



**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**



**Département de GENIE CIVIL**

**FILIERE : Génie Civil**

**SPECIALITE : Matériaux**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER**

***Par : KHELIFI Amdjed abd elmoumun et BENCHORA Djamel***

**THEME**

**Comportement des briques de terre utilisées dans la  
construction en terre dans la zone de Boussaâda sous  
chargements monotone et cyclique**

Soutenu devant le jury composé de :

<b>Dr. SEDDIKI Ahmed</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. MEKKI Lakhdar</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr. TALLAH Naoui</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. GATTOUCHE Amar</b>	<b>Université de Setif</b>	<b>Co-Encadreur</b>
<b>Dr. BELAGRAA Larbi</b>	<b>Université de M'Sila</b>	<b>Co-Encadreur</b>

**Promotion : 2019/2020**



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# REMERCIEMENTS

Au début, nous remercions Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force et la  
patience pour terminer ce travail

En second lieu, Nous remercions chacun de nos parents pour le soutien et  
les sacrifices qu'ils ont fait pour que nous terminions nos études.

nous tenons à remercier notre encadreur Dr.Tallah.N, et co-encadreur  
Dr. Guettouche .de leurs précieux conseils et de leur aide durant toute la  
période du travail.

Nous remercions également tous les enseignants, collègues et amis qui nous ont  
accompagnés de la primaire à l'université.

Et tous ceux qui ont aidé dans ce travail de près ou de loin

# *Dédicace*

Je veux remercier Dieu et remercier tous ceux qui sont avec moi pour mes peines  
et mes joies

Je présente la dédicace de mon travail à mes parents, mon père Messaoud et ma  
mère Malika, qui veillait sur mon éducation, à mes frères Ibrahim, Boumediene  
et Belkais

Et à tous les amis et la famille de près et de loin

**KHELIFI Amdjedabdelmoumun**

# *Dédicace*

Je dédiece mémoire à tous ceux qui me sont chers.

À mon père, pour tous ses sacrifices, son soutien moral et matériel.

À ma mère, pour son amour et son soutien qui m'ont permis de finir  
mes études.

À mes sœurs.

À mes frères.

À mes amis.

BEN CHOHRRA Djamel

## ملخص

يتضمن العمل الحالي دراسة نظرية نمذجة لسلوك الطوب الترابي المستخدم في البناء الترابي لمنطقة بوسعادة تحت التحميل الدوري والرتيب، ينقسم العمل إلى جزئيين: الجزء الأول عبارة عن دراسة نظرية شاملة حول تاريخ وتقنيات البناءات الترابية. خصائص التربة الخام وسلوك التربة تحت التحميل الدوري الجزء الثاني نمذجة ببرنامج بلاكسيس لاختبار القص المباشر على عناصر الطوب الترابي القادمة من بوسعادة تحت التحميل الدوري والرتيب في الأخير أظهرت النتائج أن النمذجة المستخدمة هنا ليست كاملة بما يكفي لإعطاء النتائج المتفق عليها ولكن من الممكن إعطاء تقدير تجريبي أولي لمعامل يونغ ويمكن استكمالها باختبارات أخرى أو نماذج أكثر تقدماً

الكلمات المفتاحية: الطوب الترابي، الدوري ، الرتيب، بلاكسيس

## **Résumé**

Le travail actuel comprend une étude théorique et modélisée du comportement des briques de terre utilisées dans la construction en terre de la zone de Boussaâda sous chargement cyclique et monotone. Le travail est divisé en deux parties :

La première partie consiste en une étude théorique générale de l'histoire techniques et constructives de terre crue, Propriétés et caractéristiques de la terre crue et comportement du sol sous chargement cyclique

La deuxième partie est une modélisation par le programme PLAXIS pour l'essai de cisaillement direct sur des éléments en briques de terre provenant de Boussaâda sous chargement cyclique et monotone

Enfin, les résultats ont montré que la modélisation utilisée ici n'est pas assez complète pour donner les résultats convenus, mais il est possible de donner une estimation empirique préliminaire du module de Young et elle peut être complétée par d'autres essais ou des modélisations plus poussées.

Mots clés :briques de terre , cyclique , monotone , PLAXIS

## Summary

The current work includes a theoretical and modeled study of the behavior of earth bricks used in earth construction in the Boussaâda area under cyclic and monotonic loading. The work is divided into two parts:

The first part consists of a general theoretical study of the history, techniques and construction of raw earth, Properties and characteristics of raw earth and soil behavior under cyclic loading

The second part is a modelization by the PLAXIS program for the direct shear test on elements in earthen bricks coming from Boussaâda under cyclic and monotonic loading.

Finally, the results showed that the modeling used here is not complete enough to give the agreed results, but it is possible to give a preliminary empirical estimate of Young's modulus and it can be supplemented by other tests or models. more extensive.

Key words : bricks used in earth , cyclic , monotonic , PLAXIS

# *NOTATIONS*

$\sigma_n$	(Kpa)	Contrainte normale
$\tau$	(Kpa)	Contrainte de cisaillement
$\varepsilon_n$	(mm)	Déplacement relatif normal
$\varepsilon_t$	(mm)	Déplacement relatif tangentiel
U	(mm)	Déplacement normal
W	(mm)	Déplacement tangentiel
$\sigma$	(-)	Vecteur des contraintes
$\varepsilon$	(-)	Vecteur des déplacements relatifs
C	(Kpa)	Cohésion
$\Phi$	(degrés)	Angle de frottement
$\psi$	(degrés)	Angle de dilatance
$\sigma_{no}$	(Kpa)	Contrainte normale initiale
G	(-)	Module de cisaillement
$I_d$	(% )	Indice de densité
$D_r$	(% )	Densité relative
E	(Kpa)	Module d'Young
$\nu$		Coefficient de Poisson
$R_{inter}$		Résistance d'interface

## Table de matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructive.....	3
1- Introduction.....	3
2- Repère historique de l'architecture de terre.....	3
2-1- L'architecture de terre en Afrique.....	3
2-2- L'architecture de terre en Algérie.....	4
2-3- Actualité de l'architecture de terre en Algérie.....	6
3- Description des principales techniques constructives de la terre crue.	9
3-1- Le Pisé.....	10
3-2- Le torchis.....	10
3-3- La terre compactée (B.T.C.).....	11
3-4- La terre-paille.....	11
3-5- L'Adobe (Thob).....	11
4- Construire en Terre à Bou-saâda.....	13
4-1- Nature architecturale de la ville.....	13
4-2- Description architecturale et structurale d'une maison en brique en terre.....	14
4-2-1- Description architecturale (architecture de brique de terre)	14
4-2-2- Description structurale (Méthode de construction).....	15
Chapitre 2: Propriétés et caractéristiques de la terre crue.....	20
1- Introduction.....	20
2- Propriétés et caractéristiques de la terre crue.....	21
2-1- Composition de la terre crue.....	21
2-2- Caractéristiques physiques de la terre crue.....	21
2-2-1- Aspect thermique.....	21
2-2-2- Masse volumique.....	22
2-3- Autres propriétés.....	22
2-4- Résistance mécanique.....	23

Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique.....	28
1- Introduction.....	28
2- Comportement cyclique des sols.....	29
3- Propriétés dynamiques des sols.....	30
3-1- Aspects généraux.....	30
3-2- Description empirique.....	31
3-3- Comportement des sols sous chargement cyclique.....	32
3-3-1- Sols granulaires.....	32
3-3-2- Sols cohérents.....	35
4- Facteurs influant sur la résistance au cisaillement cyclique des argiles.....	37
4-1- Effet du rapport $\tau/c_u$ .....	37
4-2- Effet de la fréquence.....	37
4-3- Effet de la variation de la pression de confinement.....	39
Chapitre 4: Présentation du code éléments finis Plaxis.....	40
1- Introduction.....	40
2- Le code éléments finis PLAXIS.....	40
2-1- Options par défaut et solutions approchées.....	41
2-1-1- Les options par défaut commencent dès le maillage.....	41
2-1-2- De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements.....	41
2-1-3- Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS.....	42
2-1-4- La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse.....	42
2-1-5- Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats.....	43
2-2- Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS.....	43
2-2-1- Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles.....	45
2-2-2- Comportement élastoplastique.....	46
2-2-3- Modèle de Mohr-Coulomb.....	47

2-3- Calcul.....	51
2-3-1- Le programme de calcul.....	52
2-3-2- Caractéristiques générales des calculs.....	52
2-3-3- Types de calculs.....	53
2-3-4- Paramètres de contrôle du calcul.....	53
2-3-5- Résultats affichés pendant les calculs.....	56
2-3-6- Le programme de résultats (output).....	57
2-3-7- Le menu des résultats.....	57
2-3-8- Le programme courbe (curves).....	57
Chapitre 5: Modélisations du comportement au cisaillement du brique en	
1.Introduction.....	59
2.Cas du cisaillement sous chargement monotone.....	59
2.1.Définition des données.....	59
2.2.Paramètres de la brique en terre.....	61
2.3.Génération du maillage.....	61
2.4.Procédure de calculs.....	62
2.5.Présentation des résultats de calcul.....	63
2.5.1.Les principaux résultats attendus.....	63
2.5.2.Modèles réalisés sur brique.....	63
2.5.3.Ancien adobe.....	63
2.5.4.Nouveau adobe.....	65
2.5.5. Etude comparative des modèles ancien adobe et nouveau adobe.....	65
3.Cas du cisaillement sous chargement cyclique.....	67
3.1.Données et mise en œuvre des calculs.....	67
3.2.Résultats des calculs et discussion.....	71
3.2.1.Ancien adobe.....	71

3.2.2.Nouveau adobe .....	71
3.2.3.Comparaison entre l'ancien et le nouveau adobe.....	72
Conclusion générale.....	73
Références Bibliographiques.....	76

## Liste des figures

<b>Fig.1.1</b> :Ksar de Moughel BECHAR (Photo :Khelifi.A). .....	5
<b>Fig.1.2</b> :Ksar de Ait ben Hadou au Maroc (Craterre).....	5
<b>Fig.1.3</b> :Habitat Ghermoul Alger centre. (Benouali, 2014).....	5
<b>Fig.1.4</b> :Ksar Hamra Timimoune.....	6
<b>Fig.1.5</b> :Ksar Menaâ Batna.....	6
<b>Fig.1.6</b> : Séchage des briques (crédits : Mohamed Al-sayaghi / Reuters)	13
<b>Fig.1.7</b> : Djamaa-en-nekhla (Exemple de l'architecture islamique). (Photo :Khelifi.A BEN CHOHRA.D).....	14
<b>Fig.1.8</b> : Une extrémité de la médina de Boussaâda. (Photo : Khelifi.A BEN CHOHRA.D).....	15
<b>Fig.1.9</b> : Photo d'un immeuble résidentiel et impasse recouverte ouvrant sur une ruelle (Photo :Khelifi.ABEN CHOHRA.D).....	18
<b>Fig.1.10</b> : Bâtiments à Bou-saâda recouverts de bois (Photo : Khelifi.A BEN CHOHRA.D).....	19
<b>Fig.1.11</b> : Mur d'un parc dans la ville de Bou-saâda(Photo : Khelifi.A BEN CHOHRA.D).....	19
<b>Fig.3.1</b> : Courbes déviateur-déformation sur un matériau granulaire sous chargement répétés, d'après Paute et al. (1994).....	34
<b>Fig.3.2</b> : Courbes déviateur-déformation d'un sol granulaire sous chargement cyclique, d'après Cambou et Hicher (2002).....	34
<b>Fig.3.3</b> : Comparaison du comportement d'une argile et d'un sable lors d'un essai triaxial cyclique alterné non drainé, d'après Hicher, 1985.....	36
<b>Fig.3.4</b> : Comparaison des résistances au cisaillement sous chargement cyclique à 10% de déformation axiale sous différentes fréquences	39

(Khaffaf1978).....	
.....	
<b>Fig.4.1</b> :Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique.....	46
<b>Fig.4.2</b> : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.....	46
<b>Fig.4.3</b> : Représentation du comportement élasto-plastique avec écrouissage.....	47
<b>Fig.4.4</b> : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.....	47
<b>Fig.4.5</b> : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	48
<b>Fig.4.6</b> : Définition du module à 50 % de la rupture.....	49
<b>Fig.4.7</b> : Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.....	51
<b>Fig.4.8</b> : Onglet <i>Paramètres</i> de la fenêtre de calcul ( <i>Calculations</i> ).....	54
<b>Fig.4.9</b> : Fenêtre de calcul.....	56
<b>Fig.4.10</b> : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme <i>Output</i> .....	57
<b>Fig.4.11</b> : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme <i>Curves</i> .....	58
<b>Fig.5.1</b> : Modèle géométrique du problème.....	60
<b>Fig.5.2</b> : Maillage du problème.....	62
<b>Fig.5.3</b> : Modèle de cisaillement à contrainte normale constante ancien adobe.....	64
<b>Fig.5.4</b> : Essais de cisaillement à contrainte normale (nouveau adobe).....	66
<b>Fig.5.5</b> : Modèle de cisaillement à contrainte normale constante "ancien adobe-nouveau adobe".....	67
<b>Fig.5.6</b> : Modèle géométrique considéré pour l'essai de cisaillement direct cyclique.....	68
<b>Fig.5.7</b> : Loi de variation du déplacement cyclique. ....	69

<b>Fig.5.8-a</b> : Maillage déformé durant la phase de cisaillement "1 cycle".....	70
<b>Fig.5.8-b</b> : Maillage déformé durant la phase de confinement "10 cycles"...	70
<b>Fig.5.9</b> :Simulation des essais à contrainte normale constante pour l'ancien adobe.....	71
<b>Fig.5.10</b> :Simulation des essais à contrainte normale constante pour nouveau adobe.....	72
<b>Fig.5.11</b> : Comparaison de la simulation des essais à contrainte normale constante, pourancien et nouveau adobe.....	72

## Liste des tableaux

<b>Tab.1.1</b> : Projets de construction en terre en Algerie(Baloul et al, 2008).....	6
<b>Tab.1.2</b> :Différentes techniques de construction en terre (CRATerre, 1995)..	9
<b>Tab.2.1</b> : Synthèse des principales propriétés des matériaux en terre pour la construction. (Moevus., 2017).....	24
<b>Tab.2.2</b> : Comparaison entre le BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.(Guillaud et al., 2017).....	26
<b>Tab.2.3</b> : Synthèse des résultats des essais mécaniques. (Guettouche et al., 2019).....	27
<b>Tab.5.1</b> : Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol.....	61
<b>Tab.5.2</b> : Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol.....	69

# Introduction générale

# Introduction générale

## 1. Présentation

### 1.1. Contexte et justification du projet

La construction en terre et estime à plus de (1/3) des bâtiments de la planète ces constructions constitue un patrimoine architectural dans la majorité des pays on utilise ce mode de construction car son coût est faible la terre en tant que matériaux présente un grand intérêt iso thermique et phonique la construction demande une certaine maîtrise malgré qu'elle a été utilisée par les populations pauvres qui ont dû acquérir une certaine expérience après qu'il est fait plusieurs essais.

Aujourd'hui on fait plusieurs tests pour le contrôle de qualité après le délaissement de la terre certain pays réessaye ce type de construction après avoir vu le sud-est Algérien du côté de Boussaâda où j'ai vu de très belle construction en terre.

### 1.2. Objectifs

Étudier ces matériaux locaux utilisés dans les constructions en terre dans la zone de Boussaâda. Afin d'étudier leurs caractéristiques mécaniques.

Nous avons réalisé la modélisation à l'aide du logiciel Plaxis sur des essais menés sur des échantillons prélevés à Boussaâda (les essais que nous devions mener ont été interrompus par les circonstances de l'épidémie de " Covid-19" et de la fermeture des laboratoires, nous sommes appuyés sur des essais antérieurs, malgré que nous avons ramené des briques de terre de Boussaâda et nous avons réalisé des échantillons)

## 2. Approche méthodologique

Une recherche documentaire a été effectuée afin d'approfondir les connaissances du sujet nous avons collecté des références à la bibliothèque qui nous a permis d'avoir des données existantes sur internet aussi nous nous sommes documentés toujours sur internet nous avons comparé certains projets similaires d'autres étudiants, la compréhension du sujet son analyse sont les points clés de cette étude.

## **Introduction générale**

Notre mémoire de fin d'étude se divise en cinq chapitres :

- 1- Le premier chapitre est consisté à l'étude bibliographique ou nous avons présenté les techniques de fabrication et de construction en terre. Nous avons parlé aussi sur la construction en Terre à Boussaâda
- 2- Le deuxième chapitre parler sur les propriétés et les caractéristiques de la terre crue (caractéristiques physiques, mécaniques et les caractéristiques thermiques, ...).
- 3- Le troisième chapitre traite le comportement des sols sous chargement cyclique dont l'objectif est de comprendre la réponse des briques quand ils sont frappés par un séisme.
- 4- Le quatrième est une présentation du code éléments finis Plaxis
- 5- Le cinquième chapitre est consacré à la présentation des résultats de modélisation avec le code PLAXIS.

En fin une conclusion générale sera donnée.

**Chapitre 1**

**La terre crue, Histoire et Techniques  
constructives**

# Chapitre 1

## La terre crue, Histoire et Techniques constructives

### 1. Introduction

La construction en terre est l'une des ressources les plus originales de l'histoire de la construction. Elle a une relation forte avec le patrimoine car elle a accompagné l'homme au cours de l'histoire de l'humanité. La modernisation, à laquelle aucune société n'échappe, ne doit pas effacer la valeur du patrimoine comme un héritage du passé, pour les générations futures, qui fondent leurs identités. Aujourd'hui, la construction en terre présente encore une source d'inspiration pour les constructeurs et les architectes. Elle joue un rôle prépondérant dans la révélation du patrimoine local d'une région, souvent liées à une véritable expression artistique et historique. Elle contribue fortement au développement social, culturel, en respect de l'environnement.

L'objectif de ce chapitre est de mettre la lumière sur la construction en terre comme une source de patrimoine qui nous donne une leçon d'architecture de construction. D'une part, à travers l'importance des œuvres ancienne construite en terre. D'autre part, à travers l'architecture de terre moderne, tout en citant des exemples réalisés avec de nouvelles techniques.

### 2. Repère historique de l'architecture de terre

#### 2.1. L'architecture de terre en Afrique

La construction en terre est mal connue pour ce matériau qui est jugé médiocre et antique. Par contre depuis lointain, la terre était le matériau privilégié de l'homme bâtisseur. Dont il fut installé sa construction en terre à cotés des rivières

(le Nil, le Tigre et l'Euphrate). Car ces régions sont fertiles avec une terre alluviale sableuse et argileuse mêlées avec la paille, fournirent le premier matériau solide et durable. Les abris semi fixes des peuples de chasseurs-collecteurs étaient bâtis en terre, les huttes de branchages recouverts de terre argileuse ou recouverts de peaux de bêtes fait partie de paysage mésolithique tel que le site de Olduvai en Tanzanie. Le rôle joué par le continent africain dans l'évolution humaine est considérable, marqué par les différentes civilisations égyptiennes qui a duré près de 3 millénaires, avec l'établissement des cités en terres à Fayoum, correspond à des habitats en roseaux et de branchages enduits d'argile remplis de mottes de terre. La civilisation se développa dans l'Égypte dynastique (2900 av. J.C) avec l'utilisation de nouvelles techniques de constructions en terre telle que la brique de terre (le matériau est modelé et moulé puis séché sous le soleil). Par cette technique, les premiers mastabas funéraires furent construits. L'autre technique c'est le mur de brique talut utilisé dans le sanctuaire de Saqqarah. La terre était réservée à l'architecture civile (maison rurale) et aussi à la demeure des nobles. Les formes et les techniques utilisées en Afrique sont multiples influencées par les civilisations méditerranéennes au nord qui ont pu contribuer à la diffusion de brique crue et pisé. Ainsi, l'Afrique de l'est était influencée par des peuples venus de l'océan indien qui utilisent le torchis et le façonnage direct, la bauge et la brique à titre d'exemple Ksar de Moughel à Béchar (Fig.1) et Ksar de Ait ben Hadou au Maroc (Fig.02). La diversité de la technique dans le continent africain implique la richesse et la maîtrise de la construction en terre. (Heuben et al., 2006).

### **2.2. L'architecture de terre en Algérie**

La construction en terre est pratiquée dans nombreuses régions du pays, du nord jusqu'au sud. La différence était dans la technique utilisée tel que : L'habitat Ghermoul d'Alger centre, présente un témoignage du bâti colonial réalisé sur plusieurs étages en maçonnerie de moellon de pierre hourdé au mortier terre et chaux (Fig.3). Par contre au sud le Toub de terre est le matériau le plus répandu (édification de la grande majorité des ksour). (Fig.4 et 5). (Benouali, 2014).

Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructives



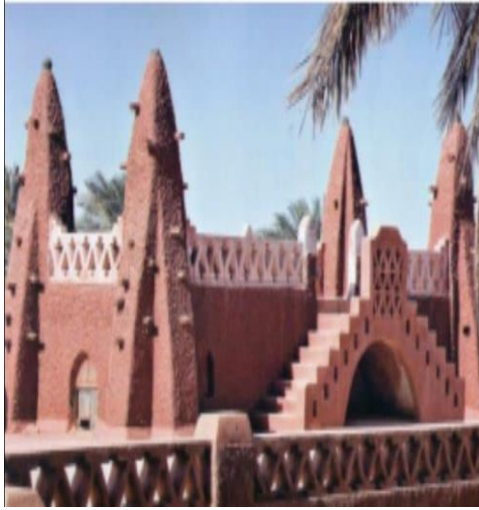
Fig.1.1: ksar de Moughel BECHAR (Photo: Khelifi.A)



Fig.1.2 : Ksar de Ait ben Hadou au Maroc (Source Craterre).



