

N°96



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

\*\*\*\*\*

**Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)**

\*\*\*\*\*

**Master de Recherche en Géotechnique et Infrastructures Immobilières**

\*\*\*\*\*

**Rapport de stage**

**Thème :**

**INFLUENCE DES CYCLES DE DESSICCATION-HUMIDIFICATION SUR  
LES PARAMETRES DE CISAILLEMENT DES SOLS ARGILEUX : CAS DES  
SOLS DES LOCALITES DE SALAHOUÉ ET TOHONOU DANS LA  
COMMUNE DE HOUÉYOGBE**

**Présenté par :**

**Joseph AHISSOU**

Ingénieur des Travaux Publics

**Encadré par :**

**Dr Yvette S. TANKPINOU KIKI**

Maitre de conférences des Universités du CAMES,

Enseignant chercheur à l'UNSTIM

**Sous la direction de :**

**Dr Victor S. GBAGUIDI**

Maitre de conférences des Universités du CAMES,

Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC

Laboratoire : Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP)

## **DEDICACES**

*A Dieu tout puissant,*

*A tous ceux qui m'ont aimé et protégé.*

## **NOS HOMMAGES**

### **1. A mes anciens :**

doyens, condisciples, confrères et collègues qui ont contribué à forger en ma personne le métier du génie civil ;

### **2. Aux membres du jury qui examinent ce mémoire.**

## REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissants envers les personnes citées ici pour leur contribution, intervention et soutien de quelque nature que ce soit aux travaux ayant conduit à la rédaction du présent mémoire de recherche. Ainsi, nous exprimons nos profondes gratitudees :

- au Dr Victor S. GBAGUIDI ; Maître de Conférences des Universités pour avoir accepté encadrer ce mémoire de recherche ;
- au Dr Yvette S . TANKPINOU KIKI; Maître de Conférences des Universités pour son encadrement ;
- au Doctorant Bertrand GBAFFONOU, pour ses conseils, orientations et sa précieuse contribution dans la conduite cette œuvre ;
- au Centre National d’Essais et de Recherches et des Travaux Publics, notamment à sa direction et son personnel de laboratoire pour avoir permis la réalisation des essais dans ce laboratoire national de reference et leur assistance ;
- à tous les enseignants de l’Ecole Doctorale des Sciences de l’Ingénieur (ED-SDI), et plus particulièrement les enseignants du Master Géotechnique et Infrastructures Immobilières (Mg2i).
- A tous mes condisciples de la deuxième promotion du Master Géotechnique et Infrastructures Immobilières (Mg2i).

## **RESUME**

Le présent travail est une contribution à l'étude de l'influence des cycles de dessiccation-humidification sur les paramètres de cisaillement des sols argileux. L'expérimentation a été faite sur des sols prélevés sur deux sites dans la commune de HOUEYOGBE précisément dans les localités de SALAHOUE et TOHONOU au sud-ouest de la république du Bénin dans la dépression de la Lama.

Ces sols ont été identifiés comme des limons argileux. Leur degré de plasticité et leur potentiel de gonflement sont élevés et ils sont peu actifs et inorganiques.

Les essais mécaniques de cisaillement direct ont été réalisés sur des échantillons témoins prélevés sur les deux sites puis sur les échantillons ayant préalablement subis des essais de dessiccation humidification pour une durée de 96 heures par cycle. Les résultats obtenus montrent que plus le sol subit des cycles de dessiccation humidification, plus la valeur de la cohésion baisse et la valeur de l'angle de frottement interne croit. Pour le même type de sol identifié dans les deux localités, la baisse de la valeur de la cohésion à Salahoué dès l'application du premier cycle est plus légère (13%) que celle de Tohonou pour lequel il est noté une chute brutale et plus importante (62%).

**Mots clés :** sol-argile -dessiccation –humidification-cisaillement direct.

## **ABSTRACT**

This work is a contribution to the study of the desiccation-humidification cycles influences on the shear parameters of clay soils. The experiment was carried out on soils taken from two sites in HOUEYOGBE area precisely in localities named SALAHOUE and TOHONOU in the south-west of the Republic of Benin located in Lama depression.

These soils, in general, have been identified as clay silt. Their degree of plasticity and growth potential are high and they are not very active. They are inorganic.

