du sol	17
IV.1.1. c Stabilisation du sol	17
IV.2 Stabilisation au ciment.....	18
IV.3 Stabilisation aux silicates.....	19
IV.4 Techniques mécaniques (drainage, couches géotextiles).....	20
IV.4.1 Types de drainage.....	20
IV.4.2 Avantages	21
IV.4.3 Inconvénients	21
IV.5 Couches géotextiles.....	21
IV.5.1 Types de géotextiles	21
IV.5.2 Avantage des géotextiles	21
V. Conclusion.....	23

SOMMAIRE

Chapitre II : Essais effectués et modélisation

I.	Introduction	23
II.1	Choix du site pour la collecte des échantillons de sol.....	24
II.2	Échantillonnage du sol à différentes profondeurs pour les essais de laboratoire	25
II.3	Essais au laboratoire.....	25
II.3.1	ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.....	25
	II.3.1.1 L'essai granulométrique par sédimentation NF P 94057.....	28
II.3.2	LIMITES D'ATTERBERG	30
II.3.3	ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (ESSAI A LA TACHE)	34
II.3.4	ESSAI OEDOMETRIQUE.....	37
II.3.5	ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECTE	40
II.3.6	ESSAI DE PERMEABILITE DES SOLS	43
II.4	Modélisation hydromécanique	46
II.4.1	Création du modèle numérique	47
II.4.2	Paramètres généraux	48
II.4.3	Construction du contour de la géométrie	51
II.4.4	Définition des conditions aux limites	51
II.4.5	Définition du matériau	Erreur ! Signet non défini.
II.4.6	Génération du maillage	Erreur ! Signet non défini.
II.4.7	Conditions Initiales	Erreur ! Signet non défini.
III.	Conclusion.....	57

Chapitre III : Identification et résultat

I	Introduction	59
II.1	Analyse des essais en laboratoire	60
II.1.1	RÉSULTAS ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	60
III.1.1	RÉSULTAS LIMITES D'ATTERBERG.....	60
III.1.2	RÉSULTAS ESSAI AU BLEU DE METHYLENE	64
III.1.3	RÉSULTAS DE L'ESSAI OEDOMÉTRIQUE	65
III.1.4	RÉSULTAS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECTE	67
III.1.5	RÉSULTAS ESSAI DE PERMEABILITE DES SOLS.....	67
IV.1.	Interprétation dutableau.....	68
IV.2	Analyse chimique des échantillons d'argile.....	68
IV.3	Résultats de la modélisation hydromécanique	69
IV.3.1	Étapes de la modélisation numérique dans PLAXIS 2D.....	69
IV.3.1.1	Définition de la géométrie du modèle.....	69
IV.3.1.2	Définition des propriétés du sol.....	69
IV.3.1.3	Conditions aux limites	70
IV.3.1.4	Discréétisation et maillage.....	70
IV.3.1.5	Conditions initiales et positionnement de la nappe phréatique.....	71
IV.3.1.6	Définition des phases de calcul.....	72
IV.3.2	Analyse des simulations hydromécaniques.....	75

SOMMAIRE

IV.3.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	77
V. Conclusion.....	78

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

I. INTRODUCTION.....	80
II. Effet des variations climatiques sur les propriétés des sols expansifs.....	80
II.1 Impact des cycles d'humidité et de sécheresse sur la stabilité des sols et les risques.....	80
II. 1.a Une diminution du module de déformation lors de l'humidification.....	80
II. 1.b Conséquences sur la stabilité des sols.....	81
II. 1.c Risques pour les infrastructures.	81
II. 2 Comparaison avec les résultats d'autres études.....	81
II. 3 Proposition de méthodes de stabilisation.....	84
II. 3.a Stabilisation chimique.....	85
II. 3.b Systèmes de drainage et couches de protection.....	85
II. 3.c Techniques mécaniques.....	85
II. 3.d Construction sur plancher à corps creux (vide sanitaire)	85
II. 4 Étude de cas pratique : site de Dar El Beïda à Saïda.....	85
II. 4.a Contexte géotechnique du site.....	86
II. 4.b Solution mise en œuvre : plancher au corps creux.....	87
II. 4.c Avantages observés.....	87
II. 4.d Retour d'expérience.....	88
III. Conclusion.....	88

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les argiles

Figure 1 : Les argiles	8
Figure 2: Gonflement et Retrait	9
Figure 3: Propriétés chimiques des Minéraux présent dans les argiles.....	12
Figure 4: Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite	14
Figure 5: Photographies au Microscope Electronique à balayage des Argiles, (Mitchell ,1976).....	14
Figure 6: Mieux prévenir le risque de retrait-gonflement des sols argileux (RGA)	15

Chapitre II : Essais effectués et modélisation

Figure 7: Tamis d'Analyse Granulométrique	26
Figure 8: Analyse granulométrique - tamiseuse à vibrations	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9: Appareil d'essai d'oedomètre pour l'essai de consolidation des sols	40
Figure 10: Représentation schématique d'une cellule œdométrique	40
Figure 11: Appareil de l'essai de cisaillement	42
Figure 12: Perméabilité du sol	43
Figure 13: Permèamètre à charge variable	46
Figure 14: Géométrie d'un modèle de terrain argileux d'une profondeur de 3m	47
Figure 15: Ouvrir / créer un nouveau projet.....	48
Figure 16: Fenêtre des paramètres généraux (projet).....	49
Figure 17: Fenêtre des paramètres généraux (dimensionnement).....	50
Figure 18: Définition des conditions aux limites	Erreur ! Signet non défini.
Figure 19: Définition des paramètres du matériau	54
Figure 20: Maillage axisymétriques par éléments finis	Erreur ! Signet non défini.
Figure 21: Champ de contraintes initial	57

Chapitre III : Identification et résultat

Figure 22: Résultats des limites d'Atterberg de 1 échantillon étudié (m)	62
Figure 23: Résultats des limites d'Atterberg de 1 échantillon étudié (m) 60	60
Figure24: courbe oedometrique profondeur 0,5m – 1	62
Figure25: courbe oedometrique profondeur 1m-3m.....	63
Figure26: La courbe contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale 0 ,5 à 1m.....	65
Figure 27 : La courbe contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale 1 à 3m.....	66

LISTE DES FIGURES

Figure 28 : Représentation géométrique bidimensionnelle du domaine étudié.....	69
Figure 29 : Stratification du sol selon les propriétés géotechniques déterminées expérimentalement.....	70
Figure 30 : Conditions aux limites appliquées au modèle numérique.....	70
Figure 31 : Maillage triangulaire raffiné pour la discréétisation du domaine.....	71
Figure 32 : Définition du poids volumique de l'eau dans le modèle hydromécanique.....	73
Figure 33 : Positionnement de la nappe phréatique et conditions d'écoulement.....	74
Figure 34 : Paramétrage des phases de calcul dans l'interface PLAXIS.....	75
Figure 35 : État initial du modèle avec la distribution de la nappe phréatique.....	76
Figure 36 : Résultat de la phase de dessiccation — retraits verticaux induits en surface.....	77

LISTE DES PHOTO

Chapitre I : Généralité sur les argiles

photo 1: Traitement de sol à la chaux – GTR.....	18
photo 2: Stabilisateurs de sols Principe de fonctionnement Wirtgen.....	19
photo 3 : Stabilisation des pentes par géosynthétiques - Naue - Géosynthétique - Logiciel d'ingénierie numérique	22
photo 4: Construction sur sols argileux - ATE Drainage	22

Chapitre II : Essais effectués et modélisation

photo 5: Photo du choix du site pour la collecte des échantillons de sol	25
photo 6: Essai Limite de liquidité.....	32
photo 7: Essai limite de plasticité.....	33
photo 8: Les échantillons de limite de plasticité après l'opération d'étuvage.....	33
photo 9: Essai de VBS.....	36
photo 10: Test de bleu méthylène.....	36

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Photo 11: site de Dar El Beïda à Saïda.....	86
Photo12: Solution mise en œuvre.....	87

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralité sur les argiles

Table 1: Caractéristique des argiles (bultel 2001) 12

Chapitre II : Essais effectués et modélisation

Table 2: Classement GTR des sols 37

Table 3: De Type de sol et Degré de perméabilité 45

Table 4: Analyse granulométrique de échantillon 0.5m - 1m 60

Chapitre III : Identification et résultat

Table 5: Analyse granulométrique de échantillon 1m-3m 60

Table 6: Résultat l'essai de la limite de plasticité profondeur 1m-3m 61

Table 7: Variation des paramètre de compressibilité et de préconsolidation avec la profondeur (essai oedométrique) 64

Table 8: Paramètres de cisaillement direct selon la profondeur 67

Table 9 : Données- profondeur 0 ,5 à 1m 65

Table 10 : Données – profondeur 1 à 3m 66

Table 11: L'activité argileuse (Ac) 70

Table 12: La classification de Skempton 71

Table13: Les résultats interprétés de l'analyse chimique des échantillons argileux 68

CHAPITRE IV : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Table14: Les résultats obtenus dans notre étude, notamment en termes de déplacements verticaux sous l'effet des cycles climatiques 83

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES PRINCIPAUX

Liste des abréviations

LTP0 : Laboratoire de Travaux Public.

VBS : Valeur de Bleu méthylène de Sol.

ECH : Echantillons.

GTR : Guide technique de la réalisation./ Guide des terrassements routiers

CBR : California Bearing Ratio (un moule normalisé (diamètre \approx 15 cm, hauteur \approx 12 cm)

IPI : L'Indice Portant Immédiat

LNHC : Laboratoire national de l'habitat de la construction

Liste des symboles

OH⁻ : Ion de Hydroxydes

O⁻² : Ion d'oxygène

Fe⁺² : Ion de fer

Na⁺ : Sodium

Ca²⁺ : calcium

K⁺ : potassium

MgO₆ : Magnesium-Oxygen Complexes

SiO₄ : sorosilicates

Mg2+: magnesium

Al3+: aluminum

Liste des symboles principaux

ω : Teneur en eau (%)

WL : La teneur en eau à la limite de liquidité (%)

Wp : La teneur en eau à la limite de plasticité (%)

Ip : Indice de plasticité (%)

D : Le diamètre des grains en mm

γ_s : Le poids spécifique des grains du sol en (g /cm³)

γ_w : poids volumique de l'eau conventionnellement pris égale à 1g/cm³.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le premier chapitre, une synthèse bibliographique a été réalisée afin de présenter les aspects fondamentaux relatifs aux sols argileux expansifs. Ce chapitre introduit les caractéristiques minéralogiques, physiques et mécaniques de ces matériaux, en insistant sur leur sensibilité aux variations de la teneur en eau. Le phénomène de gonflement-rétraction y est abordé à travers les mécanismes internes responsables de ces déformations, ainsi que les conséquences géotechniques qui en découlent. L'objectif de ce chapitre est de fournir un cadre théorique solide pour mieux appréhender les comportements particuliers de ces sols dans un contexte de génie civil.

Le second chapitre est consacré à la présentation du site d'étude et à la démarche expérimentale et numérique adoptée. L'accent est mis sur les caractéristiques géologiques de la région de Saïda, et plus précisément sur les formations argilo-gréseuses de Dar El Baïda. Cette zone, bien que localement limitée, présente un potentiel de gonflement significatif. Des essais in situ et en laboratoire ont été réalisés, en parallèle avec une modélisation numérique à l'aide du logiciel PLAXIS 8.6. Ce couplage expérimental-numérique vise à simuler le comportement du sol en tenant compte des sollicitations hydriques susceptibles de se produire dans des conditions climatiques réelles.

Le troisième chapitre présente de manière détaillée les résultats des essais effectués sur les échantillons de sol. Il s'agit notamment d'essais granulométriques, de limites d'Atterberg, de bleu de méthylène, d'essais œdométriques, de cisaillement direct, ainsi que d'une analyse chimique. Ces essais ont permis de caractériser le sol du point de vue physique, mécanique et minéralogique, afin de déterminer son comportement en profondeur et d'évaluer sa susceptibilité au gonflement. Les résultats obtenus constituent une base de données essentielle pour la compréhension du comportement du sol étudié et pour la validation de la modélisation numérique.

Enfin, le quatrième chapitre est dédié à la discussion des résultats expérimentaux et numériques, ainsi qu'à la formulation de recommandations techniques. L'impact des variations climatiques sur la stabilité des sols gonflants est analysé, en particulier à travers les effets des cycles de dessiccation et d'humidification. Des comparaisons avec des études similaires sont proposées, mettant en évidence la singularité du cas étudié. Ce chapitre se conclut par des propositions de solutions techniques pour améliorer la stabilité des ouvrages dans des contextes similaires, illustrées par une étude de cas concrète.

CHAPITRE 01

GÉNÉRALITÉ SUR LES ARGILES

I. Introduction :

Les sols expansifs représentent une problématique géotechnique majeure en raison de leur forte sensibilité aux variations de la teneur en eau, pouvant entraîner des gonflements ou des retraits importants. De nombreuses recherches ont été consacrées à la compréhension du comportement de ces sols ainsi qu'au développement de techniques de stabilisation adaptées.

Sols expansifs

I.1 Définition

Les sols expansifs, également appelés sols gonflants, sont des sols qui subissent des variations importantes de volume en fonction de l'humidité qu'ils contiennent. Ces sols présentent un comportement particulier lié à leur capacité à se dilater (gonfler) lorsqu'ils sont humidifiés, et à se rétracter lorsqu'ils sèchent. Cela peut avoir des conséquences importantes sur les structures en surface, comme les bâtiments ou les routes.

Lorsque le sol argileux devient humide, son volume peut augmenter de 10 % ou plus. Si on prend par exemple le cas des sols expansifs souterrains du Colorado aux Etats Unis, ces derniers ont tendance à maintenir une teneur en humidité constante dans leur état naturel et sont souvent relativement secs lorsque les perturbations dues à la construction commencent. L'exposition à l'eau naturelle ou artificielle pendant ou après le développement peut provoquer un gonflement. Dans de nombreux cas, le sol ne revient pas à son état sec d'origine après la construction, mais reste dans un certain état humide et se dilate en raison des changements environnementaux.

Ce comportement est principalement dû à la présence de minéraux argileux tels que la Montmorillonite ou les smectites qui sont des minéraux argileux appartenant à la famille des phyllosilicates. Leur comportement particulier, notamment leur capacité à absorber et à retenir l'eau, est due à leur structure chimique et à leurs propriétés physico-chimiques. [1]

II.2 Caractéristiques des Sols Expansifs

II.2.a Présence d'argiles gonflantes : Ces sols contiennent des minéraux argileux comme la Montmorillonite ou la smectite, qui sont très sensibles à l'humidité.

II.2. b variation volumétrique : Les changements de volume peuvent provoquer des mouvements du sol qui affectent les fondations, les routes, et d'autres structures.

II.2.c Indice de plasticité élevé : Ces sols ont souvent un indice de plasticité supérieur 20, ce qui reflète leur potentiel de gonflement.

II.3 Nature des Sols Expansifs

La nature des sols expansifs permet à ces derniers des changements de volume significatifs en fonction de la teneur en eau. Cette caractéristique est principalement observée dans certains types d'argiles, appelées argiles gonflantes, qui sont responsables de ce comportement particulier.

II.3.1 Argiles Gonflantes

Les argiles gonflantes comme citées en haut, sont des sols argileux qui ont la capacité de gonfler lorsqu'ils absorbent de l'eau et de se rétracter lorsqu'ils perdent de l'humidité. Ce phénomène est dû à la structure minérale et à la capacité des particules d'argile de retenir de grandes quantités d'eau dans leur structure. Les argiles gonflantes se trouvent principalement dans des sols composés d'argiles fines à haute teneur en eau, et leur comportement peut varier en fonction des conditions d'humidité et des changements saisonniers. ^[1]

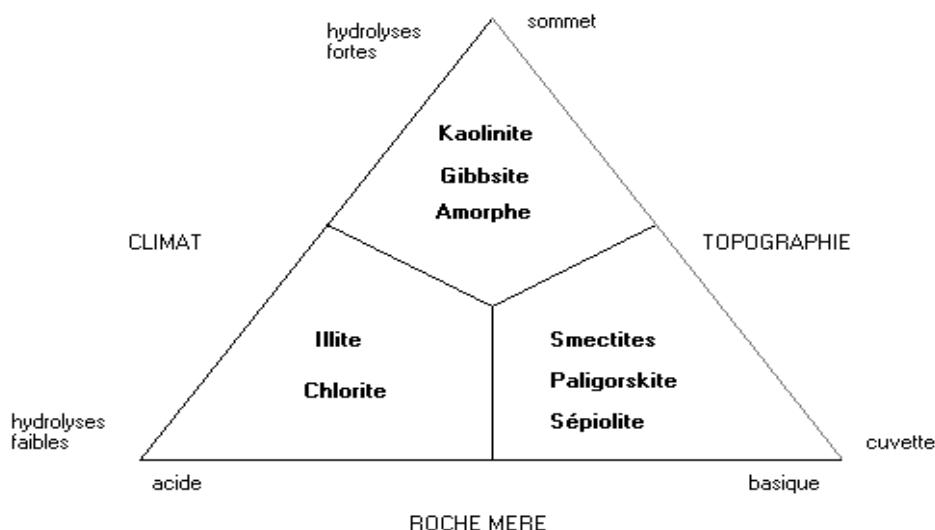


Figure 1: Les argiles

II.3.2 Comportement de Gonflement et de Retrait

Le gonflement se produit lorsque les cations entre les couches de la structure cristalline des minéraux argileux sont remplacés par de l'eau, ce qui provoque une séparation des couches et une augmentation du volume. Lorsque l'humidité diminue, les cations reprennent leur place, et la structure se contracte, entraînant un retrait.

Le gonflement et le retrait des sols argileux sont des phénomènes intrinsèquement liés à la nature hydrophile des minéraux argileux et à la structure de leur réseau cristallin.

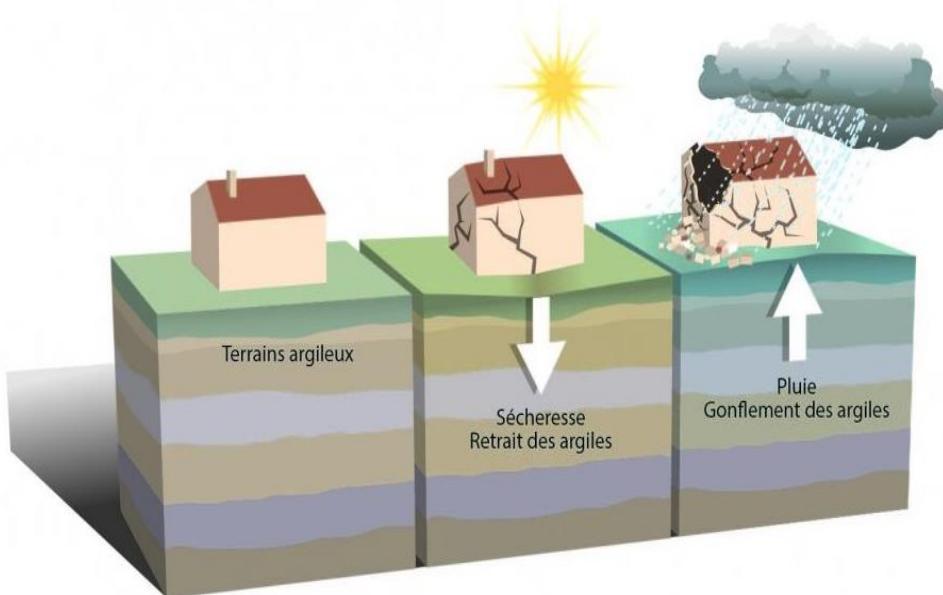


Figure 2: Gonflement et Retrait

II.3.3 Mécanisme du Gonflement :

- Les minéraux argileux, tels que les smectites (par exemple, la montmorillonite), possèdent une structure en feuillets composée de couches tétraédriques et octaédriques.
- Ces couches sont séparées par des espaces interfoliaires où se trouvent des actions échangeables (comme le sodium, le calcium ou le potassium) et de l'eau.
- Lorsque de l'eau est introduite dans le sol (par exemple, par infiltration ou humidité ambiante), les molécules d'eau s'insèrent dans ces espaces interfoliaires.
 - L'eau s'hydrate autour des cations présents, ce qui entraîne une augmentation des forces répulsives entre les couches. [1]

- Cette interaction provoque un espacement accru des feuillets, ce qui se traduit par une augmentation du volume global du sol, phénomène appelé gonflement.
- Ce processus est réversible et dépend de la disponibilité de l'eau et de la nature des cations.

II.3.4 Mécanisme du Retrait :

- Lorsque le sol subit une perte d'humidité (par exemple, à cause de l'évaporation ou de l'absorption par des plantes), les molécules d'eau quittent progressivement les espaces interfoliaires.
- Les actions échangeables, dépourvus de leur enveloppe d'hydratation, rétablissent les interactions électrostatiques entre les feuillets.
- La distance entre les couches diminue, entraînant une réduction du volume global du sol, appelée retrait.

II.3.5 Facteurs affectant le comportement de gonflement et de retrait :

Les facteurs pouvant affecter le comportement de gonflement et de retrait sont présentés comme suit :

- **Le type de minéraux argileux** : Les smectites ont une capacité de gonflement bien plus importante que les illites ou les kaolinites.
- **Les cations présents** : Les cations monovalents (comme le sodium) favorisent un gonflement plus important par rapport aux cations divalents (comme le calcium et le magnésium) en raison de leur faible capacité à réduire les forces répulsives entre les couches.
- **La quantité d'eau disponible** : Une teneur élevée en eau intensifie le gonflement, tandis qu'un environnement sec favorise le retrait.
- **Les conditions climatiques** : Les cycles saisonniers d'humidité (pluie, sécheresse) amplifient ces phénomènes dans les sols argileux.

II.4 Minéraux Responsables du Gonflement

Les minéraux argileux sont responsables du gonflement des sols expansifs. Ce phénomène est surtout lié à des argiles de type smectite, principalement composées de minéraux comme la montmorillonite et la bentonite. Ces minéraux ont des caractéristiques qui favorisent l'absorption d'eau et le gonflement. [1]

a)Smectites :

Les smectites (un groupe d'argiles) sont le principal type de minéraux responsables du gonflement des sols. Les montmorillonites et les bentonites en font partie. Ces minéraux ont une structure lamellaire

(en couches), ce qui leur permet d'absorber l'eau entre leurs couches et de se dilater. La montmorillonite est particulièrement connue pour son fort potentiel de gonflement.

Montmorillonite : C'est le minéral le plus expansif. Lorsqu'il absorbe de l'eau, il peut doubler de volume. La montmorillonite contient des cations tels que le calcium (Ca^{2+}), le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) qui, selon leur nature et leur concentration, influencent le degré de gonflement.

b)Bentonite :

C'est une argile qui contient une grande proportion de montmorillonite. Elle a également un potentiel élevé de gonflement. Elle est souvent utilisée dans les forages et dans la construction pour ses propriétés de gonflement contrôlé.

c) Illite:

L'illite est un autre type d'argile qui a un pouvoir expansif, mais il est moins marqué que celui des smectites (montmorillonite, bentonite). L'illite présente des couches d'eau moins accessibles et est plus stable que la montmorillonite en termes de gonflement. Cependant, elle peut entraîner des comportements de retrait dans certaines conditions.

d) Kaolinite:

La kaolinite, contrairement à la montmorillonite, a une capacité de gonflement beaucoup plus faible. Elle est généralement considérée comme une argile non expansive, car elle ne subit pas des changements de volume aussi importants que les autres argiles comme les smectites. Toutefois, dans des environnements particuliers, elle peut aussi présenter un comportement de gonflement modéré.^[2]

En résumé, les minéraux responsables du gonflement ont une structure cristalline particulière, souvent en couches, qui leur permet de se dilater ou de se contracter en fonction de la teneur en eau. Lorsqu'une argile gonflante (comme l'illite) est en contact avec de l'eau, celle-ci entre dans les espaces intercalaires entre les couches cristallines. Cela provoque un gonflement du sol, car les couches argileuses se séparent et créent un espace supplémentaire.

Le gonflement est accentué lorsque le sol contient des cations mobiles tels que le potassium (K^+), qui favorisent l'hydratation des couches (voir figure 2). Tandis que les cations plus stables, comme le calcium (Ca^{2+}), ont tendance à réduire l'expansion.