Fig.1.3 : Habitat Ghermoul Alger centre. (Benouali, 2014).



**Fig.1.4** : KsarHamraTimimoune



**Fig.1.5** : KsarMenaâBatna

### 2.3. Actualité de l'architecture de terre en Algérie

Aujourd'hui les attitudes ont changé, malgré l'échec de l'opération de Mustafa Ben Brahim(Odul,1983). En effet le BTS est un matériau reconnu officiellement et le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) mène ces recherches sur l'architecture de terre depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le Tableau 1.(Baloul et al, 2008).

**Tab.1.1** : Projets de construction en terre en Algérie(Baloul et al, 2008).

1969	la réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales(Dethier, 1986)
1972	Habitations à Zéralda en pisé stabilisé (banché coulé) (Doat, P et al, 1983)
1973	30 des 300 logements du village de Mustafa Ben Brahim près de Sidi Bel Abbés, sont réalisés en pisé.
1975	le village deAbadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante.(Houben, H et al, 2006)

## Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructives

1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en thoub
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée
1984	un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset et un prototype fut réalisé au CNERIB en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en blocs de terre comprimée
1986	10 logements sont réalisés à Adrar et 10 à Reggane en blocs de terre comprimée.
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en blocs de terre comprimée.
1998	un prototype en pisé fut réalisé au siège du CNERIB à Souidania, Alger

Sur le plan des pratiques traditionnelles, la construction en terre est pratiquée dans de nombreuses régions du pays. Selon le rapport du CNERIB, l'Algérie compte plusieurs techniques se distinguant par leurs procédés de production (CNERIB, 2000). Jusque-là nous n'avons pas encore rencontré d'études spécifiques sur les techniques pratiquées en Algérie. L'ouvrage de P. Odul (Odul, 1983) ne présente que quelques exemples et ne s'étale pas sur l'ensemble des procédés traditionnels algériens. Sur le plan réglementaire, l'Algérie ne dispose pas encore d'une réglementation propre à la construction en terre mais elle semble avoir établi ses bases grâce aux recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée approuvées en 1987. En 1988 le Centre Nationale d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a publié un document intitulé "Béton de terre stabilisée" (Arrêté du 05/12/1987). Ce document est un ensemble de recommandations qui

## Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructives

concernent uniquement le BTS. Cependant sa mise en application est presque inexistante, en milieu urbain ou rural. Nous rappelons ici que les projets en milieu rural, ne sont pas toujours soumis à la procédure de recours à l'architecte pour la préparation du dossier d'exécution (Ministère de l'habitat, 1992). Ce document constitue une référence pour la rédaction du cahier des charges, composant essentiel du dossier d'appel d'offre que doit préparer l'administration comme première procédure de passation de marché public. Il permet aussi aux services de contrôle et de suivi de superviser la réalisation et juger de la conformité des produits et des réalisations (Sabri, Aoudia, &Lallem, 2000). Depuis sa création en 1982 et pour remplir sa mission d'études et de recherche intégrée du bâtiment (Décret 87-234 du 03/11/87,) le CNERIB s'est lancé sur l'étude des matériaux locaux, et l'habitat économique(Olivier, 1988). Actuellement et dans le cadre de coopération scientifique et technique avec ses partenaires étrangers, le centre s'est orienté vers la mise en œuvre de technologies appropriées en matériaux locaux qui vise à "développer et à élargir les applications des matériaux locaux, affiner l'application de ces matériaux aux contextes physiques sociaux et économiques et enfin, définir et adapter les méthodes de production de ces matériaux suivant les contextes. Ces objectifs seront atteints à travers plusieurs actions entre autres, la formation à tous les niveaux et la divulgation de l'information" (CNERIB, 1992). Jusqu'à présent deux axes de recherche ont été développés au CNERIB dans le but de garantir les matériaux et les structures en terre ; La connaissance du matériau ; L'utilisation de la terre dans la construction.

Pour le premier axe, les recherches ont concerné plus le BTS et en deuxième lieu le pisé pour leur développement et leur modernisation. Ces recherches ne concernent pas les autres techniques connus et utilisées en Algérie. Pour le second axe, les études architecturales ne sont pas encore menées, ils concernent les formes architecturales générales afin de proposer les solutions compatibles avec les modes de vie des utilisateurs

Les solutions techniques pour les détails architecturaux et enfin la résistance et la tenue dans le temps des structures en terre .Sur le plan de l'enseignement et de la recherche, l'architecture de terre ne jouissait d'aucun intérêt particulier, néanmoins, elle connaît ces dernières années un regain d'intérêt, en effet, dans le

cadre de coopération scientifique avec des partenaires étrangers, et sous l'égide du ministère de la culture, l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme (EPAU) d'Alger a organisé, en 2010 et en 2012 des journées d'études portant sur la promotion des architectures de terre. (Salmi et al, 2014).

### **3. Description des principales techniques constructives de la terre crue**

De l'Amérique latine jusqu'en Chine, le matériau terre et l'architecture en terre sont représentés sous différentes formes, avec différentes techniques de construction et de fabrication (Doat et al, 1983). Parmi les techniques les plus connues, on cite : le pisé, l'adobe, (ou thob) les blocs de terre comprimée (BTC), les blocs de terre stabilisée (BTS), la terre paille et le torchis. Elles font l'objet actuellement d'un développement technologique tant sur le plan de la maîtrise et de l'amélioration des performances que sur le processus de production.

**Tab.1.2 :** Différentes techniques de construction en terre (CRATerre, 1995).

Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol (habitat troglodytique)
Terre recouvrante	La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.
Terre remplissante	La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.
Terre découpée	Des blocs de terre sont directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.
Terre façonnée	La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces
Terre empilée	Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais.

Terre moulée	La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules de formes diverses.
Terre extrude	La terre est extrudée par une machine puissante.
Terre extrude	La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules, comme un béton
Terre-paille	Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau léger.
Terre garnissante	La terre mêlée de fibres est appliquée en couches minces pour garnir le support.

### **3.1. Le Pisé**

Le pisé est un procédé de construction en terre crue, sans mélange de paille, c'est une maçonnerie monolithique réalisée par des couches superposées de terre compactée dans un coffrage appelé banches. La mise en place du coffrage est une entreprise qui prend 15 à 20 minutes. Le remplissage de ce coffrage se fait par couches successives de terre d'environ 12 cm, qui, une fois tassées, n'atteignent plus qu'une hauteur d'environ 8 cm (ce qui donne l'aspect lamellé des façades en pisé) (Pignal, 2005). Une fois, le remplissage terminé, le coffrage est démonté pour être remonté à côté. Le compactage se fait au moyen d'un pisoir en bois.

Selon Doat, le pisé est le mode de construction en terre le plus pur et le plus direct. Cette technique de construction existe traditionnellement partout dans le monde. Depuis la fin du XVIIIème siècle, une série de publications, dont les plus connues sont celles de François Cointereaux, ont fait connaître et diffuser cette technique (Doat et al, 1983)

### **3.2. Le torchis**

Le torchis est une technique de hourdage qui consiste en l'application d'une terre mélangée à de la paille sur un clayonnage maintenu dans une ossature porteuse en bois (Pignal, 2005). C'est un matériau de remplissage, donc non porteur. Des boules de terre sont amassées l'une sur l'autre et légèrement tapotées à la main ou avec les pieds pour former des murs monolithiques. La terre est renforcée

en rajoutant des fibres, normalement de la paille provenant de toutes sortes de céréales et de fibres végétales, comme de l'herbe et des brindilles pour diminuer le retrait de la terre et améliorer la cohésion entre les particules de la terre. Il existe différentes sortes de torchis suivant les qualités de paille et de terre qui sont associées. Ces torchis peuvent prendre la forme d'une pâte molle ou de tresse. Dans le premier cas, la terre prend l'aspect de galettes qui sont empilées. Dans le second cas, le torchis est essentiellement composé de paille qui est trempée dans un mélange appelé "barbotine" (terre saturée d'eau). Le torchis joue beaucoup plus le rôle d'un isolant thermique et acoustique.

### 3.3. La terre compactée (B.T.C.)

La B.T.C. est d'une certaine manière, une version plus moderne de l'adobe. Les constructions en B.T.C. se développent aujourd'hui et constituent la forme la plus répandue de construction en terre crue. Ces briques présentent l'avantage d'être très résistantes et très souples quant à leur utilisation. Les briques de terre compactée sont stabilisées le plus souvent à la chaux ou au ciment (de 6 à 8 % en masse sec, le reste est composé de terre crue)(Doat et al, 1983). Le mélange de terre (avec stabilisant) est moulé puis compacté à l'aide d'une presse mécanique ou manuelle. La terre utilisée est plus proche de la terre à pisé que de la terre à adobe, elle est moins argileuse et plus sableuse.

### 3.4. La terre-paille

Pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est diluée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille(Bui., 2008).

### 3.5. L'Adobe (Thob)

Selon la définition scientifique contemporaine, l'adobe (dénomination espagnole dérivée de l'arabe al thob (la terre), est un bloc de terre crue moulée et séchée(Bui. 2008). On trouvera des multitudes d'adobes de tailles et de formes différentes, évoluant successivement selon l'archéologue José Imbeloni de la forme conique puis cylindro-conique, en demi-sphère, dentiforme et enfin en parallélépipède. Ce qui différencie les constructions de type appareillé avec la technique du pisé, c'est

## Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructives

la possibilité de fabriquer et de stocker l'ensemble des matériaux nécessaires à la construction avant d'engager les travaux(Doat et al, 1983).

La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni graviers étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage. Afin de minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales. (Paulus, 2015).

Pour fabriquer des briques prismatiques, la terre est moulée à l'état plastique et est tassée à la main afin de chasser l'air. Elle peut alors être directement démoulée. On laisse sécher les briques au soleil durant quelques jours puis, dès qu'elles peuvent être manipulées sans se déformer, on les dresse sur les panneaux afin qu'elles sèchent uniformément sur les faces de pose et d'appui. Une fois sèches, les briques sont stockées puis maçonnées avec un mortier de terre extrêmement collant. Il s'agit de la technique de construction en terre la plus rapide. En effet, sa vitesse d'exécution peut être comparée à celle des matériaux industriels. On peut construire l'entièreté d'une construction avec seulement des adobes grâce aux techniques des arcs, voûtes et coupes. La fabrication des adobes nécessite également très peu d'outillage : seul un moule en bois (ou en métal) est indispensable pour construire des briques rectangulaires. Il s'agit donc d'une méthode très économique répondant parfaitement aux besoins des pays en développement. Cette technique a connu une large évolution depuis le VIII<sup>e</sup> millénaire ACN, époque à laquelle les premières briques de terre crue, de formes coniques, ont été façonnées à la main sans moule. La plus ancienne brique piriforme retrouvée sur un site archéologique de Jéricho date de 8000 ans ACN. La technique a ensuite évolué vers des formes cylindriques puis semi-sphériques. Les plus anciennes briques rectangulaires, plus récentes que les précédentes, ont été retrouvées en Turquie sur le site de Çatalhöyük et datent quant à elles du VI<sup>e</sup> millénaire ACN. Aujourd'hui, ces briques prismatiques sont les plus répandues avec des formats variant de 20x11x5cm (2kg) à 60x30x10cm (30kg). La production est soit artisanale avec une production journalière variant de 100 à 600 briques par homme, soit industrielle avec une production automatisée pouvant produire plusieurs milliers de blocs par jour. Le patrimoine architectural en adobe est

présent sur tous les continents, aussi bien dans l'architecture vernaculaire que dans les bâtiments publics ou les édifices monumentaux. On recense une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes comme Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert), Ghadamès en Libye, Lima au Pérou (Anger & Fontaine, 2009 ; Guillaud & Houben, 1995). (Paulus., 2015) ou encore Oued Mzab en Algérie.



**Fig.1.6** : Séchage des briques (crédits : Mohamed Al-sayaghi / Reuters)

## 4. Construire en Terre à Bou-saâda

### 4.1. Nature architecturale de la ville

Reconnue pour son succès en tant que reste des villes algériennes historiques dans l'architecture islamique, où mosquées et bâtiments ont connu une croissance remarquable (**Fig.7**). L'importance de l'esprit islamique et le style architectural luxueux de mosquées telles que Busa, construit par le monde Cheikh Sidi Thamer (Nacib, 2013). Les bâtisseurs bosniaques ont utilisé des outils naturels, tels que des palmiers et des arches, pour la construction de mosquées, qui constituent le modèle idéal pour l'architecture et la construction islamiques, avec ses beaux-arts, ses décorations et ses motifs, sans oublier les sciences et les arts cognitifs qui l'ont caractérisée tout au long de son histoire glorieuse. C'est un monument religieux, culturel et intellectuel qui éclaire la région de ses érudits et de ses hommes.



**Fig.1.7 :** Djamaa-en-nekhla (Exemple de l'architecture islamique). (Photo :Khelifi.ABEN CHOHRA.D)

## **4.2. Description architecturale et structurale d'une maison en brique en terre**

Lors de nos sorties, notre outil d'approche s'est basé sur l'observation in situ où les prises photographiques étaient indispensables ainsi que les témoignages des personnes âgées qui nous ont apporté des informations précieuses concernant les méthodes de constructions, le matériel et les matériaux utilisés. Ces sorties nous ont permis également de faire une connaissance sur les constructions en terre traditionnelles dans la zone de Bousaâda.

### **4.2.1. Description architecturale (architecture de brique de terre)**

Bousaâda est réputé pour ses richesses architecturales, nombreux sont ses sites classés au patrimoine de l'humanité par l'UNESCO. L'architecture Bousaadiene est très variée, elle a évolué au cours des siècles en fonction de facteurs historiques, géographiques et sociologiques. Elle s'est développée et enrichie lors des différentes conquêtes et invasions qu'a connues la région.

De nombreuses influences extérieures telles que l'architecture musulmane et celle des pays alentours ainsi que plus récemment l'architecture coloniale ont participé à la création des différents types architecturaux que l'on trouve dans le pays.

La terre crue a toujours été l'un des matériaux les plus utilisés dans les constructions (**Fig.8**), les savoirs faire des maçons se sont transmis de génération en génération.

Les anciens bâtiments de Bousaâda, ou même les nouvelles maisons construites dans les dernières années en brique de terre, présentent un avantage particulier dans la fabrication des briques et leur mode d'utilisation, ce qui leur permet de conserver leur forme et leur durabilité malgré le long délai.(Corpus, 2015).



**Fig.1.8** : Une extrémité de la médina de Bousaâda. On observera que l'architecture traditionnelle de ksar utilise largement le (Toub) (photo : Khelifi.ABEN CHOHR.A.D)

### 4.2.2. Description structurale (Méthode de construction)

#### a- La technique de l'adobe (matériau utilisé et étapes de fabrication)

L'adobe est le matériau le plus utilisé dans la construction traditionnelle à Bousaâda. Cette brique peut être de différentes formes et dimensions. On peut utiliser des moules en bois ou en acier pour la confectionner. La terre appropriée à la fabrication de l'adobe doit être le plus près possible du lieu de la construction et à proximité d'un point d'eau. Il faut un sol constitué de 55 à 75 % de sable, 10 à 28 % de limon et 15 à 18 % d'argile pour obtenir le meilleur résultat. Avec les briques d'adobe on peut réaliser différentes parties d'un ouvrage. On peut construire les murs extérieurs et intérieurs et aussi la couverture si on choisit de faire une toiture voûtée. Selon l'emploi de la brique elle variera de dimension et de composition. Par exemple, les briques utilisées pour les voûtes sont plus petites et stabilisées à la paille pour être plus légères. Ces briques ont l'inconvénient d'être peu solides mais on peut toutefois faire des édifices à un étage. Elles s'érodent facilement au contact

## Chapitre 1: La terre crue, Histoire et Techniques constructives

de l'eau, il faut donc les recouvrir d'un enduit qu'il faut entretenir régulièrement et refaire au bout de plusieurs années. Elles ont l'avantage d'être très économiques car leur fabrication se fait près du site de construction. Il n'y a donc généralement pas ou peu de frais de transport. Seule la paille a une valeur monétaire ainsi que la main d'œuvre qui n'a pas besoin d'être qualifiée.

Les différentes étapes nécessaires pour la fabrication des briques sont les suivantes :

1. Il faut enlever les pierres de la terre.
2. Il faut hydrater la terre. Cette étape appelée « pourrissage » permet de saturer d'eau les particules d'argile ce qui améliore la qualité des briques et diminue les fissures de retrait. La quantité d'eau nécessaire est importante, elle représente 1/3 du mélange. Souvent dans les villages la terre est directement extraite de sites boueux ou marécageux, il n'y a donc pas besoin de l'hydrater davantage.
3. Le but étant d'obtenir un mélange homogène, il faut malaxer l'ensemble.
4. Pour stabiliser la matière on ajoute un mélange de fibres végétales ou animales, généralement de la paille.
5. L'ensemble doit macérer assez longtemps pour que les matériaux non fibreux se décomposent. Cette étape n'est pas toujours nécessaire, cela dépend de la composition de la terre ainsi que de l'usage fait des briques. Les murs protégés de la pluie à l'intérieur ou enduits n'ont pas besoin d'être stabilisés.
6. Pour donner le gabarit et la forme aux briques on peut utiliser des moules en bois ou en métal.
7. Après le démoulage, il faut faire sécher les briques trois semaines sur une aire de stockage couverte de sable et les retourner régulièrement. L'idéal est de les laisser sécher individuellement à l'ombre les deux premiers jours, période de retrait de la brique.
8. Bien que moins pérenne que d'autres matériaux à base de terre, l'adobe me semble avoir un potentiel intéressant. C'est le matériau le mieux maîtrisé

par les maçons avec le bloc de parpaing. De plus, à l'heure actuelle, elle constitue l'unique matériau viable économiquement en milieu rural. Sa pérennité peut être nettement améliorée avec l'utilisation d'enduits appropriés.(Doat et al, 1979).

### b- Fondations

Les constructions en terre crue en murs massifs à éléments (briques d'adobe, blocs comprimés) ou monolithiques (bauge, pisé) sont assimilables à de la maçonnerie classique. Ce sont des ouvrages lourds qui sont bâtis sur des fondations superficielles (semelles) ou semi-profondes (longrines, puits) dont la conception répond aux règles de calcul connues. Les systèmes de fondations classiques ainsi que les matériaux qui les composent conviennent assez bien.

Il est utilisé dans les fondations de roche où le mur est placé directement (**Fig.9**).

Les fondations doivent être suffisamment profondes pour :

- Être construites sur le bon sol. Faire particulièrement attention aux sols expansifs ou à fort tassement ;
- Être protégées de l'eau de surface et de l'humidité ;
- Être mises hors gel ;
- Être protégées de l'érosion éolienne qui peut affouiller les fondations (dans le cas de fortes tempêtes) ;
- Être protégées de travaux dans leur voisinage (voirie, jardinage, agriculture) ;
- Être protégées des rongeurs et insectes (termites).



**Fig.1.9** : Photo d'un immeuble résidentiel et impasse recouverte ouvrant sur une ruelle  
(Photo :Khelifi.ABEN CHOIRA.D)

### **c- Planchers**

La plupart des bâtiments de Boussaâda sont recouverts de bois(**Fig.10**).Il existe généralement deux systèmes de remplissage connus dans la zone de Boussaâda. Ces systèmes sont souvent employés pour améliorer l'isolation acoustique :

- **Terre en vrac** : de nombreux planchers à poutres et parquets en bois, avec sous-face en planches ou cannisses de roseaux, sont bourrés ou remplis de terre en vrac. La terre employée doit être parfaitement sèche.
- **Panneaux préfabriqués** : ils sont le plus souvent réalisés en torchis ou en terre-paille et servent à remplir la sous-face du plancher sans participer à la portance du plancher. De ce fait, la trame des poutres peut être assez large (80 à 90 cm) et les éléments peuvent être préfabriqués en courte ou grande longueur : 0,40 à 1,20 m, pour une épaisseur de 15 cm et pesant de 35kg à 120kg par élément. La forme en entrevous permet d'alléger le plancher.

### **d- Murs**

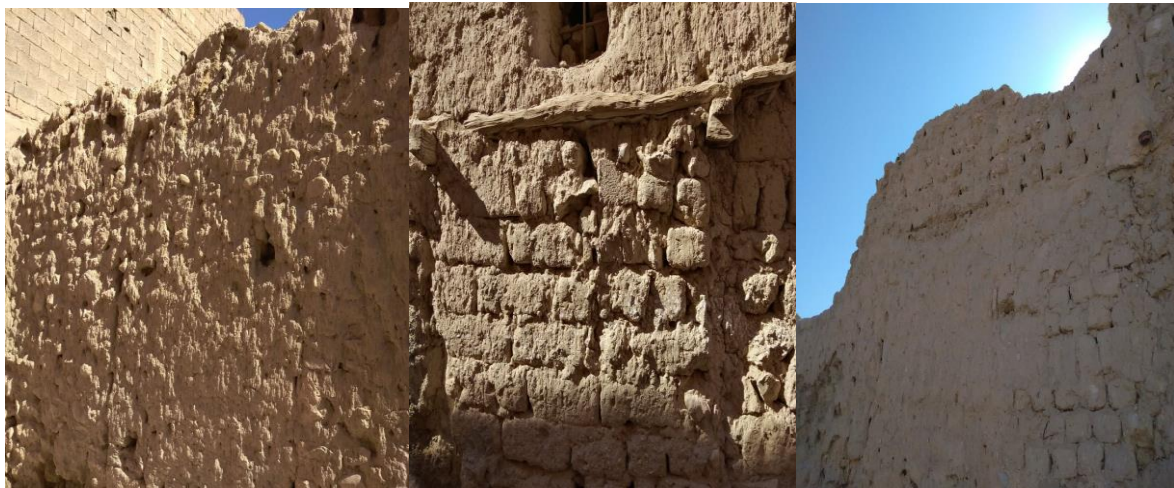
Moyennement de 30 à 60cm, le principe d'édification consiste à poser des briques côte à côte, en variant leur disposition d'une rangée à une autre. Notez également la taille des grosses briques due à la présence de granulats (**Fig.11**).