The mechanical direct shear tests were carried out on control samples taken from the two sites and then on the samples having previously undergone drying and humidification tests for a period of 96 hours per cycle. The results obtained show that more the soil undergoes cycles of desiccation and humidification, more the value of cohesion drops and the value of the internal friction angle increases. For the same type of soil identified in this two localities, the drop in the value of the cohesion in Salahoué from the application of the first cycle is lighter (13%) than that of Tohonou, for which a greater sudden drop is noted (62%).

**Key words :** soil - clay - desiccation - humidification - direct shear.

## TABLE DES MATIERES

DEDICACES .....	i
NOS HOMMAGES.....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLE DES MATIERES .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES PHOTOGRAPHIES.....	x
LISTE DES GRAPHES .....	xi
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	xii
LISTE DES NOTATIONS.....	xiii
LISTE DES ANNEXES .....	xv
AVANT-PROPOS .....	xvi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....	4
1.1    GENERALITE SUR LES ARGILES [1] .....	5
1.1.1    ASPECTS MICROSTRUCTURAUX DES ARGILES.....	5
1.1.2    LES PRINCIPAUX TYPES D'ARGILE .....	5
1.1.3    LOCALISATION DES SOLS ARGILEUX AU BENIN [1].....	9
1.2    SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	11
1.3    MECANISMES DE RETRAIT/ DESATURATION ET DE GONFLEMENT/RESATURATION [2].....	14
1.3.1    Mécanismes de retrait .....	14
1.3.2    Mécanismes de gonflement.....	16
1.4    ETUDES DE L'EFFET DE LA DESSATURATION - RESSATURATION SUR LES MATERIAUX ARGILEUX [2].....	17
1.4.1    Plaque tensiométrique .....	17
1.4.2    La méthode osmotique .....	18
1.4.3    L'appareil de Richards (méthode de translation d'axes).....	18
1.4.4    La méthode des solutions salines .....	19

---

CHAPITRE 2 : Matériaux, matériels et méthodologie de recherche .....	22
2.1  MILIEU D'ÉTUDE [1] .....	22
2.1.1  Présentation de la Commune de Houéyogbe .....	22
2.1.2  Présentation des sites de prélèvement .....	25
2.2  MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	26
2.2.1  Aspects généraux.....	26
2.2.2  Essai de dessiccation-humidification .....	27
CHAPITRE 3 : Résultats : analyses et interprétation.....	30
3.1  LES ESSAIS D'IDENTIFICATION.....	30
3.1.1  Essais réalisés .....	30
3.1.2  Résultats .....	30
3.1.3  Analyse et Interprétation .....	31
3.2  LES ESSAIS HYDRIQUES ET MECANIQUES.....	37
3.2.1  Essais de dessiccation-humidification.....	37
3.2.2  Essais de cisaillement direct.....	38
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	46
ANNEXES .....	47

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1 : Structure élémentaire du réseau cristallin de la kaolinite [1].....	6
Figure 1.2 : Structure élémentaire du réseau cristallin de la montmorillonite [1] .....	7
Figure 1.3 : Structure élémentaire du réseau cristallin de l'illite [1] .....	8
Figure 1.4 : Situation géographique de la dépression de la Lama au sud du Bénin [1] .....	11
Figure 1.5 : Tube capillaire [2].....	15
Figure 1.6 : L'eau adsorbée dans un paquet de feuillets smectitiques (Van Damme 2001) [2]	16
Figure 2.1 : Carte de la Commune de Houéyogbé [1] .....	24
Figure 2.2: Carte Pédologique de Houéyogbé [1].....	25
Figure 3.1 : Abaque de classification triangulaire de Taylor (1948) [1].....	32

---

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles [1].....	9
Tableau 1.2: Synthèse bibliographique relative à l'influence des cycles dessiccation / humidification sur les sols argileux.....	12
Tableau 1. 3 : Données sur les solutions salines et les succions associées [2].....	20
Tableau 2.1 : Localisation des sites de prélèvements et profondeur .....	25
Tableau 2.2 : Récapitulatif des essais et leurs matériels.....	27
Tableau 3.1 : Récapitulatif des résultats d'essais d'identification de sol de TOHONOU et de SALAHOUE .....	31
Tableau 3.2 : Récapitulatif sur les types de sols selon la classification triangulaire de Taylor (1948) .....	32
Tableau 3.3 : Récapitulatif sur les types de sols selon la classification HRB .....	33
Tableau 3.4 : Récapitulatif sur le comportement plastique et le potentiel de gonflement .....	34
Tableau 3.5 : Classification selon la plasticité des sols présenté par J.M. Txhouaninana (1999) [1] .....	34
Tableau 3.6 : Potentiel de gonflement d'après Snethen [1] .....	34
Tableau 3.7 : Dénomination des sols en fonction du coefficient d'activité .....	35
Tableau 3. 8 : Classification des sols en fonction du coefficient d'activité (SKEMPTON 1953) [1] .....	35
Tableau 3. 9 : Classification des sols selon leur teneur en matières organiques [1] .....	36
Tableau 3.10 : Récapitulatif des paramètres de cisaillement des sols.....	40