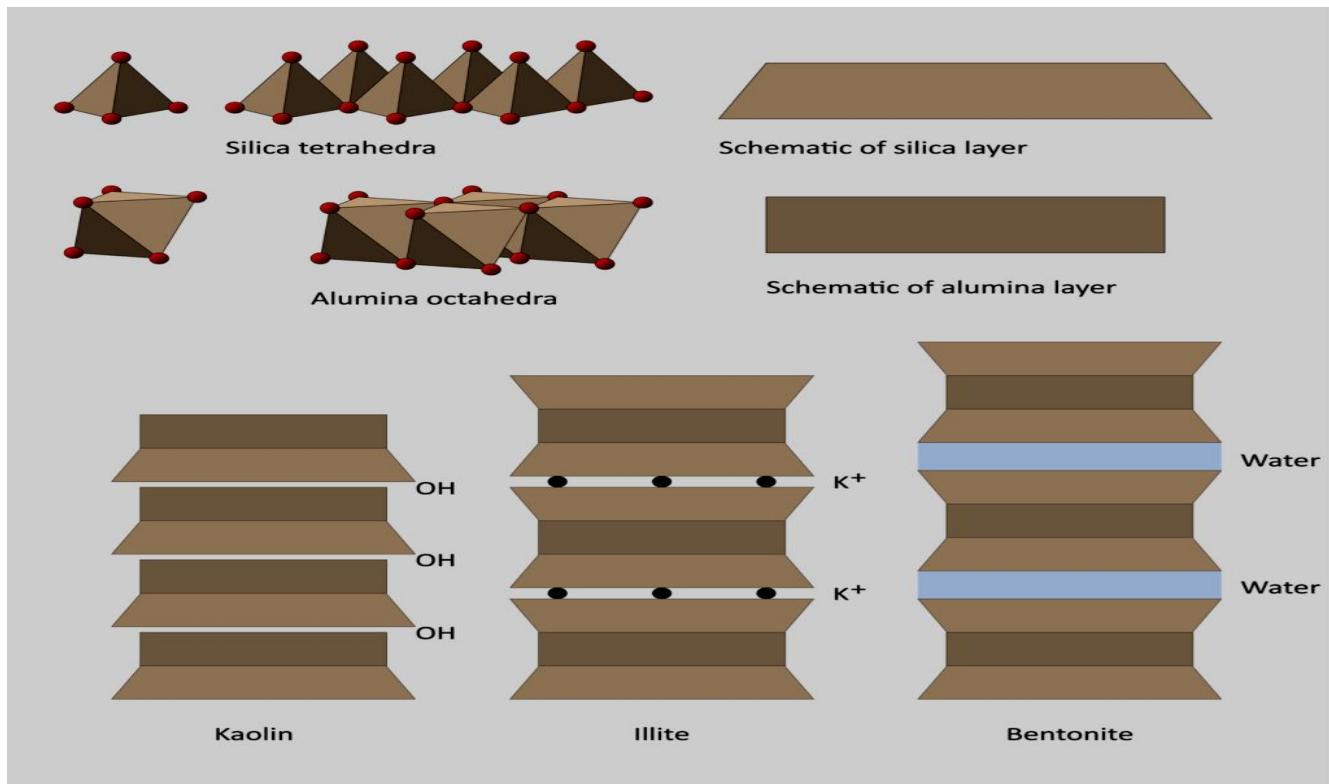


Figure 3: Propriétés chimiques des Minéraux présent dans les argiles

Table 1: Caractéristique des argiles (bultel 2001)

Nom	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une Articule (μm)	Epaisseur d'une particule (μm)	Surface spécifique en m^2/g	C.E.C en Meq/10g
Kaolinite	100-200	0,1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-10	10-40
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700-840	80-150

Ce tableau présente les caractéristiques physiques et chimiques de trois types principaux d'argiles : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite (smectite), selon Bultel (2001). Il compare plusieurs paramètres importants pour comprendre le comportement de ces minéraux :

Nombre de feuillets par particule : La kaolinite a un grand nombre de feuillets (100-200), tandis que l'illite et la montmorillonite en ont beaucoup moins (1-10 et 1 respectivement), ce qui influence leur structure et réactivité.

Diamètre et épaisseur des particules : La montmorillonite présente les dimensions les plus faibles (0,1 µm de diamètre et 0,001 µm d'épaisseur), ce qui contribue à sa grande surface spécifique.

Surface spécifique : La montmorillonite possède une surface spécifique extrêmement élevée (700-840 m²/g), bien plus que l'illite (65-100 m²/g) et la kaolinite (10-20 m²/g), ce qui en fait un excellent adsorbant.

Capacité d'échange cationique (C.E.C.) : Elle est également la plus élevée pour la montmorillonite (80-150 meq/100g), indiquant un fort potentiel de rétention des nutriments ou contaminants, contrairement à la kaolinite, qui a la plus faible capacité (3-15 meq/100g).

➤ Structure chimique des smectites (dont la montmorillonite)

Les smectites ont une structure en feuillets composée de :

- **Couches tétraédriques (SiO₄)** : Chaque feuillet est formé de tétraèdres de silice (SiO₄) arrangés en réseau.
- **Couches octaédriques (AlO₆ ou MgO₆)** : Ces couches sont constituées d'atomes d'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg) entourés d'oxygènes ou d'hydroxydes (OH).
- **La couche tétraédrique (Mg²⁺, Al³⁺)** : est un élément fondamental de la structure des minéraux argileux, y compris la montmorillonite. Elle joue un rôle clé dans les propriétés physico-chimiques de ces minéraux, notamment leur capacité à absorber l'eau et à échanger Des ions.
- **Espace interfoliaire** : Entre les feuillets, il existe un espace où peuvent se loger des cations (Na⁺, Ca²⁺, K⁺) et des molécules d'eau.

Voici une explication détaillée schématique de la structure d'une montmorillonite:

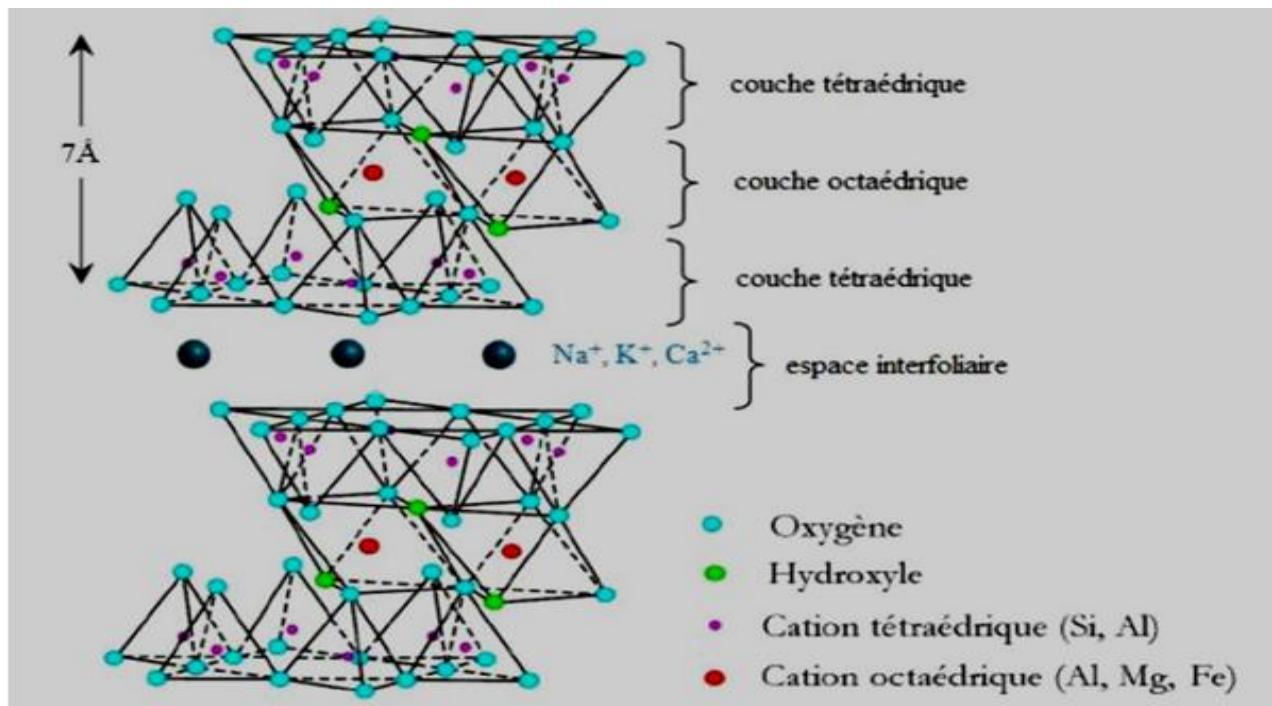


Figure 4: Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite

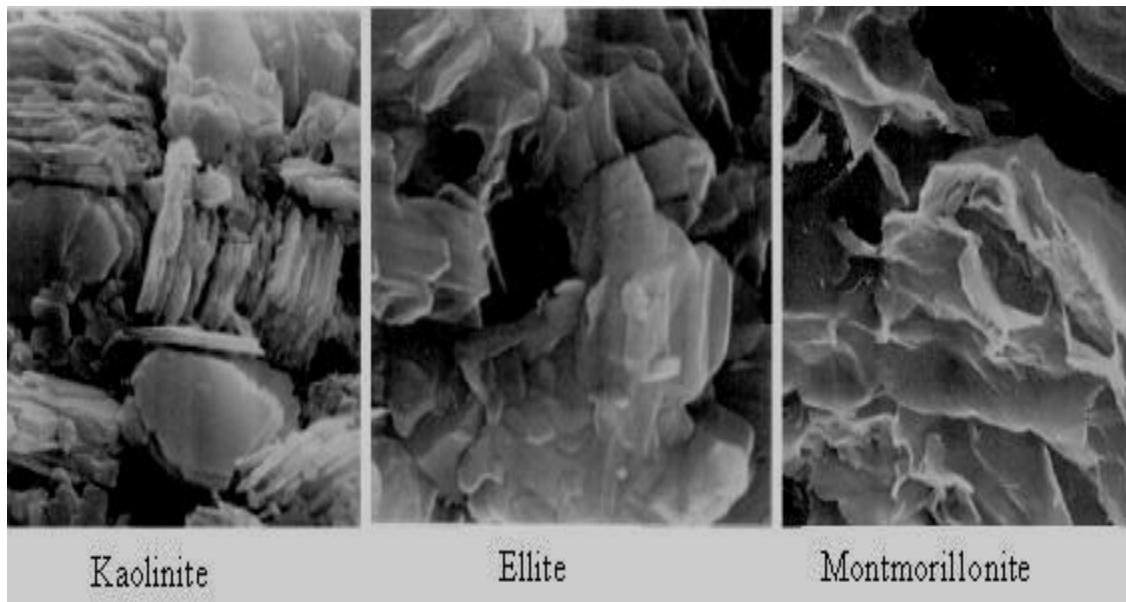


Figure 5: Photographies au Microscope Electronique à balayage des Argiles, (Mitchell, 1976).

Cette figure illustre les effets du phénomène de retrait-gonflement des sols agrileux (RGA) sur les constructions . la figure met en évidence l'importance de la gestion de la végétation

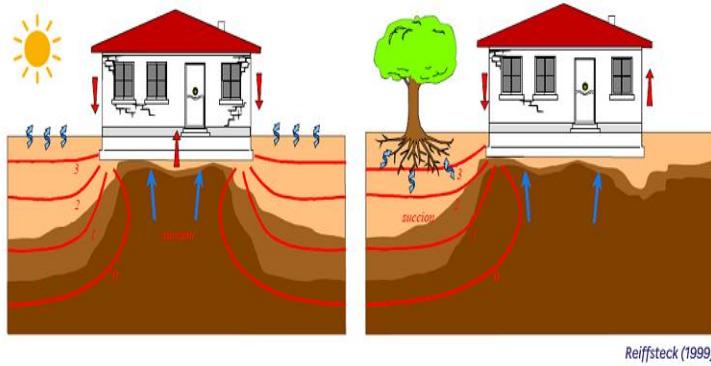


Figure 6: Mieux prévenir le risque de retrait-gonflement des sols argileux (RGA)

III. Effets des variations climatiques sur les sols expansifs

III.1 Cycles de sécheresse et d'humidité:

Les variations climatiques et en particulier les cycles alternés de sécheresse et d'humidité affectent le comportement volumique des sols. Ce phénomène a des conséquences directes sur plusieurs aspects

Des activités humaines, telles que la construction, l'agriculture, et la gestion des infrastructures sportives et récréatives. [7]

III.2 Comportement volumique des sols :

Le comportement volumique des sols fait référence aux changements de volume du sol en réponse à des variations de l'humidité. Lorsque le sol subit un manque d'eau (sécheresse) ou un excès d'eau (humidité excessive), son volume se modifie en fonction de la capacité de rétention d'eau, de la porosité et de la texture du sol. [11]

a. En période de sécheresse :

Lors de conditions de sécheresse, le sol perd de l'eau et se rétracte, ce qui peut entraîner des fissures, un durcissement de la surface et une perte de la structure du sol. Cette rétraction peut réduire la stabilité du sol et affecter la performance des terrains agricoles ou sportifs.

b. En période d'humidité excessive:

En revanche, lors de conditions de forte humidité, le sol peut gonfler, car il absorbe l'eau, ce qui augmente son volume. Cela peut provoquer un affaissement du sol ou des instabilités, particulièrement dans les sols argileux.

➤ Impacts sur les constructions et les infrastructures

Les variations du volume des sols dues aux cycles de sécheresse et d'humidité peuvent également avoir des conséquences sur les projets de construction, car le gonflement et la rétraction des sols peuvent provoquer des mouvements du sol sous les fondations, entraînant des déformations ou des fissures dans les bâtiments, les routes et d'autres infrastructures. Cela peut accroître les coûts de maintenance et poser des risques pour la sécurité des structures.

➤ Stabilité des terrains :

Les terrains sportifs en extérieur, tels que les terrains de football, de rugby ou de golf, peuvent être gravement affectés par les cycles de sécheresse et d'humidité. La rétraction et le gonflement des sols entraînent la formation de fissures ou des irrégularités de surface, ce qui réduit la sécurité des athlètes et la qualité du jeu.

➤ Stabilité des routes :

Les routes construites sur des sols expansifs subissent :

Désordres structuraux : La portance du sol varie, entraînant une perte de soutien pour les couches de chaussée.

Décollements des couches (base, fondation) dû aux mouvements différentiels.

Augmentation des coûts de maintenance (réparations fréquentes nécessaires). [11]

IV. Techniques de stabilisation des sols expansifs

Qu'est-ce que la stabilisation des sols ?

La stabilisation des sols, également connue sous le nom de stabilisation des terrains, est un processus essentiel dans les domaines de la construction et de l'ingénierie. Elle fait appel à diverses méthodes et matériaux de stabilisation des sols, notamment la stabilisation des sols aux polymères, pour améliorer les propriétés naturelles du sol en fonction des besoins de l'ingénierie. Ce processus améliore la capacité portante du sol, sa résistance à la traction et ses performances globales, ce qui le rend adapté aux projets de construction. La stabilisation des sols est particulièrement importante lorsque le sol naturel sous les fondations d'un bâtiment ne peut pas supporter le poids de la structure.

IV.1 Stabilisation chimique (chaux, ciment, silicates):

IV.1.1 La Chaux :

Parler de stabilisation de l'argile avec de la chaux n'a rien de nouveau. Déjà utilisée dans la construction des pyramides du Tibet, cette technique était aussi fréquemment employée en Chine et en Inde, mais il a fallu attendre les années 1950 pour que le traitement des argiles avec de la chaux se popularise et s'étende à la construction d'autoroutes, routes, pistes d'atterrissement, etc.

Apportant une solution à la fois rapide et économique à ces problèmes, la chaux joue trois rôles dans la stabilisation des sols, qu'elle peut ainsi assécher, modifier ou stabiliser :

IV.1.1.a Assèchement du sol :

La chaux vive (oxyde de calcium) est hautement efficace pour l'assèchement de tout sol humide. Après son mélange avec la terre argileuse, la chaux vive absorbe l'eau à travers une réaction exothermique qui réduit significativement l'humidité du sol par hydratation et évaporation. La baisse d'humidité variera en fonction de la chaux ajoutée et des conditions ambiantes, mais elle peut osciller entre 2% et 5%. Ce processus intervient immédiatement dès l'ajout de chaux.

IV.1.1.b Modification du sol :

En rajoutant de la chaux au sol, la répartition des charges à la surface des particules du sol argileux se modifie en donnant lieu à un échange ionique entre le Sodium (Na) du sol et le Calcium (Ca) de la Chaux. Ce processus se déclenche aussi immédiatement après l'ajout de chaux. L'effet produit est que la terre perd sa faculté à retenir l'eau.

IV.1.1.c Stabilisation du sol :

Dans ce cas, l'effet se produit plutôt à moyen terme et de manière graduelle. L'argile du sol (qui contient de la silice et de l'alumine) en contact avec la chaux est en mesure de former des silicates et des alumates calciques hydratés. Cette réaction, dite "pouzzolanique", aboutit à une augmentation de la compression simple du sol, ainsi qu'à une meilleure stabilité face au gel. [3]



Photo 1: Traitement de sol à la chaux – GTR

IV.2 Stabilisation au ciment

- Début du XX^e siècle : Premières utilisations du ciment Portland pour stabiliser les sols aux États-Unis et en Europe, notamment pour les routes et les pistes d'atterrissement.
- Années 1950-1960 : Développement de techniques systématiques de stabilisation des sols, avec des études sur les dosages optimaux en ciment.
- Années 1970-1980 : Introduction de normes (ASTM, AASHTO) pour la stabilisation des sols au ciment, incluant des essais de résistance et de durabilité.

La stabilisation chimique au ciment est une méthode courante pour améliorer les propriétés des sols en augmentant leur résistance mécanique, en réduisant leur perméabilité et en améliorant leur durabilité. Elle est particulièrement adaptée pour les sols granulaires, les sols limoneux, et certains sols argileux peu plastiques. [2]

➤ Mécanismes d'action

- **Hydratation** : Le ciment réagit avec l'eau pour former une matrice rigide (CSH et CAH), qui lie les particules de sol entre elles.
- **Augmentation de la résistance** : La réaction d'hydratation et le durcissement augmentent la capacité portante et la stabilité à long terme.

Réduction de la perméabilité :

La matrice cimentaire rend le sol moins perméable, limitant ainsi l'érosion et les infiltrations.



Photo 2: Stabilisateurs de sols | Principe de fonctionnement | Wirtgen

IV.3 Stabilisation aux silicates

Les silicates (comme le silicate de sodium) sont utilisés pour stabiliser les sols en modifiant leur structure chimique.

- **Mécanisme d'action :**
 - Les silicates réagissent avec les ions présents dans le sol pour former des gels ou des précipités qui renforcent la structure du sol.
 - Ils réduisent la perméabilité et améliorent la cohésion des particules. [2]

- **Avantage :**

- Réduction du gonflement et amélioration de la stabilité.
- Adapté aux sols à faible teneur en argile.

- **Limite :**

- Coût relativement élevé.
 - Efficacité dépendante du pH et de la composition chimique du sol.
- .[manuels techniques sur la géotechnique]

IV.4.2 Techniques mécaniques (drainage, couches géotextiles)

Les techniques mécaniques pour stabiliser les sols expansifs, comme le drainage et l'utilisation de couches géotextiles, sont souvent utilisées pour contrôler les mouvements du sol liés à l'humidité, ce qui réduit le risque de déformation et d'instabilité des structures.

Drainage

Le drainage est l'une des techniques mécaniques les plus courantes et consiste à gérer l'eau dans ou autour des sols expansifs afin d'éviter les variations de volume dues aux fluctuations d'humidité.

IV.4.3 Types de drainage :

➤ **Drainage superficiel :**

Ce type de drainage permet d'évacuer les eaux de surface qui peuvent s'accumuler près des fondations ou des structures. Il est essentiel dans les zones où l'eau de pluie ou la neige fondues s'infiltraient facilement dans le sol expansif.

Son application peut être utilisée pour les ronds-points, routes, zones résidentielles, etc...

Le drainage est effectué sous différentes méthodes notamment sous forme de caniveaux, fossés, drains de surface, etc...

➤ **Drainage profond :**

Il s'agit d'un système de drainage installé sous la surface du sol pour évacuer l'eau qui pourrait pénétrer plus profondément dans le sol. Cela réduit l'humidité en profondeur et prévient l'expansion du sol.

Son application peut être utilisée pour les fondations de bâtiments, infrastructures routières, etc... [4]

Le Drain à tuyaux perforés est placés à une certaine profondeur (souvent entre 1 et 3 mètres), créant un réseau pour évacuer l'eau excédentaire.

On trouve aussi un système de drainage sous pression (drainage forcé) : qui est un système plus complexe, dans lequel des pompes sont utilisées pour maintenir l'eau sous contrôle dans des zones où le drainage naturel n'est pas suffisant. Ce type de drainage est utilisé dans des sols particulièrement gorgés d'eau.

IV.4.2 Avantages :

- Peut être utilisé dans des conditions plus extrêmes où d'autres systèmes échoueraient.
- Permet de maintenir une humidité constante dans le sol, évitant les variations de volume liées aux changements d'humidité.
- Réduit les risques de soulèvement ou d'affaissement du sol expansif sous les fondations.

IV.5 Inconvénients :

- Les coûts d'installation peuvent être élevés, notamment dans les sols très humides ou dans des zones difficiles d'accès.
- Nécessite un entretien régulier pour s'assurer que les drains restent efficaces.

IV.5.1 Couches géotextiles :

Les géotextiles sont des matériaux synthétiques (souvent en polyester, polypropylène ou fibres naturelles) utilisés pour renforcer les sols et contrôler l'humidité, tout en améliorant la stabilité des sols

expansifs. Ces matériaux sont placés dans les couches de sol pour améliorer les propriétés mécaniques et physiques.

IV.5.2 Types de géotextiles :

Géotextiles de séparation : Ces géotextiles servent à séparer différentes couches de matériaux dans le sol, comme la couche d'argile expansif et la couche de remblai ou de fondation. Cela évite que les particules d'argile ne pénètrent dans les autres matériaux et cause des déformations.

Application : Routes, parkings, sols sous fondations.

IV. Avantage des géotextiles :

- Faciles à installer et relativement économiques. [10]

- Améliorent la stabilité des sols sans nécessiter de modification chimique ou de remplacement du sol.
- Permettent d'améliorer la capacité portante du sol et de prévenir les tassements et les mouvements liés à l'humidité.
- Peuvent être combinés avec d'autres techniques de drainage. [1]



Photo 3: Stabilisation des pentes par géosynthétiques - Naue - Géosynthétique - Logiciel d'ingénierie numérique



Photo 4: Construction sur sols argileux - ATE Drainage

ATE : Accumulateur a Trous evasés (ou Drain ATE) un système de drainage constitué de tuyaux perforés ou a fentes .

V. Conclusion

Les mécanismes de gonflement et de retrait sont étroitement liés à la structure cristalline des argiles et aux interactions eau-minéraux, influencés par des facteurs tels que le type de cations présents, les conditions climatiques et la composition minéralogique du sol. Les variations saisonnières d'humidité exacerbent ces phénomènes, nécessitant des techniques de stabilisation adaptées pour limiter leurs impacts.

Parmi les solutions disponibles, la stabilisation chimique (chaux, ciment, silicates) permet de modifier les propriétés physico-chimiques des sols, réduisant leur plasticité et améliorant leur résistance. La stabilisation mécanique, via des systèmes de drainage et l'utilisation de géotextiles, offre une approche complémentaire en régulant l'humidité et en renforçant la stabilité des couches superficielles.

En conclusion, une compréhension approfondie des sols expansifs et une approche de stabilisation adaptée (combinant méthodes chimiques et mécaniques) sont essentielles pour garantir la durabilité des constructions et minimiser les risques liés aux mouvements différentiels du sol. Les avancées techniques et les normes actuelles permettent une gestion plus efficace de ces sols, mais leur comportement reste tributaire des conditions environnementales, nécessitant une surveillance continue dans les projets d'ingénierie. [4]

Chapitre 02

Essais effectués et modélisation

I. Introduction

L'étude géotechnique des argiles de Dar El Baïda, dans la région de Saïda, prend tout son sens lorsqu'on l'inscrit dans le contexte géologique régional. En effet, les argiles de Saïda appartiennent à une formation argilo-gréseuse déposée dans le sillon tlemcenien durant le Callovien et l'Oxfordien. Cette sédimentation se caractérise par une rythmicité marquée, directement liée aux apports terrigènes variables dans le temps et l'espace, mais aussi influencée par des mouvements épeirogéniques. Ces facteurs traduisent une dynamique sédimentaire complexe et hétérogène, propice à la formation de faciès variés, dont certains peuvent évoluer vers des matériaux à comportement expansif.