L'expérience des bâtisseurs a établi un rapport d'épaisseur minimale des murs égal au 1/10 de la hauteur du bâtiment, pour les murs en brique de terre. On admet aussi une épaisseur minimale de 30 cm pour des murs en pisé d'une maison de plain-pied et de 45 cm avec un étage. De même, on ne doit pas dépasser une distance maximale de 5 à 6 m entre murs de refends ou renforts ou entre joints de dilatation (joints secs prévus par avance et intégrés aux ouvertures ou résolument séparés des ouvertures).

La dimension des murs est aussi fonction de chaque technique de construction et des contraintes propres du projet : charges propres et d'occupation, contraintes thermiques.



**Fig.1.10** :Bâtiments à Bou-saâda recouverts de bois (Photo : Khelifi.A BEN CHOHR.A.D)



**Fig.1.11** : Mur d'un parc dans la ville de Bou-saâda(Photo : Khelifi.A BEN CHOHR.A.D)

**Chapitre 2**

**Propriétés et caractéristiques de la  
terre crue**

## Chapitre 2

# Propriétés et caractéristiques de la terre crue

### 1. Introduction

Les performances d'une brique de terre sont évaluées par la détermination de sa résistance en compression et à la traction, sa teneur en eau, son retrait dû au séchage, sa durabilité. (Malanda & al., 2017).

Ce chapitre a pour objet d'avoir les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et en cisaillement ainsi les caractéristiques thermiques de ces briques.

Les tests de laboratoire permettent de connaître les caractéristiques de la terre disponible avec plus de précision qu'avec les tests réalisés sur chantier.

À l'heure actuelle, il existe très peu de normalisation pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction. On retrouve seulement quelques normes pour l'adobe et pour la terre damée stabilisée qui précisent la résistance minimale et la durabilité du matériau terre. (Paulus., 2015).

Des essais expérimentaux réalisés par différents organismes de pays industrialisés permettent d'avoir tout de même une idée des performances techniques du matériau terre en général. Ces caractéristiques peuvent être comparées aux résultats obtenus aux essais énoncés précédemment afin de s'assurer de la fiabilité de ceux-ci. (Paulus., 2015).

## 2. Propriétés et caractéristiques de la terre crue

### 2.1. Composition de la terre crue

La terre crue est un matériau minéral granulaire, composé de matière solide, liquide et gazeuse. La fraction solide est constituée de grains : cailloux (taille exprimée en centimètres), de graviers (de 20 mm à 5 mm), de sables (5 mm à 0,06 mm), de silts (0,06 mm à 2  $\mu\text{m}$ ), d'argiles, qui sont des plaquettes plutôt que des grains (taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) et d'oxydes métalliques qui ont des propriétés colorantes (taille également inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ). La fraction liquide est constituée d'eau et de corps organiques et minéraux dissous dans cette eau. La fraction gazeuse est constituée d'azote, d'oxygène, de gaz carbonique, ainsi que de gaz issus de la vie présente dans la terre (hydrogène, méthane, etc.). Les fractions liquides et gazeuses subissant des modifications très rapides, on caractérise traditionnellement un sol par sa fraction solide, ce qui se traduit par l'étude de sa granulométrie. Lors de l'utilisation de la terre crue pour réaliser un ouvrage, la fraction liquide est à prendre en compte avec autant d'attention que la fraction solide : c'est l'état hydrique de la terre.

Au-delà de ces vitrines technologiques, prenons l'exemple plus familier d'une maison moyenne de 100 m<sup>2</sup> en béton armé : l'énergie nécessaire à sa construction représente l'équivalent de 40 années de dépense de chauffage. À titre de comparaison, avec la même énergie nous pourrions construire l'équivalent de 10 maisons en bois ou 50 maisons en terre crue de même surface, toute chose étant égale par ailleurs. (Atoke., 2013).

### 2.2. Caractéristiques physiques de la terre crue

#### 2.2.1. Aspect thermique

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas un matériau isolant. En revanche, elle possède une excellente inertie thermique. Ceci se traduit par une régulation des différences de températures intérieures (pour l'été : plus frais le jour car le mur se rafraîchit la nuit, rendant cette fraîcheur le jour).

Voici quelques valeurs, pour une terre à 1 500 kg/m<sup>3</sup> :

- Conductivité : 0,75 W/m.°C ;

## Chapitre 2: Propriétés et caractéristiques de la terre crue

- Chaleur spécifique : 900 J/kg.°C ;
- Capacité thermique : 1 350 kJ/m<sup>3</sup>.°C
- Effusivité thermique : 1,00 J/(racine carrée de la capacité thermique).m<sup>2</sup>.°C.
- Soit, pour du pisé à 2 000 kg/m<sup>3</sup>, une capacité thermique de 1 800 kJ/m<sup>3</sup>.°C.(Atoke., 2013).

### 2.2.2. Masse volumique

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre. Elle s'étale de 1 200 kg/m<sup>3</sup> à 1 600 kg/m<sup>3</sup> pour de la terre foisonnée (dans un tas de terre par exemple). Cette valeur augmente suite à une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors idéalement une masse volumique de 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Les mélanges amendés en paille sont plus légers : en terre-paille, la masse volumique est de 300 kg/m<sup>3</sup> à 1 300 kg/m<sup>3</sup>.

Pour des briques de terre crue filée (densité : 2,00) : conductivité = 1,05 W/m.°C, inférieure à celle de la brique cuite (1 à 1,35) ; capacité = 2000 KJ/m<sup>3</sup>.°C, supérieure à celle de la brique cuite (1360 à 2100).(Atoke., 2013).

### 2.3. Autres propriétés

- Indice de correction acoustique à 500 Hz : 50 dB pour un mur de 20 cm en briques de terre crue filée
- Bonne diffusion de la vapeur d'eau, pare-vapeur ou VMC inutiles
- Propriétés absorbantes des argiles (produits de dégraissage type K2R)
- Protection contre les nuisances associées aux ondes électromagnétiques générées par les appareils et circuits électriques
- Par sa nature, le matériau n'entre pas dans un cycle de dégénérescence.
- Peut absorber jusqu'à 3% de son poids en vapeur d'eau (évolution de sa teneur en eau de 4% à 7%, ce qui permet d'avoir une inertie " hydrique " non négligeable en ce qui concerne le confort)
- Évite l'excès d'humidité qui provoque des rhumatismes

- Évite le manque d'humidité qui provoque des problèmes oculaires, inflammatoires et respiratoires. (Atoke., 2013).

### 2.4. Résistance mécanique

La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Du point de vue mécanique, elle fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression (les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles). La terre mise en œuvre de manière monolithique (pisé, bauge) a généralement une résistance à la compression d'environ 20 kg/cm<sup>2</sup> (2 MPa). Les éléments de maçonnerie (adobes) ont des résistances à la compression pouvant aller de 20 kg/cm<sup>2</sup> à 50 kg/cm<sup>2</sup> (2 MPa à 5 MPa). L'adjonction d'éléments fibreux (paille par exemple) permet de conférer au mélange une certaine résistance en traction, flexion et cisaillement, mais qui reste tout de même négligeable. [1-03]

Doat et al. (1979) recommandent les caractéristiques suivantes pour une construction à un seul niveau :

- Résistance à la compression : 2 kg/cm<sup>2</sup>
- La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec
- Résistance à la traction : 0
- Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm<sup>2</sup>
- Module d'Young : 7000 à 70 000 kg/cm<sup>2</sup>
- Perméabilité : 1x10<sup>-6</sup> cm/sec
- Dilatation thermique : 0,012 mm/m par °C
- Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C
- Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg
- Déphasage horaire pour un mur de 40cm : 8 à 12 heures
- Amortissement phonique pour un mur de 40cm et une fréquence de 500 Hz : 56 dB.

## Chapitre 2: Propriétés et caractéristiques de la terre crue

Moevus et al. (2012) récapitulent (voir Tableau 2.1) les principales propriétés de la terre brute mises à jour pour les trois principaux types de mise en œuvre de la terre pour la construction : terre compactée, terre de moulage et terre additionnée de fibres. Les valeurs indiquées dans la référence (Houben et Guillaud, 1989) sont rappelées entre parenthèses aux fins de comparaison.

**Tab.2.1** : Synthèse des principales propriétés des matériaux en terre pour la construction. (Moevus., 2017).

Propriété	Unité	Terre compactée	Terre moulée	Terre fibreuse
Teneur en argile	%	5 - 30	20 - 40	
Indice de plasticité PI	%	5 - 30	15 - 35	
Teneur en eau initiale $W_{ini}$	%	5 - 15	15 - 35	
Densité sèche $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1600 - 2200 (1700 - 2200)	1200 - 2100 (1200 - 1700 pour adobe)	300 - 1200 (600 - 800)
Teneur en eau ambiante $w$	%	0 - 5%		
Retrait de séchage	%	1 - 3 (0,02 - 0,1 pour les CEB, 0,1 - 0,2 pour les pisés)	1 - 20 (0.02 - 0.1 pour adobe)	Proche de 0
Facteur de résistance à la vapeur d'eau $\mu$		5 - 13		

## Chapitre 2: Propriétés et caractéristiques de la terre crue

Module de Young E	GPa	1.0 - 5.5 (0,7 à 7,0 pour la terre stabilisée au ciment)		<1.0
Résistance à la compression uniaxiale $R_c$	MPa	0,4 - 3,0 (2.0)	0.4 - 5.0	
Résistance à la traction $R_t$	MPa	0.1 - 0.5 (0.5 - 1.0 pour la terre et les CEB)		
Capacité thermique massique c	J/kg.K	600 – 1000 (~ 850)		
Capacité thermique volumique C	kJ/m <sup>3</sup> .K	960 - 2200	720 - 2100	180 – 1200
Conductivité thermique $\lambda$	W/m.K	0,5 - 1,7 (0,81 - 0,93)	0,3 - 1,5 (0,46 - 0,81)	0,1 - 0,3 (0,1 - 0,45)

CRATerre, pour sa part, a donné la comparaison suivante entre les caractéristiques de BTC, Briques cuites, Adobe et Blocs de béton léger (voir Tableau 2.2)

Pour l'adobe utilisé dans la construction traditionnelle à Bousaâda l'étude menée par Guettouche et al. (2019) révèle que la teneur en eau moyenne est estimée à 2,51% alors que la teneur en fibres végétale est de 0,337% ainsi les poids volumiques humide, sec et particules solides sont respectivement 17,3 KN/m<sup>3</sup> et 16,81 KN/m<sup>3</sup> et 23,65 KN/m<sup>3</sup>, en ces résultats trouvés la porosité et l'indice des vides sont respectivement 0,289 et 0,41. L'étude conclut que les pourcentages moyennes de graves ; sables et fines sont respectivement 10,26% ; 66,16% et 23,58%, avec une granulométrie serrée et prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

## Chapitre 2: Propriétés et caractéristiques de la terre crue

La limite de liquidité moyenne est estimée à 25,60% ainsi la limite de plasticité égale à 21,92%, soit un indice de plasticité de l'ordre de 3,68, et Classification LPC Sable Limoneux.

Guettouche et al. (2019) récapitulent aussi les principales propriétés mécaniques de l'adobe de Bousaâda (voir Tableau 2.3).

Pour la conductibilité thermique de l'adobe la valeur moyenne de  $\lambda$  est de 0.7291 W/m.K, ce qui correspond aux bons isolant thermique.

**Tab.2.2 :** Comparaison entre le BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.  
(Guillaud et al., 2017).

COMPARAISON ENTRE LE BTC ET D'AUTRES MATERIAUX DE MAÇONNERIE					
Caractéristiques	Unité	BTC	Briques cuites	Adobes	Blocs de béton léger
<b>FORME ET TAILLE</b>					
Type					
L x l x h	cm	29,5 x 14 x 9	22 x 10,5 x 6,5	40 x 20 x 10	40 x 20 x 15
<b>ASPECT</b> - Surface - Intérêt esthétique		lisse moyen à bon	rugueuse à lisse bon à excellent	irrégulière pauvre	rugueuse moyen
<b>PERFORMANCES</b> - Résistance en compression humide - Dilatation thermique réversible - Isolation thermique - Masse volumique apparente - Durabilité	Mpa % W/m°C kg/m³	1 à 4 0,02 à 0,2 0,81 à 1,04 1 700 à 2 200 faible à très bonne	0,5 à 6 0 à 0,02 0,7 à 1,3 1 400 à 2 400 faible à excellente	0 à 5 - 0,4 à 0,8 1 200 à 1 700 faible	0,7 à 5 0,02 à 0,05 1,0 à 1,7 1 700 à 2 200 faible à très bonne
<b>EMPLOI EN MAÇONNERIE</b>		porteur  sans enduit	porteur  sans enduit	porteur  avec enduit	remplissage  avec enduit

**Tab.2.3** : Synthèse des résultats des essais mécaniques. (Guettouche et al., 2019)

<b>Caractéristiques</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Résultats obtenus</b>
Résistance au cisaillement à la boîte	C	kPa	220 kPa
	$\Phi$	degré	34.32°
Résistance à la compression simple	Rc	MPa	0.03 MPa

**Chapitre 3**  
**Comportement des sols sous**  
**chargement cyclique**

# Chapitre 3

## Comportement des sols sous chargement cyclique

### 1. Introduction

Il est bon que la préoccupation parasismique soit intégrée dès les premières phases de la conception du projet, au même titre que l'étanchéité ou l'isolation. C'est pourquoi la tâche du concepteur est de trouver un compromis pour obtenir la combinaison optimale entre la résistance et la déformabilité, ce qui n'est pas chose facile, le comportement de l'ensemble du bâtiment dépendant du comportement de chacun des éléments et de la façon dont ils sont assemblés.

Lors d'un séisme, c'est le sol qui est moteur. Les sollicitations mécaniques que le séisme engendre sont diverses et il est certain qu'une bonne connaissance de son action permettrait de mieux construire. (IRMA, 2020).

Le problème est de savoir comment un bâtiment peut répondre aux sollicitations définies, de façon à :

- Éviter l'effondrement total ;
- Limiter l'endommagement ;
- Limiter les déformations pour assurer la continuité d'un service.

La nature des matériaux utilisés et leur qualité sont de première importance. Ils doivent répondre le mieux possible aux sollicitations mécaniques anormales que les tremblements de terre imposent.

Par ailleurs, les dimensions des éléments constituant le bâtiment devront être pensées en fonction de la qualité des matériaux pouvant réellement être obtenus

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

sur le site. Par exemple, un mur en béton armé de faible performance devra avoir une épaisseur supérieure à celui pouvant faire appel à un béton de bonne qualité ; cette remarque reste valable pour d'autres types de matériaux tels que la pierre, la brique, etc.(IRMA, 2020).

Les constructions en terre sont également répandues à travers le monde. La réglementation parasismique actuelle ne permet pas d'agir efficacement sur le patrimoine existant car les normes sont adaptées et rédigées pour l'utilisation de matériaux industriels qui acceptent des niveaux de contraintes plus élevés. Leur application peut même, être destructive pour le bâti ancien. (Ferrigniet al, 2005).

## 2. Comportement cyclique des sols

La connaissance du comportement cyclique des sols s'impose pour comprendre la réponse des sites quand ils sont frappés par un séisme.

En très petites déformations, la raideur du sol est représentée par le module de cisaillement  $G_{max}$  qui est en lien direct avec la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$ . Dans la gamme des déformations faibles à moyennes, le comportement des sols est non linéaire et hystérétique. La raideur du sol est représentée par le module de cisaillement sécant  $G$ . Il est d'usage de l'exprimer aussi par le rapport  $G/G_{max}$ .

La dissipation d'énergie par le sol au cours des cycles est représentée par le coefficient d'amortissement  $D$ . L'existence d'un amortissement minimal  $D_{min}$  en très petite déformation est admise généralement.

Comme beaucoup de propriétés mécaniques des sols,  $G$  et  $D$  dépendent à la fois de la contrainte effective de confinement  $s'm$  et du niveau de déformation de cisaillement  $g$ .

En pratique, le recueil des propriétés dynamiques des terrains s'effectue par la mesure directe des vitesses  $V_s$  in situ, ou une estimation indirecte de celles-ci, puis au laboratoire, où sont mesurées ou estimées les variations de  $G$  et  $D$  avec  $s'm$  et  $g$ . En reproduisant des sollicitations cycliques appropriées et contrôlées, les essais de laboratoire permettent d'identifier les paramètres représentatifs du comportement non linéaire et hystérétique des sols (colonne résonnante, cisaillement simple, triaxial).

### 3. Propriétés dynamiques des sols

#### 3.1. Aspects généraux

Ce paragraphe donne un aperçu des propriétés dynamiques des sols du point de vue des essais de laboratoire en référence à Seed et Idriss (1970), Hardin et Drnevich (1972b), Iwasaki et Tatsuoka (1977), Iwasaki et al. (1978), Zen et al. (1978), Kokusho (1980), Kokusho et al. (1982), Seed et al. (1986), Sun et al. (1988), Vucetic et Dobry (1991), Ishibashi et Zhang (1993), Rollins et al. (1998), Vucetic et al. (1998), Darendeli (2001), Stokoe et al. (1999), Stokoe et al. (2004), Zhang et al. (2005), Bui et al. (2007), Guerreiro et al. (2012), Liao et al. (2013), Vardanega et Bolton (2013), El Mohtar et al. (2013), parmi d'autres.

Le module  $G$  et le rapport  $G/G_{\max}$  dépendent des nombreux paramètres caractéristiques du comportement mécanique des sols testés dans leur état naturel. Ces paramètres dépendent de la nature des sols, en lien notamment avec l'indice de plasticité  $I_p$  pour les sols argileux, ou la granulométrie et la forme des grains pour les sables. L'âge du dépôt intervient. Les paramètres dépendent aussi de l'état du sol en matière de compacité (indice des vides, indice de consistance pour les argiles, indice de densité pour les sables), d'histoire passée (surconsolidation) et de saturation. Ils expriment l'anisotropie plus ou moins marquée du sol. Ils dépendent de l'état initial (contrainte moyenne effective  $s'_m$  et rapport des contraintes initiales), de l'amplitude de la déformation et de la vitesse de chargement (fréquence), puis du nombre de cycles. Généralement, dans les sols argileux, la dégradation du rapport  $G/G_{\max}$  avec  $g$  est moins rapide quand  $s'_m$  et  $I_p$  augmentent. Les sols peu plastiques sont plus dépendants de  $s'_m$  que les sols plastiques.

L'amortissement  $D$  dépend aussi des paramètres évoqués ci-dessus (nature du sol, état du sol, conditions initiales et chargements). Toutefois, considéré comme amortissement hystérétique, il est supposé indépendant de la vitesse de chargement (fréquence) par opposition à un amortissement visqueux. Ainsi,  $D$  augmente avec  $g$  dans la gamme des petites aux moyennes déformations. La connaissance de  $D_{\min}$  à très petite déformation et de  $D$  à grande déformation est moins précise. La mesure s'avère difficile du fait de l'influence de la machine

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

d'essai et des conditions d'essai (fréquence, nombre de cycles, condition de contact des éprouvettes) ou de l'accumulation des déformations irréversibles.

Parmi tous les facteurs évoqués ci-dessus et largement étudiés, il n'est pas fait mention des effets de la pression interstitielle. Pourtant, les essais triaxiaux cycliques sont réalisés en condition non drainée pour demeurer en accord avec les fréquences sismiques. Dans la gamme des petites aux moyennes déformations et au-delà, l'accumulation de la pression interstitielle pendant les cycles produit la réduction de la contrainte effective  $s'_m$ . La pression interstitielle agit donc directement sur la mesure des propriétés dynamiques du sol, via l'influence des  $s'_m$ . Elle joue aussi sur l'accumulation des déformations plastiques au cours des cycles. Dans les sables lâches, l'accumulation de la pression interstitielle peut aboutir à l'annulation des contraintes effectives et à la liquéfaction du sol accompagnée d'une dégradation quasi totale du module  $G$ . Ainsi, l'eau interstitielle intervient sur la raideur et l'amortissement du sol en fonction du niveau de sollicitation cyclique.

Dans les argiles, l'effet de cette accumulation est moins tranché. Cet accroissement au cours des cycles ne se fait sentir qu'à partir d'un seuil de l'ordre de  $10^{-3}$  de la déformation de cisaillement au plus (Matasovic et Vucetic, 1992). Par la suite la dégradation du module s'opère continûment pendant les cycles sous l'effet d'une accumulation de la pression interstitielle, qui s'effectue dans une progression linéaire avec le logarithme du nombre de cycles le plus souvent (Matasovic et Vucetic, 1995). De fait, comme dans les sables, l'identification des propriétés dynamiques du sol n'est pas effectuée dans un état de contraintes effectives constantes.