## **LISTE DES PHOTOGRAPHIES**

Photo 2.1 : Puits manuel de prélèvement d'échantillons .....	26
Photo 2.2 : Appareillage de dessiccation : étuve et pesée .....	28
Photo 2.3 : Appareillage pour l'humidification .....	29

## **LISTE DES GRAPHES**

Graphe 3.1 : Pourcentage de passant au tamis 80 $\mu\text{m}$ .....	31
Graphe 3.2 : Pourcentage de passant au tamis 2 $\mu\text{m}$ .....	32
Graphe 3.3 : Valeurs d'Indice de Plasticité (Ip).....	33
Graphe 3.4 : Valeur des coefficients d'activité .....	35
Graphe 3.5 : Valeur de teneur en matière organique.....	36
Graphe 3.6 : Résultats de (a) humidification et (b) dessiccation .....	37
Graphe 3.7 : Courbe intrinsèque de SALAHOUÉ C1 .....	38
Graphe 3.8 : Courbe intrinsèque de SALAHOUÉ C2 .....	39
Graphe 3.9 : Courbe intrinsèque de SALAHOUÉ C3 .....	39
Graphe 3.10 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C1 .....	39
Graphe 3.11 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C2 .....	40
Graphe 3.12 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C3 .....	40
Graphe 3.13 : Synthèse des courbes intrinsèques de Salahoué .....	41
Graphe 3.14 : Synthèse des courbes intrinsèques de Tohonou .....	41
Graphe 3.15 : Valeurs de la cohésion $C_{uu}$ .....	43
Graphe 3.16 : Valeurs de l'angle de frottement interne $\Phi_{uu}$ .....	44

## **LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS**

<b>AIPEA</b>	:	Association Internationale Pour l'Étude des Argiles
<b>BRM</b>	:	Base de Référence Mondiale
<b>CNERTP</b>	:	Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics
<b>CO</b>	:	Couche octaédrique
<b>EPAC</b>	:	École Polytechnique d'Abomey-Calavi
<b>kPa</b>	:	Kilo Pascals
<b>LPC</b>	:	Laboratoire des Ponts et Chaussées
<b>UNSTIM</b>	:	Université Nationale des Sciences, technologies, Ingénierie et Mathématique
<b>UTM WGS 84</b>	:	Universal Transverse of Mercator World Geodesic System 84
<b>CT</b>	:	Couche tétraédrique

## LISTE DES NOTATIONS

$\sigma$	Contrainte totale géostatique
$\sigma'$	Contrainte effective
$\sigma_e$	Contrainte extérieure
$\sigma_{cap}$	Tension de surface
$u$	Pression interstitielle
$u^*$	Pression interstitielle équivalente
$u_a$	Pression d'air
$u_w$	Pression d'eau
$\gamma_f$	Poids volumique du fluide
$\rho_s$	Masse volumique des particules solides ou poids spécifique
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau
$e$	Indice des vides
$\rho_t$	Masse volumique de la suspension au temps $t$
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau distillée à la température d'essai $T$
$M_1$	Masse du pycnomètre vide
$M_2$	Masse du pycnomètre plus échantillon sec
$M_3$	Masse du pycnomètre rempli d'eau plus échantillon
$M_4$	Masse du pycnomètre rempli d'eau
$V_v$	Volume des vides
$V_s$	Volume des grains solides
$P_{wf}$	Poids d'eau final en gramme
$M$	Masse de l'échantillon en gramme (Analyse granulométrique)
$M_c$	Masse cumulée de sol retenu pour chaque ouverture
$M_s$	Masse totale sèche de l'échantillon
$V_s$	Volume de la suspension
$m$	Masse de sol sec prélevée sur le tamisât à 80 $\mu m$
$D$	Diamètre maximal des granulats
$D$	Diamètre équivalent des particules (sédimentométrie)
$H_{cap}$	Hauteur de capillarité