Dans l'ensemble de la région ouest (des confins algéro-marocains jusqu'à Tiaret), une tendance à l'approfondissement progressif est observée jusqu'à l'Oxfordien inférieur, suivie d'un comblement du sillon d'origine vraisemblablement tectonique. Cette cicatrisation marque une rupture dans l'évolution commune des domaines tlemcenien et tellien. Toutefois, des zones localement expansives persistent dans la région de Saïda, ce qui est particulièrement rare compte tenu du contexte géologique généralisé.

C'est précisément cette rareté qui a motivé le choix du site de Dar El Baïda. Cette localité présente des caractéristiques géotechniques atypiques au sein de la région, notamment la présence d'argiles à comportement potentiellement gonflant. Ce caractère expansif, bien que peu répandu dans le secteur, est crucial pour les études de génie civil, en raison des risques qu'il présente pour la stabilité des ouvrages (gonflements, tassements différentiels, etc.).

II. 1 Choix du site pour la collecte des échantillons de sol

Le choix du site de Dar El Baïda repose sur la volonté d'étudier un faciès exceptionnel dans un contexte où les sols expansifs sont rares. L'analyse géotechnique de ces argiles spécifiques permettra d'étudier l'effet des variations climatiques sur ce type de sol, or ce travail s'appuie donc sur des observations géotechniques précises, rendant l'étude à la fois pertinente et représentative des enjeux locaux en ingénierie des sols.

Cette phase préliminaire, souvent déterminante, englobe deux étapes clés : le choix judicieux du site d'étude et la collecte rigoureuse d'échantillons représentatifs, suivis d'une série d'essais de laboratoire permettant de caractériser le comportement mécanique et hydrique du sol.

Parmi les essais essentiels figurent :

- L'essai de l'analyse granulométrique, qui va nous permettre la classification de notre sol
- L'essai au bleu de méthylène, qui permet d'évaluer l'activité des argiles et leur capacité d'adsorption, un indicateur clé de leur potentiel gonflant.
- L'essai de cisaillement direct, crucial pour déterminer la résistance au glissement et les paramètres de cohésion (c) et d'angle de frottement interne (ϕ).
- L'essai œdométrique, indispensable pour analyser la compressibilité du sol et son comportement sous chargements statiques, notamment dans le cas des tassements différentiels
- L'essai de perméabilité, nous permettant d'identifier la perméabilité de notre sol
 - Les limites d'Atterberg qui vont nous permettre d'identifier la limite de liquidité et de plasticité de notre argile. [3]



Photo 5: Photo du choix du site pour la collecte des échantillons de sol

II. 2 Échantillonnage du sol à différentes profondeurs pour les essais de laboratoire :

Trois échantillons non remaniés de sol ont été prélevés à des profondeurs distinctes, deux échantillons ont été prélevés par nos soins (0.5 mètre et 1 mètre) et les données du troisième échantillon sur une profondeur de 3 mètre nous ont été communiqués par la LNHC afin d'évaluer les propriétés géotechniques du terrain. Chaque échantillon a été soumis à une série d'essais en laboratoire, incluant des essais cédrométriques, des essais au bleu de méthylènes, des limites d'Atterberg ainsi que des essais au cisaillement rectiligne. Ces tests permettent de caractériser la composition, la compressibilité et la portance du sol à différentes profondeurs, fournissant ainsi des données essentielles pour la conception du modèle numérique.

Les résultats mettent en évidence les variations potentielles des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur, ce qui est crucial pour une approche géotechnique précise. [2]

II. 3 Essais au laboratoire

II. 3.1 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE [NFP 18-540] :

➤ DEFINITIONS :

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- des mortiers, des bétons,
- des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- et des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.

➤ CLASSES GRANULAIRES :

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D.
- Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné 0/D.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées:

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes : Le refus sur le tamis D est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

Le tamisât au tamis d est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

Le refus sur le tamis 1.56 D est nul, Le tamisât au tamis $0.63 d < 3\%$; toutefois pour $D \leq 5$ mm, cette limite est portée à 5%. [6]

➤ APPAREILLAGE:

- Une balance électronique précise
- Un pinceau pour le nettoyage des tamis
- Une machine à tamiser dans le cadre d'un laboratoire équipé, dans le cas contraire le tamisage se fera manuellement.
- Étuve de séchage[3]



Figure 7: Tamis d'Analyse Granulométrique



Figure 8: Analyse granulométrique - tamiseuse à vibrations

➤ MODE OPERATOIRE:

1. Préparation de l'échantillon : La quantité de matériau à utiliser pour l'analyse granulométrique doit être assez grande pour que ce dernier soit assez représentatif et en même temps assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés. On prend une mesure du matériau (M) pratiquement, la quantité de matériau utilisée dans l'essai sera telle que sa masse M en Kg soit supérieure ou égale à 0.2 fois le diamètre du plus gros granulat D en mm ($M_0 \geq 0.2.D$), dont le prélèvement devrait respecter les conditions de l'échantillonnage.

2. Préparation de l'échantillon qui sera analysé. Le choix du matériau imposera aussi le choix des tamis. L'échantillon choisi devra être sec. Sa teneur en eau pourra être vérifiée avec l'essai correspondant de mesure de teneur en eau.

3. Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant en mettant le tamis avec la plus grosse maille en haut et le tamis avec la plus petite maille en bas, en finissant avec le fond de tamis et le couvercle de la colonne.

4. Verser le matériau sec dans le tamis

5. Fermer le couvercle de la colonne de tamis

6. Secouer manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis

7. Reprendre un à un les tamis en ajoutant le fond et le couvercle le tamisât intégrant le tamis suivant et le refus restant dans le tamis initial.

8. Déterminer à l'aide de la balance électronique la masse de chaque refus

9. Réaliser cette opération sur tous les refus y compris le matériau dans le fond de la colonne de tamis

10. Remplir le tableau correspondant avec les résultats des masses obtenues et calculer les pourcentages de refus et tamisât pour chaque tamis.

III.3.1.1 L'essai granulométrique par sédimentation NF P 94-057

1. Objectif de l'essai

L'essai granulométrique par sédimentation a pour but de :

- ◆ Déterminer la distribution des grains fins (inférieurs à 80 µm) dans un sol, en particulier les limons et les argiles.
- ◆ Compléter l'analyse granulométrique par tamisage qui ne permet pas d'évaluer correctement les particules très fines.
- ◆ Évaluer le comportement du sol, son indice de plasticité, sa perméabilité, et son aptitude à la compaction. [3]

2. Principe de la méthode

L'analyse repose sur la loi de Stokes qui décrit la vitesse de chute d'une particule sphérique dans un fluide. On mesure la concentration des particules à différentes profondeurs et à différents temps à l'aide d'un hydromètre.

3. Appareillage utilisé

Voici les équipements nécessaires :

Appareil	Description
Éprouvette graduée (1000 ml)	Récipient transparent où la suspension de sol est agitée puis laissée au repos
Hydromètre	Instrument flottant permettant de lire la densité de la suspension à une profondeur donnée
Thermomètre	Pour mesurer la température de la suspension (la viscosité de l'eau dépend de la température)
Balance de précision	Pour peser la masse de sol sèche avec précision
Bécher / Agitateur mécanique	Pour disperser le sol dans l'eau
Dispersant chimique (ex. hexamétaphosphate de sodium)	Empêche la flocculation des particules fines
Tamis de 80 µm (ou 63 µm)	Pour éliminer les particules grossières avant sédimentation
Chronomètre	Pour respecter précisément les temps de lecture

4. Méthodologie complète de l'essai

A. Préparation de l'échantillon

- ◆ Prendre environ 50 g de sol sec, préalablement tamisé à 80 µm pour éliminer les particules grossières.
- ◆ Disperser cet échantillon dans un bécher avec de l'eau distillée + dispersant.
- ◆ Laisser reposer quelques heures ou agiter mécaniquement pendant 15-30 minutes. [3]

B. Transfert dans l'éprouvette

- ◆ Transférer la suspension dans l'éprouvette de 1000 ml.
- ◆ Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre le volume exact.
- ◆ Bien agiter pour homogénéiser la suspension (par retournement ou agitation mécanique).
- ◆ Démarrer le chronomètre dès que l'agitation cesse.

C. Lectures hydrométriques

- ◆ Introduire doucement l'hydromètre dans l'éprouvette.
- ◆ Effectuer les lectures de la densité à différents instants : généralement à 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 15 – 30 – 60 – 120 minutes, etc.
- ◆ Relever également la température de la suspension pour corriger les lectures selon des tables standard.

5. Exploitation des résultats

À partir des lectures de l'hydromètre, on déduit :

- ◆ Le diamètre équivalent des particules (d'après la loi de Stokes).
- ◆ La teneur cumulée en pourcentage de particules en suspension.
- ◆ Le pourcentage en poids des particules fines (argileuses, limoneuses) selon le diamètre.

Le résultat final est une courbe granulométrique représentant la répartition en pourcentage des particules selon leur diamètre (en échelle logarithmique).

II.3.2 LIMITES D'ATTERBERG :**➤ Définition et modes opératoires des Limites d'Atterberg selon la norme NF P94-051 :**

Les limites d'Atterberg définissent les teneurs en eau critiques d'un sol qui marquent les transitions entre ses différents états physiques. Ces limites reflètent les changements de comportement du sol en fonction de sa teneur en eau et sont utilisées pour évaluer ses propriétés géotechniques.

• Limite de liquidité (Liquide Limite - LL) :

Lorsque le sol est saturé en eau, il se comporte comme un liquide. Dans cet état, le sol perd sa cohésion et peut s'écouler sous l'effet de forces minimes. La limite de liquidité est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

➤ APPAREILLAGE:

- ❖ Appareil de casagrande
- ❖ Balance de 5kg (précision 1g)
- ❖ Etuve ventilé
- ❖ Spatules
- ❖ Mortier et pilon en porcelaine

➤ MODE OPERATOIRE

- Elles sont déterminées sur la fraction de sol passant au tamis 400 µm,
- On prendra un échantillon d'environ 60g, on ajoute de l'eau.
- Dans une coupelle lisse, à l'aide de la spatule on répartit au 2/3 la pâte dans la coupelle.
- On trace une rainure avec l'outil à rainurer en prenant soin de la maintenir Perpendiculairement à la surface.
- On soumet la coupelle à des chocs réguliers (à l'aide de la boîte de Casagrande, voir photo (17) au rythme de 2 coups par second. La hauteur étant réglée à une hauteur de 1.0 cm à l'aide d'une calle.
- On note le nombre de coups nécessaires pour avoir une fermeture de la rainure sur une longueur de 1 cm.
- On prélève un échantillon de chaque côté des lèvres de rainure et au voisinage de lieu où elles se sont fermées.
- Les échantillons ainsi prélevés sont placés dans des boîtes à pétri et étuvés afin de déterminer la teneur en eau.



Photo 6: Essai Limite de liquidité

➤ **Limite de plasticité (Plastic Limit - PL) :**

Lorsque la teneur en eau diminue, le sol entre dans un état plastique où il peut être modelé sans se fissurer. Dans cette phase, le sol conserve sa forme mais perd sa capacité à s'écouler. La limite de plasticité est la teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide.

➤ **Limite de plasticité**

➤ **APPAREILLAGE:**

- ❖ Balance de 5kg (précision 1g)
- ❖ Etuve ventilé
- ❖ Planche à roulets
- ❖ Capsules en verre

➤ **MODE OPERATOIRE :**

La limite de plasticité est la teneur en eau pour laquelle, ces rouleaux se brisent en petits tronçons.

- On étale le reste de la patte sur une plaque de verre à l'aide d'une spatule pour la dessécher.
- On forme à l'aide de la paume de la main sur les plaques de verres des rouleaux de diamètre 3 mm et de 10 à 15cm de longueur, voir photo



Photo 7: Essai limite de plasticité



Photo 8: Les échantillons de limite de plasticité après l'opération d'étuvage

On appelle **indice de plasticité** la différence $IP = Lw - WP$. C'est l'étendue de l'intervalle pendant lequel on peut " travailler " le sol.

II.3.3 ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (ESSAI A LA TACHE) :**➤ Définition et modes opératoires du VBS selon la norme NF P 94-068:**

La structure des argiles leur confère un ensemble de réactions lié à l'eau, ces réactions sont appelées ACTIVITÉS. Ces activités ont pour effet les phénomènes:

- ❖ De gonflement
- ❖ De plasticité
- ❖ De cohésion constatée sur ces sols.

L'essai au bleu de méthylène permet d'observer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sol. Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur de bleu du sol, ou VBS, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassement.

➤ BUT DE L'ESSAI :

Paramètre d'identification (valeur ou bleu des sol) V.B.S permet d'apprécier globalement la quantité et la qualité des argiles dans un sol

Déterminer la capacité d'adsorption du bleu de méthylène par un échantillon d'argile en identifiant le point d'équivalence.

➤ APPAREILLAGE:

- ❖ Argile sèche et tamisée : **30 g**
- ❖ Bleu de méthylène : **10 g**
- ❖ Eau distillée **1L**
- ❖ Agitateur magnétique ou vortex
- ❖ Burette ou pipette graduée
- ❖ Béchers de **250 mL**
- ❖ Papier filtre (ou buvard)
- ❖ Pipette ou compte-gouttes
- ❖ Balance de précision

➤ **Le principe :**

On va mettre en place dans un bécher un échantillon de sol d'une masse de 30g avec (500cm³) d'eau déminéralisé mettre cette ensemble sous agitation et incorporer de la solution de bleu jusqu'à ce qu'on ait atteint la saturation par adsorption.

Une fois qu'on a atteint cette saturation par adorption donc on va estimer la quantité de bleu injecté pour calculer ce paramètre qu'on appelle la valeur au bleu du sol.

VBS faible (1g/100) : sol peu argileux (sable , graine).

VBS modéré (1à5g/100) : sol avec présence d'argile peu actives .

VBS élevée (5g/100) : sol ruches en argiles actives(semectites , montmorillonite) .

(cette valeur est cruciale pour évaluer le comportement du sol (gonflement, rétraction, perméabilité).

➤ **MODE OPERATOIRE :**

➤ **Préparation de la solution de bleu de méthylène :**

➤ **Dissolution :**

- ❖ Peser **10 g de bleu de méthylène**.
- ❖ Les dissoudre dans **1 litre d'eau distillée** pour obtenir une **solution mère à 10 g/L**.

➤ **Homogénéisation :**

- ❖ Agiter la solution jusqu'à dissolution complète.

➤ **Préparation de l'échantillon :**

- ❖ Peser **30 g d'argile sèche**.
- ❖ Verser dans un bécher propre.
- ❖ Ajouter environ **100 mL d'eau distillée**.
- ❖ Agiter (agitateur magnétique ou manuel) pendant **10 minutes** pour bien disperser.

➤ **Titration au bleu de méthylène :**

- ❖ Ajouter la solution de bleu de méthylène **goutte à goutte ou par fractions de 5 mL** tout en agitant.
- ❖ Après chaque ajout, prélever **1 goutte du mélange** avec une pipette et la déposer sur un **papier filtre propre**.

- ❖ Observer l'apparence de la **tâche** :
- ❖ Si le bord de la tache reste incolore → adsorption incomplète.
- ❖ Dès que la tache est **uniformément bleue** → **point d'équivalence atteint**.

➤ **Arrêt de l'essai :**

- ❖ Compter le nombre de taches (ou le volume) utilisées pour atteindre ce point.
- ❖ Selon notre essai, nous avons atteint le **point d'équivalence à 46 taches** → ce qui
- ❖ correspond à 46 ajouts de volume déterminé (5 mL à chaque fois). [14]

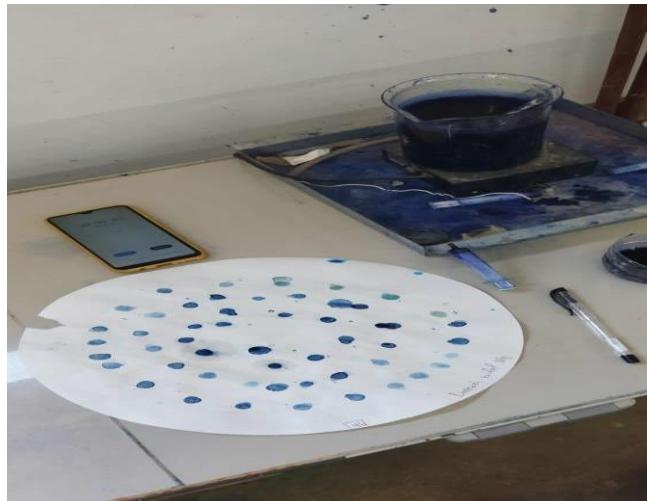
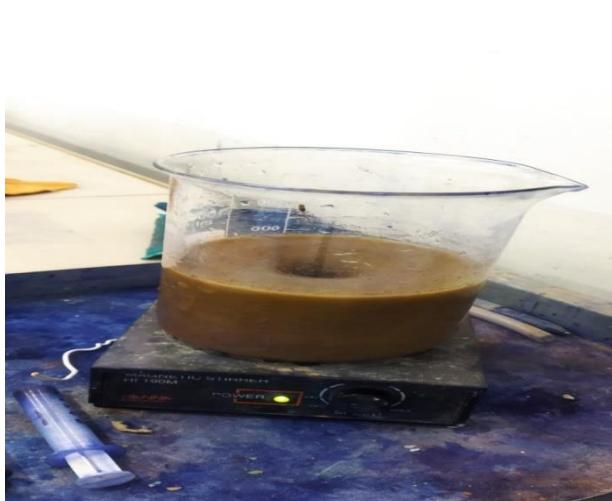
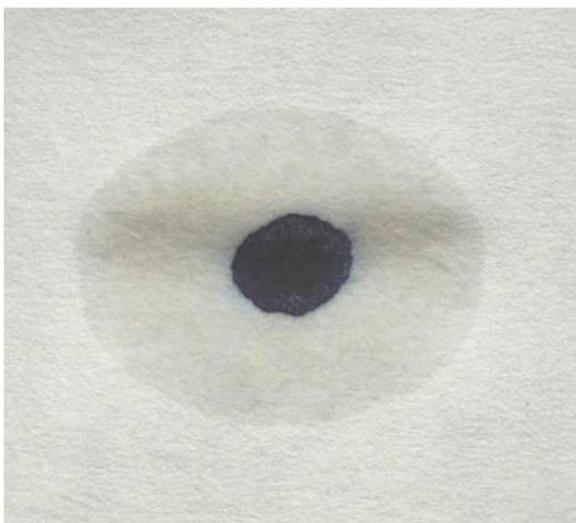


Photo 9: Essai de VBS

• **Test négatif**



• **Test positif**

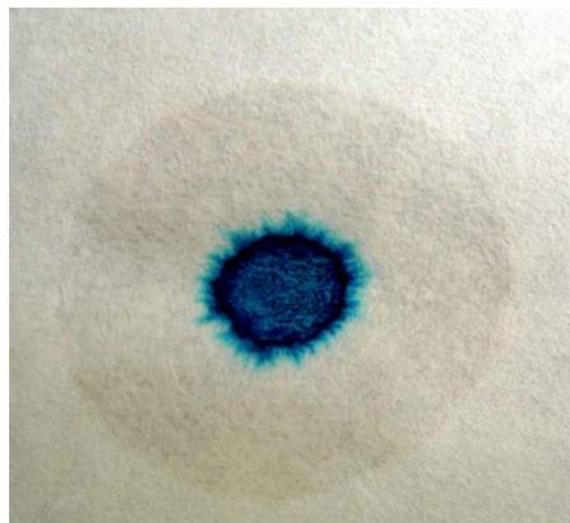


Photo 10: Test de bleu méthylène

Table 2: Classement GTR des sols

CLASSE A : SOLS FINS			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$D_{max} \leq 50\text{mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} > 35\%$	A Sols fins	$VBS \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$	A_1 Limons peu plastiques, lœss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
		$12 \leq I_p \leq 25$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	A_2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
		$25 \leq I_p \leq 40$ ou $6 < VBS \leq 8$	A_3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
		$I_p > 40$ ou $VBS > 8$	A_4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques

II.3.4 L'essai oedometrique

➤ Définition et modes opératoires de l'essai oedometrique la norme NF P 94-090-1

Pour évaluer les tassements d'un sol sous le poids d'une charge (fondation, remblai, etc.), il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques du sol qui sont déterminées à l'aide de l'essai de compressibilité à l'oedomètre.

Cet essai permet de prévoir l'amplitude des tassements des sols ainsi que leur évolution dans le temps sous une charge donnée en fournissant les caractéristiques du sol suivantes :

- ❖ L'indice de compression C_c
- ❖ L'indice de gonflement C_s
- ❖ La contrainte de préconsolidation du sol σ'_p
- ❖ Le module oedométrique E_{oed}
- ❖ Le coefficient de consolidation C_v

La connaissance de ces trois grandeurs C_c , σ'_p et e_0 permet de calculer le tassement ΔH à long terme (ou drainé) d'une couche d'épaisseur H produit par une charge déterminée

$$\Delta H = H \frac{c_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_p}$$

Le sol chargé est saturé d'eau. L'eau ne peut pas s'évacuer et supporte presque seule la charge.

La perméabilité permet à l'eau de s'évacuer. Les grains se tassent et prennent progressivement l'effort en charge.

1. Seuls les grains supportent la charge. Ils subiront encore un très léger tassement. **Le sol est consolidé.**

On désigne ainsi par « consolidation » l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans ce processus depuis l'état initial jusqu'à l'état final qui correspond à un état d'équilibre.

➤ PRINCIPE :

Cet essai a pour objet d'étudier la consolidation d'une éprouvette de sol saturée intact ou remanié, soumise à des charges verticales, drainée en haut et en bas et maintenues latéralement par une paroi rigide. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

➤ APARAILLAGE DE L'ESSAI :

- ❖ Bâti de consolidation, supporte la cellule œdométrique, comportant un levier qui transmet les charges avec un rapport de 10.
- ❖ Cellule œdométrique comporte les éléments suivants :
 - ❖ Une bague œdométrique cylindrique rigide qui reçoit l'éprouvette.
 - ❖ Un piston permettant de répartir l'effort appliqué sur l'éprouvette.
 - ❖ Deux pierres poreuses avec le papier filtre. Ce dernier sert à protéger les pierres du colmatage dû aux grains fins.
 - ❖ Série de poids.
 - ❖ Comparateur au 1/100 mm.
 - ❖ Chronomètre.
 - ❖ Balance précise au 1/100 g.

➤ MODE OPERATOIRE :

a. *Mise en place d'un échantillon de sable :*

On se propose dans cette expérience d'étudier un échantillon de sable sec pour lequel le tassement est essentiellement instantané et peut évoluer par le fluage.

- ❖ Préparer environ 500g de sable sec tamisé à 0,4 mm.
- ❖ Mesurer le diamètre intérieur de la bague œdométrique D, et sa hauteur H0 (mm).
- ❖ Peser l'ensemble « moule, bague et la pierre poreuse inférieure » (N).
- ❖ Remplir la bague avec du sable sec en appliquant une pression modérée à la main sur le piston positionné sur l'échantillon pour le compacter.
- ❖ Déterminer le poids de l'ensemble « moule, bague, pierre poreuse inférieure et sable sec ». En déduire le poids du sable sec.

b. *Réalisation de l'essai:*

- ❖ Placer la cellule sur son plateau.
- ❖ Mettre le levier à niveau puis placer le comparateur et régler le à zéro.
- ❖ Remplir le réservoir avec de l'eau pour la saturation et l'observation de la variation de hauteur de l'éprouvette commence à partir de ce moment.
- ❖ Après stabilisation, faire une lecture du comparateur ΔH_0 et en déduire la hauteur initiale de l'échantillon saturé (notée H_i).
- ❖ Réinitialiser le comparateur. L'échantillon est alors prêt pour l'essai œdométrique.

c. *Chargement de l'éprouvette :*

- ❖ Commencer le cycle de chargement en appliquant successivement les charges suivant 1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 16 kg. (ne jamais retirer le poids précédent, ajouter le complément de poids).
- ❖ Chaque palier doit durer 4 minutes. Mesurer le tassement suivant la cadence suivante : 0, 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 45 s, 60 s, 75 s, 90 s, 120 s et 240 s. On admettra pour la circonstance que la consolidation est atteinte au bout de 4 min (en fait pour un essai normal, un palier dure 24h)
- ❖ Effectuer ensuite le cycle de déchargement suivant le même processus jusqu'à 2 kg.
- ❖ Recharger l'éprouvette en utilisant le cycle 8 ; 16 ; 32 ; 64 kg et faire les lectures jusqu'à 8minutes pour les deux dernières charges.
- ❖ Démonter et déterminer la teneur en eau de l'éprouvette de sol [16]



Figure 9: Appareil d'essai d'oedomètre pour l'essai de consolidation des sols

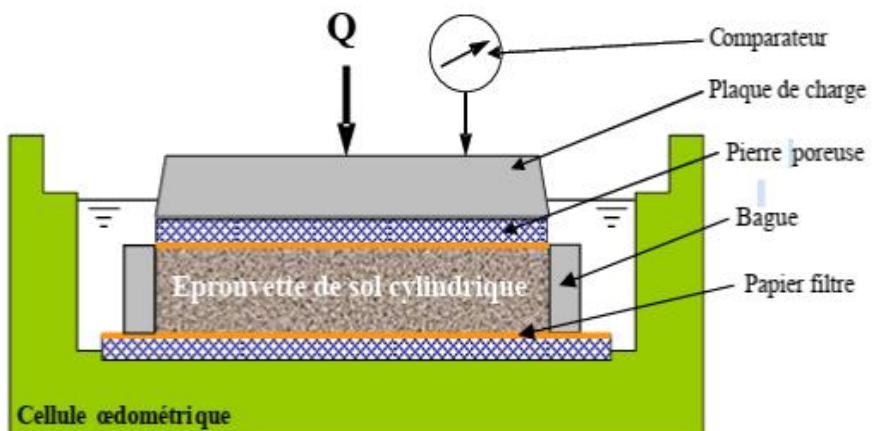


Figure 10: Représentation schématique d'une cellule œdométrique

II. 3.5 L'essai de cisaillement (Norme NF P 94 -071-1) :

➤ Définition:

L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer ces paramètres de résistance au cisaillement, l'angle de frottement interne et la cohésion C.