#### 3.2. Description empirique

Après avoir compilé de nombreux résultats expérimentaux portant sur différents types de sols, différents appareillages et différents types d'essais cycliques, Vucetic et Dobry (1991) ont établi un faisceau de courbes qui permet de décrire la dégradation du module de cisaillement  $G$  et de l'amortissement  $D$  en fonction de la déformation de cisaillement et de l'indice de plasticité. Puis, Ishibashi et Zhang (1993) ont développé une expression analytique donnant  $G$  et  $D$  en fonction du module maximal  $G_{max}$ , de l'amplitude de la déformation cyclique de cisaillement, de la contrainte effective de confinement et de l'indice de plasticité

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

Ip de l'argile. Une approche possible pour caractériser l'amortissement consiste à relier celui-ci au rapport  $G/G_{\max}$ . Un avantage de cette approche tient à sa meilleure robustesse, car  $D$  est plus difficile à mesurer avec précision que le rapport  $G/G_{\max}$ . Hardin et Drnevich (1972a) ont suggéré de relier  $D$  proportionnellement à  $1-G/G_{\max}$ . Ishibashi et Zhang (1993) ont proposé une relation polynomiale de  $G/G_{\max}$ .

De nombreuses formulations ont été établies par la suite. Vardanega et Bolton (2013) présentent une expression semi-empirique de  $G_{\max}$  fonction de l'indice des vides et de la contrainte effective de confinement  $s'm$ . L'effet de la vitesse de chargement est pris en compte, en se fondant à la fois sur des essais de laboratoire monotones et cycliques, pour des applications aux problèmes de chargements statiques (fondations) ou dynamiques (séismes).

#### 3.3. Comportement des sols sous chargement cyclique

L'objectif de cette partie est de présenter le comportement des sols sous chargement cyclique et les modèles existants adaptés à ce type de chargement. Cette partie s'inspire des différents travaux bibliographiques de Dubujet, 1992 ; Paute et al., 1994(a) et (b) ; Mestat, 2002 ; Cambou et Hicher, 2002 ; Hau, 2003 ; et Foucault, 2010.

##### 3.3.1. Sols granulaires

Les matériaux granulaires montrent, sous chargement cyclique répété, des relations contraintes-déformations complexes caractérisées par des non linéarités et des irréversibilités. La structure granulaire des sols entraîne, à chaque cycle, des déplacements entre les grains, qui ne sont que très partiellement réversibles lors du déchargement. Des réarrangements granulaires ont donc lieu à chaque cycle. Les paramètres qui entrent en compte dans ces déformations plastiques dépendent du chargement cyclique ainsi que des propriétés mécaniques et minéralogiques des sols.

Le comportement des sols granulaires sous chargement cyclique a été étudié expérimentalement depuis quelques décennies (Lentz et Baladi, 1980 ; Diyaljee et Raymond, 1982 ou plus récemment : Wichtmann, 2005) et des lois de comportement ont été développées à partir de ces observations. Ces études sont généralement basées sur des campagnes expérimentales à l'appareil triaxial sous

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

chargement cyclique. En mécanique des sols, la plupart des études du comportement cyclique des sols granulaires ont été réalisées afin d'analyser le phénomène de liquéfaction. Toutefois, de nombreuses études sur le comportement cyclique des graves et ballasts ont été effectuées afin de déterminer leur comportement dans le cadre d'une utilisation dans les domaines ferroviaires et routiers (chaussées souples notamment) (Paute et al., 1994 (b) ; Indraratna et al., 2010).

Le LCPC a mené une étude de caractérisation des graves non traitées (GNT) à l'appareil triaxial à chargements répétés (Paute et al., 1994a et b), sous un grand nombre de cycles (jusqu'à 100 000). Le domaine d'activité visé par cette étude est la construction de chaussées. La grave non traitée est un matériau à granularité continue dont les gros éléments sont compris entre 14 et 31,5mm. Ces essais mettent en évidence (figure 3.1) un comportement mécanique complexe :

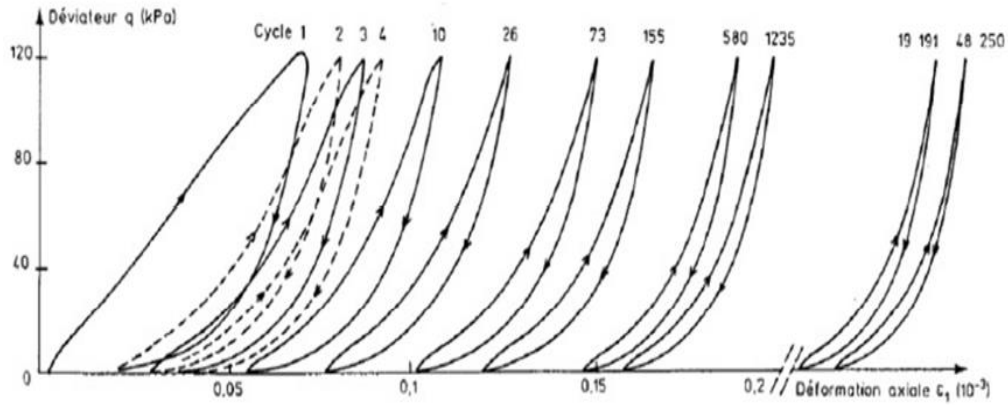
- Une élasticité non-linéaire, dépendant des contraintes appliquées,
- Des déformations permanentes, similaire à un phénomène de type Rocher, évoluant avec le nombre de cycles appliqués et dont les valeurs sont également en relation avec les contraintes appliquées.

Cambou et Hicher, 2002 ont réalisé des essais triaxiaux sur des GNT sous sollicitations cycliques. Ils ont mis en évidence les points suivants :

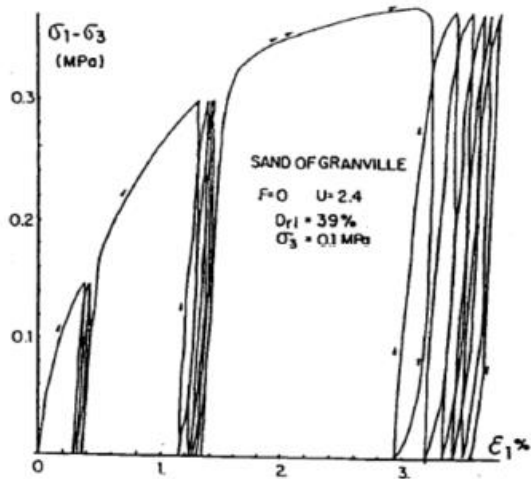
- Les essais répétés montrent un écrouissage important au cours du premier cycle. Les cycles conservent pratiquement la même forme en se décalant le long de l'axe correspondant à la déformation axiale (figure 3.2).
- Effet de l'histoire de chargement en contraintes qui agit essentiellement sur la partie déviatoire de la réponse. Cet effet traduit l'évolution d'une anisotropie induite avec l'histoire de chargement.
- Une augmentation de la déformation volumique au cours des cycles. Dans le cas d'essais non drainés, ceci se traduit par une augmentation de la pression interstitielle. Celle-ci va de pair avec une diminution de la pression effective.

Les résultats obtenus sur une grande variété de matériaux montrent l'influence particulière de la minéralogie des granulats, de la teneur en eau, et à un degré moindre, de la compacité sur les performances mécaniques des GNT.

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique



**Fig.3.1 :** Courbes déviateur-déformation sur un matériau granulaire sous chargement répétés, d'après Paute et al. (1994)



**Fig.3.2 :** Courbes déviateur-déformation d'un sol granulaire sous chargement cyclique, d'après Cambou et Hicher (2002)

Afin de représenter le comportement des sols granulaires, différentes approches de modélisation dans le cadre de l'élasto-plasticité ont été mises en place. Cependant, les modèles de type élasto-plastique basés sur un seul critère de plasticité (Mohr-Coulomb), à écoulement isotrope (type Cam-Clay), ou bien à deux surfaces de charge développant uniquement des écoulements isotropes (modèle de Lade, 1977), ne sont pas adaptés à la modélisation du comportement des sols sous sollicitations cycliques, mais donnent des résultats acceptables pour des chargements monotones. Dans le cadre de l'élasto-plasticité, un écoulement mixte apparaît nécessaire pour reproduire les phénomènes cycliques observés pour les sols granulaires. Cependant, la modélisation de l'anisotropie induite par la rotation des contraintes principales reste un des points les plus délicats.

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

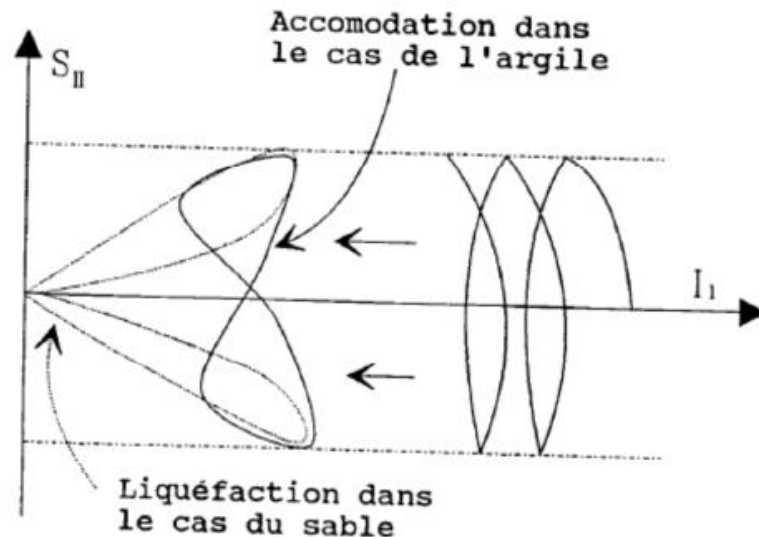
Des modèles élasto-plastique ont été développés pour simuler le comportement des sols granulaires soumis à des chargements cycliques (Ghaboussi et Momen, 1982 ; Pastor et al., 1990 ; Schwer et Murray, 1994 ; Manzari et Dafalias, 1997 ; Desai, 1994 ; Fang, 2003). Ces modèles intègrent de l'écroutissement cinématique ou mixte avec un ou plusieurs mécanismes plastiques.

#### 3.3.2. Sols cohérents

Globalement les comportements sous sollicitations cycliques drainées des sols granulaires et des sols cohérents, tels que l'argile, sont assez similaires.

Mestat (2002) a identifié, par des essais triaxiaux en sollicitations monotones, les traits de comportement généraux des sols cohérents naturels. Cependant, le comportement de l'argile soumise à une sollicitation alternée cyclique non drainée dépend très fortement du niveau de contrainte imposée. Si celui-ci est bas, il y a possibilité d'obtenir une stabilisation des cycles, qui se reproduisent sur eux-mêmes (phénomène d'accommodation). Dans le cas d'essais à fort niveau de contrainte, quelques cycles peuvent mener dans le domaine des grandes déformations. Dans le cas des sols granulaires, la diminution de pression moyenne effective se poursuit jusqu'à l'annulation des contraintes : c'est le phénomène de liquéfaction. Par contre, pour les argiles, l'augmentation de pression interstitielle se produit jusqu'à la rencontre de la droite de plasticité parfaite (au sens des modèles de Cam-Clay), sans jamais aboutir à l'annulation des contraintes effectives (figure 3.3). Des discontinuités cinématiques, dues à la grande déformabilité des argiles, en seraient responsables d'après Hicher, 1985.

Les essais réalisés sur des argiles sur-consolidées montrent que plus le degré de sur-consolidation est grand, plus l'augmentation de pression interstitielle est faible. L'aboutissement à une pression interstitielle donnée, réclame, dans le cas d'une argile sur-consolidée, un nombre de cycles plus importants.



**Fig.3.3 :** Comparaison du comportement d'une argile et d'un sable lors d'un essai triaxial cyclique alterné non drainé, d'après Hicher, 1985

Le modèle « Cam-Clay modifié » développé par Roscoe et Burland, 1968, est le modèle le plus utilisé pour décrire le comportement des argiles normalement consolidées ou faiblement sur-consolidées. Il représente bien un grand nombre de phénomènes qui caractérisent le comportement des argiles normalement consolidées sous chargement monotone. En revanche, ces modèles ne permettent pas de décrire les phénomènes typiques qui apparaissent dans les argiles sur-consolidées. Les modèles de type Cam-Clay ne tiennent pas compte de l'anisotropie des argiles naturelles, due au mode de déposition des matériaux. Ces modèles ont été développés en considérant les sols comme isotropes.

Mestat, 2002, a cité les évolutions apportées par Kattan, 1990 et Lepidas et Magnan, 1990, pour corriger ces points.

La modélisation du comportement des sols sous chargements cycliques est un autre point faible des modèles de type Cam-Clay. Les modèles basés sur le concept d'état critique estiment convenablement les chargements monotones appliqués aux sols, mais ces modèles sont incapables de modéliser correctement le comportement des sols sous chargement cyclique. Lors des phases de déchargement et d'éventuelles phases de rechargement, le comportement cyclique est uniquement modélisé par un comportement élastique, alors que les résultats font apparaître des déformations irréversibles au cours des cycles successifs.

Des modèles adaptés aux comportements des argiles sous sollicitations cycliques existent dans la littérature, dont par exemple le «bubble model», développé par Al-Tabbaa (Al-Tabbaa, 1987 ; Al-Tabbaa et Muir Wood, 1989) ou par la suite le modèle de Barnichon, 2002. Ce type de modèles permet de simuler une transition continue entre l'état plastique et l'état élastique. Ils intègrent de l'écroutissement isotrope et cinématique avec un ou plusieurs mécanismes plastiques.

#### 4. Facteurs influant sur la résistance au cisaillement cyclique des argiles

D'importants campagnes d'essais en laboratoire ont été réalisées par de nombreux chercheurs (Bjerrum, 1973 ; Andersen et al, 1976), pour étudier les effets des charges cycliques sur de petits éléments d'argile soumis à un chargement triaxial ou à l'appareil de cisaillement direct. Ils ont constaté que le comportement de l'argile dépend d'un large éventail de facteurs, notamment le type d'essai, la forme de l'onde, la fréquence, nombre de cycles et l'effet de surconsolidation.

##### 4.1. Effet du rapport $\tau/c_u$

Aux fins de comparaison, il a été jugé commode d'exprimer les charges cycliques comme un rapport  $\tau/c_u$ . Les chercheurs ont constaté que plus ce rapport est élevé, moins le nombre de cycles nécessaire pour provoquer la rupture est important.

##### 4.2. Effet de la fréquence

Il a été rapporté que la vitesse de chargement avait une influence considérable sur le comportement de la pression interstitielle de la rupture (Crawford, 1959) et que la valeur élevée de la pression interstitielle observée durant des essais lents pourrait être due à une consolidation secondaire. Il remarque également que durant des essais triaxiaux de compression, où le déviateur a été maintenu constant pendant plusieurs heures, la pression interstitielle continuera d'augmenter.

La forme et la fréquence de l'onde de chargement utilisés sont des facteurs ayant une influence sur le comportement cyclique de l'argile.

Dans d'autres travaux de laboratoire (Seed, 1966 ; Thiers et al, 1969), des échantillons d'argile soumis à des essais de chargement cyclique triaxiaux avec

### Chapitre 3: Comportement des sols sous chargement cyclique

une fréquence constante de 1Hz. Les essais étant non drainés et à chargement contrôlé. On observa qu'une diminution de la fréquence de 2Hz à 1Hz causait une réduction de 20% à de 25% de la résistance au cisaillement.

Dans une étude (Takahashi et al, 1980) sur des échantillons d'argile plastique soumis à un chargement cyclique de type chargement contrôlé, il a été constaté que les échantillons ayant été soumis à plus de 450 secondes pour atteindre la résistance maximale, ont généré des pressions interstitielles plus élevées que celle produites dans les échantillons, ont été soumis à un chargement durant plus de 50 seconds pour atteindre la résistance au cisaillement maximale (figure 3.4).

Une série d'essais triaxiaux sur des spécimens d'argile de Bangkok (Thammathiwat et al, 2004), non remanié, a été réalisée avec variation de la fréquence (0.1Hz, 0.5Hz et 1.0Hz) ainsi que du ratio  $\tau/C_u$  (0,2, 0,25, 0,30, 0,35 et 0,40) tout en maintenant constante la contrainte totale moyenne principale. On observa que la tendance générale était la suivante : les spécimens soumis à un chargement lent exigent plus de temps pour rompre que les échantillons soumis à un chargement rapide.

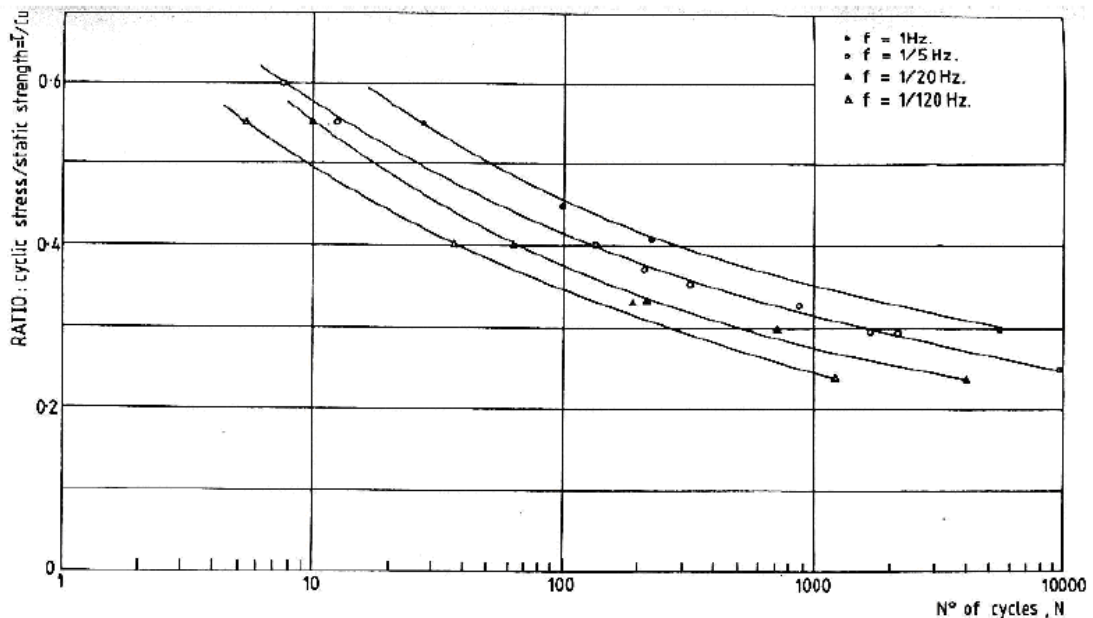


Fig.3.4 : Comparaison des résistances au cisaillement sous chargement cyclique à 10% de déformation axiale sous différentes fréquences (Khaffaf 1978).

### 4.3. Effet de la variation de la pression de confinement

Un autre facteur qui peut influencer la résistance sous l'effet d'un chargement cyclique est la variation de la pression de confinement (c.-à-d. pression hydrostatique de cellules appliquée à l'échantillon dans la cellule triaxial) d'un essai à l'autre.

Une série d'essais triaxiaux répétés non drainés avec mesure de pression interstitielle a été effectuée sur une argile surconsolidée de Seattle (Sherif et al, 1972). On observa que si le rapport de pression de confinement est moins de 8, il y avait peu ou pas de changement de la résistance de cisaillement à la rupture. Des Essais triaxiaux non drainés avec contrôle de chemins de contrainte sur l'argile de Pise (Callisto et al, 1998) ont montré que la rigidité dépend fortement du chemin de contrainte.

**Chapitre 4**

**Présentation du code éléments finis**

**Plaxis**

# Chapitre 4

## Présentation du code éléments finis Plaxis

### 1. Introduction

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers.

### 2. Le code éléments finis PLAXIS

Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis *PLAXIS* représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit

outremesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter.

L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide.

Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. (IHCENE LAMRI,2008)

### **2.1.Options par défaut et solutions approchées**

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui sont un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.(PLAXIS,2002).

#### ***2.1.1. Les options par défaut commencent dès le maillage :***

L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.(PLAXIS,2002).

#### ***2.1.2. De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements:***

Si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée

automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité.

L'option K0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple). (PLAXIS,2002).

### ***2.1.3. Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS :***

Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux.

Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ce champ de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède ; PLAXIS offre cette possibilité qui est souvent très appréciable. (PLAXIS,2002).

### ***2.1.4. La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse :***

L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution,

... etc. ; s'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

Le coefficient de sécurité est une notation un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS. Le critère de rupture est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif. (PLAXIS,2002).

### ***2.1.5. Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats :***

Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées. (PLAXIS,2002).

## **2.2. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS**

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique- plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par élément finis permet de

#### Chapitre 4;Présentation du code éléments finis Plaxis

résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont Empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation.

La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important.

La démarche suivie dans le développement du code PLAXIS est différente. Un des objectifs de PLAXIS est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. En ce sens, PLAXIS peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans PLAXIS sont des modèles qui peuvent apparaître simple, voire simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ... etc.), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élastoplastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter d'une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écrouissage. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le "*Soft Soil Model*" qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastique peut être justifié.

## Chapitre 4;Présentation du code éléments finis Plaxis

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- Quel est le comportement principal à modéliser ?
- Utiliser un modèle qui décrit ce comportement ;
- Interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.

En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

### ❖ *Les modèles utilisés dans Plaxis sont :*

1. Modèle élastique linéaire
2. Modèle de Mohr-Coulomb
3. Modèle de sol avec écrouissage (*Hardening Soil Model*)
4. Modèle pour sols mous (*Soft Soil Model*)
5. Modèle pour sols mous avec effet du temps (*Soft Soil Creep Model*). (REZAIE, F,1994).