<b><math>r_{cap}</math></b>	Rayon capillaire
<b>S</b>	Section de l'éprouvette
<b><math>\omega_L</math></b>	Limite de liquidité
<b><math>\omega_P</math></b>	Limite de plasticité
<b>IP</b>	Indice de plasticité
<b>k</b>	Coefficient de perméabilité

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Essais d'identification.....47  
Annexe 2 : Essais de cisaillement .....49

## AVANT-PROPOS

Des années de pratique du génie civil en tant qu'ingénieur de projets de travaux routiers, infrastructures immobilières puis de dirigeants d'entreprise publique de laboratoire national, nous ont amené à éprouver la nécessité de nous perfectionner dans la connaissance de ce domaine très sensible qu'est la géotechnique. Il nous est également paru utile de contribuer à l'effort de recherche dans lequel s'investit déjà de nombreux chercheurs inscrits dans divers départements de l'université d'Abomey-Calavi. Aussi avons-nous pris la décision de nous inscrire dans cette promotion spéciale de cours en Master de recherche, spécialité « Géotechnique et Infrastructures Immobilières (Mg2i) », animé par l'École Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI).

Les disciplines enseignées par d'éminents professeurs compétents et rompus dans leurs matières, ont permis de renforcer notre capacité face aux exigences de la pratique dans la profession. Cette acquisition de nouvelles connaissances a également porté sur l'apprentissage de la démarche pour les recherches scientifiques. Les enseignement reçus ont, en effet, couvert des domaines bien diversifiées comme les géosciences (dynamique et vibration des sols, géophysique appliquée au génie-civil, mécanique des sols, mécanique des roches); la géotechnique (fondations et ouvrages enterrés, stabilité des talus et ouvrages de soutènement, la géotechnique routière, méthodes expérimentales en géotechnique); la rhéologie des sols, les Mesures et Instrumentations; Élasticité - Plasticité - Calcul à la Rupture; les méthodes numériques et modélisations (méthodes numériques en mécanique des sols, méthode d'identification des paramètres et modèles), l'anglais scientifique, la recherche documentaire et la rédaction scientifique.

Le thème de recherche du présent mémoire qui porte sur l'influence des cycles de dessiccation/humidification sur les sols argileux est un vaste domaine de recherche porté par l'équipe du Professeur Victor S. GBAGUIDI et sur lequel interviennent plusieurs chercheurs de différents grades depuis plusieurs années. Notre contribution est donc un apport aux travaux de doctorants à l'École Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED SDI). Il vise à faire l'état des lieux de la connaissance scientifique à travers la revue bibliographique, pose les jalons de l'expérimentation à travers les essais de dessiccation/humidification et de cisaillement direct sur différents échantillons de sols. Les résultats obtenus ont été analysés et comparés à ceux obtenus au cours des travaux de même nature et dans d'autres conditions. Au regard de

l'importance du sujet, il parait indiqué que du temps lui soit accordé pour une appréhension approfondie du phénomène en étude. Les perspectives dégagées dans la conclusion de ce rapport seront soumises à la validation d'une recherche en thèse de doctorat.

## INTRODUCTION GENERALE

Tous constructeurs en Génie Civil vise la stabilité et la durabilité des ouvrages qu'il a conçus et mise en œuvre. Cependant, force est de constater la précocité des dégradations et même de l'instabilité de ces ouvrages. Si ces constats peuvent être imputés aux défauts de conception et de mise en œuvre de la fondation, ils sont majoritairement dus à une sous information sur la nature et l'interaction des sols sous-jacent des fondations et ce dernier.

Les sols argileux sont les plus indexés dans ce type de sinistres à cause de leur aptitude à une forte variation de leur volume dès que les conditions d'équilibre (humidité, contrainte) sont modifiées. Ces phénomènes se manifestent par l'apparition de désordres, tels les enlacements et les fissures affectant les ouvrages types maisons individuelles construites à faible profondeur et sans précautions particulières ainsi que les chaussées routières. Ils ont été identifiés comme un phénomène plus accentués dans une partie de la région sud du Bénin. La maîtrise du comportement hydrique et mécanique des sols de cette région est donc nécessaire en vue de la réalisation des infrastructures durables.