La résistance au cisaillement des terrains influence la conception des différents ouvrages tels que les talus, les soutènements et les fondations. Cette conception doit permettre d'éviter les ruptures ou les déformations excessives lorsque les ouvrages sont soumis à des charges maximales. Il est donc crucial de connaître la résistance ultime ou limite des terrains. [16]

➤ APPAREILLAGE:

Le bâti,

La boite de cisaillement,

Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette,

Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-bottes,

Le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps,

Série de poids,

Balance précise au 1/100 g.

➤ Mode opératoire**• Préparation de l'échantillon :**

Le sol est compacté dans la boîte de cisaillement (soit intact, soit remanié).

La surface de l'échantillon est plane pour assurer un contact uniforme.

• Application de la charge normale ($\sigma \square$) :

Une première charge verticale (N) est appliquée (par exemple : 50, 100, 200 kPa).

La contrainte normale est calculée par :

$$\sigma_n = N/A \quad (A = \text{surface de l'échantillon})$$

• Cisaillement de l'échantillon :

La partie supérieure de la boîte est déplacée horizontalement à vitesse constante (par exemple 0,5 mm/min).

La force de cisaillement (T) et les déplacements sont enregistrés jusqu'à rupture ou déformation maximale.

➤ Répétition pour différentes contraintes normales :

L'essai est réalisé sous au moins trois charges normales différentes pour tracer la courbe intrinsèque (droite de Mohr-Coulomb). [16]

➤ **Analyse des résultats :**

La résistance au cisaillement (τ) est calculée par :

$$\tau = T / A = \sigma n \cdot \tan \phi$$

Les paramètres de cisaillement (*c* et ϕ) sont déterminés par régression linéaire :

$$\tau = c + \sigma n \cdot \tan \phi$$

➤ **Principe de l'essai:**

- ❖ L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-bottes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.
- ❖ L'essai consiste à appliquer une charge verticale constante N par l'intermédiaire d'un piston. Puis on tire horizontalement la demi-botte inférieure par une vitesse constante jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. La force totale de cisaillement T est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-botte supérieure. On mesure les déplacements horizontaux Δl et verticaux Δh .
- ❖ L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.
- ❖ La détermination de τ et σ lors de la rupture permet de préciser un point de la courbe intrinsèque du sol étudié. En réalisant plusieurs essais avec différentes valeurs de contraintes verticales, on peut déterminer le critère de rupture de Mohr- Coulomb et définir ses valeurs de cohésion c et d'angle de frottement ϕ . [16]



Figure 11: Appareil de l'essai de cisaillement

II.3.6 ESSAI DE PERMEABILITE DES SOLS



Figure 12: Perméabilité du sol

➤ **Définition:**

En génie civil (hormis les matériaux métalliques) sont perméables y compris le granit sain ou les bétons.

La qualification d'imperméabilité qui est associée souvent aux bétons ou aux argiles est simplement liée au fait que nous ne « voyons » pas l'eau qui passe au travers de ces matériaux. Cela n'implique pas l'absence d'écoulement et surtout l'absence de forces liées à cet écoulement.

La perméabilité a une influence vitale sur les problèmes de fondations et certains ouvrages de mécanique des sols tels que :

- a. la stabilité des barrages.
- b. la stabilité des excavations ouvertes.
- c. la stabilité des ouvrages en palplanches.
- d. les caractéristiques de consolidation du sol.
- e. la classification des sols et leurs propriétés.

Les écoulements des eaux à travers les interstices d'un système de sol, sont complexes et variés. Ils ne permettent pas de tirer des conclusions et définir par la suite des méthodes de calcul pour résoudre les problèmes pratiques posés. Des hypothèses sont alors nécessaires ;

les écoulements sont supposés lents et leurs chemins plus courts. Ainsi, la condition d'écoulement laminaire est satisfaite.

➤ Principe d'essai Perméamètre à charge variable

Le perméamètre à charge variable est un appareil utilisé pour mesurer la perméabilité des sols (généralement des sols fins comme les argiles ou les limons) en laboratoire. Son principe repose sur la loi de Darcy et sur la variation du niveau d'eau dans un tube en fonction du temps.

➤ Principe de l'essai au perméamètre à charge variable

1. Loi de Darcy :

La perméabilité (k) est déterminée à partir de la relation :

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

La perméabilité (k) est donnée par :

$$\ln\left(\frac{h_1 h_2}{h_2 h_1}\right) k = A \cdot t_a \cdot L \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

où :

a = section du tube capillaire (m^2),

- ❖ L = longueur de l'échantillon (m),
- ❖ A = section de l'échantillon (m^2),
- ❖ t = temps écoulé (s),
- ❖ $h_1 h_1$ et $h_2 h_2$ = hauteurs d'eau initiale et finale.

➤ MATERIEL APARAILLAGE DE L'AISSAI :

- ❖ Un perméamètre de compactage avec accessoires ;
- ❖ Un support de perméamètre avec accessoires ;
- ❖ Un panneau de tubes piézométriques ;
- ❖ Un réservoir d'eau ;
- ❖ Une éprouvette graduée ;
- ❖ Un chronomètre ;
- ❖ Moule CBR (Proctor) ;
- ❖ Dame Proctor normal ou modifié ;

- ❖ Règle à araser ;
- ❖ Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ;
- ❖ Tamis 0.5 mm et 2 mm ;
- ❖ Balance précise au 1/100 g.
- ❖ Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g ;
- ❖ Etuve $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ C ;
- ❖ Papier filtres.
- ❖ Sable de diamètres 0,5/2 mm

➤ **MODE OPERATOIRE :**

a. Préparation de l'échantillon

- L'essai se déroule sur un échantillon de sable de diamètres 0,5/2 mm imprègne d'eau et compacts.
- Mettre le matériau dans le perméamètre, sur la plaque inférieure et sur le disque perforé et le papier filtre.
- Compackter par couches successives.
- Araser le matériau compacté sur le bord du perméamètre.
- Poser le papier filtre puis le second disque perforé et fermer le perméamètre

Table 3: De Type de sol et Degré de perméabilité

Type de sol	k (cm/s)	Degré de perméabilité
Graviers moyens à gros	10^{-3} à 10^{-1}	Très élevé
Petits graviers, sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevé
Sable très fin, sable limoneux, lœss	10^{-5} à 10^{-7}	faible
Limon compact, argile silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Très faible
Argile franche	10^{-9} à 10^{-12}	Pratiquement imperméable

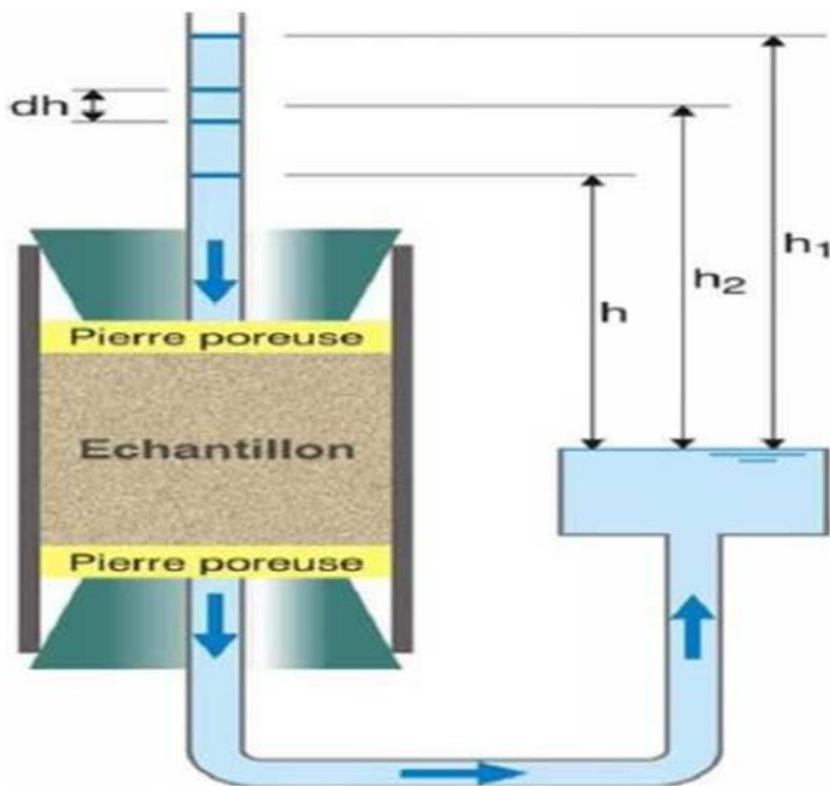


Figure 13: Perméamètre à charge variable

III. Modélisation hydromécanique

Une couche de sol argileux gonflant, d'une épaisseur de 3 mètres et d'une largeur de 10 mètres, est modélisée afin d'étudier son comportement sous l'effet des variations climatiques, en particulier les cycles de sécheresse et de précipitations. Ce sol est connu pour sa sensibilité aux changements du taux d'humidité, entraînant des phénomènes de gonflement ou de retrait susceptibles d'endommager les structures superficielles.

Le modèle est mis en œuvre à l'aide du logiciel PLAXIS 2D (version 8.6), avec une géométrie plane (2D), et des conditions de drainage qui permettent de simuler l'effet de la nappe phréatique.

La profondeur modélisée (3 m) correspond à la zone active du sol soumise aux cycles hydriques naturels, tandis que la largeur de 10 m garantit que les effets de bord ne perturbent pas l'évolution des contraintes et des déformations au centre du domaine.

Le sol est représenté par un comportement élasto-plastique, selon le modèle de Mohr-Coulomb, en raison de sa simplicité et de sa capacité à approximer les principales caractéristiques mécaniques des sols fins. Ce modèle utilise cinq paramètres principaux : le

le module de Young E , le coefficient de Poisson ν , la cohésion C , l'angle de frottement interne ϕ , et l'angle de dilatance ψ . Ces paramètres ont été définis à partir d'essais de laboratoire réalisés sur une argile gonflante prélevée à faible profondeur (0,5 m à 3 m).

L'objectif de cette modélisation est d'analyser l'impact des modifications du niveau de la nappe phréatique sur les déplacements verticaux, les contraintes et les pressions interstitielles, en distinguant deux phases : une phase de sécheresse, caractérisée par une baisse du niveau d'eau, et une phase de pluie, représentant une remontée d'humidité. Cette approche permet d'évaluer l'évolution des efforts internes dans le sol gonflant, ainsi que ses effets différés dus au phénomène de consolidation.

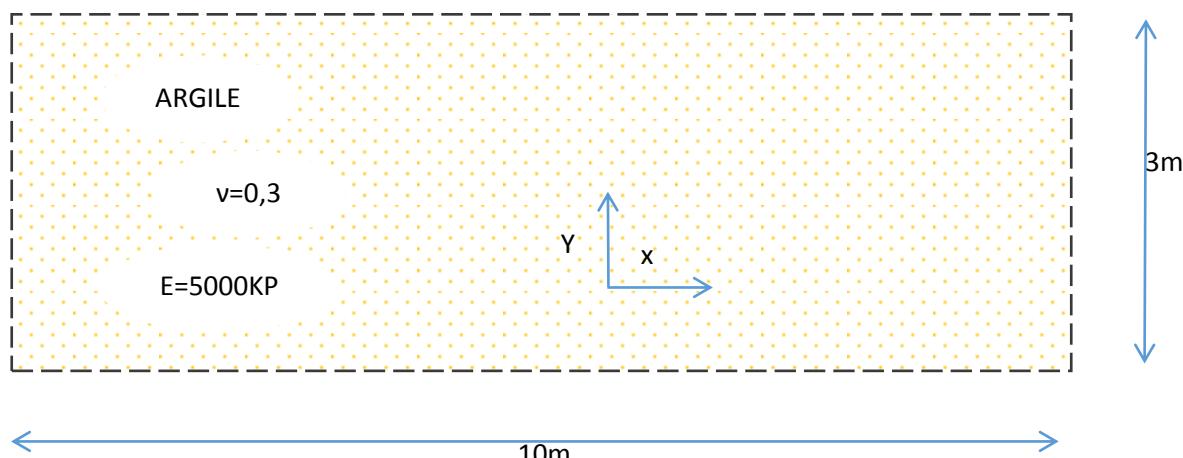


Figure 14: Géométrie d'un modèle de terrain argileux d'une profondeur de 3m

III.1 Création du modèle numérique :

La modélisation du sol gonflant a été réalisée à l'aide du logiciel **PLAXIS 2D (version 8.6)**. Pour cela, il est nécessaire de passer par le module **Input**, qui permet de définir la géométrie, les matériaux, le maillage et les conditions initiales du sol.

La première étape consiste à **lancer le module Input** en double-cliquant sur son icône. Une boîte de dialogue intitulée **Créer/Ouvrir un projet** apparaît alors, permettant soit d'ouvrir un projet existant, soit d'en créer un nouveau. Dans notre cas, un **nouveau projet** a été sélectionné, puis validé en cliquant sur le bouton **OK** (voir Figure 15).

Une fois cette étape terminée, la fenêtre des **paramètres généraux** s'affiche. Elle est composée de deux onglets principaux :

- **Project;** dans lequel sont renseignés le nom du projet, son emplacement, ainsi que quelques informations générales ;
- **Dimensions;** qui permet de spécifier les unités utilisées (longueur, force, temps), les dimensions géométriques du modèle (largeur, hauteur) ainsi que les valeurs d'accélération gravitationnelle (voir Figure 16 et Figure 17).

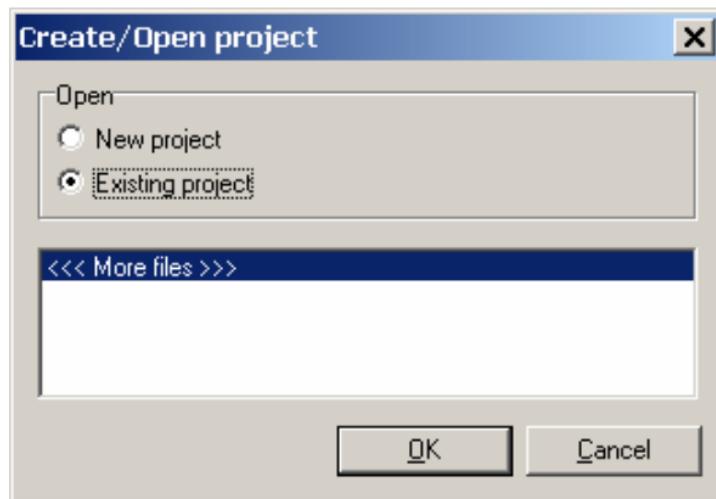


Figure 15: Ouvrir / créer un nouveau projet

III4.2 Paramètres généraux

La première étape de toute analyse par éléments finis consiste à **définir les paramètres de base du modèle**. Cela se fait dans la fenêtre **General Settings**.

Ces paramètres incluent :

La description du problème : une brève formulation du type de sol étudié (sol argileux gonflant), de l'objectif de la modélisation (analyse de l'effet des variations climatiques), et de la configuration du modèle.

Le type d'analyse : dans notre cas, il s'agit d'une **analyse de consolidation** (*Consolidation analysis*), permettant de simuler les déformations différenciées dans le sol dues à la variation de l'humidité et à l'évolution des pressions interstitielles.

Le type d'éléments finis utilisés : ici, des **éléments quadratiques à 15 nœuds** ont été sélectionnés pour une meilleure précision dans la représentation des déformations dans les zones fines du maillage.

Les unités de base : les unités utilisées dans notre modèle sont les suivantes :

- Longueur : **mètre (m)**
- Force : **kilonewton (kN)**
- Temps : **jour (d)** ou **seconde (s)**, selon les besoins de l'analyse

La taille de la zone de dessin (Draw area) : elle a été fixée de manière à représenter une **largeur de 10 m** et une **profondeur de 3 m**, ce qui couvre toute la zone d'influence des variations climatiques sur le sol.

Ces réglages initiaux garantissent que le modèle numérique est cohérent et correctement dimensionné avant de passer à la définition de la géométrie du sol

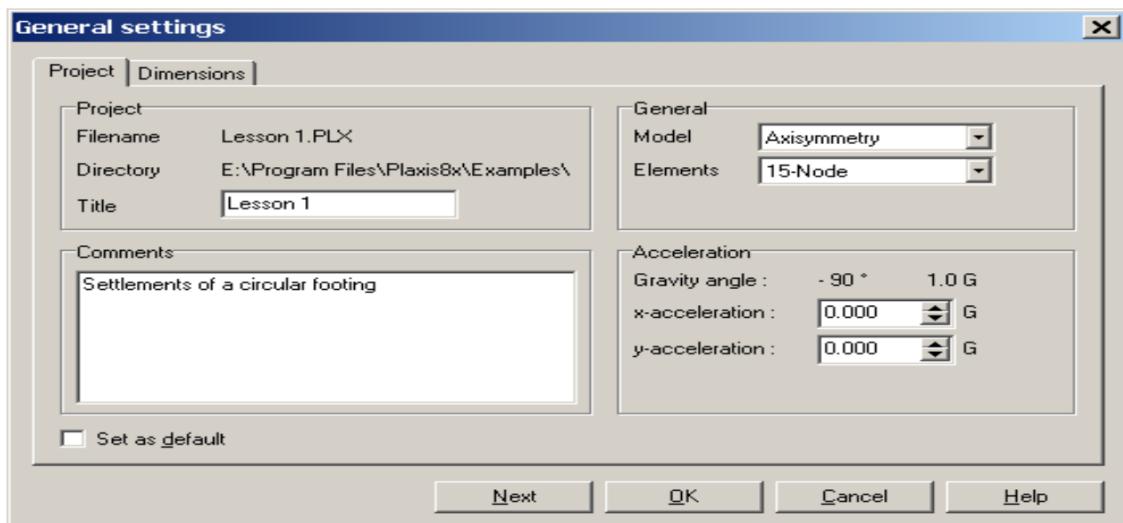


Figure 16: Fenêtre des paramètres généraux (projet)

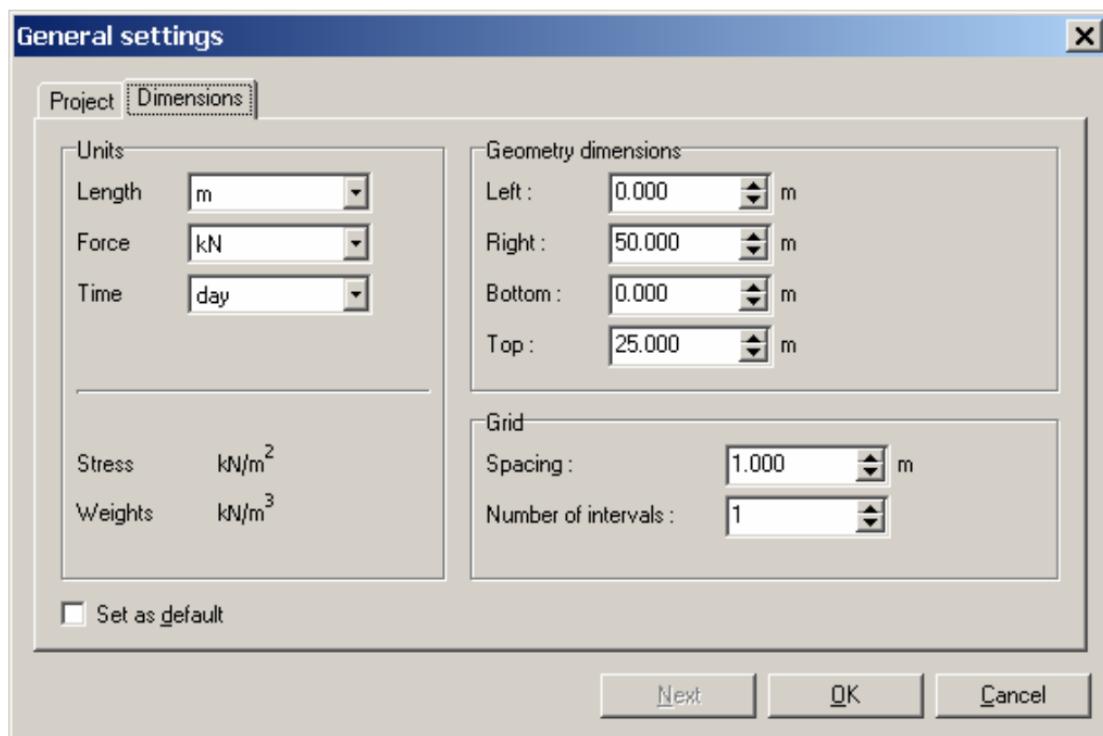


Figure 17: Fenêtre des paramètres généraux (dimensionnement)

Pour confirmer les paramètres nous devons cliquez sur le bouton OK et la zone de dessin apparaît afin de permettre de dessiner le modèle géométrique.

Définition de la géométrie du modèle

Une fois les paramètres généraux définis, la **zone de dessin** s'affiche à l'écran, avec une indication claire de **l'origine** et des **axes de coordonnées**. Par convention dans PLAXIS :

- L'axe **X** est orienté vers la droite ;
- L'axe **Y** est orienté vers le haut.

La géométrie peut être construite n'importe où dans la zone de dessin. Pour créer des objets, l'utilisateur peut soit utiliser les **boutons de la barre d'outils**, soit passer par le **menu Geometry**.

Dans un projet vierge, l'outil **Geometry Line** est généralement activé par défaut. Sinon, il peut être sélectionné manuellement depuis la barre d'outils secondaire ou à partir du menu **Geometry**.

III.4.3 Construction du contour de la géométrie :

La géométrie du modèle a été établie de manière à représenter une couche homogène de sol gonflant, d'une largeur de 10 mètres et d'une profondeur de 3 mètres, afin de simuler son comportement sous l'effet des variations d'humidité. Le contour du domaine a été construit à l'aide de l'outil Geometry Line  , en traçant un polygone rectangulaire à partir de l'origine du repère (0 . 0). Le tracé a été effectué successivement en direction horizontale jusqu'au point (10 . 0), puis verticalement jusqu'à (10 . 3), avant de revenir vers la gauche jusqu'au point (0 . 3), et enfin de refermer la boucle au point initial. Ce contour délimite la zone modélisée, à l'intérieur de laquelle seront définies les propriétés du sol, les conditions aux limites, ainsi que les sollicitations mécaniques destinées à reproduire les effets des cycles climatiques.

III.4.4 Définition des conditions aux limites

Une fois la géométrie tracée, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites pour simuler l'environnement réel du sol et limiter les mouvements non désirés au niveau des bords du modèle.

Dans notre cas d'étude, nous modélisons une couche de sol gonflant sur une largeur de 10 m et une profondeur de 3 m, en supposant que le sol est infini latéralement et en profondeur. Comme le domaine modélisé est forcément fini, il est nécessaire d'appliquer des fixations artificielles现实的 pour que les déformations soient bien représentées.

Choix des conditions aux limites :

Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire un comportement réaliste du sol dans le cadre d'une simulation bidimensionnelle. Le bord inférieur du domaine modélisé a été entièrement bloqué, à la fois horizontalement et verticalement, empêchant ainsi tout déplacement selon les axes **X** et **Y**. Cette configuration traduit la présence d'un sol sous-jacent plus rigide ou un prolongement du milieu naturel. Quant aux côtés gauche et droit, ils ont été contraints uniquement dans la direction horizontale (**X**), ce qui autorise les déplacements verticaux tout en empêchant les mouvements latéraux. Ce choix permet de simuler la continuité latérale du sol et de limiter l'influence des frontières artificielles sur la réponse mécanique du modèle.