#### **2.2.1. Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles :**

Le comportement des sols est régi par les propriétés du squelette ; il est donc nécessaire d'utiliser des contraintes effectives et d'écrire des lois de comportement en contraintes effectives. La pression interstitielle générée dans les ouvrages est une conséquence du non variation de volume ; celle-ci est-elle-même dépendante de la perméabilité du sol. Un sable peut être non drainé in situ sous des sollicitations sismiques (rapides) de même qu'une argile est toujours non drainée à court terme. Les variations de volumes empêchées par les perméabilités créent des pressions interstitielles ; en fait, celles-ci dépendent des variations de volume ; en élasticité, si les grains de sols sont incompressibles, on démontre que :

$$\Delta u_w = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \dots \dots \dots 4.1$$

Où  $\Delta u_w$  est la surpression interstitielle,  $n$  la porosité,  $K_w$  le module volumique de l'eau et  $\Delta \varepsilon_v$  est un incrément de déformation volumique.

Des calculs en contraintes totales sont possibles. Ils permettent par exemple, des calculs de tassements et de stabilité de remblai après construction. Ces calculs ignorent la génération de pressions interstitielles. Ils présentent l'avantage d'être simples et de se recalculer par rapport à des calculs plus classiques de stabilité à court terme.

Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai. (REZAIE, F,1994).

### 2.2.2. Comportement élastoplastique :

Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil  $S_0$  (figure 4.1).

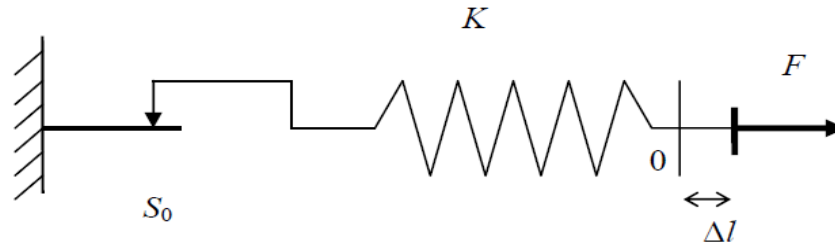


Fig.4.1 :Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure [4.2].

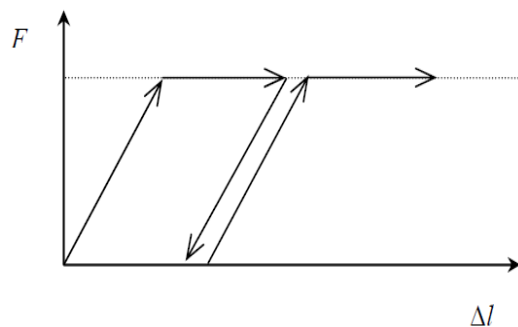


Fig.4.2 :Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par les figures [4.1 et 4.2] est un comportement élastique-plastique sans écouissage. La figure [4.3] représente un comportement élastique-plastique avec écouissage. (REZAIE, F,1994).

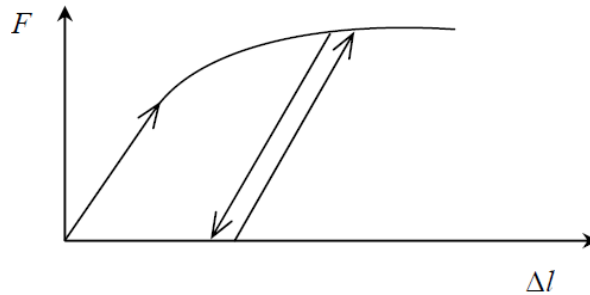


Fig.4.3 : Représentation du comportement élasto-plastique avec écouissage.

### 2.2.3. Modèle de Mohr-Coulomb :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c \dots\dots\dots 4.2$$

Où  $\sigma_n$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et  $c$  et  $\varphi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau figure [4.4].

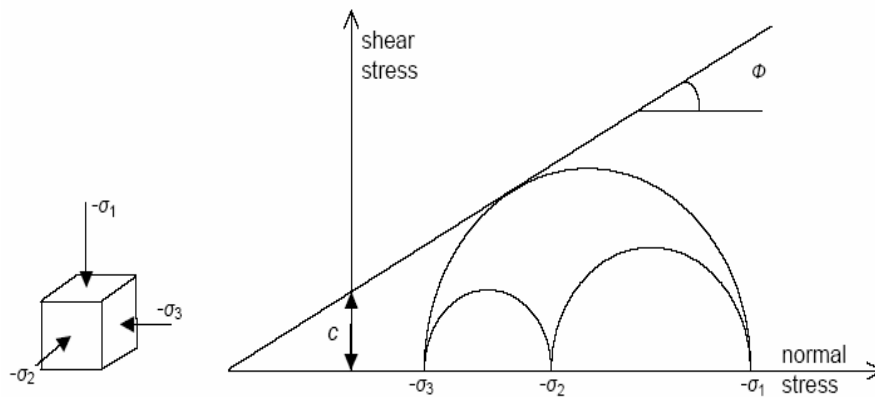
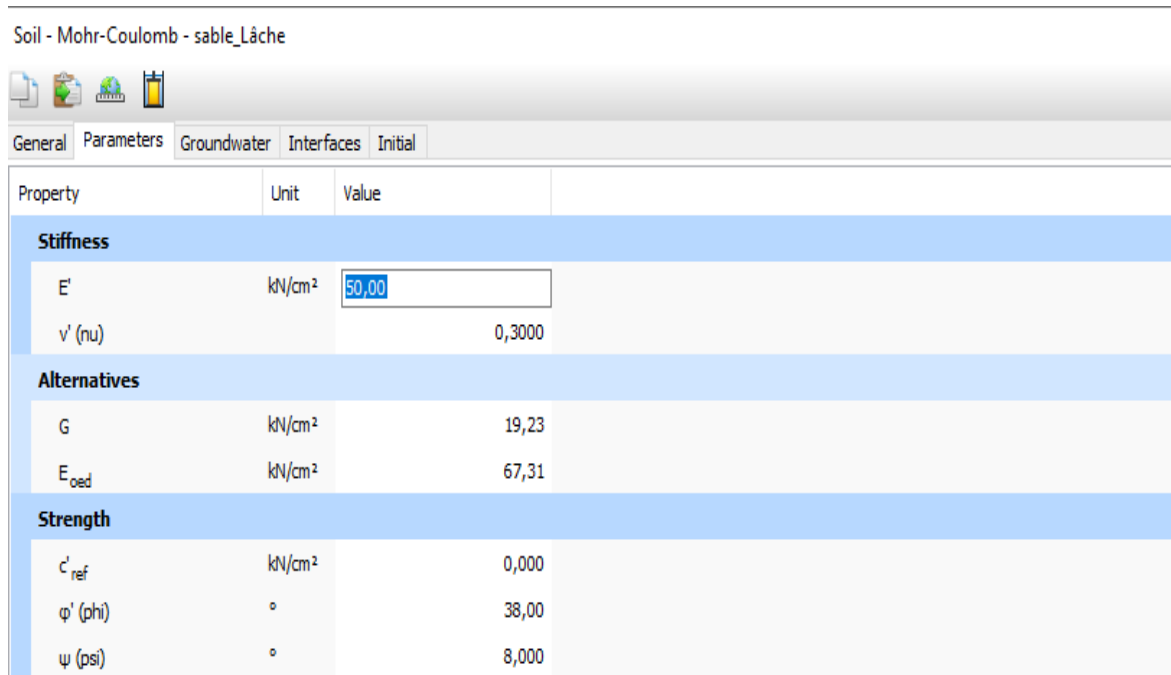


Fig.4.4 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres (figure 4.5). Les deux premiers sont  $E$  et  $\nu$  (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont  $c$  et  $\varphi$ , respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes

## Chapitre 4;Présentation du code éléments finis Plaxis

souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. (REZAIE, F,1994).



The screenshot shows the 'Soil - Mohr-Coulomb - sable\_Lâche' window in Plaxis. The 'Parameters' tab is active, displaying a table of soil properties. The table is organized into sections: Stiffness, Alternatives, and Strength. The 'Stiffness' section includes Young's modulus (E') and Poisson's ratio (v'). The 'Alternatives' section lists shear modulus (G) and oedometric modulus (E<sub>oed</sub>). The 'Strength' section lists reference cohesion (c<sub>ref</sub>), friction angle (φ'), and dilatancy angle (ψ).

Property	Unit	Value
<b>Stiffness</b>		
E'	kN/cm <sup>2</sup>	50,00
v' (nu)		0,3000
<b>Alternatives</b>		
G	kN/cm <sup>2</sup>	19,23
E <sub>oed</sub>	kN/cm <sup>2</sup>	67,31
<b>Strength</b>		
c <sub>ref</sub>	kN/cm <sup>2</sup>	0,000
φ' (phi)	°	38,00
ψ (psi)	°	8,000

Fig.4.5 :Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

### a) Module d'Young :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant.

Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{max}$  mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux.

Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (figure 4.6).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple. (REZAIE, F,1994).

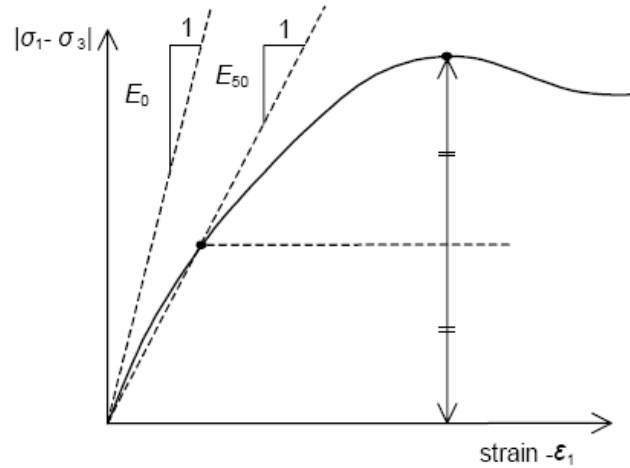


Fig.4.6 :Définition du module à 50 % de la rupture.

**b) Coefficient de Poisson :**

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable. (REZAIE, F,1994).

**c) Angle de frottement :**

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger Les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement  $\varphi_{cv}$ (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (figure 4.4). (REZAIE, F,1994).

**d) Cohésion :**

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec  $\phi_u = 0$ , PLAXIS offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : Ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre *c-depth*. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (typiquement en kPa/m). (REZAIE, F,1994).

### ***e) Angle de dilatance :***

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté  $\psi$  ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \phi - 30^\circ \quad \text{pour} \quad \phi > 30^\circ.$$

$$\psi = 0^\circ \quad \text{pour} \quad \phi < 30^\circ.$$

Le cas où  $\psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique).

La valeur  $\psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes. (REZAIE, F,1994).

### ***f) Les paramètres avancés :***

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés (figure 4.7). (REZAIE, F,1994).

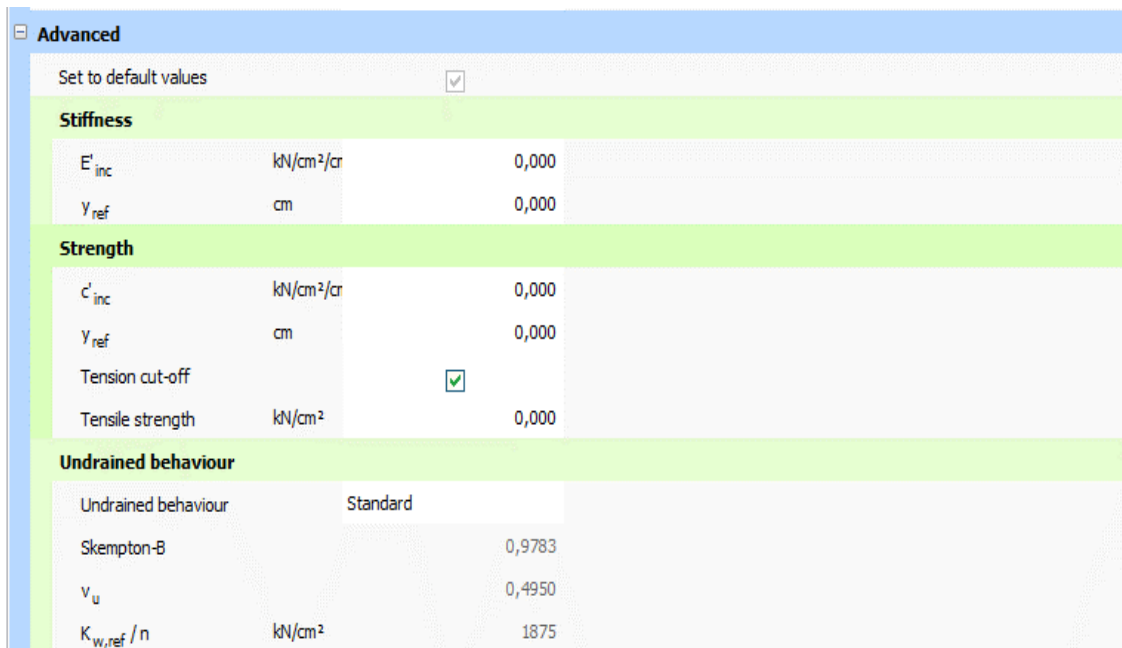


Fig.4.7 :Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.

### 2.3. Calcul

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (*Calculation*). *PLAXIS* permet d'effectuer différents types de calculs aux éléments finis.

Le programme de calcul ne traite que de l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique (*Plastic calculation*), une analyse de consolidation (*Consolidation analysis*), un calcul de coefficients de sécurité (*Phi-c réduction*) ou un calcul dynamique (*Dynamique calculation*).

Cette dernière option requiert le module dynamique de *PLAXIS* (*PLAXIS Dynamique module*), qui est une extension de la Version 8.

Les trois premiers types de calcul (*plastique, consolidation, Phi-c réduction*) permettent en option de prendre en compte les effets des grands déplacements. Cette option s'appelle *Updatedmesh*(mise à jour du maillage) et est disponible comme option avancée.

Dans la pratique, un projet peut se décomposer en plusieurs phases. De même, le processus de calcul de *PLAXIS* est aussi divisé en étapes de calcul. L'activation d'un cas de charge prédéfini, la simulation d'étapes de construction, l'introduction d'une période de consolidation, le calcul d'un coefficient de sécurité sont des exemples de phases de calcul. Chaque phase de calcul est couramment divisée en plusieurs pas de calcul. Cela est dû au fait que le comportement non linéaire du sol nécessite l'application des charges par paliers (incréments de charge). Cependant, dans la plupart des cas, il suffit de préciser l'état à obtenir à la fin de la phase de calcul. Dans *PLAXIS*, des procédures automatiques et robustes d'incrémentation des pas de chargement assurent un choix approprié des pas de calcul. (PLAXIS,2002).

### 2.3.1. Le programme de calcul :

Cette icône représente le programme de calcul (*Calculation*). Celui-ci contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis. La fenêtre de sélection permet un choix rapide entre les quatre projets les plus récents.

Si le projet choisi n'apparaît pas dans cette liste, il faut utiliser l'option <<<*More files*>>>.

Dans ce cas, le gestionnaire de fichiers apparaît, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires accessibles et de choisir le fichier de projet *PLAXIS* souhaité (\*.plx). Il n'est pas nécessaire de choisir un projet quand on clique sur le bouton *Calculate* depuis la fenêtre des conditions initiales du programme d'entrée des données. Dans ce cas, le projet en cours est automatiquement sélectionné dans le programme de calcul. Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît. (PLAXIS,2002).

### 2.3.2. Caractéristiques générales des calculs :

Les données introduites à l'aide de l'onglet *General* permettent de définir les caractéristiques générales d'une phase de calcul.

### ***Phase :***

Les divers éléments du groupe *Phase* peuvent être utilisés pour identifier une phase de calcul et pour déterminer l'ordre des phases de calcul en sélectionnant celle qui sera prise comme point de départ pour chaque étape de calcul.

### ***Calculation type :***

Les choix faits dans les deux cases du groupe (*Calculation type*) déterminent le type de calcul utilisé

### ***Comment et log info :***

La case *Log info* affiche les messages générés pendant le calcul aux éléments finis. La case *Comment* permet de stocker les informations relatives à une phase de calcul en particulier. (PLAXIS,2002).

### **2.3.3. Types de calculs :**

Le type de calcul d'une phase (*Calculation type*) est d'abord défini dans le menu déroulant en haut à droite de l'onglet General. Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique (*Plastic*), une analyse de consolidation (*Consolidation*) et un calcul de coefficient de sécurité (*Phi-c réduction*).

Un calcul dynamique (*Dynamique*) est disponible en option dans le menu déroulant, mais il requiert le module PLAXIS Dynamics, qui est une extension de la Version 8. (PLAXIS,2002).

### **2.3.4. Paramètres de contrôle du calcul :**

L'onglet *Paramètres* est employé pour définir les paramètres de contrôle d'une phase de calcul et de la procédure de résolution correspondante (figure 4.8).

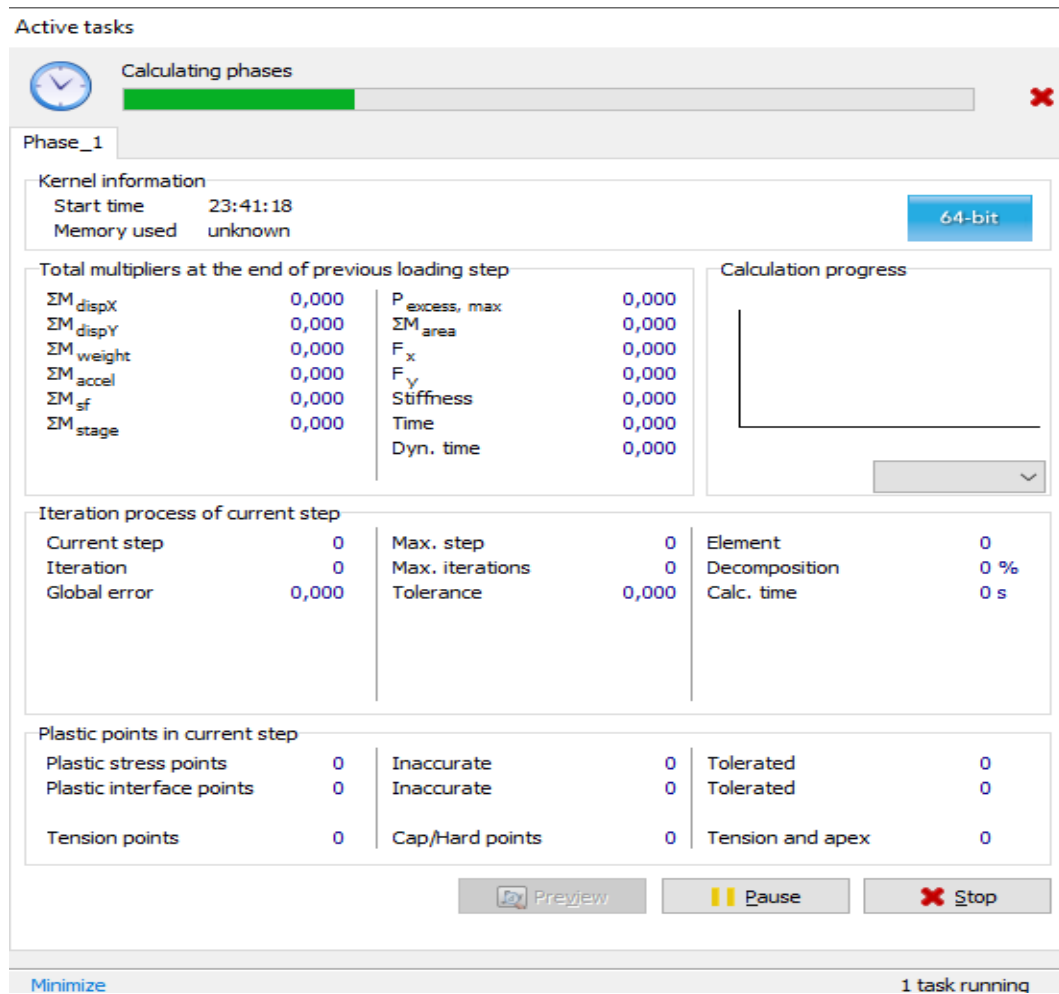


Fig.4.8 :Onglet Paramètres de la fenêtre de calcul (Calculations).

### 2.3.4.1. Construction par étapes :

La construction par étapes (*Staged construction*) est le type de chargement (*Loading input*) le plus important. Grâce à cette fonctionnalité spéciale de Plaxis, il est possible de changer la géométrie et la configuration de chargement en désactivant ou réactivant les charges, les couches de sol ou les éléments de structure créés lors de la définition du modèle géométrique. La construction par étapes permet une simulation précise et réaliste de différents processus de chargement, construction et excavation. Cette option peut également être utilisée pour réassigner des jeux de caractéristiques des matériaux ou pour changer les distributions de pressions hydrauliques dans la géométrie. Pour mener un calcul de construction par étapes, il est d'abord nécessaire de créer un modèle géométrique qui inclut tous les objets utiles au calcul. Les objets qui ne sont pas

nécessaires au début du calcul seront désactivés dans la configuration géométrique initiale à la fin du programme *Input*. L'analyse d'une construction par étapes peut être effectuée au cours d'un calcul plastique aussi bien que pour une analyse de consolidation. Dans l'onglet *Parameters*, l'option *Staged construction* peut être sélectionnée dans la case *Loading input*.

En double-cliquant sur le bouton *Define*, le programme *Input* est lancé et la fenêtre de construction par étapes apparaît.

Cette fenêtre est semblable à la fenêtre des conditions initiales, mis à part le fait que les options qui n'ont de sens que pour les conditions initiales (comme la *procédure K0*) ne peuvent être sélectionnées.

Il est aussi impossible d'accéder à la fenêtre géométrie du programme *Input* à partir de la fenêtre de construction par étapes. D'autre part, des options spécifiques au mode de construction par étape sont disponibles. (PLAXIS,2002).