Sous l'effet des conditions climatiques saisonnières, les sols argileux peuvent présenter des déformations volumiques importantes dépendamment de la modification de leur teneur en eau. Les phénomènes physiques à l'origine de ces problèmes sont intrinsèquement complexes et difficiles à reproduire J-B Kazmierczak et al. (2016). Par ailleurs, le comportement de ces sols est également affecté par des facteurs extérieurs liés par exemple à la présence de végétation et/ou des ouvrages qui, eux-mêmes modifient l'état de contrainte dans les sols concernés. On peut toutefois évaluer, dans certaines configurations, le tassement et le gonflement d'un massif de sol dus aux changements de sa teneur en eau grâce, notamment, à des modèles élastiques, Fredlund et Rahardjo, 1993 ou élastoplastiques, Alonso et al., 1990 ; Cui et Delage, 1996.

Ces types de sols sont identifiées dans la région de la Lama au sud du Bénin et sont la cause des désordres sur les bâtiments [KIKI et al, 2006]. Elles sont également présentes dans la dépression d'Issaba à l'Est de la dépression de la Lama [AGBELELE et al, 2016].

Ce sont les actions répétées entre humidités et sécheresses qui provoquent des cycles de retrait – gonflement sur ces sols argileux simulant ainsi les phénomènes climatique saisons sèche et pluvieuse.

La réponse de l'effort induit sur les sols argileux par ce phénomène de retrait gonflement peut être caractérisée par la modification des paramètres mécaniques que sont la cohésion et l'angle de frottement interne de ces sols.

Aussi importe-t-il de déterminer les proportions de variabilité de ces paramètres mécaniques lorsqu'intervient les variations hydriques induisant le retrait et le gonflement dans ces types de sol.

C'est à partir du thème intitulé: « **INFLUENCE DES CYCLES DE DESSICCATION-HUMIDIFICATION SUR LES PARAMETRES DE CISAILLEMENT DES SOLS ARGILEUX : CAS DES LOCALITÉS DE SALAHOUÉ ET TOHONOU DANS LA COMMUNE DE HOUEYOGBE** » qu'il est proposé de conduire l'étude de la problématique de ce phénomène naturel.

L'objectif général de ce mémoire vise l'étude des cycles d'humidification/dessiccation des sols argileux et leur influence sur les paramètres de cisaillement que sont la cohésion et l'angle de frottement interne.

Les objectifs spécifiques visés par le thème sont :

- établir une revue bibliographique des travaux menés sur le comportement au cisaillement des sol argileux soumis à l'expérimentation des cycles de dessiccation/humidification ;
- rechercher les sols argileux dans les localités de Salahoué et Tohonou dans la commune de Houeyogbé;
- déterminer les variations des paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) des échantillons de sols argileux témoins et ceux soumis à des cycles de dessiccation/humidification.

Ce rapport est scindé en trois chapitres :

- le chapitre I présente la revue bibliographique avec une synthèse des principaux résultats obtenus sur des travaux de caractérisation des sols argileux dans la dépression de la Lama au sud du Bénin et des travaux de comportements au cisaillement des sols argileux soumis aux cycles d'humidification/dessiccation ;

- le chapitre II intitulé : matériaux, matériels et méthodologie présente le milieu d'étude à savoir les localités de Salahoué et Tohonou dans la commune de Houéyogbé, la campagne de prélèvement de sol et les essais réalisés au laboratoire du CNERTP ;
- le chapitre III intitulé : résultat, analyse et interprétations aborde les analyses et interprétation des résultats obtenus.

## CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### Introduction

**L**e phénomène de retrait/gonflement des sols se caractérise par des mouvements différentiels de terrains de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau est modifiée. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les sables et les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite.

Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants aux bâtis au cours des périodes de sécheresse prolongée

En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants ne sont observés qu'en période sèche. La sécheresse se traduit par une baisse du niveau des nappes. La tranche la plus superficielle de sol, sur 1 à 2 m de profondeur, est alors soumise à l'évaporation. Il en résulte un retrait des argiles, qui se manifeste verticalement par un tassement et horizontalement par l'ouverture de fissures, classiquement observées dans les fonds de mares qui s'assèchent.

De même, lors de précipitations, les sols se ré-humidifient, ils gonflent et des soulèvements différentiels peuvent être à l'origine de nouveaux désordres. Contrairement aux phénomènes de tassement par consolidation, les effets ne s'atténuent pas avec le temps mais augmentent quand la structure perd de sa rigidité. Ces modifications de consistance s'accompagnent de variations de volume, dont l'amplitude peut être parfois spectaculaire.