➤ **Mise en œuvre dans PLAXIS :**

La mise en œuvre de ces conditions dans **PLAXIS 8.6** s'effectue via l'outil **Fixed End Anchors**, accessible depuis le menu "**Geometry**" ou depuis la barre d'outils. Les fixations latérales sont appliquées en sélectionnant les bords gauche et droit du modèle, avec l'option "**Fixed in X**" activée, tandis que le bord inférieur est fixé à la fois en **X** et en **Y**. Cette configuration garantit une simulation stable, tout en laissant au sol la liberté de se déformer verticalement sous l'effet des sollicitations hydromécaniques modélisées

Ces fixations permettent de simuler une zone de sol suffisamment large pour que les effets des conditions aux limites ne perturbent pas les déformations naturelles dues aux variations climatiques.

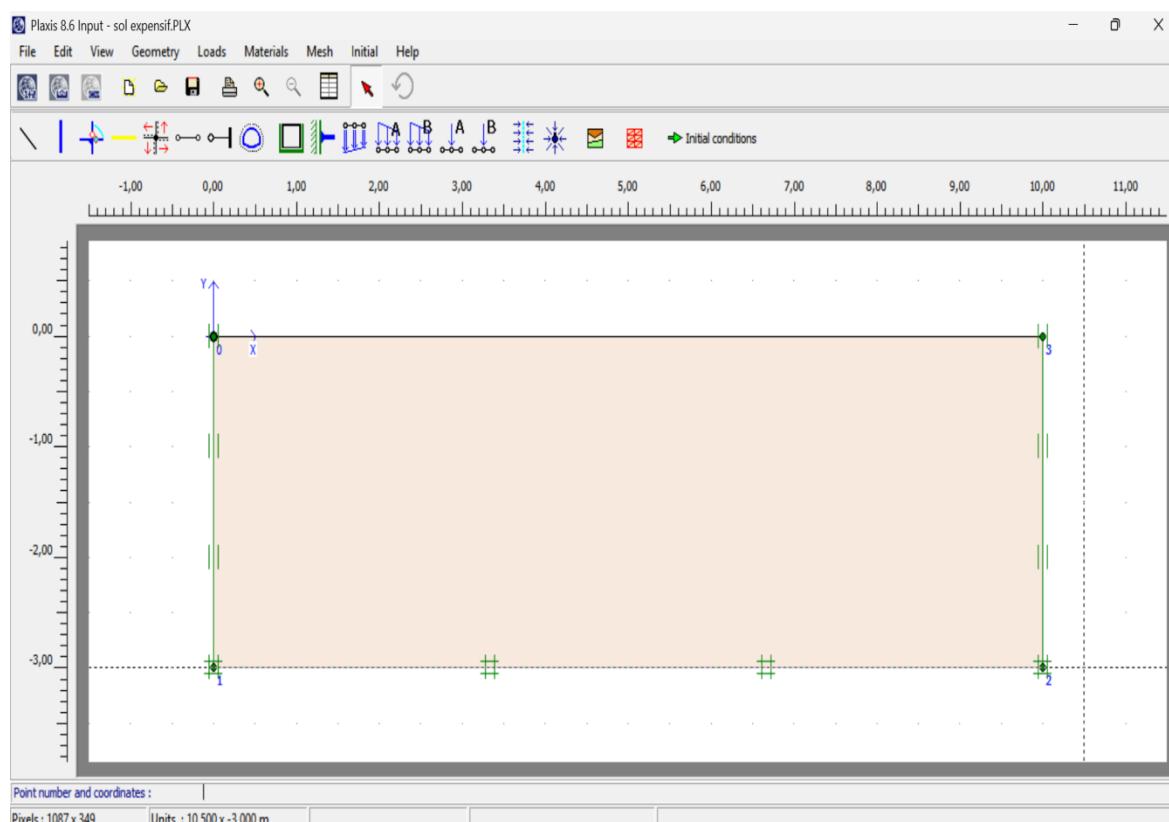


Figure 18: Définition des conditions aux limites

III.4.5 Définition du matériau

Afin de simuler le comportement du sol gonflant, il est nécessaire d'attribuer à chaque zone de la géométrie un modèle de sol approprié ainsi que les paramètres géotechniques correspondants. Dans **PLAXIS**, les propriétés des sols sont regroupées sous forme d'ensembles de matériaux, stockés dans une base de données.

Ces ensembles de matériaux peuvent ensuite être affectés à un ou plusieurs clusters (zones du modèle délimitées lors de la création de la géométrie).

➤ Modèle de sol utilisé

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi le modèle Mohr-Coulomb, un modèle élasto-plastique simple, mais suffisant pour simuler le comportement global d'un sol argileux gonflant sous l'effet de la variation de l'humidité (saison sèche et saison pluvieuse). Ce modèle est largement utilisé dans les premières phases d'analyse pour sa simplicité et sa facilité de calibration.

➤ Paramètres du sol

Les paramètres utilisés dans notre cas sont :

Poids volumique sec : $\gamma = 17 \text{ KN/m}^3$

Module de Young (E) : 5000 KN/m^2

Coefficient de Poisson (v) : 0,3

Angle de frottement (ϕ) : 18°

Cohésion (c) : 15 KPa

Coefficient de perméabilité (k) : $8,640\text{E-}04 \text{ m/day}$

K_0 (coefficients de pression interstitielle au repos) : déterminé par la formule de Jaky

$$(K_0 = 1 - \sin\phi)$$

Remarque : Ces valeurs ont été déterminées à partir des essais de laboratoire réalisés sur des échantillons d'argile prélevés entre 0,5 m et 3 m de profondeur.

➤ Procédure dans PLAXIS pour la Définition des propriétés du sol

La modélisation du comportement du sol gonflant a été réalisée à l'aide du modèle constitutif de Mohr-Coulomb, couramment utilisé pour les sols argileux dans les analyses géotechniques simplifiées. Dans l'environnement de travail PLAXIS, les propriétés du sol ont été définies via l'onglet Materials, en accédant à la section Soil & Interfaces. Un nouveau matériau a été créé en sélectionnant le modèle Mohr-Coulomb, puis en renseignant les paramètres mécaniques (module de Young, angle de frottement, cohésion, etc.), hydrauliques (poids volumique, perméabilité) et les conditions initiales. Une fois les caractéristiques enregistrées, le matériau a été affecté à la zone modélisée en l'associant au cluster correspondant dans la géométrie, par simple sélection depuis la liste déroulante. Cette étape permet d'assurer la cohérence entre la géométrie du modèle

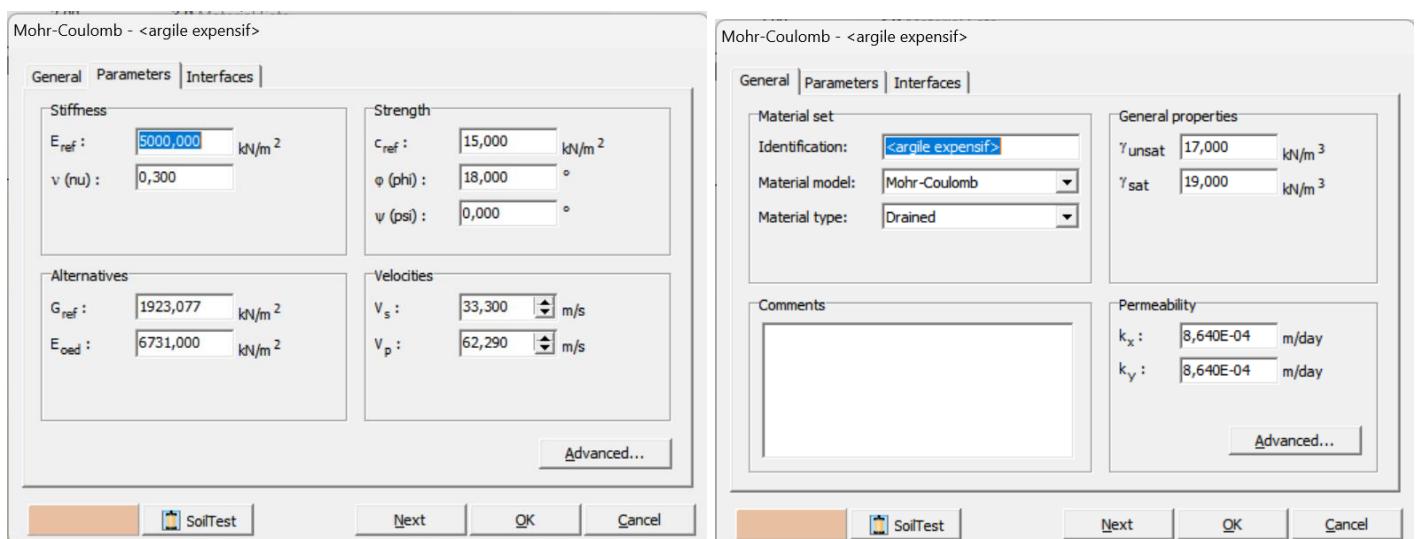


Figure 19: Définition des paramètres du matériau

et le comportement du sol simulé.

Il est impératif que chaque cluster et chaque élément structurel (si utilisé) ait un matériau assigné avant la génération du maillage. Sans cela, PLAXIS ne permet pas d'avancer vers la phase de maillage et de conditions initiales.

III.4.6 Génération du maillage

Une fois le modèle géométrique complété, le maillage par éléments finis peut être

PLAXIS propose une procédure entièrement automatique de génération de maillage, dans laquelle la géométrie est discrétisée en éléments finis du type d'élément de base choisi, ainsi que les éléments structurels compatibles, s'il y a lieu.

Ce maillage représente une étape essentielle, car il permet de transformer la géométrie continue du sol en un système discret sur lequel les calculs numériques seront effectués.

➤ Génération du maillage

Le maillage du domaine modélisé a été généré à partir du menu dédié Mesh, accessible depuis la barre d'outils de PLAXIS. Afin d'assurer une meilleure précision dans le calcul des déformations, notamment dans le cadre d'une analyse non linéaire ou de consolidation, le type d'éléments sélectionné a été fixé sur **15 nœuds**, ce qui permet une interpolation plus fine des champs de déplacement. Le niveau de finesse du maillage, défini par le paramètre **Global Coarseness**, a été réglé sur "**Medium**", valeur par défaut qui offre un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats. Pour des analyses plus sensibles aux variations climatiques, une finesse plus élevée peut être envisagée. Une fois les paramètres définis, la génération automatique du maillage a été lancée via la commande **Generate** . En cas de message d'erreur tel que "**Material sets not assigned**", il est nécessaire de vérifier que chaque cluster de la géométrie a bien été associé à un matériau dans l'onglet **Materials**. Une fois le processus abouti, le message "**Mesh generated successfully**" confirme la création correcte du maillage.

Tu peux visualiser les éléments finis (triangles) dans la zone de dessin (voir figure 20).

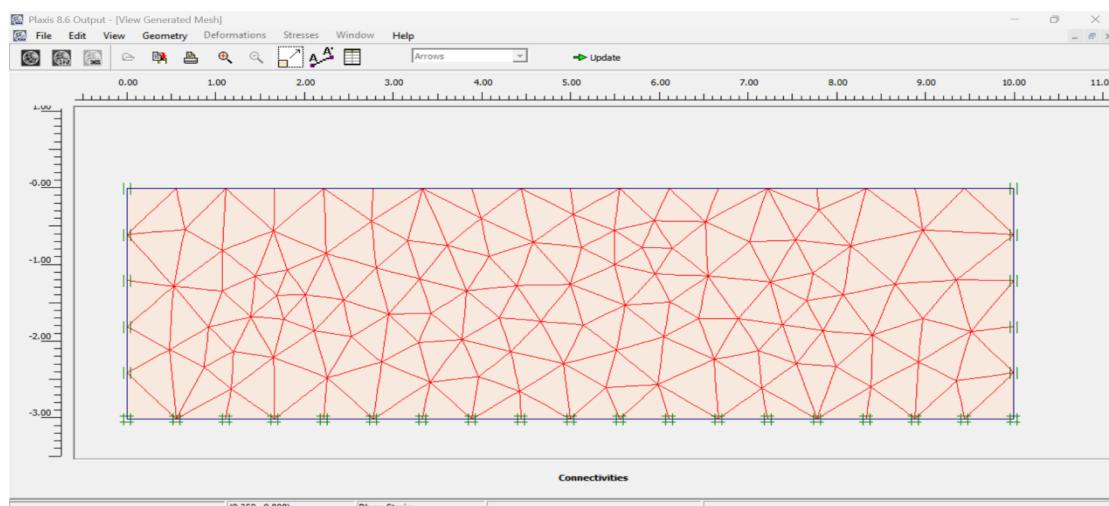


Figure 20: Maillage axisymétriques par éléments finis

III.4.7 Conditions Initiales

Une fois le maillage généré, le modèle par éléments finis est complet. Toutefois, avant de lancer les calculs, il est nécessaire de générer les **conditions initiales**. En général, les conditions initiales comprennent l'état initial des contraintes effectives dans le sol.

Dans le cadre de cette étude portant sur un sol argileux gonflant, un niveau de la nappe phréatique a été introduit dans le modèle afin de représenter les conditions réelles du terrain. Ainsi, cette étape intègre à la fois les contraintes effectives et la distribution des pressions interstitielles dans le sol saturé.

➤ Définition des conditions initiales

La génération des conditions initiales a été effectuée à partir du module Input de PLAXIS, à l'aide du mode dédié accessible via l'option **Initial Conditions**. Lors de cette étape, la valeur par défaut du poids volumique de l'eau, fixée à **10 kN/m³**, a été conservée, conformément aux standards couramment admis. La définition des conditions initiales se déroule en deux volets : le mode **Pressions interstitielles** et le mode **Contraintes initiales et configuration géométrique**, entre lesquels l'utilisateur peut basculer à l'aide de la barre d'outils  . Dans le cas présent, un niveau phréatique ayant été défini dans la géométrie du modèle, il a été nécessaire de vérifier la distribution des pressions interstitielles dans le premier mode, avant de passer à la génération des contraintes initiales. Cette dernière a été réalisée en activant la procédure de type K_0 , qui permet de calculer automatiquement les contraintes géostatiques à partir du poids propre du sol. Le coefficient de pression horizontale à l'état de repos, K_0 , a été laissé à la valeur par défaut fournie par PLAXIS, calculée selon la formule de Jaky : $K_0 = 1 - \sin(\phi)$.

Le multiplicateur du poids du sol a été maintenu à **ΣMweight = 1.0**, indiquant que l'intégralité du poids propre est prise en compte dans le calcul. Cette approche permet d'établir un état initial réaliste avant l'introduction des charges simulant les variations climatiques. En mettant à jour ces étapes, la figure 21 ci après apparaît :

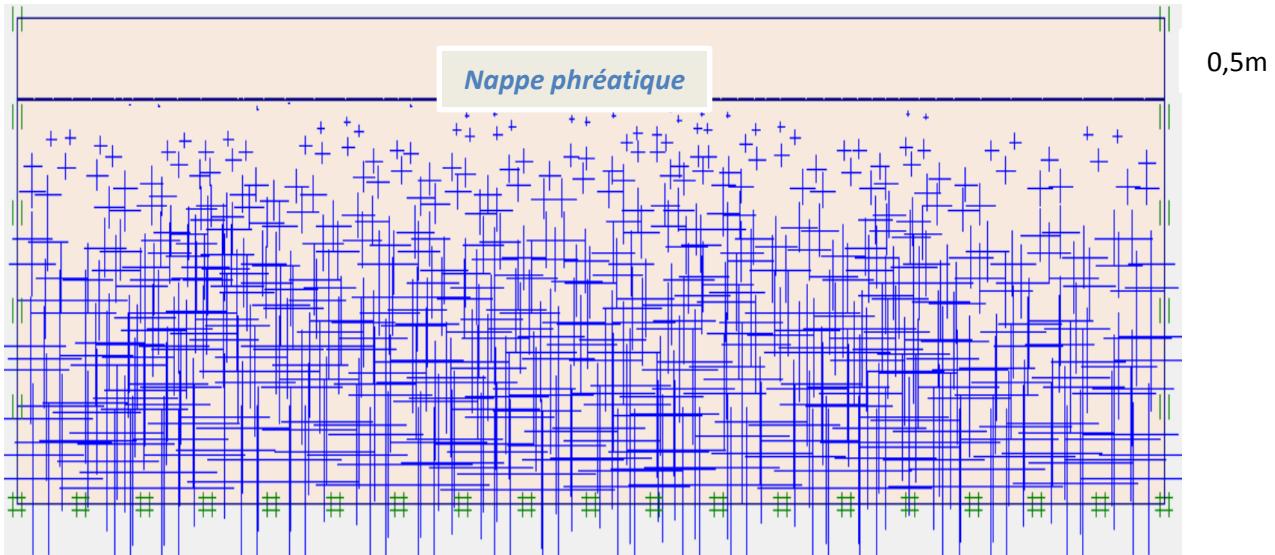


Figure 21: Champ de contraintes initial

V. Conclusion

En conclusion, cette étude démontre l'importance d'une caractérisation fine des sols expansifs pour anticiper leurs réponses sous sollicitations climatiques. Les résultats obtenus fournissent des outils prédictifs essentiels pour la conception d'ouvrages résilients dans la région de Saïda, tout en ouvrant des perspectives pour des recherches futures sur l'optimisation des paramètres de modélisation ou l'intégration de modèles constitutifs plus avancés (ex : Hardening Soil). Ces travaux s'inscrivent ainsi dans une démarche à la fois scientifique et opérationnelle, visant à concilier sécurité des infrastructures et compréhension des mécanismes géotechniques complexes. L'importance des essais effectués et l'importance de la simulation sur plaxis.

Chapitre 03

Identification

Et résultat

I. Introduction

L'étude des sols passe inévitablement par une phase expérimentale rigoureuse permettant de caractériser leurs propriétés physiques, mécaniques, minéralogiques et chimiques. Ce chapitre présente les résultats des différents essais en laboratoire réalisés sur des échantillons prélevés à des profondeurs comprises entre 0,5 m et 3,0 m. Ces essais visent à évaluer le comportement global du sol, sa composition granulométrique, sa plasticité, sa compressibilité, sa résistance au cisaillement, sa perméabilité ainsi que son activité argileuse.

L'objectif de cette analyse est de déterminer la nature du sol en profondeur et d'en déduire ses implications géotechniques, notamment sa stabilité, sa sensibilité au gonflement-rétraction, et son comportement face aux charges. Les essais réalisés incluent : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, l'essai œdométrique, les essais de cisaillement direct, ainsi qu'une analyse chimique approfondie.

Ce chapitre constitue donc un fondement essentiel pour l'évaluation du comportement du sol en conditions réelles, et servira de base pour les recommandations en matière de construction, de stabilisation et de gestion des risques géotechnique

II.1 Résultats des essais en laboratoire

III.1.1 RÉSULTAS ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE [NFP 18-540] :

Table 4: Analyse granulométrique de échantillon 0.5m - 1m

Fraction	Pourcentage (%)
Graviers (>2 mm)	0
Sables (2 – 0,063 mm)	20
Limons (0,063 – 0,002 mm)	30
Argiles (<0,002 mm)	50

Table 5: Analyse granulométrique de échantillon 2m- 3m

Fraction	Pourcentage (%)
Graviers (>2 mm)	0
Sables (2 – 0,063 mm)	10
Limons (0,063 – 0,002 mm)	25
Argiles (<0,002 mm)	65

III.1.2 RÉSULTAS LIMITES D'ATTERBERG:

$P_5 \rightarrow 7g \rightarrow 10g \rightarrow 9,92 \text{ g}$

$P_{3\text{CH}} \rightarrow 18g \rightarrow 21g \rightarrow 20,5g$

$$Wp = \frac{9,92 + 20,5}{2}$$

$$Wp = 15,21\%$$

$$WI = \boxed{30\%}$$

$$Ip = 30-15,21$$

$$\boxed{14,79\%}$$

=

$$Wl = \boxed{44\%}$$

$$Ip = 44 - 15,21$$

$$= \boxed{28,79 \%}$$

Les résultats de l'essai de la limite de plasticité sont représentés en tableau suivant :

Table 6: Résultat l'essai de la limite de plasticité profondeur 2m – 3m

Profondeur	WL (%)	Wp (%)	Ip (%)
2 – 3 m (Éch. 1)	48	18	30
2 – 3 m (Éch. 2)	44	15.21	28.79

Echantillon Z= 0.5 -1 m

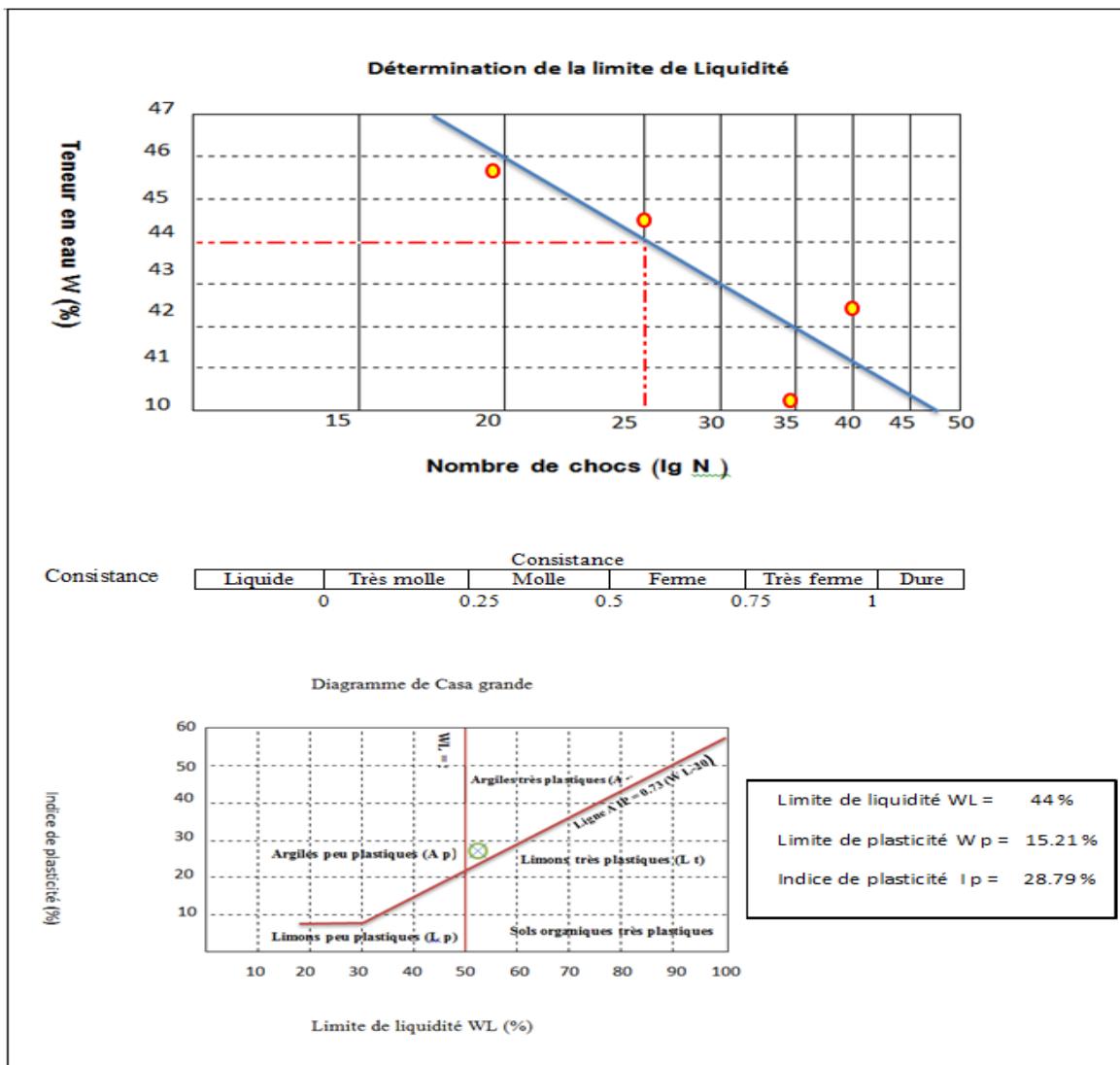


Figure 22: Résultats des limites d'Atterberg de l'échantillon étudié (0.5-1 m)