### 2.3.4.2. Activation ou modification des chargements :

Les charges créées pendant la définition de la géométrie sont désactivées dans la situation initiale, mais elles peuvent être réactivées en utilisant un processus de construction par étapes. Comme pour les éléments de structure, les chargements peuvent être activés ou désactivés en cliquant une fois dessus dans le modèle géométrique.

Les charges actives sont dessinées dans leur couleur d'origine, alors que les charges désactivées sont dessinées en gris.

Lors de l'activation de charges, la valeur réelle du chargement appliqué durant le calcul est déterminée par la donnée du chargement et le multiplicateur de chargement correspondant. (PLAXIS,2002).

### 2.3.4.3. Exécution de la procédure de calcul :

Lorsque les phases de calcul ont été définies et les points pour les courbes sélectionnés, la procédure de calcul peut être exécutée. Avant de la lancer, il est cependant préférable de vérifier la liste des phases de calcul. En principe, toutes les phases de calcul signalées par une flèche bleue seront exécutées dans la procédure de calcul. Par défaut, si l'on définit une phase de calcul, celle-ci sera

## Chapitre 4;Présentation du code éléments finis Plaxis

automatiquement sélectionnée pour les calculs. Une phase de calcul précédemment exécutée, est marquée d'une coche verte si le calcul est parvenu à son terme, sinon elle est indiquée par une croix rouge.

Pour sélectionner ou désélectionner une phase de calcul à exécuter, il faudra soit double-cliquer sur la ligne correspondante, soit appuyer sur le bouton droit de la souris au niveau de la ligne correspondante puis sélectionner l'option *Mark calculate* ou l'option *Unmark calculate* dans le menu du curseur. (PLAXIS,2002).

### 2.3.5. Résultats affichés pendant les calculs :

Pendant une analyse en déformations par éléments finis, les informations à propos du processus itératif sont présentées dans une fenêtre séparée. Ces informations comprennent les valeurs courantes des facteurs multiplicateurs totaux de chargement ainsi que d'autres paramètres pour la phase en cours de calcul (figure 4.9). (PLAXIS,2002).

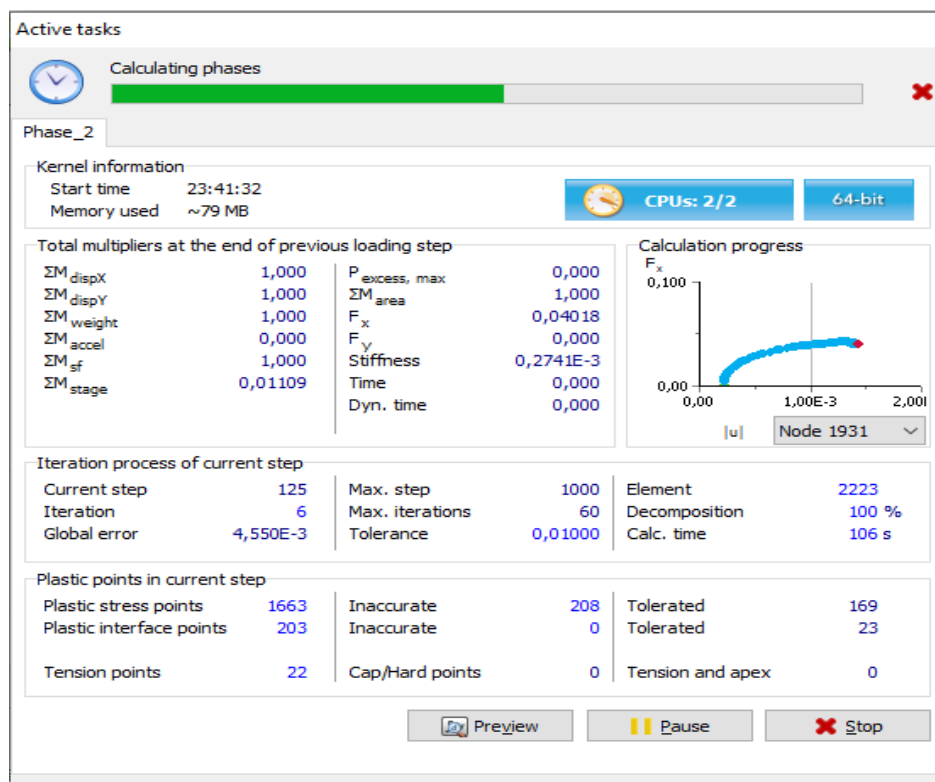


Fig.4.9 :Fenêtre de calcul.

### 2.3.6. Le programme de résultats (output) :

Cette icône représente le programme de résultats (*Output*). Celui-ci contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis. Au lancement du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul approprié ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. Après cette sélection, une première fenêtre de résultats est ouverte ; celle-ci affiche le maillage déformé. (PLAXIS,2002).

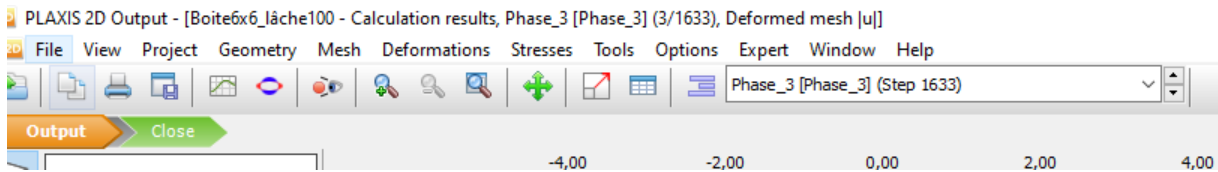


Fig.4.10 :Barre d'outils de la fenêtre principale du programme *Output*.

### 2.3.7. Le menu des résultats :

Le menu principal du programme *Output* contient des menus déroulants qui couvrent la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, et voir des graphiques et des tableaux. Les principaux types de résultats d'un calcul aux éléments finis sont les contraintes et les déformations. Par conséquent, ces deux aspects constituent la majeure partie du menu des résultats. Lorsqu'un modèle géométrique complet est affiché, le menu principal est constitué de différents menus :*File, Edit, View, Geometry, Deformations, Stresses, Window et Help*.

Selon le type de données présentées dans une forme de résultats, le menu changera. (PLAXIS,2002).

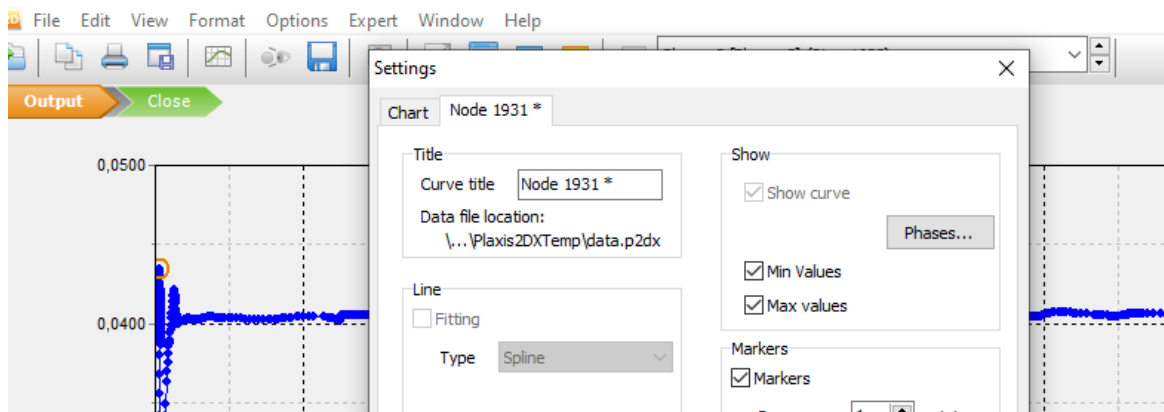
### 2.3.8. Le programme courbe (curves) :

Cette icône représente le programme *Curves* (figure 4.11). Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations. Au début du programme *Curves*, il faut choisir entre ouvrir une courbe existante et en créer une nouvelle. Si *New chart* est sélectionné, la fenêtre *Curvegeneration* apparaît, dans laquelle les paramètres de génération de courbes sont réglés.

## Chapitre 4;Présentation du code éléments finis Plaxis

En sélectionnant *Existing chart*, la fenêtre de sélection permet un choix rapide de l'une des quatre courbes les plus récentes. Si le graphique à sélectionner n'apparaît pas dans la liste, l'option <<<*More files*>>> peut être utilisée.

Le gestionnaire de fichiers général apparaît alors, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires disponibles et de choisir le fichier graphique de PLAXIS souhaité (un numéro compris entre 00 et 99). Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la fenêtre principale. (PLAXIS,2002).



**Fig.4.11** :Barre d'outils de la fenêtre principale du programme *Curves*.

## **Chapitre 5**

# **Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique**

## Chapitre 5

# Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

### 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de modélisation avec le code *PLAXIS V20*, de l'essai de cisaillement direct sur des éléments de brique en terre venant de Boussaâda. Ces modèles ont permis l'étude de comportement au cisaillement et de déformation de brique en terre, pour cela on utilise les caractéristiques du brique étudié par Saâdaoui.N et Ouahab.Y (Guettouche et al, 2019), on va utiliser les deux types de brique, ancien et nouveau, et on va étudier aussi la condition de chargement imposée dans la direction verticale (contrainte imposée).

### 2. Cas du cisaillement sous chargement monotone

Le but de cette partie est de déterminer un modèle géotechnique, dit de référence, donc on va modéliser la boîte de cisaillement.

Le modèle de référence a été établi et calculé avec le logiciel *PLAXIS 2D V20*. Il sera utilisé comme base de comparaison lors de l'étude paramétrique qui suivra.

#### 2.1 Définition des données

Pour que le logiciel *PLAXIS* puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données du modèle suivantes :

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

On choisit un nom (essai de cisaillement), en déformation plane avec triangles à 15 nœuds. On suppose une couche de sol de 0.03m d'épaisseur et de 0.06m de large (les dimensions de la boîte de Casagrande). On obtient donc un rectangle de 30x60 mm<sup>2</sup>, cette couche est divisée en deux couches de 0.015m d'épaisseur (demi-botte inférieure et supérieure), de même nature de sol dans le cas d'essais sol-sol.

Mais dans le cas de l'essai sol-structure on remplace la couche inférieure par l'élément de structure (plate).

Les conditions aux limites sont prises par défaut :déplacements libres sur les deux cotés verticaux et bloqués au fond.

On choisit le chargement A (load system A) et on applique pour l'ancien adobe les chargements (100 ,200, 300 KPa), et pour le nouveau adobe les chargements (100 ,200 ,300 KPa), On choisit aussi Les déplacements imposés (Prescribed displacements) qui peuvent être placées dans le point (0,0.015) a (0,0.03) et dans le point (0.06,0.015) a (0.06,0.03).

Les figures suivantes (figures5-1 et 5-2) représentent la géométrie du problème.

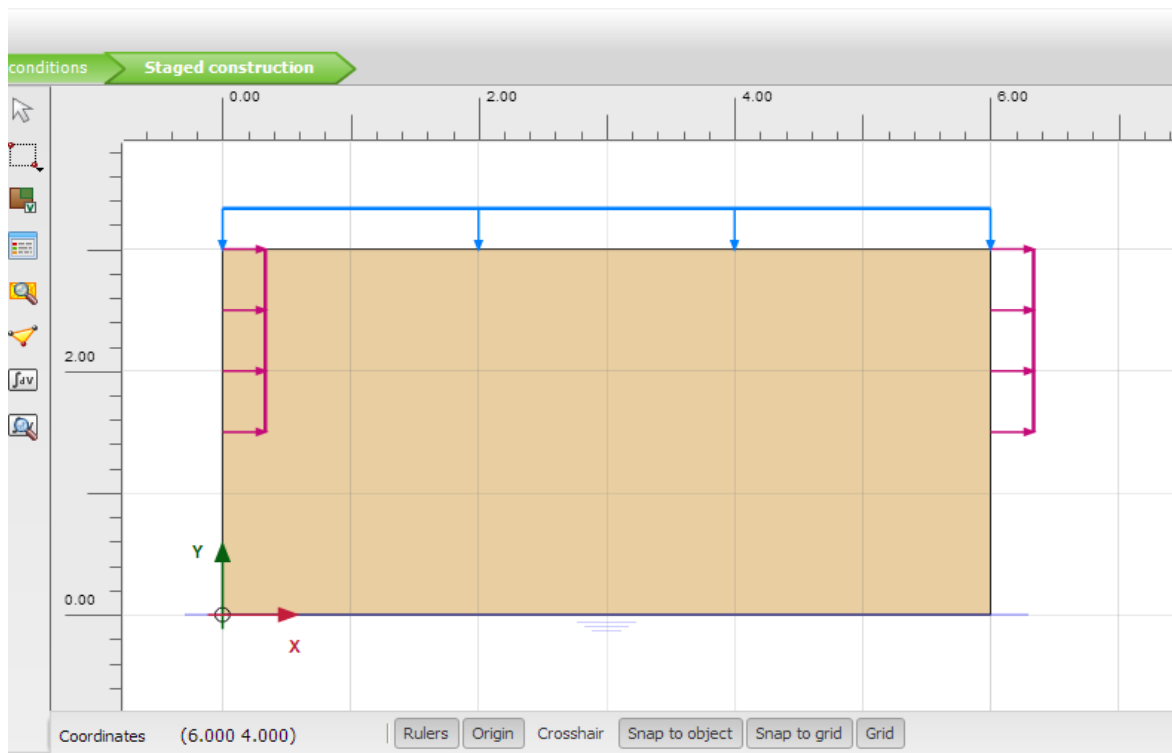


Fig.5.1 :Modèle géométrique du problème.

### 2.2 Paramètres de la brique en terre

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

On définit un nouveau type de sol en choisissant (*new*) dans la base de données des matériaux. On utilisera un modèle de Mohr-Coulomb et on précisera que le sol est drainé (*drained*). Les paramètres pour l'ancien et le nouveau sont donnés dans le tableau 5.1.

**Tab.5.1** : Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol.

Paramètres	Nom	Ancien adobe	Nouveau adobe	Unité
Modèle type	Model	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Poids volumique sec	$\gamma_d$	15,92	16,12	kN/m <sup>3</sup>
Module d'Young	$E_{ref}$	6240	1020	kN
Coefficient de Poisson	N	0.31	0.27	-
Cohésion	$c_{ref}$	220	68.06	kPa
Angle de frottement	$\Phi$	34.92	57.29	-
Angle de dilatation	$\Psi$	4.92	27.29	-
Facteur de de forme	$R_{inter}$	0.90	0.90	-

### 2.3 Génération du maillage

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 540 éléments et le nombre des nœuds est de 4662 nœuds.

On règle la finesse du maillage (*global Coarseness*) sur « *medium* », puis, on le raffine localement au niveau de l'interface, comme indiqué sur la figure 5.2.

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

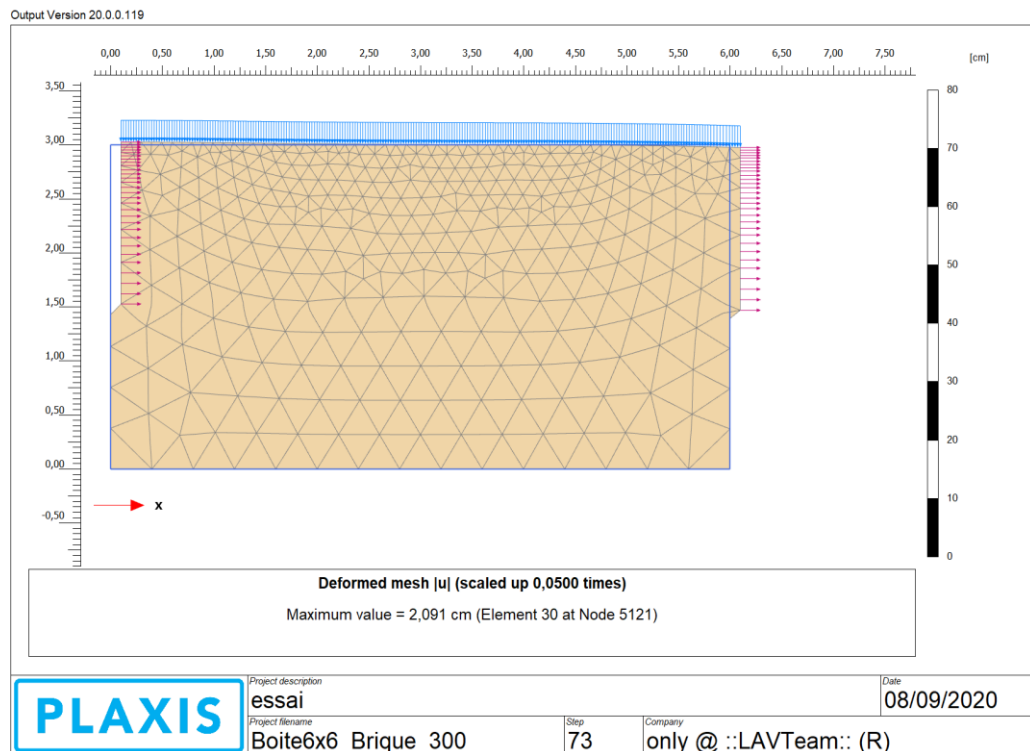


Fig.5.2 : Maillage du problème.

### 2.4 Procédure de calculs

Le calcul du modèle de référence est défini en 3 phases :

**Phase 0 : Initiation des contraintes (procédure  $K_0$ )** ; On détermine les contraintes effectives initiales.

**Phase 01 : phase de chargement** : Dans la fenêtre calcul, on choisit pour la première phase les options et dans l'onglet Paramétrés, on prend l'option <<construction par étapes>> (*staged construction*) et l'option <<Remise à zéro des déplacements>> (*reset displacementsto zero*) puis on clique sur le bouton "Define". On obtient alors un vu du modèle avec en grisé les charges que l'on va activer en cliquant dessus et régler les valeurs de la charge, puis on active l'interface dans le cas d'essai sol-sol.

**Phase 02 : phase de cisaillement** : On active les déplacements imposés en cliquant dessus et on choisit la valeur de 5mm selon la direction (x) et 0mm selon la direction (y).

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

Il est nécessaire de choisir les points où l'on veut visualiser les données, tant en déplacement (des nœuds) qu'en contraintes (des points de Gauss).

On peut alors lancer le calcul...

### 2.5 Présentation des résultats de calcul

#### 2.5.1 Les principaux résultats attendus

On s'intéressera à :

- ❖ La déformation de maillage
- ❖ Les points plastiques (*plastic points*)
- ❖ Effet du paramètre du sol (analyse paramétrique)
- ❖ La variation de la force ( $F_x$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $w$ )
- ❖ La variation du déplacement à la normale en fonction du déplacement horizontal ( $w$ )
- ❖ La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte de confinement pour déterminer les caractéristiques de cisaillement ( $c$ ,  $\varphi$ ) et on le compare avec les résultats obtenus dans les essais réalisés.

#### 2.5.2 Modèles réalisés sur brique

Une série de modèles numériques d'essais de cisaillement direct monotone a été réalisée pour étudier l'influence de principaux paramètres (l'adobe et la contrainte normale initiale) sur la contrainte de cisaillement. Les essais ont été effectués avec deux types d'adobe (ancien et nouveau). Les essais ont été modélisés avec un chemin de chargement : à contrainte normale constante. Une gamme de contraintes de 100, 200 et 300 kPa a été explorée.

Nous allons présenter ci-après, les résultats de ces différents essais.

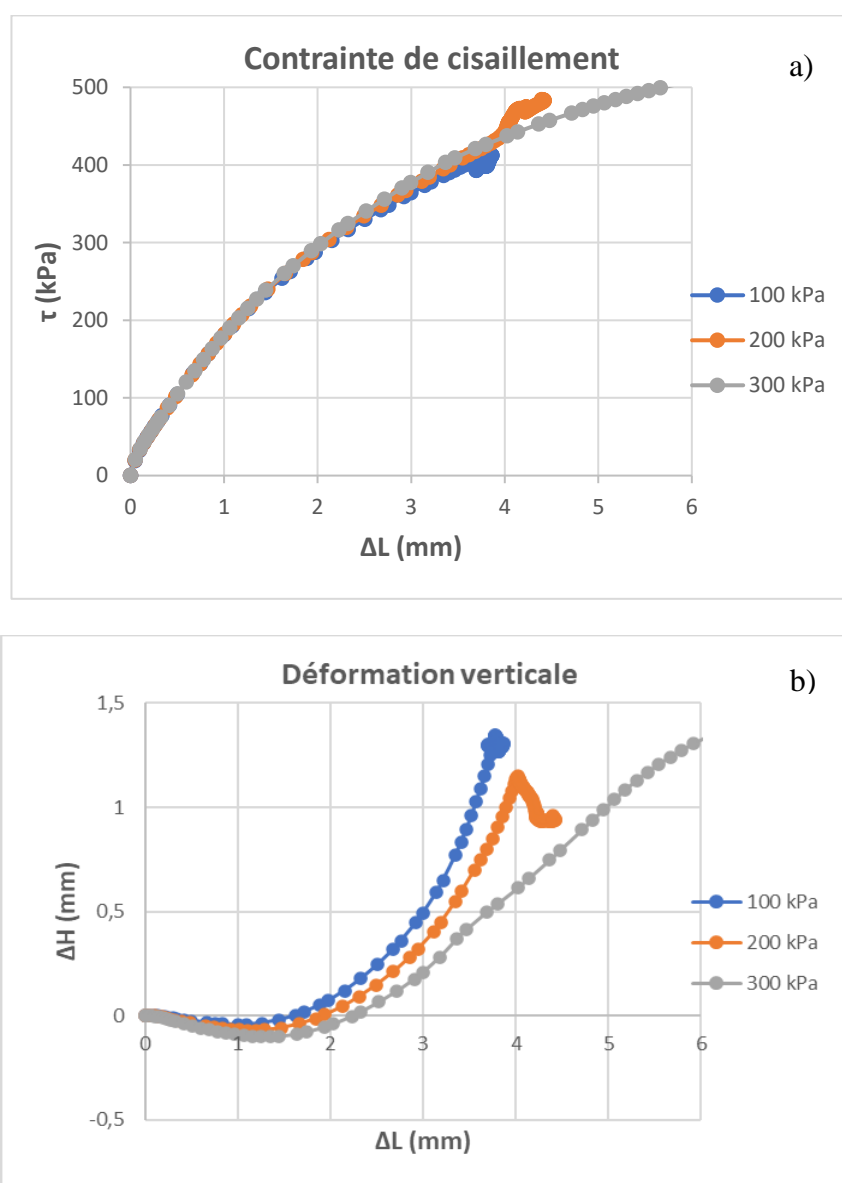
#### 2.5.3 Ancien adobe

Afin d'étudier l'influence de la contrainte normale initiale, nous avons modélisé des essais à trois valeurs de la contrainte normale initiale à forte confinement ( $\sigma_{no}=100, 200$  et  $300$  kPa). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 5.3.a et 5.3b.