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer la revue bibliographique avec une synthèse des principaux résultats obtenus sur des travaux de caractérisation des sols argileux dans la dépression de la Lama au sud du Bénin et des travaux menés sur les comportements mécaniques des sols argileux soumis aux cycles d'humidification/dessiccation.

## 1.1 GENERALITE SUR LES ARGILES [1]

### 1.1.1 ASPECTS MICROSTRUCTURAUX DES ARGILES

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille des phyllosilicates. Ils sont issus de la dégradation lente de minéraux préexistants. Les conditions dans lesquelles a eu lieu la dégradation, ainsi que son état d'avancement peuvent expliquer la grande diversité des argiles.

La cellule de base des minéraux argileux est appelée cristallite. Elle est constituée d'un feuillet et d'un interfeuillet appelé aussi espace interfoliaire ou interstice. Une particule d'argile résulte de l'empilement face-à-face de quelques cristallites élémentaires (White, 1999). La phase solide des argiles est structurée suivant une organisation spatiale particulière : **le feuillet, la particule et l'agrégat.**

### 1.1.2 LES PRINCIPAUX TYPES D'ARGILE

Trois grands groupes d'argiles sont souvent rencontrés en géotechnique. il s'agit **des kaolinites, des illites et des smectites.** Ces argiles pures représentent des références pour la classification des différentes argiles qu'elles soient naturelles ou commerciales.

#### 1.1.2.1 Les kaolinites

Les kaolinites sont des minéraux argileux type 1:1 (TO), à feuillets d'équidistance fixe de  $7\text{\AA}$ . Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les  $\text{O}^-$  présents sur la surface supérieure et les  $\text{H}^+$  de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, conférant avec les liaisons de Van der Waal une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau. Par conséquent, les kaolinites sont presque insensibles à l'eau. Cette liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement  $45\text{m}^2/\text{g}$ .

Les particules de kaolinite sont de grandes plaquettes rigides de forme hexagonale de quelques dizaines à une centaine de nanomètre d'épaisseur et de quelques centaines à un millier de nanomètres d'extension latérale (dimension latérale/épaisseur). Les feuillets sont empilés de manière ordonnée et sont en contact les uns avec les autres. Ainsi, la seule surface accessible à l'eau reste la surface externe à la particule. Théoriquement, l'eau interfoliaire n'a aucune existence dans ce type d'argile. **Elle est l'exemple typique d'une argile non gonflante.**