Echantillon Z= 1 -3 m

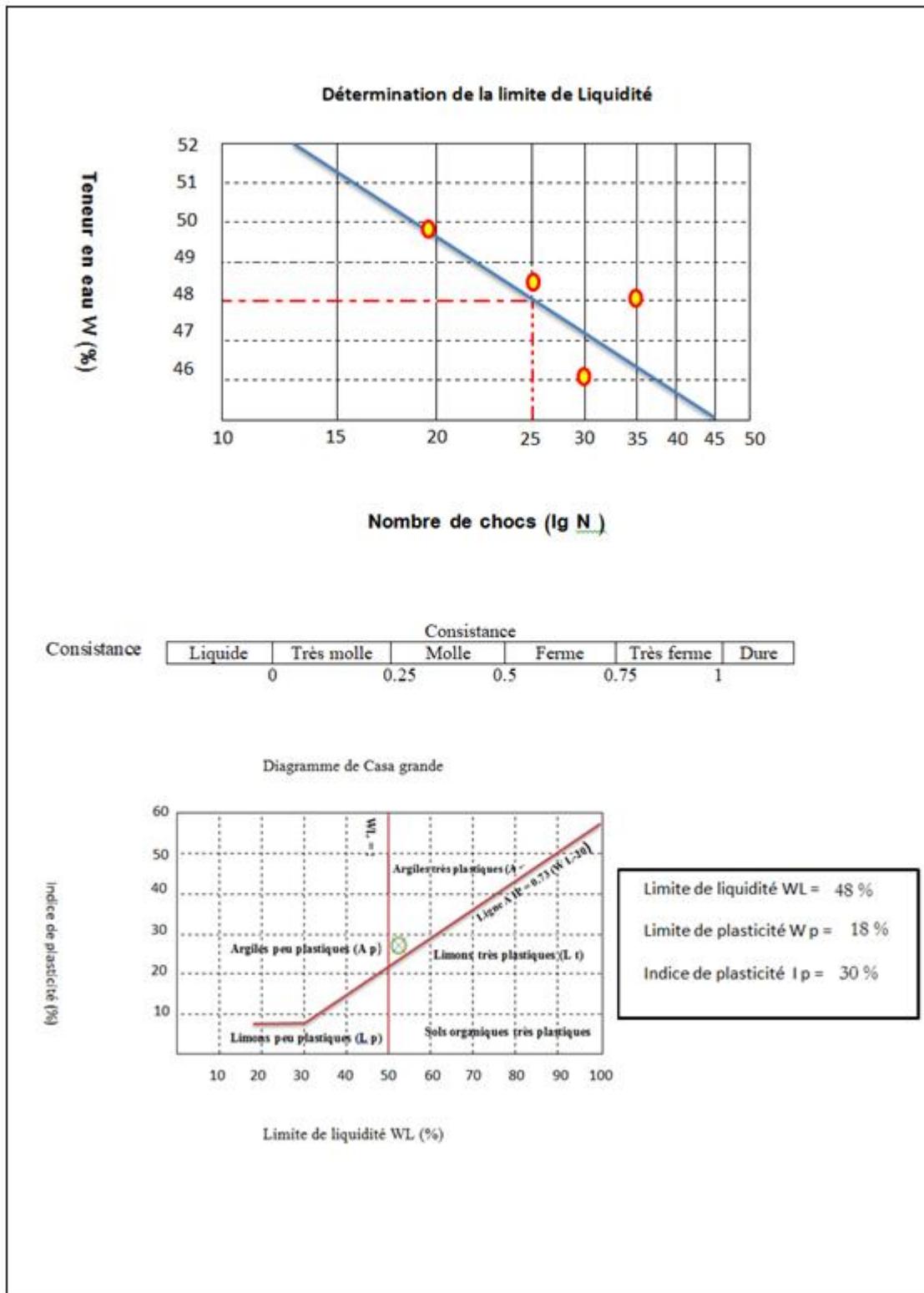


Figure 23: Résultats des limites d'Atterberg de l'échantillon étudié (1-3m)

III. 1.2 RÉSULTAT ESSAI AU BLEU DE METHYLENE OU ESSAI A LA Tâche :

$$VBS = \frac{MB}{Msec} \times 100$$

$$\rho = 10g/l$$

$$\rho_B \frac{VB}{Msec} \times 100$$

$$(46 \times 5) / 30 = 7.66$$

➤ Résultat : VBS = 7,66

Cela correspond à une argile de type **smectite** ou **montmorillonite**, avec un **fort pouvoir adsorbant**, proche de celui des bentonites mais pas encore au maximum.

➤ Conclusion :

L'argile analysée est majoritairement **de type smectite**, peut-être légèrement mélangée avec d'autres minéraux comme l'illite

III.1.4 RÉSULTATS L'ESSAI OEDOMÉTRIQUE:

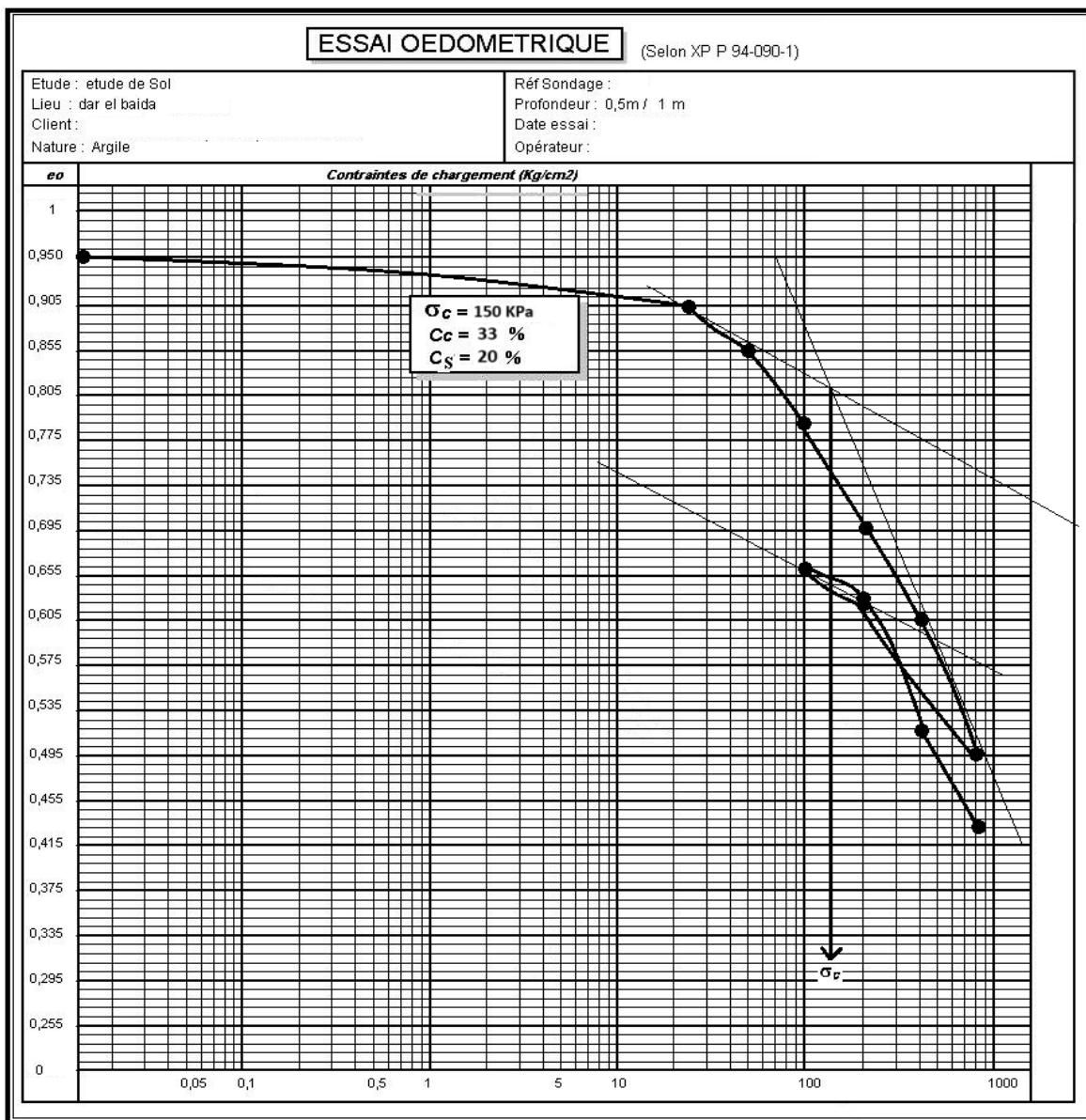


Figure24: courbe oedometrique profondeur 0,5m - 1m

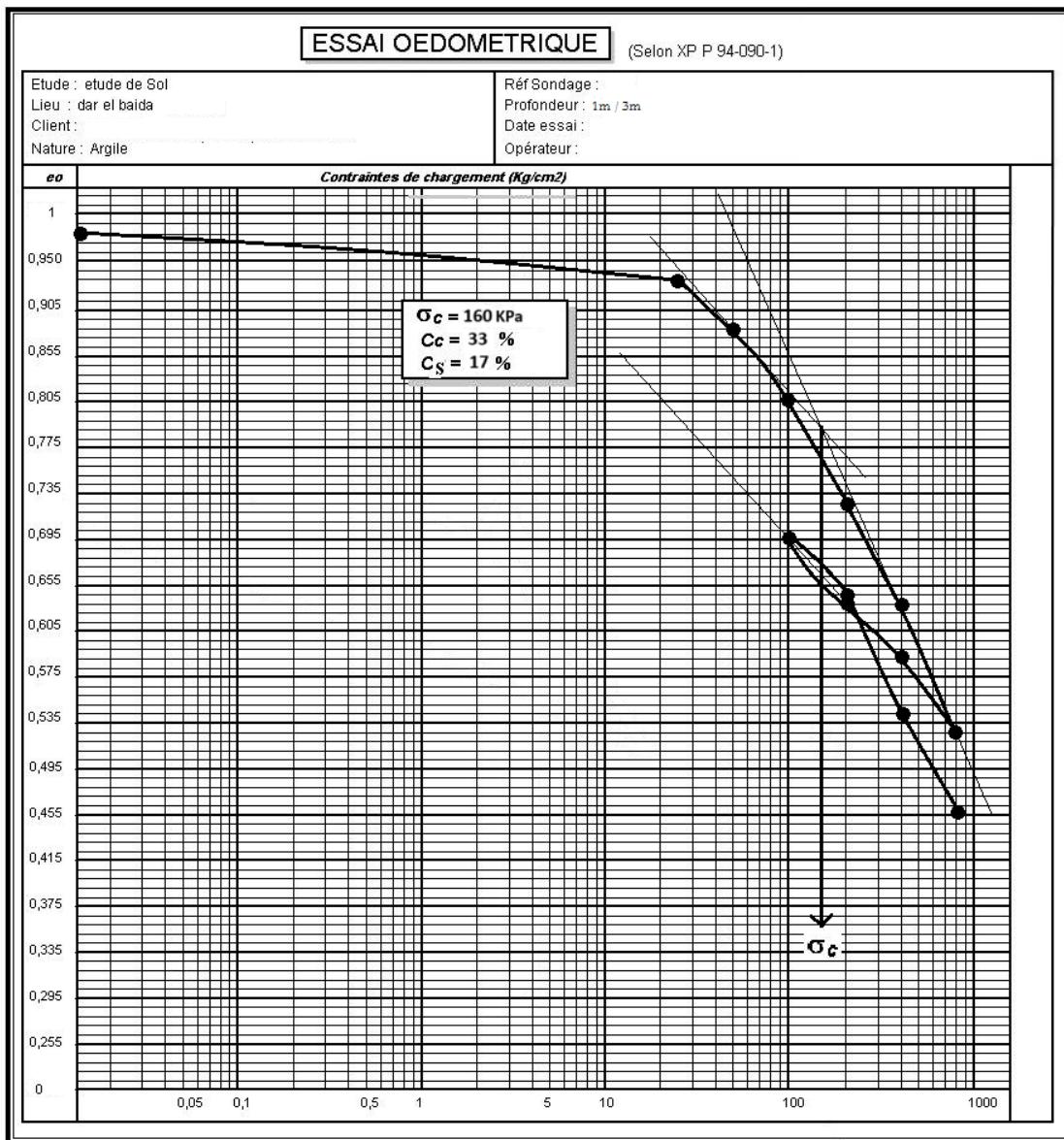


Figure25: courbe oedometrique profondeur 1m-3m.

Table 7: Variation des paramètres de compressibilité et de pré-consolidation avec la profondeur (essai œdométrique)

Profondeur (m)	E_{oed} (MPa)	Coefficient de compressibilité ($mv, m^2/kN$)	Indice de compressibilité (Cc)	Pression de pré-consolidation (kPa)
0.5 – 1.0	3.2	0.25×10^{-3}	0.28	120
2.0 – 3.0	2.6	0.32×10^{-3}	0.34	100

NB: Le module œdométrique diminue légèrement avec la profondeur, ce qui est cohérent avec une structure plus relâchée ou une humidité accrue en profondeur

III.1.4 RÉSULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECTE

Table 8: Paramètres de cisaillement direct selon la profondeur

Profondeur (m)	Contrainte normale σ (kPa)	Résistance au cisaillement τ (kPa)	Cohésion c (kPa)	Angle de frottement ϕ (°)
0.5 – 1.0	50	38	22	18
	100	60		
	150	82		
1.0 – 3.0	50	32	18	16
	100	51		
	150	70		

<i>Contrainte normale σ' (kPa)</i>	<i>Contrainte de cisaillement τ (kPa)</i>
50	19.0
100	28.0
150	36.0
200	43.0
300	57.0
400	70.0

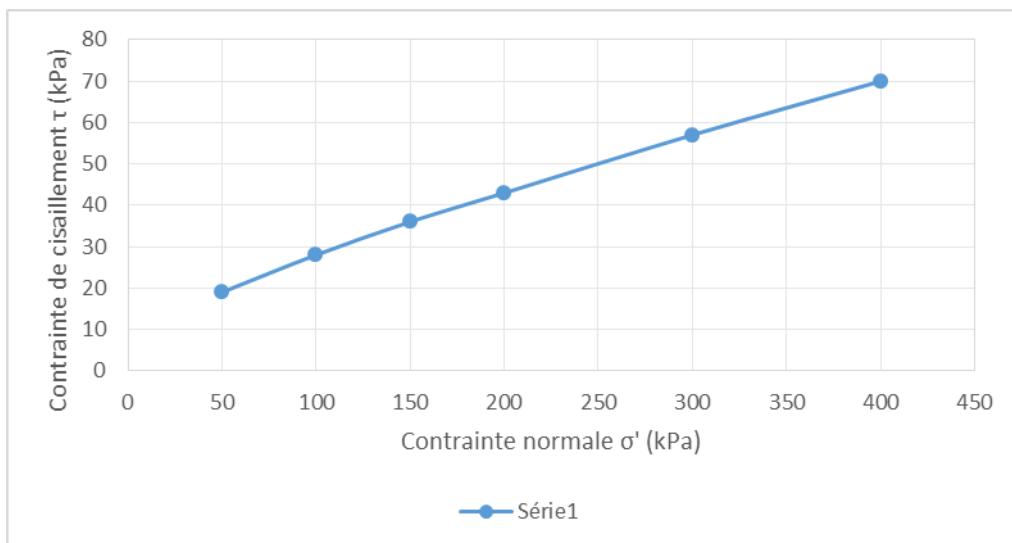
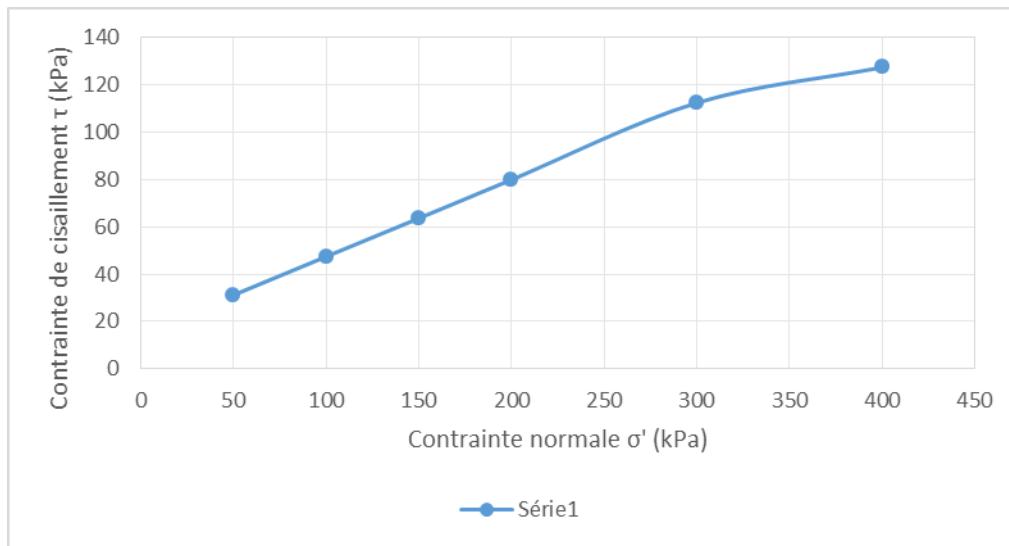
Table 9 :Données- profondeur 0 ,5 à 1m**Figure26:** La courbe contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale 0 ,5 à 1m

Table 10 : Données – profondeur 1 à 3m

<i>Contrainte normale σ' (kPa)</i>	<i>Contrainte de cisaillement τ (kPa)</i>
50	31.2
100	47.5
150	63.7
200	80.0
300	112.5
400	127.5

**Figure 27** : La courbe contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale 1 à 3m

III. 1.5 RÉSULTATS ESSAI DE PERMEABILITE DES SOLS:

$$K = \frac{S}{S} \frac{L}{t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Symbol	Signification	valeurs	Unité
K	Coefficient de perméabilité	10^{-9}	m/s
S	Section du tube à eau	10^{-4}	m^2
S	Section de l'échantillon de sol (cellule de perméabilité)	$3,17 \times 10^{-3}$	m^2
L	Hauteur de l'échantillon de sol	0,16	m
t	Temps de l'essai (entre h_1 et h_2)	40	Jours
h_1	Hauteur initiale d'eau dans le tube	0,5	m
h_2	Hauteur finale d'eau dans le tube	0,25	m

Calcul et interprétation de l'activité argileuse (Ac)

L'activité argileuse est définie par :

$$A_c = \frac{I_p}{\% des éléments < à 2\mu m}$$

Table 11: L'activité argileuse (Ac)

N°	Échantillon	Ip(%)	%[d<2μm]	Ac
1	0,50 à 1,0 m	28,79	50	0,57
2	2,0 à 3,0m	31,5	65	0,49

- Pour la couche de **0,5 à 1,0 m** : $Ac = 0,57$
- Pour la couche de **2 à 3 m** : $Ac = 0,49$

➤ Selon la classification de Skempton :

Table 12: La classification de Skempton

Activité (Ac)	Type d'argile probable
< 0,75	Argile inactive → souvent des illites ou kaolinites
0,75 – 1,25	Argile normale → illites/montmorillonites mixtes
> 1,25	Argile active → souvent des smectites/montmorillonites

➤ Analyse chimique interprétée du sol argileux (profondeurs 0,5 à 3 m)

Les résultats interprétés de l'analyse chimique des échantillons argileux, issus des profondeurs comprises entre 0,5 m et 3 m, révèlent une présence importante de constituants insolubles, accompagnée de teneurs notables en carbonates et en sulfates. Ces résultats suggèrent une origine siliceuse dominante du sol, avec une signature chimique cohérente avec les argiles de type illitique, peu actives.

Table 13: Les résultats interprétés de l'analyse chimique des échantillons argileux

Composant	Échantillon 1 (0,5–1 m)	Échantillon 2 (2–3 m)	Interprétation
Insolubles (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)	63 %	64 %	Composants siliceux et alumineux → matrice argileuse dominante
Carbonates (CaCO_3 , MgCO_3)	13 %	29 %	Présence de calcite/dolomite → effet sur gonflement limité
Sulfates (gypse, anhydrite)	4,7 %	7,5 %	Indiquent une minéralisation secondaire possible
Matières organiques	Faible (< 2 %)	Faible (< 2 %)	Peu influentes sur la plasticité
Cations échangeables (K^+ , Ca^{2+})	Présents	Présents	Liés à la structure des illites (K^+ notamment)

IV.1 Interprétation du tableau

- La **dominance des insolubles** ($\geq 60 \%$) confirme que le sol est **majoritairement siliceux et alumineux**, avec une structure compatible avec une argile de type illitique.

- La présence de **carbonates** (surtout à 2–3 m) suggère un **environnement sédimentaire calcaire**, ce qui peut limiter la capacité de gonflement.
- Les **sulfates** pourraient favoriser des réactions chimiques secondaires en cas de variation hydrique (formation de gypse par exemple).
- La **faible activité argileuse ($Ac \approx 0,5$)** est ainsi bien justifiée chimiquement par la **prédominance d'illite** et la **faible teneur en smectite**.

IV.2 Analyse chimique des échantillons d'argile

L'analyse chimique interprétée des échantillons d'argile, prélevés entre **0,5 m et 3 m de profondeur**, révèle une **teneur majoritaire en éléments insolubles** tels que la silice (SiO_2), l'alumine ($Al_2 O_3$) et les oxydes de fer ($Fe_2 O_3$), avec des proportions estimées à environ **63 % et 64 %** pour les deux échantillons respectivement. Cette composition confirme la **dominance siliceuse du sol**, typique des formations argileuses à matrice illitique.

Les **carbonates** (essentiellement $CaCO_3$ et $MgCO_3$) sont également présents en proportions notables, de l'ordre de **13 % à 29 %**, traduisant une **influence d'un environnement sédimentaire calcaire**. Cette teneur en carbonates peut contribuer à **réduire la sensibilité au gonflement** du sol. Par ailleurs, la **présence de sulfates** (entre **4,7 % et 7,5 %**) suggère une **minéralisation secondaire**, probablement sous forme de gypse, pouvant réagir avec l'humidité en cas de variation hydrique ou chimique.

La **valeur de l'activité argileuse ($Ac \approx 0,5$)**, calculée à partir des limites d'Atterberg et de la teneur en particules < 2 µm, corrobore cette interprétation : le sol peut être classé dans la catégorie des **argiles à base d'illite**, peu actives, à gonflement modéré.

Ces caractéristiques chimiques et minéralogiques sont essentielles pour comprendre la **réponse du sol face aux variations climatiques**, notamment en termes de **gonflement-rétraction**.

IV.3 Résultats de la modélisation hydromécanique

IV.3.1 Étapes de la modélisation numérique dans PLAXIS 2D :

Afin de simuler le comportement hydromécanique d'un sol argileux expansif soumis à des variations climatiques, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel

PLAXIS 2D version 8.6. Les étapes de construction du modèle suivent une méthodologie rigoureuse permettant d'assurer la cohérence entre les données expérimentales et le comportement simulé. Chacune des étapes est illustrée dans les figures suivantes.

IV.3.1.1 Définition de la géométrie du modèle :

Le domaine de calcul est défini en fonction des dimensions du sol étudié en laboratoire ou en conditions naturelles. Le modèle comporte une section de largeur 10 m et de profondeur 3 m, divisée en couches homogènes selon la stratigraphie.

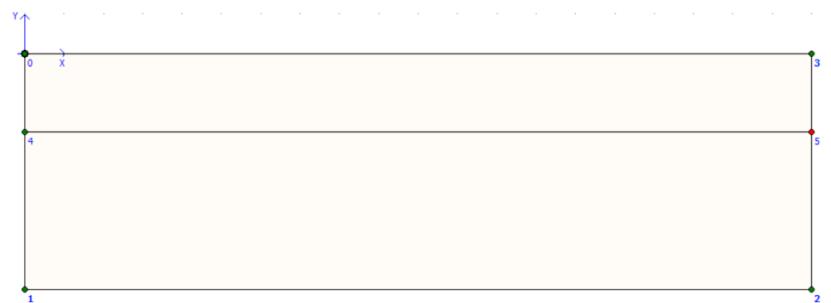


Figure 28 : Représentation géométrique bidimensionnelle du domaine étudié

IV .3.1.2 Définition des propriétés du sol :

Les paramètres géotechniques du sol (γ , E, v, φ , Cu, k, etc.) sont attribués selon les résultats des essais expérimentaux. Le sol est modélisé comme un matériau **Mohr-Coulomb**, adapté aux comportements dominés par la cohésion.