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

On constate que la contrainte de cisaillement augmente rapidement au début du chargement. Elle atteint un pic, puis elle continue à augmenter d'une façon asymptotique (Figure 5.3.a), la contrainte de cisaillement augmente avec la contrainte initiale, on remarque que la stabilisation n'apparaît que tardivement pour des cisaillements importants.

L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la figure 5.3.b. On constate que le déplacement tangentiel est dilatant tous le long du cisaillement, la phase de dilatance augmente avec la contrainte initiale.



**Fig.5.3** : Modèle de cisaillement à contrainte normale constante "ancien adobe".

a) : Évolution de la contrainte tangentielle, b) : Évolution du déplacement normal.

#### **2.5.4 Nouveau adobe**

Des essais ont été modélisée avec le nouveau adobe à fort confinement ( $\sigma_{no} = 100, 200$  et  $300$  kPa).

Une analyse des résultats obtenus (Figures 5.4.a et 5.4.b) montre que dans le cas des fortes confinements la contrainte de cisaillement augmente rapidement au début des essais sans stabilisation, puis change de direction pour un déplacement  **$U_x = 1.12$  mm** et continue à augmenter, on remarque que pour une contrainte initiale  $\sigma_{no} = 100$  kPa,  $\sigma_{no} = 200$  kPa et  $\sigma_{no} = 300$  kPa donnent les mêmes valeurs de contrainte de cisaillement.

En ce qui concerne le déplacement normal dans le cas de fort confinement on remarque que le comportement est dilatant pour  $\sigma_{no} = 100$  kPa sans stabilisation. On constate également que le déplacement normal ne s'accroît pas avec la contrainte initiale, pour  $\sigma_{no} = 200$  kPa et  $\sigma_{no} = 300$  kPa on note que le comportement est contractant tout au long du modèle.

#### **2.5.5 Etude comparative des modèles ancien adobe et nouveau adobe**

La figure 5.5 illustre une comparaison entre les résultats obtenus avec les deux modèles : modèle ancien adobe et modèle nouveau adobe.

Une analyse de ces résultats montre que la contrainte maximum de cisaillement avec le modèle ancien adobe est atteint avec un déplacement tangentiel  **$\Delta L = 4.50$  mm** et dépasse la valeur  **$\tau > 450$  kPa**, par contre dans le cas du nouveau adobe la contrainte continue à augmenter de façon oblique sans stabilisation, et sa valeur ne dépasse pas  $\tau < 40$  kPa.

En ce qui concerne le déplacement normal, le modèle ancien adobe a un comportement montre une phase de contractante puis devient dilatant, dans le cas du nouveau adobe le modèle montre une phase contractante plus prononcée dans le cas de l'ancien adobe .

Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

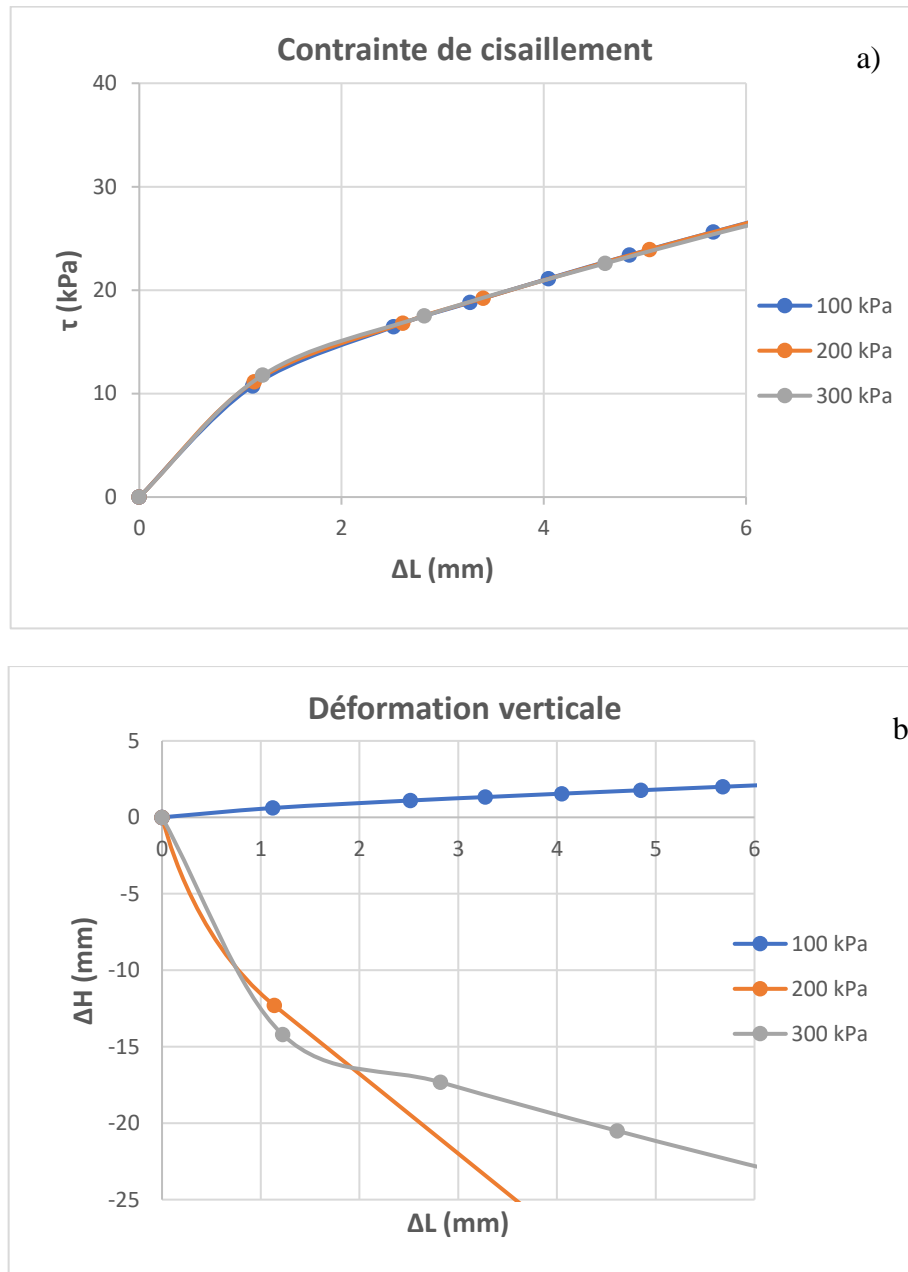
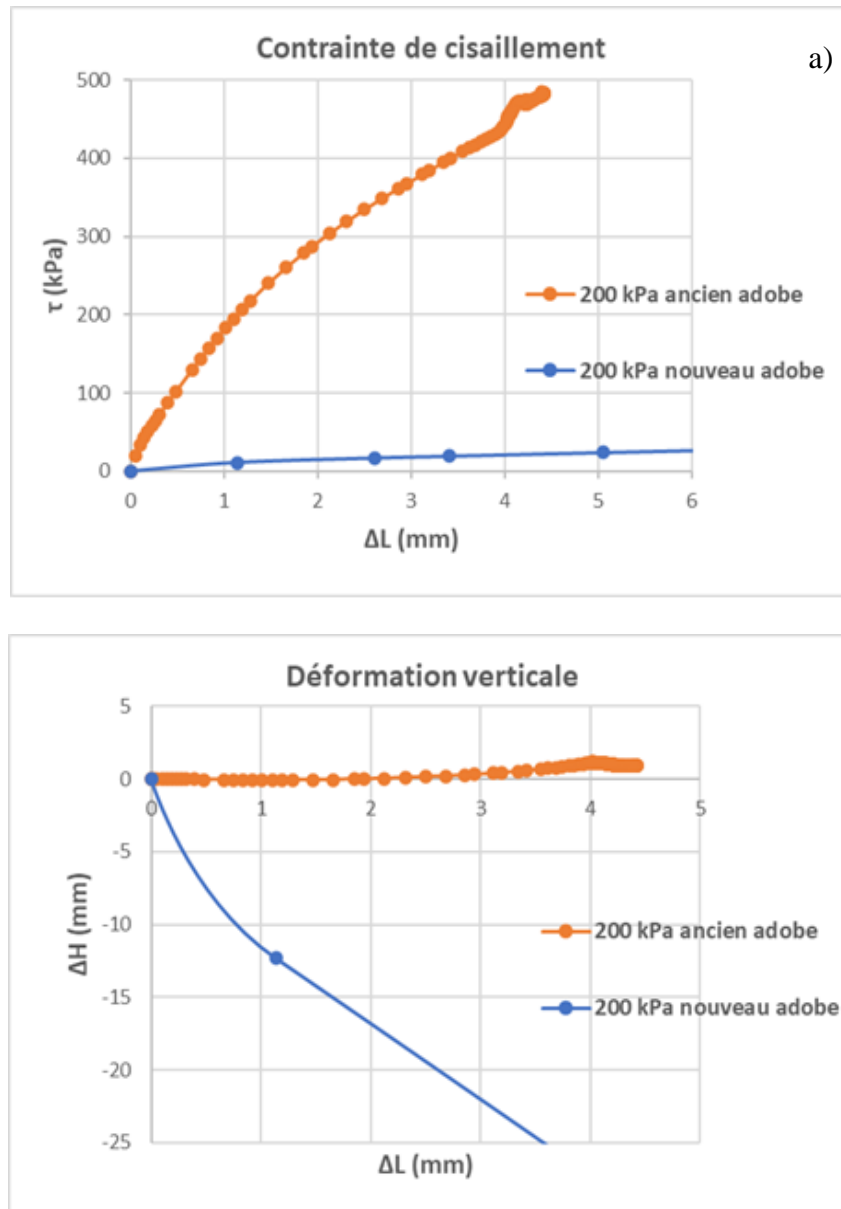


Fig.5.4 : Essais de cisaillement à contrainte normale "nouveau adobe"

a) : Evolution de la contrainte tangentielle ; b) : Evolution du déplacement normal.



**Fig.5.5** : Modèle de cisaillement à contrainte normale constante "ancien adobe-nouveau adobe"

a) : Evolution de la contrainte tangentielle ; b) : Evolution du déplacement normal

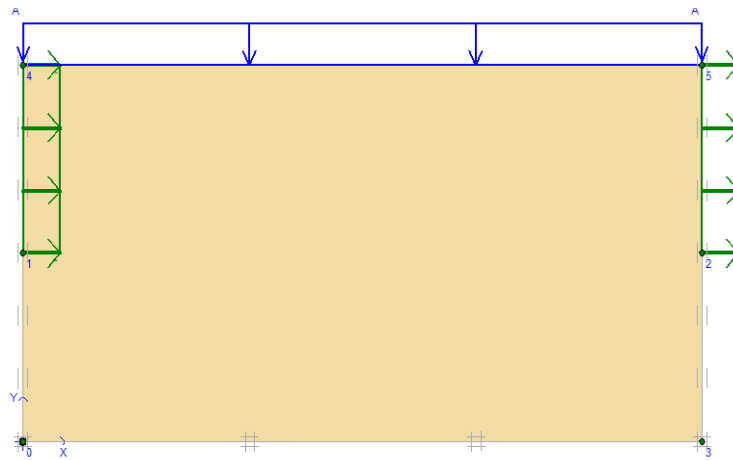
### 3. Cas du cisaillement sous chargement cyclique

#### 3.1 Données et mise en œuvre des calculs

Les calculs ont été effectués avec le logiciel PLAXIS-2D. Ils ont nécessité la définition du modèle représenté sur la figure 4.1, le modèle simule une boîte de cisaillement similaire à celle utilisée dans l'étude expérimentale. Il est composé de

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

deux demi-boîtes, l'une supérieure mobile et l'autre inférieure fixe. Il est confiné à sa partie supérieure libre (charge répartie A) et soumis à un déplacement appliqué sur ses deux côtés latéraux (déplacement prescrit B) lui permettant de glisser dans un sens comme dans un autre sur une course prédéfinie sur un plan fixe simulant l'interface sable-sable (dans le cas d'un cisaillement du sable seul) ou sable-plaque (dans le cas d'un cisaillement à l'interface du sable et de la plaque). Les conditions aux limites sont choisies par défaut (déplacement horizontal et verticaux bloqués à la base du modèle et déplacement horizontal bloqué sur ces côtés latéraux).



**Fig.5.6** :Modèle géométrique considéré pour l'essai de cisaillement direct cyclique

Le tableau 5.2 donne les valeurs des paramètres de calcul pour la brique en terre, ancien et nouveau. Notons que le modèle de comportement des matériaux retenu est de type Mohr-Coulomb. En plus des propriétés de cisaillement cyclique du brique en terre utilisées, les calculs permettent de déterminer le comportement de la brique en terre sous chargement cyclique, et de faire une comparaison entre l'ancien et le nouveau adobe.

Après génération du maillage et initialisation des contraintes (procédure Ko), les calculs comportent deux phases successives :

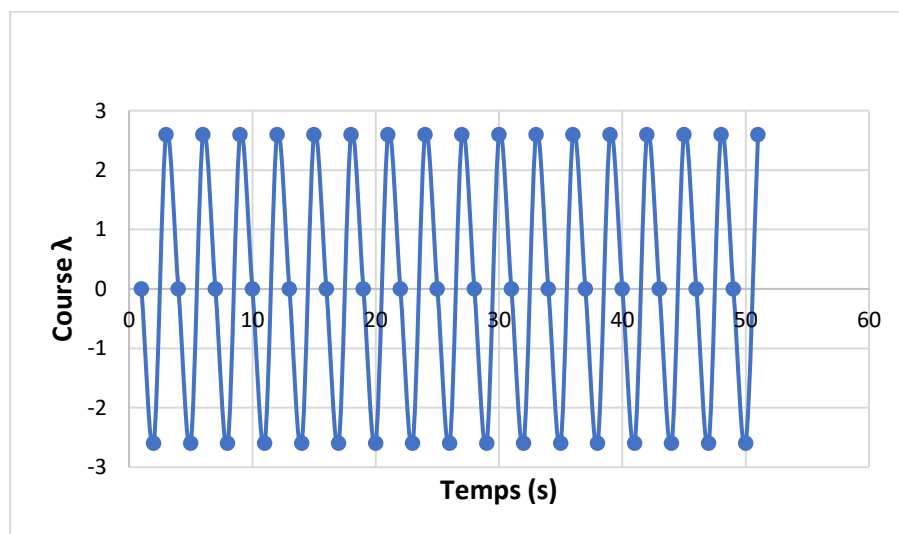
- Une phase de mise en application de la contrainte normale de confinement considérée  $\sigma_n=100$  kPa ;

**Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique**

- Une phase de cisaillement cyclique caractérisée par l'application d'un déplacement prescrit à la demi-boite supérieure mobile. Le déplacement prescrit s'effectue de manière alternée sur une course fixée à  $\lambda \leq +3.0$  cm dont la loi de variation est présentée sur la figure 4.2 pendant un certain nombre de cycles  $N_{cyc}$  fixé (1,10 cycles).

**Tab.5.2 :** Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol.

Paramètres	Nom	Ancien adobe	Nouveau adobe	Unité
Modèle type	Model	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Poids volumique sec	$\gamma_d$	16,81	17,36	kN/m <sup>3</sup>
Module d'Young	$E_{ref}$	6240	1020	kN
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.31	0.27	-
Cohésion	$c_{ref}$	220	68.06	kPa
Angle de frottement	$\varphi$	34.32	57.29	-
Angle de dilatation	$\psi$	4.92	27.29	-
Facteur de de forme	$R_{inter}$	0.90	0.90	-



**Fig.5.7 :** Loi de variation du déplacement cyclique

## Chapitre 5 Modélisations du comportement au cisaillement du brique en terre sous chargement monotone et cyclique

La figure 5.8 présente le maillage déformé durant les phases de confinement et de cisaillement du modèle de sable supposé dense après 1 et 10 cycles de cisaillement alterné.

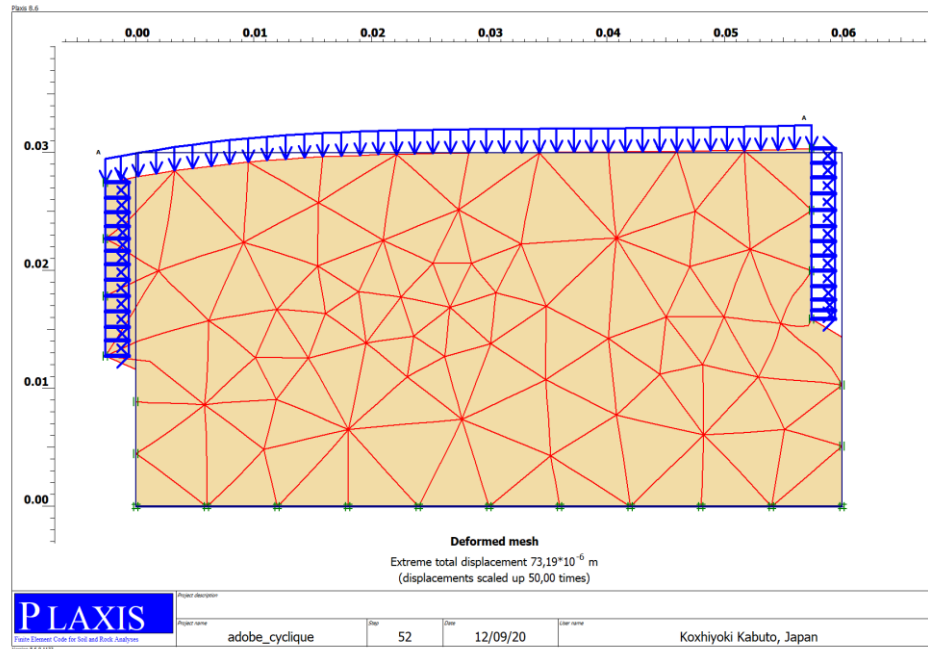


Fig.5.8-a :Maillage déformé durant la phase de cisaillement "1 cycle".

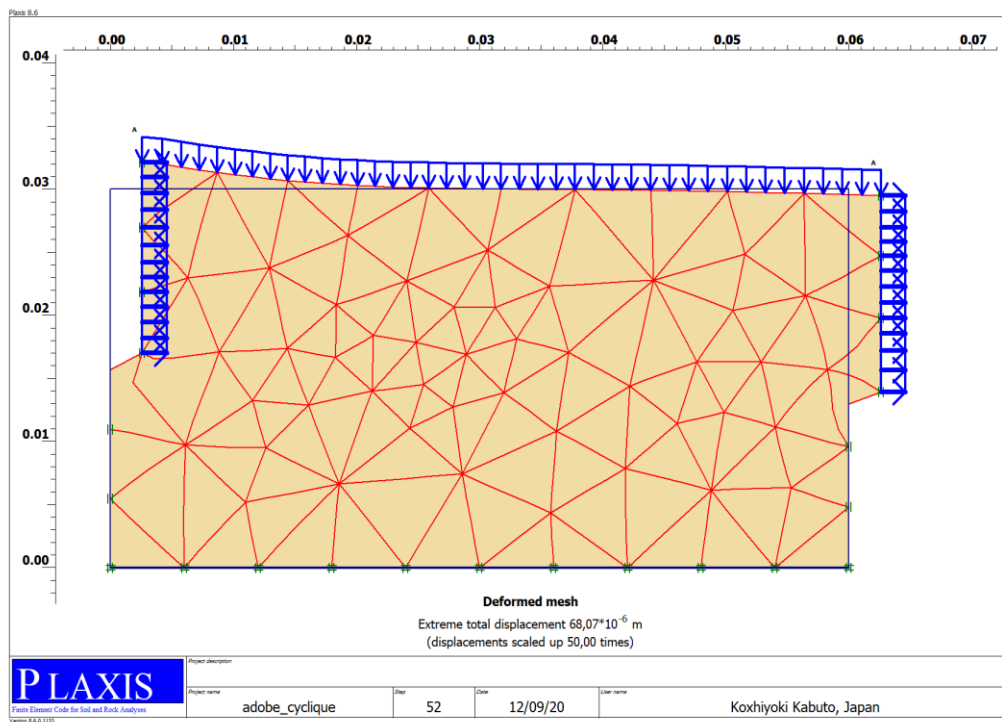


Fig.5.8-b : Maillage déformé durant la phase de confinement "10 cycles".

### 3.2 Résultats des calculs et discussion

On présente et discute ci-après les principaux résultats de simulation des essais de cisaillement de la brique sous chargement cyclique pour l'ancien et le nouveau adobe, et on va faire une comparaison entre les deux types au niveau de la contrainte de cisaillement.