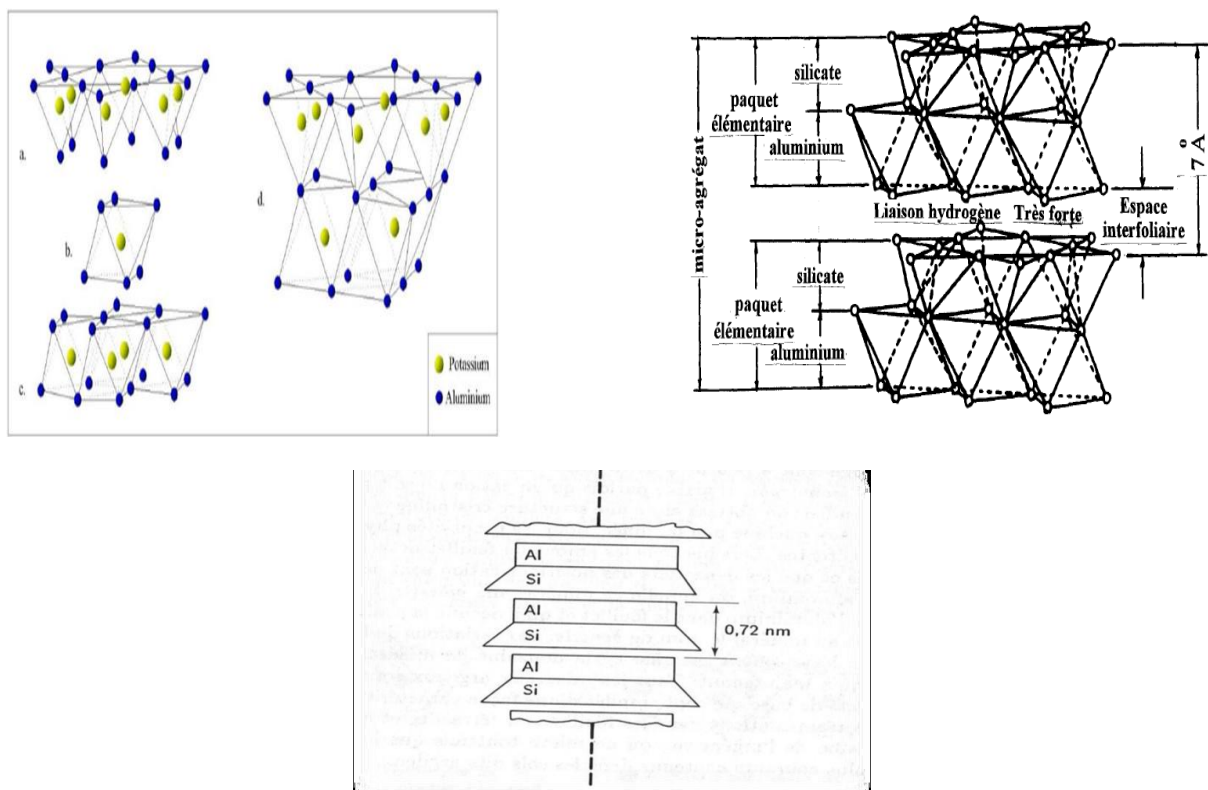


Figure 1.1 : Structure élémentaire du réseau cristallin de la kaolinite [1]

### 1.1.2.2 Les smectites

Les smectites sont des minéraux argileux de type 2 :1 (TOT). L'empilement des feuillets est désordonné ; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement grande par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å°. Ce désordre des feuillets et la constitution des faces inférieures et supérieures de ce type d'argile ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte. Par conséquent, les smectites sont très sensibles à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets. La capacité d'échange de ces argiles est comprise entre 80 et 150 méq/100g.

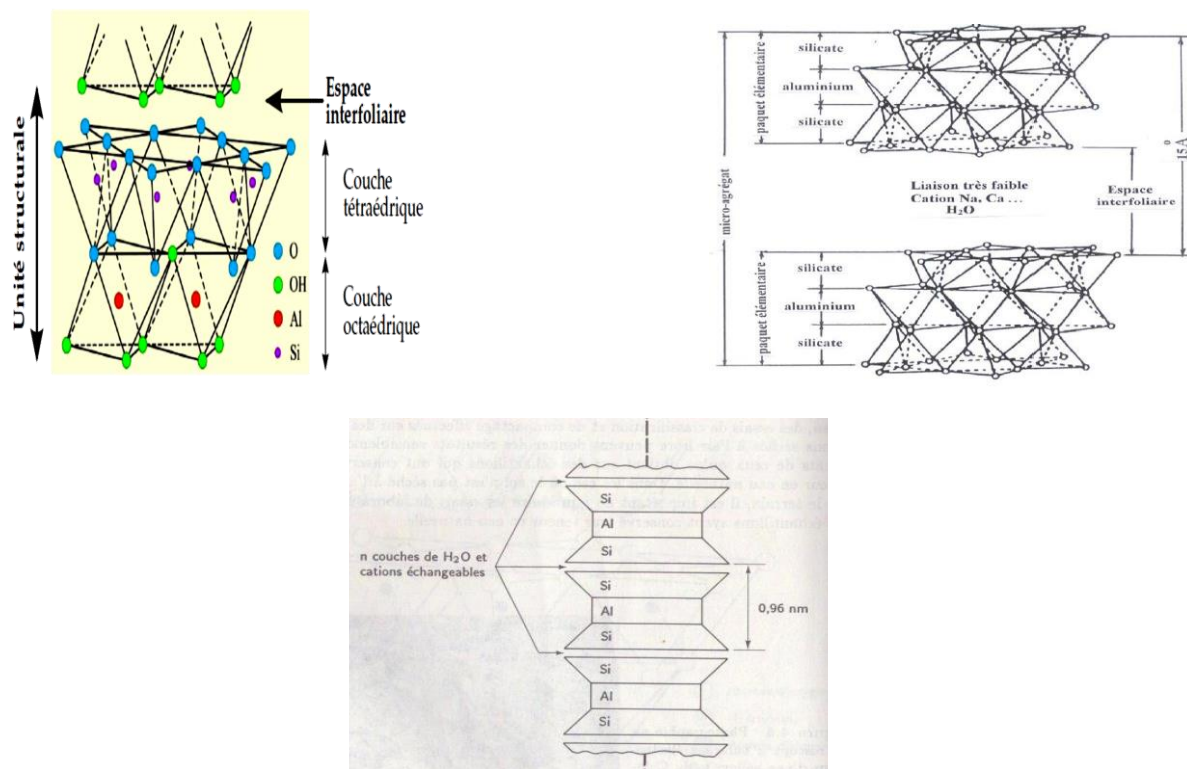


Figure 1.2 : Structure élémentaire du réseau cristallin de la montmorillonite [1]