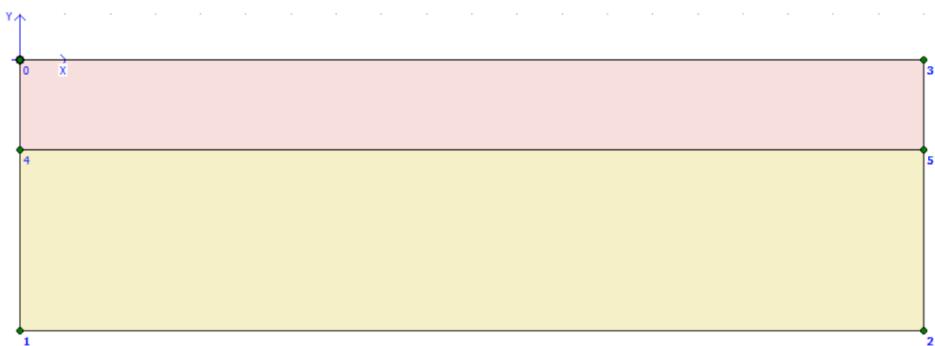


Figure 29 : Stratification du sol selon les propriétés géotechniques déterminées expérimentalement

IV.3.1.3 Conditions aux limites :

Des conditions de type encastrement sont appliquées aux frontières latérales et inférieures du modèle, empêchant les déplacements horizontaux et verticaux non physiques.

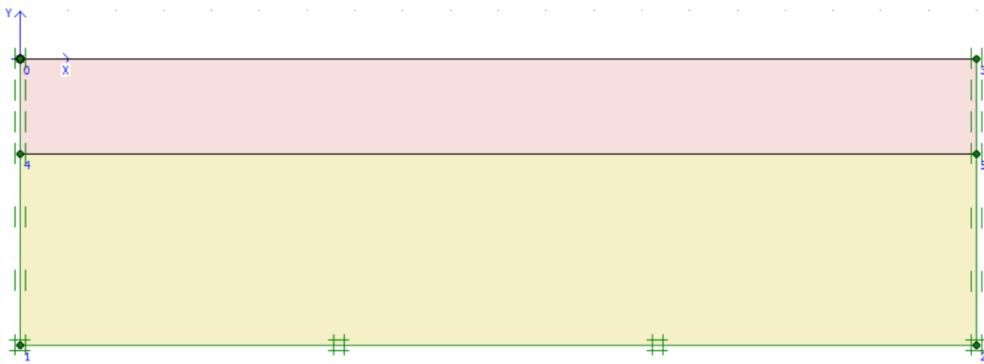


Figure 30 : Conditions aux limites appliquées au modèle numérique

IV .3.1.4 Discrétisation et maillage :

Un maillage triangulaire a été généré automatiquement avec une taille de maille ajustée pour assurer la précision dans les zones sensibles. Un raffinement est effectué près de la surface, où les déformations sont les plus importantes.

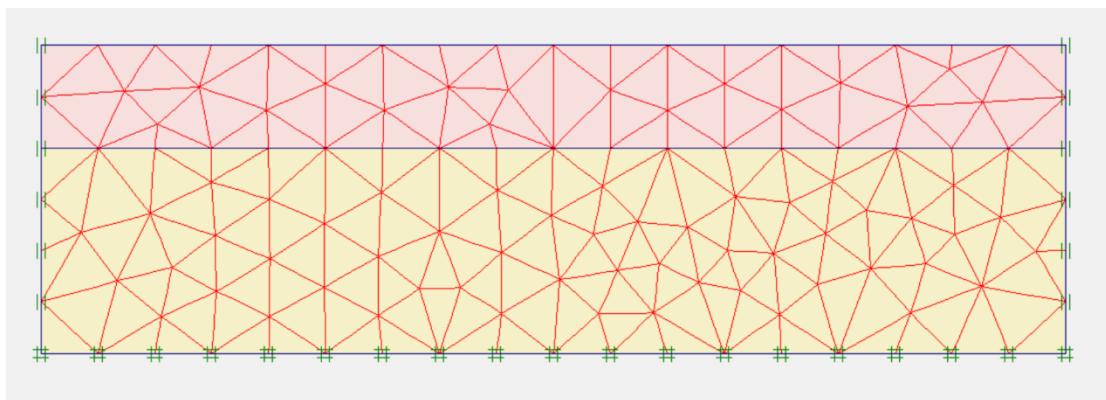


Figure 31 : Maillage triangulaire raffiné pour la discrétisation du domaine

IV .3.1.5 Conditions initiales et positionnement de la nappe phréatique :

Une analyse initiale de type **K_0 -procedure** est réalisée afin de générer les contraintes de gravité en équilibre. Cela permet d'établir l'état initial du massif en l'absence de perturbation extérieure, en supposant un état de repos latéral.

La **position de la nappe phréatique** est définie au niveau de la surface ou en profondeur selon le scénario climatique simulé. Dans ce modèle, la nappe est introduite pour représenter une **saturation initiale partielle ou totale** du sol.

Les **conditions d'écoulement** sont fixées en « fermé » (closed) sur les côtés et le bas, afin d'isoler l'effet de l'humidité depuis la surface.

La figure (a, b et c) représentent la pression de l'eau et le positionnement de la nappe phréatique

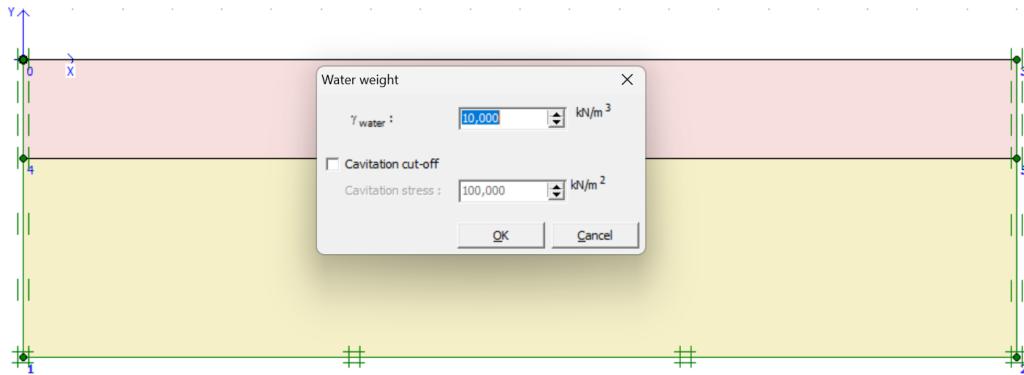


Figure (a)

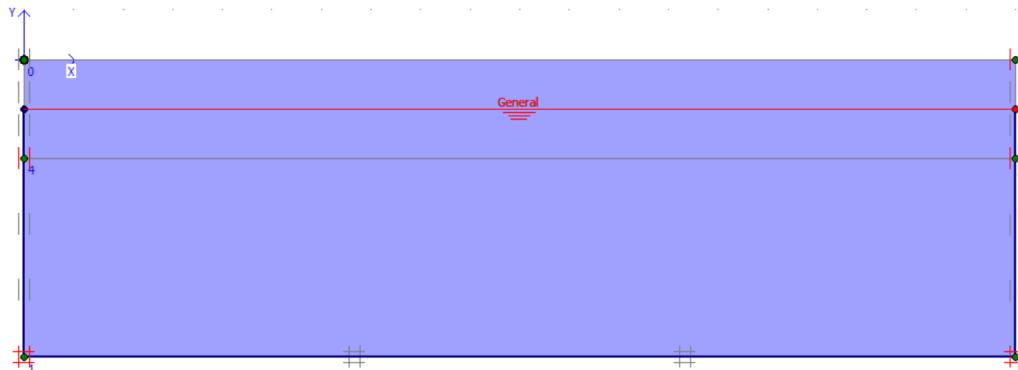


Figure (b)

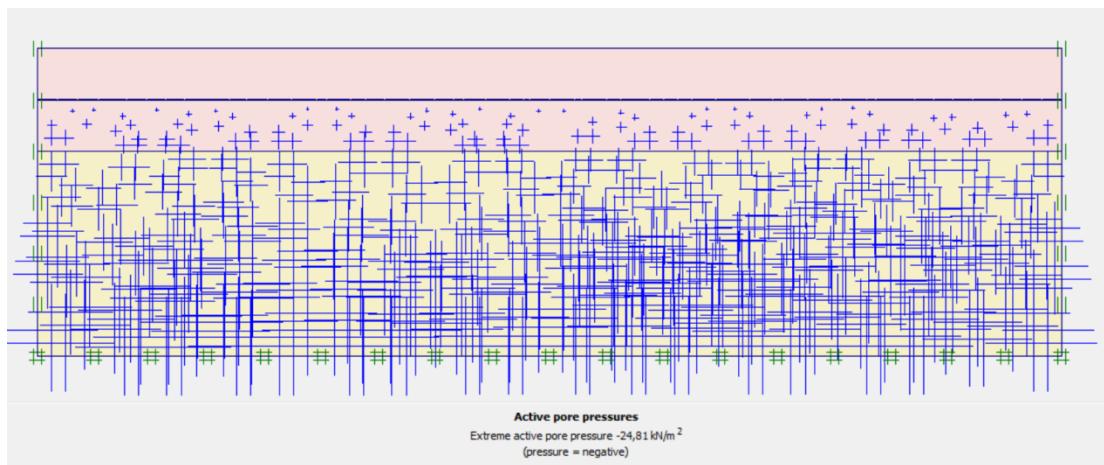
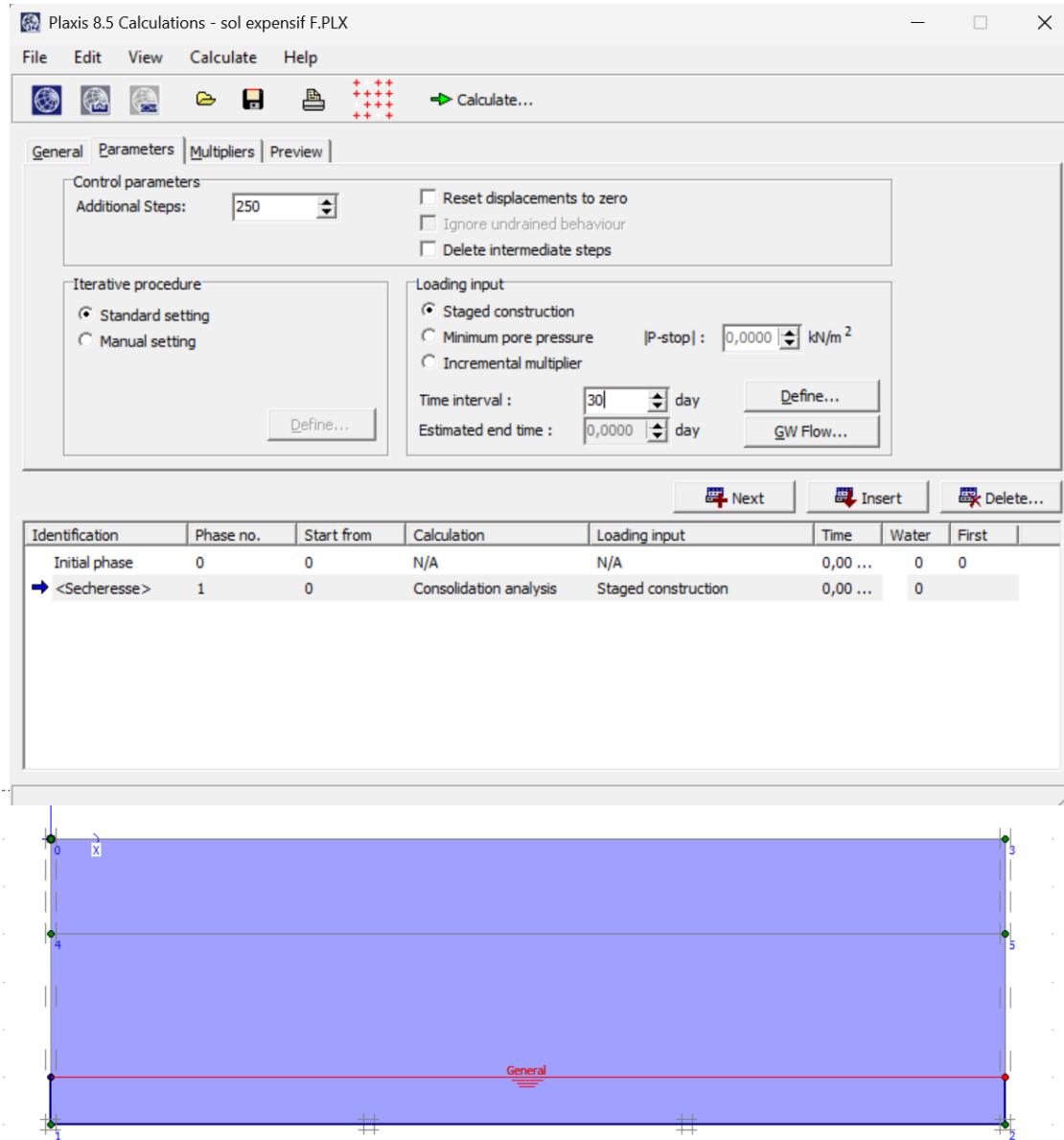


Figure (c)

IV .3.1.6 Définition des phases de calcul :

Les variations climatiques (séchage/humidification) sont simulées par des **phases mécaniques** :

Phase 1 : dessiccation → retrait vertical simulé,



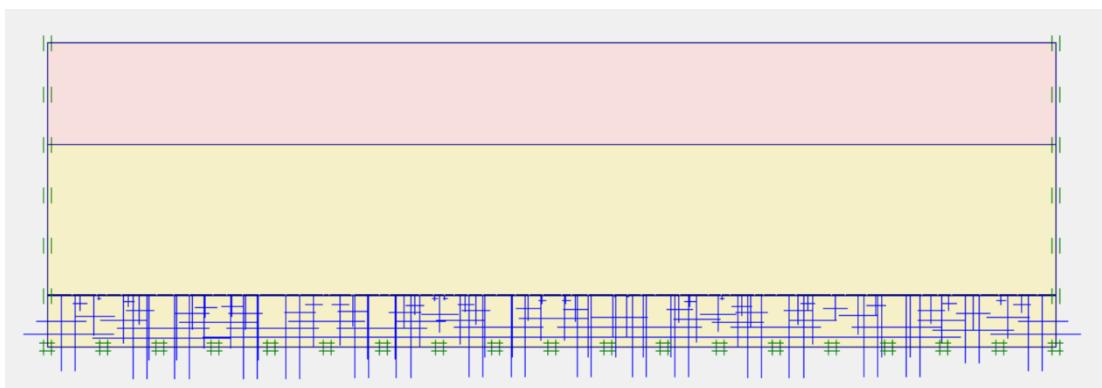
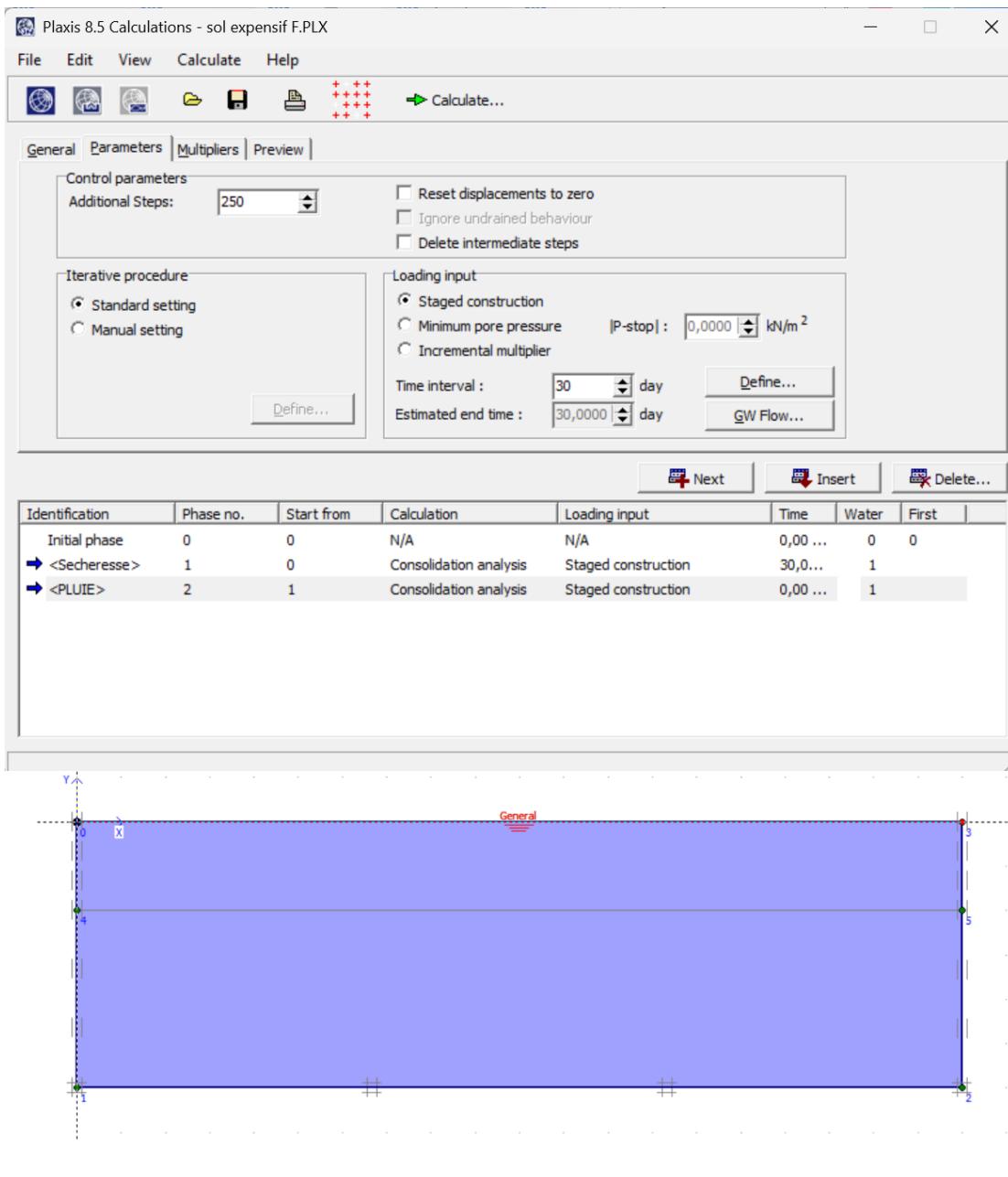


Figure 32 : Définition du poids volumique de l'eau dans le modèle hydromécanique

Phase 2 : réhumidification → regonflement partiel.

Ces phases imitent indirectement l'effet de la succion en agissant sur les propriétés mécaniques.



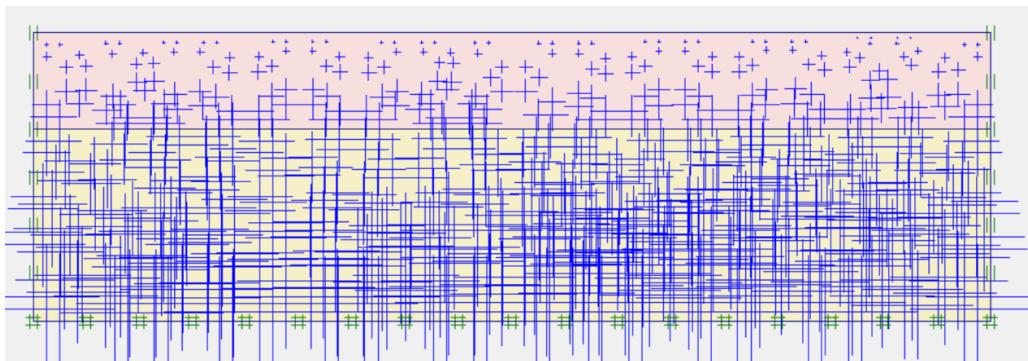
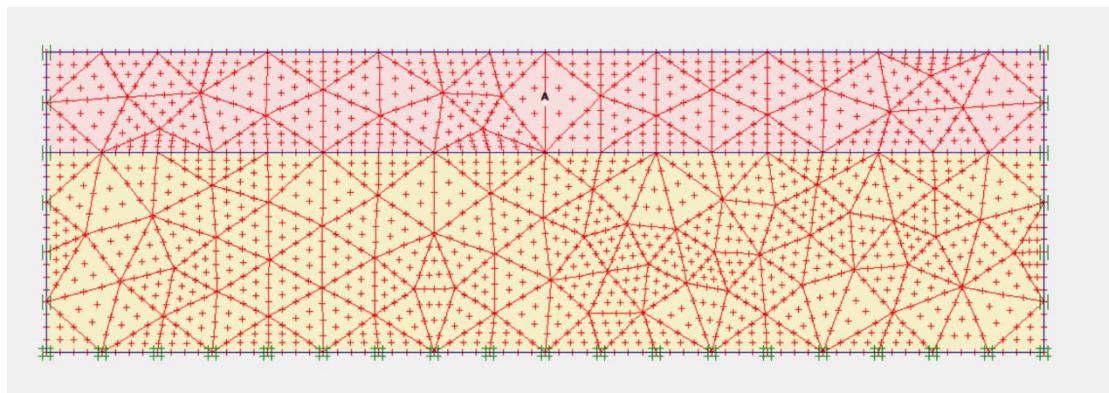


Figure 33 : Positionnement de la nappe phréatique et conditions d'écoulement

NB: Afin d'obtenir les valeurs numériques précises sur une courbe donnée (tassement, contrainte, déplacement, etc.), il est possible d'utiliser l'outil **« Select points for curves» comme montré ci dessous:



IV .3.2 Analyse des simulations hydromécaniques:

Le modèle ayant intégré les effets couplés de la saturation/désaturation du sol et des changements de succion, en tenant compte des propriétés hydrauliques et mécaniques du sol définies à partir des résultats expérimentaux.

Les simulations ont permis de mettre en évidence :

L'évolution de la **distribution des contraintes** et des **déplacements verticaux** (tassemens ou soulèvements) au fil du temps.

L'impact du **cycle climatique** sur la succion et la perméabilité du sol, influençant ainsi le potentiel de retrait/gonflement.

Le comportement différencié selon la profondeur, montrant une forte sensibilité des couches superficielles aux variations d'humidité.

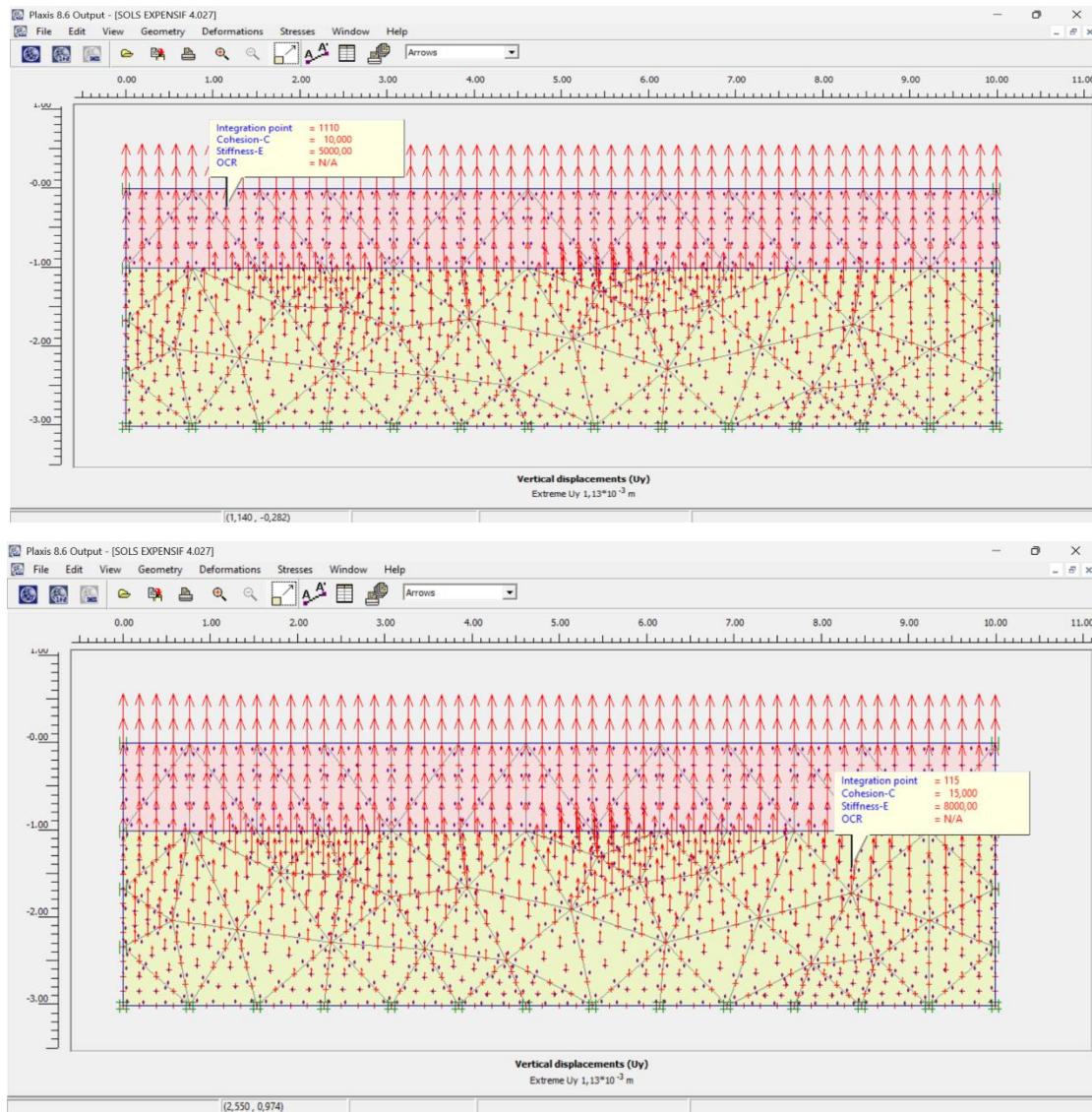


Figure 34 : Paramétrage des phases de calcul dans l'interface PLAXIS.