#### 3.2.1 Ancien adobe

La figure 5.9 illustre la simulation des essais cycliques réalisées à contrainte normale constante dans le cas de l'ancien adobe. On constate que le modèle décrit l'évolution de la contrainte de cisaillement. Il reproduit bien le module initial, mais concernant l'évolution de l'érouissage cyclique, on remarque que la contrainte de cisaillement diminue au cours des cycles.

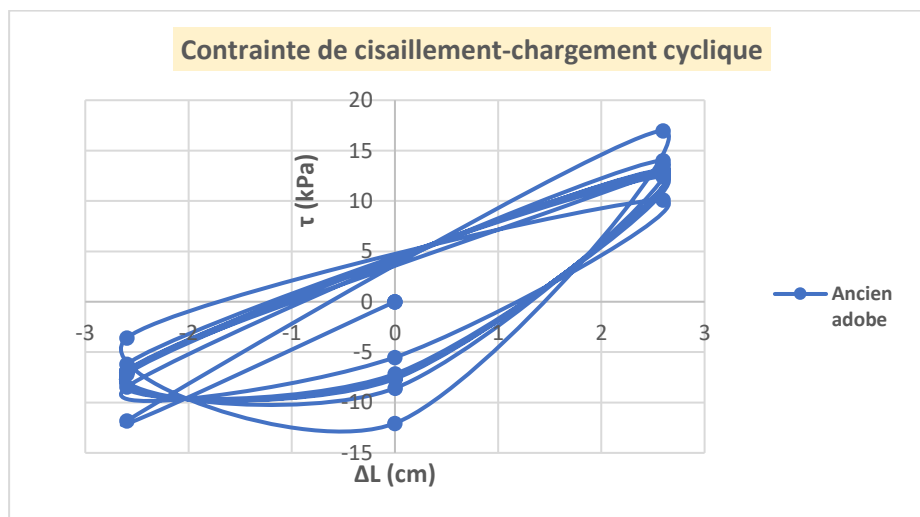


Fig.5.9: Simulation des essais à contrainte normale constante pour l'ancien adobe

#### 3.2.2 Nouveau adobe :

La figure 5.10 illustre la simulation des essais cycliques réalisés à contrainte normale constante dans le cas des essais sur le nouveau adobe. On constate que le modèle décrit l'évolution de la contrainte de cisaillement. Il reproduit bien le module initial, mais concernant l'évolution de l'érouissage cyclique, on remarque que la contrainte de cisaillement diminue au cours des cycles.

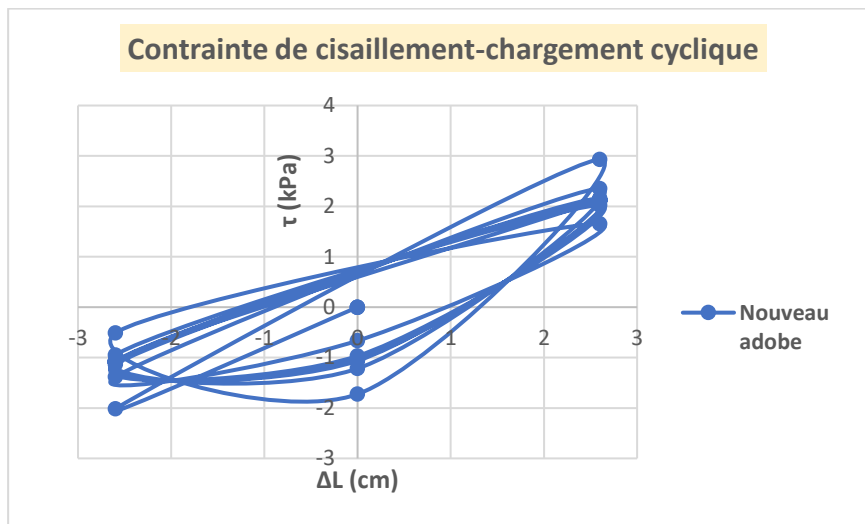


Fig.5.10 :Simulation des essais à contrainte normale constante pour nouveau adobe.

### 3.2.3 Comparaison entre l'ancien et le nouveau adobe :

La figure 5.11 illustre la simulation des essais cycliques réalisés à contrainte normale constante dans le cas des essais sur l'ancien et le nouveau adobe. On constate que la contrainte de cisaillement cyclique pour l'ancien adobe est très grande par rapport à la contrainte pour le modèle nouveau adobe, et on remarque que la différence des valeurs est de l'ordre de 6 fois plus grande dans le cas de l'ancien adobe

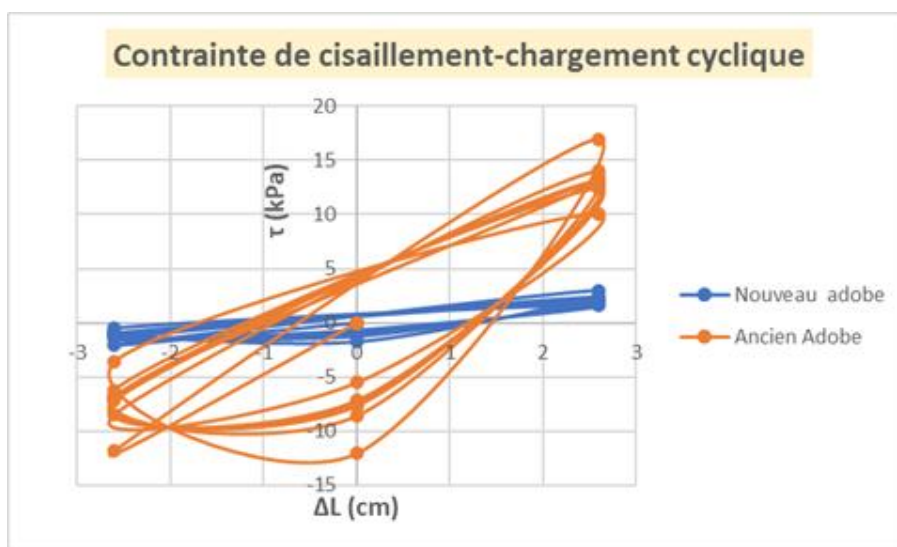


Fig.5.11 : Comparaison de la simulation des essais à contrainte normale constante, pourancien et nouveau adobe

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Partout dans le monde et à travers les siècles, les matériaux de construction directement disponibles ont été utilisés pour construire des maisons et des abris. Dans les climats chauds-arides et tempérés, le matériau de construction le plus répandu a été la terre. De nos jours, près d'un tiers de la population mondiale vit dans des maisons en terre et ce nombre atteint même plus de la moitié dans les pays en voie de développement.

Des exemples d'architectures remarquables en terre sont présents sur tous les continents (voir Figure 1).

Les constructions en terre sont diverses : la terre fournit des matériaux de compositions différentes suivant les régions, et les techniques de construction ont évolué pendant des milliers d'années. Chaque technique diffère en fonction de la composition de la terre utilisée, de la méthode de compactage, de la teneur en eau de fabrication, et du processus de séchage. Les principales méthodes utilisées sont reportées dans la Figure.1.2.

Contrairement aux autres matériaux traditionnels ; ciment, béton, bois et acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée dans la construction sans trop de dépense d'énergie. Aussi, elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux, culturels, mais aussi économiques. Elle possède aussi de bonnes performances d'isolation thermique une fois stabilisée dans les conditions idéales.

Cependant, l'inconvénient est que, à l'état cru, ce matériau ne résiste pas toujours aux intempéries. Ainsi, la durabilité des ouvrages construits est redoutée. Beaucoup de bâtisses en terre crue (adobe et torchis) et particulièrement celles construites avec des matériaux sans aucun traitement associé sont vouées à des sérieux problèmes de stabilité, d'usure progressive et voire d'émiettement en présence d'un taux d'humidité important, surtout dans les pays à forte pluviométrie.

## Conclusion générale

La terre crue est un matériau local encore mal connu mais très utilisé en Algérie et dans les pays en voie de développement, dont la plupart dans les zones régulièrement affectées par les séismes.

A partir d'une étude bibliographique nous avons pu montrer que la terre crue est un matériau au comportement plastique mais qu'il est possible de déterminer un module élastique sous une contrainte donnée.

La connaissance du comportement cyclique des sols s'impose pour comprendre la réponse des sites quand ils sont frappés par un séisme. La nature des matériaux utilisés et leur qualité sont de première importance. Ils doivent répondre le mieux possible aux sollicitations mécaniques anormales que les tremblements de terre imposent.

Le traitement d'un essai dynamique réalisé sur un Adobe (Thob) permet d'obtenir, via une modélisation éléments finis, un module élastique.

Comme on l'a vu, de nombreux facteurs influent sur les valeurs des fréquences propres. En effet, elles dépendent de la géométrie du matériau, des caractéristiques de celui-ci (teneur en eau, isotropie, ...) et du niveau de contrainte appliqué.

La modélisation de l'essai de cisaillement de la brique en terre sous chargement monotone, montre que la contrainte maximum de cisaillement avec le modèle ancien adobe est atteint avec un déplacement tangentiel  $\Delta L = 4.50$  mm et dépasse la valeur  $\tau > 450$  kPa, par contre dans le cas du nouveau adobe la contrainte continue à augmenter de façon oblique sans stabilisation, et sa valeur ne dépasse pas  $\tau < 40$  kPa.

En ce qui concerne le déplacement normal, le modèle ancien adobe a un comportement montre une phase de contractante puis devient dilatant, dans le cas du nouveau adobe le modèle montre une phase contractante plus prononcée dans le cas de l'ancien adobe.

Dans le cas du modèle sous chargement cyclique on constate que le modèle décrit l'évolution de la contrainte de cisaillement. Il reproduit bien le module initial, mais

## **Conclusion générale**

concernant l'évolution de l'érouissage cyclique, on remarque que la contrainte de cisaillement diminue au cours des cycles. la contrainte de cisaillement cyclique pour l'ancien adobe est très grande par rapport à la contrainte pour le modèle nouveau adobe, et on remarque que la différence des valeurs est de l'ordre de 6 fois plus grande dans le cas de l'ancien adobe.

Les modélisations utilisées ici, ne sont a priori pas suffisamment complètes pour donner des résultats en accord mais elles permettent de donner une première approximation de la valeur module de Young et peuvent être complétées par d'autres essais ou des modélisations plus poussées.

## Références Bibliographiques

AL-TABBAA A., (1987). Permeability and stress-strain response of speswhite kaolin. Thèse de doctorat, Université de Cambridge.

AL-TABBAA A., WOOD D.M, (1989). An experimentally based bubble model for clay. Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics, Niagara Falls, 91-99.

ANDERSEN, K, H et al. (1976). Behavior of clay subjected to undrained cyclic loading. Proc. 1st Int. Conf, on, Behavior of Offshore Structures, Trondheim, Vol 1,3926403.

ATOKE R., (2013). La terre crue en architecture, mieux connaitre le matériau pour mieux l'adapter et l'utiliser, 2013 - Global Archiconsult. pp. 14

BALOUL, AN et DAHLI, M. (2008). Conservation et valorisation du patrimoine ksourien pour un développement durable de la région du twatgourara : cas du ksar de tmassekht. Algérie. pp.11.

BARBAS, A. et FRANK, R.(1982) Utilisation de la méthode des éléments finis en mécanique des sols dans ledomaine de l'élastoplasticité. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,1982, Rapport de recherche LPC n°146,Paris, France.

BARNICHON J.D., 2002. Contribution of the bounding surface plasticity to the simulation of gallery excavation in plastic clays. Engineering Geology, vol. 64, pp.217-231.

BENOUALI, H. (2014). La réglementation technique Algérienne de construction avec les Matériaux locaux.FestivalArchiTerre, EPAU. pp.27.

BJERRUM, L.,(1973). Geotechnical problems involved in foundation structures in the North Sea. Geotechnique, Vol 23, No.3., pp 319-358.

BUI.Q.B. (2008). Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques, thèse de doctorat, Lyon : INSA.

## Références Bibliographiques

CALLISTO, L. and CALABRESI, G. (1998). Mechanical behaviour of a natural soft clay. *Geotechnique*. Vol 48 No. 4 page 495-513.

CAMBOU B., Hicher P.Y., 2002. Modélisation élastoplastique des sols – 2. Chargements cycliques. Chapitre 4, *Elastoplasticité des sols et des roches, Modeles de comportement des sols et des roches 1*, PY Hicher et J-F Shao, Paris, Hermes Science.

CHAMPIRE F., (2017). Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. *Génie civil*. Université de Lyon, 2017. France. pp.189

CNERIB. (1992). *Projet HAB 24 – Filière BTS*. Alger : CNERIB.

CNERIB. (2000). *Conception de logement économiques à base de produits localement disponibles*.

Alger : CNERIB.

CORPUS. (2015). *Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Maison de la médina de Bou Saada*. Algérie. pp.146)

CRAWFORD C.B. (1959). The influence of rate of strain on effective stresses in a sensitive clay, *Soc. Testings Mat., Special Technical Pub. No. 254*, 36-61.

CRATerre. (1995). *Traité de construction en terre*. Marseille : edit 2. Parenthèse.

DESAI C.S., (1994). Hierarchical single surface and the disturbed state constitutive models with emphasis on geotechnical applications. *Geotechnical Engineering: Emerging trends in design and practice*. Oxford & IBH Publishing Co. pp 115-154.

DIYALJEE V.A., RAYMOND, G.P., (1982). Repetitive load deformation of cohesionless soil. *J. Geotech. Engrg. Div.*, vol. 108, n°10, pp. 1215-1229.

DOAT, P., HAYS, A., HOUBEN, H., MATUK, S. et VITOUX F., (1979). *Construire en terre*. CRATerre, Collection AnArchitecture, 1979. France. pp.265.

DOAT, P et al. (1983). *Construire en terre*. Paris: Alternative.

DUBUJET Ph., (1992). *Modélisation du comportement cyclique des argiles*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.

## Références Bibliographiques

- FANG H.L., 2003. A state-dependent multi-mechanism for sand. *Géotechnique*, vol. 53, n°4, pp. 407-420.
- FOUCAULT A., (2010). Modélisation du comportement cyclique des ouvrages en terre intégrant des techniques de régularisation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.
- FERRIGNIET F., HELLY B., MAURO A., MENDES VICTOR L., PIEROTTI P.,(2005) Ancient buildings and earthquakes ,n. 50,603, pp135
- GHABOUSSI J., MOMEM H., (1982). Modelling and Analysis of Cyclic Behavior of Sands. *SoilMechanics –Transient and CyclicLoads*, pp. 314-342.
- GUETTOUCHE, A., TALLAH, N., SAADAOU, B., OUAHAB, Y., (2019). Etude de caractérisation des briques de terre utilisées dans les anciennes constructions de la zone de Boussaâda. Mémoire de Master. Université de M'sila. pp.200.
- GUILLAUD, H; JOFFROY, T ; ODUL, P ;CRATerre-EAG., (1995). Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction. Friedrich Vieweg& Sohn, 1995. P9.
- HAU K.W., (2003). Application of a three-surface kinematic hardening model to repeated loading of thinly surfaced pavements. Thèse de doctorat, Université de Nottingham, United Kingdom.
- HEUBEN, H., GUILLAUD, H et CRATerre., (2006). *Traité de la construction en terre*, Ed Parenthèse CRATERRE, p18.)
- HICHER P.Y., (1985). Comportement mécanique des argiles saturées sur divers chemins de sollicitations monotones et cycliques - Application a une modélisation élastoplastique et viscoplastique. Thèse de Doctorat, Université Paris.
- IHCENE LAMRI.,(2008). Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotone et cyclique. Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère, Université de M'sila Skikda, p29
- INDRARATNA B., THAKUR P.K., VINOD J.S., (2010). Experimental and numerical study of railway ballast behaviour under cyclic loading. *International Journal of Geomechanics*, vol. 10, n°136.

## Références Bibliographiques

IRMA., (2020). La construction parasismique. Fiche documentation n°11. Institut des Risques Majeurs. France., pp 1-4.

[http://www.irma-grenoble.com/PDF/mallettes/sismique/DOC\\_fiche11.pdf](http://www.irma-grenoble.com/PDF/mallettes/sismique/DOC_fiche11.pdf), mise à jour en 2008.

KATTAN A., (1990). Fluage et consolidation des sols satures et quasi-satures. Analyse Numérique. Thèse de doctorat, ENPC, Paris.

KHEMISSA M., (2006) Communications aux Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur : « Risques géotechnique et environnementaux liés à l'aménagement ». INSA de Lyon, France.

LADE P.V., (1977). Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface. Int. Jour. Solids and Structures, vol. 13, pp 1019-1035.

LENTZ R.W., BALADI G.Y., (1980). Simplified Procedure to Characterize Permanent Strain in Sand Subjected to Cyclic Loading. International Symposium on Soil under Cyclic and Transient Loading, Swansea

LEPIDAS et MAGNAN J.P., (1990). Fluage et consolidation des sols argileux : modélisation numérique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC n°157.

MALANDAN, LOUZOLO-KIMBEMBEP, TAMBA-NSEMI YD. (2017). Etude des caractéristiques mécaniques d'une brique en terre stabilisée à l'aide de la mélasse de canne à sucre. Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 2(2), pp. 1-9. ISSN 2312-8712.

MOEVUS M., ANGER R., FONTAINE L., (2012). Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. Terra 2012, Apr 2012, Lima, Peru. <hal-01005948>

MANZARI M.T., DAFALIAS Y. F., (1997). A critical state two-surface plasticity model for sands. Géotechnique, vol. 47, n° 2, pp. 255-272.

MESTAT P., (2002). Modélisation du comportement cyclique des ouvrages en terre intégrant des techniques de régularisation. Thèse de doctorat, École centrale des arts et manufactures de Paris, pp 179

## Références Bibliographiques

- NACIB, Y. (2013). Cultures oasiennes (Bou-Saada essai d'histoire sociale). Editions Zyriab. Algérie. pp.118.
- Odul, P. (1983). L'architecture de terre en Algerie. Ed. projet earth construction technologies appropriate to developing countries, Belgique.
- PASTOR M., ZIENKIEWICZ O.C., CHAN A.H.C, (1990). Generalized plasticity modelling soil behaviour. Int. J. Num. Anal. Meth. In Geomech., vol. 14, n°3, pp. 151-190.
- PAULUS J., (2015). Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte. Université de Liège – 2014/2015. pp.227.
- PAUTE J.H., HORNYCH P., BENABEN J., (1994) (a). Comportement mécanique des graves non traitées. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 190, pp. 27-38.
- PAUTE J.L., MARIGNIER J., VIDAL B., (1994) (b). Le triaxial a chargement répété LPC pour l'étude des graves non traitées. Bulletin de liaison des ponts et chaussées, vol. 190, pp. 17-55
- Pignal, B. (2005). Terre crue - Techniques de construction et de restauration. Eyrolles. Paris
- PLAXIS(2002).Finiteelement code for soils and rock analyses. Professional version,Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- REZAIE, F., (1994). "Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'interface sols-structures souschargements monotone et cyclique". Thèse de doctorat, Université des Sciences et technologies de Lille
- RIDEAUD A., & TEVES COSTA P., (2005). Ancient Buildings and Earthquakes, Edipugliasrl, 2005. pp 360.
- ROSCOE, K.H. and BURLAND, J.B. (1968) On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay, in: J. Heyman, F. Leckie (Eds.), Engineering plasticity, Cambridge University Press, Cambridge, 535-609.
- Sabri, Aoudia, &Lallem., (2000)GUIDE DE GESTION DES MARCHES PUBLICS edition de sahel 2000

## Références Bibliographiques

- SALMI, S. et BOUSSOUALIM, A. (2014). La construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers cas du village kabyle ait Itchir. Mémoire de magister. Université de Tizi Ouzou. Algérie. pp.143.
- SCHWER L.E., MURRAY Y.D., (1994). A three-invariant smooth cap model with mixed hardening. International journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 18, pp. 657-688.
- SEED, H.B., CHAN, C.K. (1966). Clay strength under earthquake loading conditions. J. Soil Mech. Found. Div., A.S.C.E., Vol 92, SM2, 53-78. (1966).
- SHAHROUR I. &BENCHEIKH B., (1992)"Analysis of the soil-structure interaction under monotonicand cyclic loadings"- First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Bruxelles, EditionCh Hirsch, O.C. Zienkiewicz and E. Onate, pp. 269-275.104
- SHERIF, M. A et al., (1998). Pore Pressure Prediction during Earthquake Loading, Soils and Foundations, Vol. 18; No. 4, pp. 19-30.
- TAKAHASHI, M., HIGHT, D.W. and VAUGHAN, P.R.(1980). Effective stress changes observed during undrained cyclic triaxial tests on clay. Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading”, Swansea, Vol 1, 201-209.
- TALLAH Naoui. (2008). Modélisation expérimentale et numérique du comportement des interfaces sol-structure,mémoire présenté pour l’obtention du diplôme de magister. pp34
- THAMMATHIWAT, A et al, (1972). Behavior of strength and pore pressure of soft clay cyclic loading, Thammasat. Ing.J. Sc. Tech, Vol. 9; No. 4, page. 21-28, (2004).
- THIERS, G.R., SEED, H.B.(1969). Strength and stress-strain characteristics of clays subjected to seismic loading conditions, Symp. Â.S.T.M., STP450, 3-36.
- WICHTMANN T., (2005). Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading. Thèse de doctorat, Université de Bochum. Germany.
- ZAMAN M.M.; DESAI C.S. &DRUMM E.C., (1984), Interface model for dynamic soil structure interaction - Jour. of Geo tech. Engine., Vol. 110, No. 9.