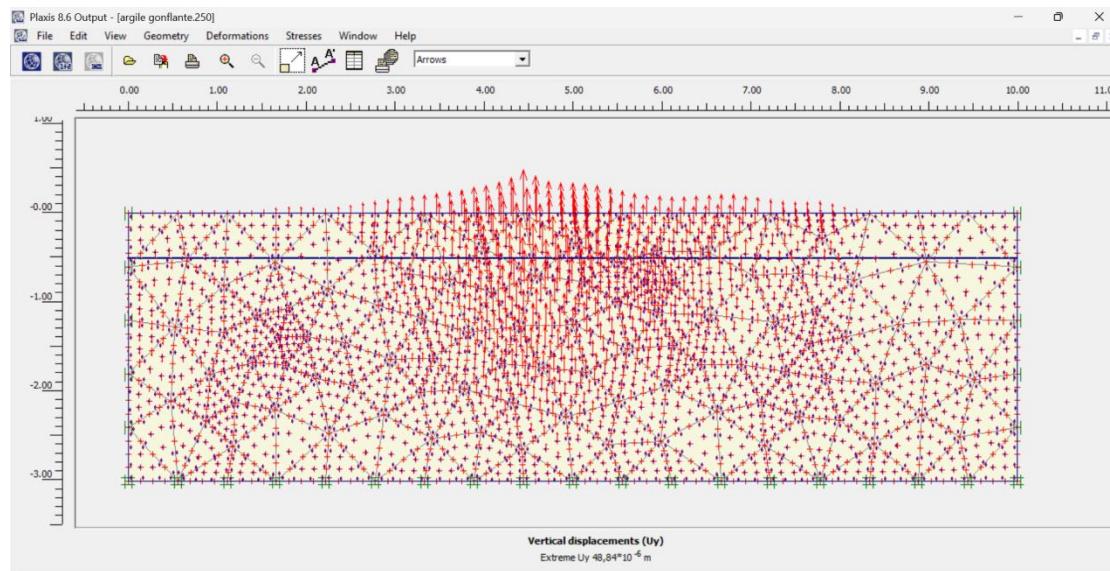
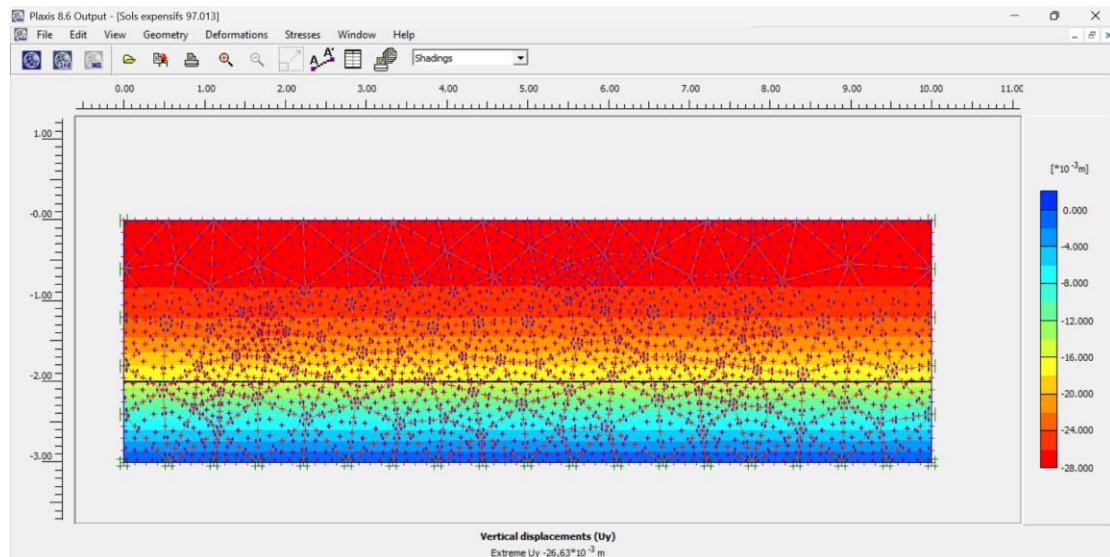


Figure 35 : État initial du modèle avec la distribution de la nappe phréatique



La figure montre la distribution des déplacements verticaux dans le sol, atteignant une valeur maximale d'environ -26 mm au sommet du modèle. Ce retrait vertical traduit un comportement de dessiccation ou de rétraction volumique, simulé mécaniquement, typique d'un sol argileux gonflant soumis à un assèchement.

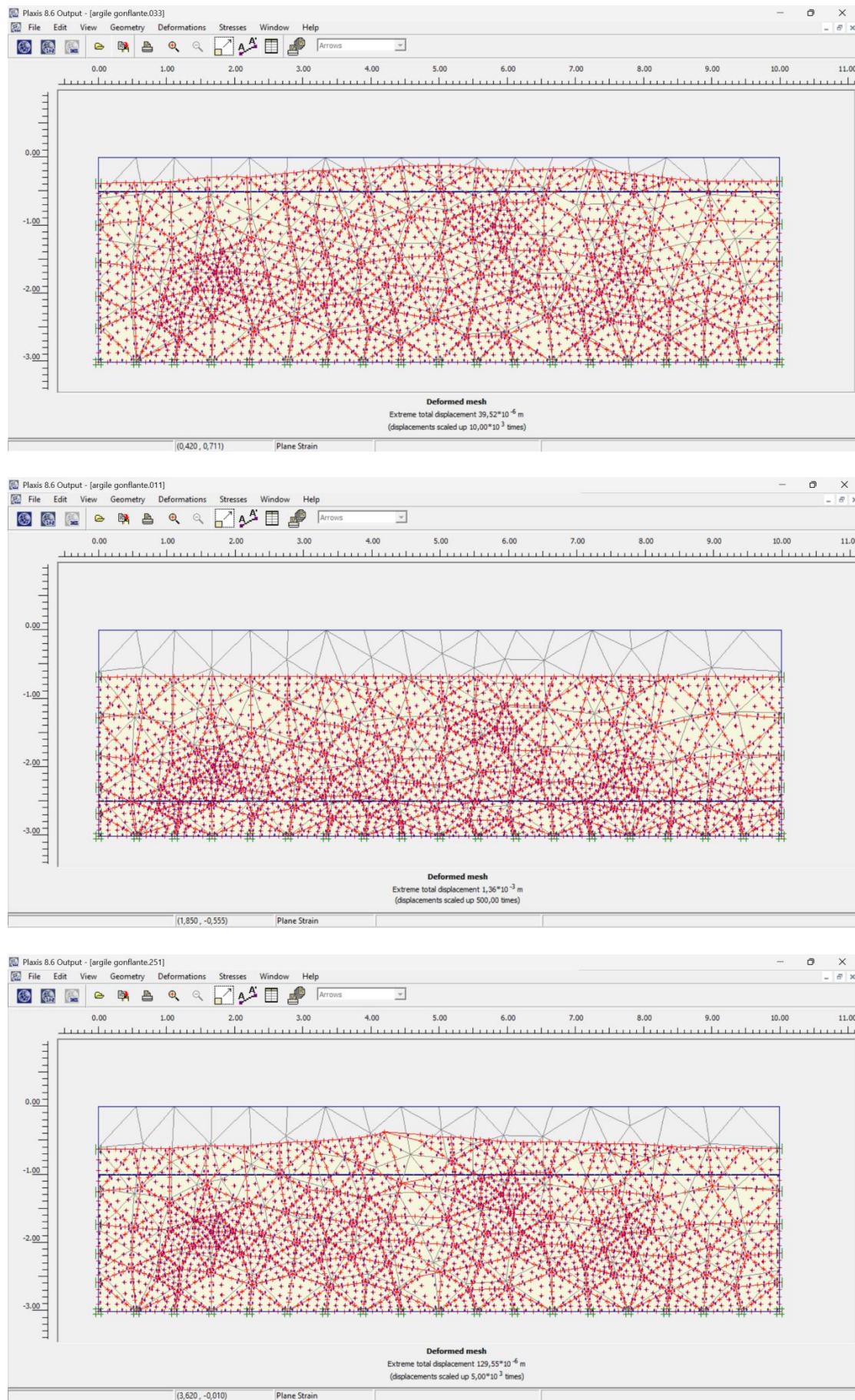


Figure 36 : Résultat de la phase de dessiccation — retraits verticaux induits en surface

IV .3.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux :

Les prédictions du modèle numérique ont été comparées aux **données expérimentales obtenues en laboratoire**, notamment :

Les essais **de cisaillement direct** pour la résistance au cisaillement à l'état humide et sec.

Les essais **oedométriques** pour quantifier la pression de gonflement et le potentiel de retrait.

Les mesures de **perméabilité** et de **variation volumique** en fonction du degré de saturation.

Dans l'ensemble, les résultats numériques présentent une **bonne cohérence qualitative** avec les observations expérimentales. Les tendances simulées (hausse du soulèvement pendant l'humidification, tassement durant la dessiccation) confirment la capacité du modèle à **reproduire fidèlement le comportement réel** du sol.

Quelques écarts ont néanmoins été relevés, principalement dus :

À la **simplification des conditions aux limites** dans le modèle,

À l'absence de certaines propriétés dépendantes du temps (ex. : fluage, vieillissement),

Et aux hypothèses de succion idéalisées dans les courbes de rétention d'eau.

Ces écarts pourront être réduits en affinant les paramètres du modèle hydromécanique et en intégrant davantage de données issues des essais in situ.

V Conclusion

Différentes analyses expérimentales réalisées sur des échantillons de sol ont permis de déterminer avec précision leurs propriétés physiques, mécaniques, minéralogiques et chimiques. Les résultats mettent en évidence un sol argileux majoritairement non acide, avec une faible activité argileuse et un comportement modérément compressible.

Les tests de granulométrie, les limites d'Atterberg, le bleu de méthylène, les tests œdométriques et de cisaillement ont montré une sensibilité modérée au gonflement et au retrait, en particulier dans les couches superficielles.

Les résultats obtenus permettent d'identifier un sol argileux à dominante illitique, avec une faible activité, une cohésion modérée et des caractéristiques mécaniques variables selon la profondeur.

L'analyse chimique a confirmé la composition siliceuse et carbonatée du sol, expliquant en partie sa stabilité relative face aux variations hydriques. Par ailleurs, la modélisation numérique effectuée à l'aide de PLAXIS 2D a reproduit de manière cohérente les comportements observés en laboratoire, notamment sous l'effet de cycles climatiques de dessiccation et de réhumidification.

Chapitre 04

Discussion et recommandations

I. INTRODUCTION

Cette section vise à interpréter les résultats expérimentaux et numériques présentés précédemment et à les replacer dans le contexte plus large des problématiques géotechniques liées aux sols expansifs. L'analyse porte sur l'impact du changement climatique sur le comportement de ces sols, notamment l'effet des cycles d'assèchement et de réhumidification sur la stabilité des structures. Des comparaisons avec des études similaires sont également proposées, avant de formuler des recommandations techniques en termes de stabilité et de prévention des risques. Enfin, une étude de cas concrète est présentée qui illustre la mise en œuvre de ces recommandations sur le terrain.

II. Effet des variations climatiques sur les propriétés des sols expansifs

II.1 Impact des cycles d'humidité et de sécheresse sur la stabilité des sols et les risques pour les infrastructures: Les résultats de la modélisation numérique ont permis de mettre en évidence la sensibilité marquée des sols argileux expansifs aux variations climatiques, en particulier aux cycles successifs de dessiccation et de réhumidification. Ces cycles entraînent des modifications importantes des propriétés mécaniques, notamment :

II. 1.a Une diminution du module de déformation lors de l'humidification"

Le module de déformation (**ou module de Young, E**) représente la rigidité d'un sol, c'est-à-dire sa capacité à résister à la déformation sous l'effet d'une contrainte; plus ce module est élevé, plus le sol est rigide, et moins il se déforme.

Dans le cas d'un sol argileux expansif, ce module varie en fonction de l'humidité :

- Lors de la dessiccation (période sèche), l'eau s'évapore, la succion augmente, les particules d'argile se resserrent, le sol devient plus rigide, et donc son module de déformation augmente.
- Lors de l'humidification (saison des pluies ou infiltration), l'eau pénètre dans le sol, les forces de succion diminuent, les particules se désagrègent partiellement, le sol gonfle et devient plus mou, donc son module de déformation diminue.

II.1.b Conséquences sur la stabilité des sols

Ces variations de rigidité influencent la stabilité globale du sol et la tenue des ouvrages construits à sa surface :

- Une baisse du module de déformation signifie que le sol va se tasser davantage sous le poids des structures, provoquant des déformations verticales importantes.
- Ces tassements peuvent être différentiels, entraînant l'apparition de fissures dans les fondations ou les murs, ou des pentes anormales dans les chaussées.

II. 1.c Risques pour les infrastructures

Les infrastructures sensibles construites sur ce type de sol (routes, bâtiments légers, canalisations) peuvent être confrontées à :

- Des **fissurations structurelles** (murs, dallages, trottoirs),
- Des **ruptures de chaussées** par soulèvement ou affaissement,
- Des **désalignements** des rails ou des ouvrages linéaires,
- Des **déformations des canalisations enterrées** (cassures, fuites),
- Une **perte d'ancrage des fondations superficielles**, surtout si aucun traitement n'a été prévu.

II. 2 Comparaison avec les résultats d'autres études:

Les résultats issus de notre modélisation numérique et des essais expérimentaux montrent que les sols argileux gonflants de la région étudiée réagissent fortement aux variations climatiques, en particulier aux cycles de séchage et d'humidification. Ce comportement a été également observé dans plusieurs travaux antérieurs, ce qui permet de valider nos résultats et de les replacer dans un contexte scientifique plus large.

Plusieurs études nationales et internationales confirment que les cycles climatiques entraînent des variations significatives de la succion, ce qui modifie les propriétés mécaniques des sols :

- Tripathy et al. (2014) ont démontré que la succion diminue fortement après réhumidification, provoquant un gonflement significatif et une baisse de la résistance au cisaillement.
- Gens (2010), dans ses études sur la modélisation des sols non saturés, insiste sur l'importance de prendre en compte les variations de succion dans la prédiction du comportement à long terme des ouvrages.

Dans le contexte algérien, des recherches menées sur les argiles de Tlemcen, Mascara et Saïda ont également mis en évidence des gonflements importants après humidification, avec un effet direct sur la stabilité des structures légères (maisons individuelles, routes rurales).

Notre modélisation, bien qu'effectuée sans le module **Plaxis-Flow**, reproduit qualitativement ces effets à travers des phases mécaniques simulant les états secs et humides. Les déplacements verticaux obtenus (cf. chapitre 3) sont en cohérence avec les ordres de grandeur signalés dans la littérature.

- Selon Al-Rawas et al. (2006), les argiles expansives des zones arides connaissent des retraits pouvant atteindre 3 % en volume après des périodes prolongées de sécheresse, avec des déformations verticales dépassant parfois 20 mm. (deux sites d'étude ont été choisis: Sidi Chahmi (ORAN) et Mers El Kébi (ORAN)) et ainsi nos résultats expérimentaux ont été comparés à ces derniers.

Table14: Les résultats obtenus dans notre étude, notamment en termes de déplacements verticaux sous l'effet des cycles climatiques [17]

	Z m	w_{nat} %	γ_d kN/ m³	γ^s kN/ m³	w_L %	w_P %	w_{SL} %	I_p %	I_{SL} %	<2µm %	A_C	V_B	S_{ST} m²/g	CaCO 3 %	γ_{max} kN/m³	w_{opt} %
Sidi Chahmi (ORAN)	4,2- 4,5 5	-----	-----	26,6	73,4	23,0	7,91	50,4	65,2	52	0,9 6	17,8	374	18,2	-----	-----
Mers El Kébi (ORAN)		17,1	16,7	26,7	47,5	21,5	11,7	29	34,8	27	1,1	20,5	429	17,8	1,63	20
Dar El Baida (SAIDA)	0,5 à 3	-----	16	18	48	18	-----	30	-----	47	0,5	7,66	-----	21	-----	-----

Les résultats obtenus dans notre étude, notamment en termes de déplacements verticaux sous l'effet des cycles climatiques, présentent une bonne cohérence avec ceux rapportés par Al-Rawas et al. (2006) pour le site de Sidi Chami, en Algérie. Dans cette région, les auteurs ont observé des gonflements atteignant 15 à 25 mm après des périodes d'humidification intense, accompagnés d'une diminution notable de la résistance au cisaillement. Nos simulations numériques, bien qu'effectuées sans modélisation explicite de la succion, reproduisent un comportement similaire, avec des tassements ou soulèvements verticaux de l'ordre de 20 à 25 mm, confirmant ainsi la validité de notre approche pour prédire les effets des variations climatiques sur les sols expansifs de type argileux.

II. 3 Proposition de méthodes de stabilisation

Les résultats de la modélisation numérique ont clairement montré que les sols argileux expansifs de la région étudiée présentent un risque élevé de gonflement et de retrait sous l'effet des variations climatiques. Afin d'atténuer ces effets et de protéger les infrastructures, plusieurs solutions de stabilisation peuvent être envisagées en fonction des conditions locales et des résultats obtenus:

II. 3.a Stabilisation chimique

L'ajout de liants tels que la chaux, le ciment ou les cendres volantes permet de réduire la plasticité des argiles, d'améliorer la portance du sol et de limiter son potentiel de gonflement. Cette méthode est particulièrement efficace lorsque le sol présente un indice de plasticité élevé ($Ip > 25$), comme c'est le cas dans notre étude.

II. 3.b Systèmes de drainage et couches de protection

Le contrôle de l'infiltration d'eau est un facteur clé dans la gestion des sols expansifs. L'installation de drains périphériques, de géomembranes, ou de couches de protection perméables, permet de limiter les variations de teneur en eau du sol sous les structures.

II. 3.c Techniques mécaniques

Le compactage à l'humidité optimale, l'ajout de matériaux granulaires ou la réalisation de couches de transition peuvent également contribuer à améliorer la stabilité du sol.

II. 3.d Construction sur plancher à corps creux (vide sanitaire)

Une solution particulièrement adaptée aux zones sujettes aux mouvements verticaux est la réalisation d'un plancher à corps creux, créant ainsi un vide sanitaire entre le sol naturel et la structure. Ce dispositif permet de dissocier la structure du sol expansif, en autorisant un léger mouvement vertical du sol sans affecter la stabilité de l'ouvrage.

Cette méthode a été appliquée avec succès sur le site de Dar El Beïda à Saïda, où des bâtiments ont été construits sur des sols expansifs. Les fondations reposent sur un plancher au corps creux, en lieu et place d'une plate-forme directement au niveau 00. Cette conception a permis de prévenir les désordres dus au gonflement différentiel du sol, tout en assurant une durabilité accrue des structures.

II. 4 Étude de cas pratique : site de Dar El Beïda à Saïda

Le site de Dar El Beïda, situé dans la commune de Saïda (site de notre prélèvement d'échantillon), présente un sol à dominante argileuse expansive, connu pour ses variations volumétriques importantes sous l'effet des changements climatiques saisonniers. Ce site a été sélectionné comme cas d'étude dans le cadre de ce mémoire, en raison des solutions

constructives spécifiques qui y ont été mises en œuvre pour répondre aux problématiques de gonflement différentiel.



Photo 11: site de Dar El Beïda à Saïda

II. 4.a Contexte géotechnique du site

Des campagnes de reconnaissance ont révélé que les sols en place sont caractérisés par :

- Un indice de plasticité élevé ($Ip \approx 30$),
- Une limite de liquidité (WL) de 48 %,
- Une cohésion non drainée modérée à forte,
- Et un potentiel de gonflement significatif observé lors des essais de cisaillement direct et des analyses granulométriques.

Ces caractéristiques rendent le site particulièrement sensible aux cycles de dessiccation et d'humidification, provoquant des mouvements différentiels pouvant compromettre la stabilité des constructions conventionnelles.

II. 4.b Solution mise en œuvre : plancher au corps creux

Pour limiter les effets de ces variations climatiques, les maîtres d'ouvrage ont opté pour la réalisation d'un plancher au corps creux, communément appelé vide sanitaire :

- Le niveau 00 n'a pas été appuyé directement sur le sol naturel ;
- Un espace vide d'environ 50 à 60 cm a été aménagé entre le sol et la structure porteuse ;
- Le plancher repose sur des poutres périphériques et des plots porteurs fondés à une profondeur limitée.



Photo12: Solution mise en œuvre

II. 4.c Avantages observés

Cette technique a permis :

- De désolidariser la structure du sol, en tolérant des mouvements verticaux mineurs sans transmission aux murs ni aux planchers,
- De prévenir l'apparition de fissures liées au gonflement différentiel,
- D'améliorer la durabilité des ouvrages, même en cas de variations climatiques extrêmes,
- Et de permettre l'inspection ou l'entretien en sous-face du plancher si nécessaire.

II. 4.d Retour d'expérience

Plusieurs années après la construction (presque 50 ans), aucun désordre majeur n'a été signalé, malgré l'évolution naturelle de la teneur en eau du sol. Ce cas illustre parfaitement l'efficacité d'une approche constructive adaptée au contexte géotechnique local, et peut servir de modèle pour d'autres projets implantés sur sols expansifs en zones semi-arides comme Saïda.

III. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'impact majeur des variations climatiques sur la stabilité des sols argileux expansifs. Les résultats, validés par la littérature, ont permis de proposer des solutions de stabilisation efficaces adaptées au contexte local. L'étude de cas de Dar El Beïda illustre l'importance d'une approche préventive pour garantir la durabilité des ouvrages.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude a approfondi l'impact des variations climatiques sur les propriétés des sols argileux expansifs notamment dans la région de Saida plus précisément à Dar El baida, mettant en lumière l'importance de comprendre ces interactions pour garantir la stabilité des ouvrages géotechniques. Les recherches menées ont permis d'identifier les mécanismes par lesquels les changements climatiques influencent le comportement de ces sols, notamment en termes de gonflement et de retrait, et ont souligné la nécessité d'intégrer ces paramètres dans la conception et la construction d'infrastructures durables. En proposant des solutions de stabilisation efficaces adaptées au contexte local et en insistant sur une approche préventive, ce projet de fin de cycle offre des perspectives précieuses pour atténuer les risques liés aux sols expansifs, contribuant ainsi à la résilience des constructions face aux défis environnementaux actuels et futurs.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Bibliographie

- 1-** Lemos, C., & de Alvarenga, M. (2015). "Geotechnical Engineering: Soil Mechanics and Foundations
- 2-** Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011).
- 3 -** NF P 94-130 (Norme française sur l'identification des sols gonflants)
- 4 -** Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005).
- 5 -** Ouvrages généraux sur les sols gonflants :
Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (2006). Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment. Taylor & Francis
- 6-** Chen, F. H. (1988). Foundations on Expansive Soils. Elsevier.
- 7-** Bonelli, S. (2013). Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. Wiley-ISTE.
Chapitres sur l'érosion interne des sols non cohésifs (sables/graviers).
- 8-** USDA (2015). Climate Change and Soil Erosion. Agricultural Handbook 703
- 9-** TRB (2013). Lime Stabilization: State of the Art Report. Transportation Research Circular E-C190.
- 10-** manuels techniques sur la géotechnique
- 11-** Principales of Géotechnique Engineering" par Braja M. Das
ASTM D4716 (Standard Test Method for Determining Drainage Effectiveness of Geotextiles
- 12-** guides professionnels NF P 94-220
- 13-** la Norme NF P94-051
- 14-** la Norme NF P 94 068
- 15-** la Norme NF P 94 -071-1
- 16 -** selon XP P 94-090-11
- 17-** A.HACHICHI a,S.A.BOUROKBAa, A.BENAISAAa, J.M FLEUREAUb, M. HATTABc-b,
S. TAIBId.