### 1.1.2.3 Les illites

Les illites sont des minéraux argileux de type 2:1 (TOT), à feuillets d'équidistance fixe de 10 Å. Elles ont la même composition que la montmorillonite, mais une liaison forte entre feuillets est permise par la présence de cations potassium  $K^+$ . Ce caractère leur confère un potentiel de gonflement moindre que celui des smectites et la constitution de particules de tailles importantes. Les particules sont généralement composées d'un empilement de 5 à 20 feuillets, avec une épaisseur de moins d'une dizaine de nanomètres et une centaine de nanomètres pour l'extension latérale. Le pouvoir de fixation des cations de l'illite est compris entre 10 et 40 méq/100g.

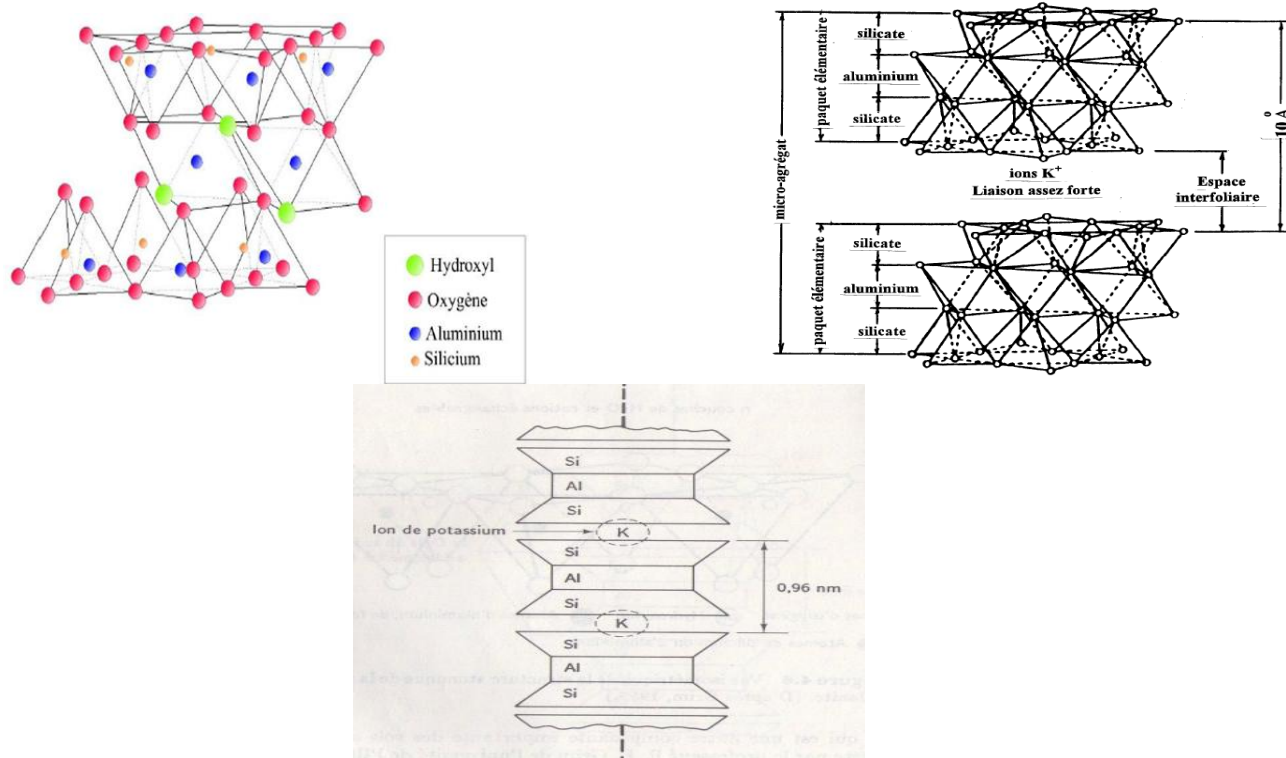


Figure 1.3 : Structure élémentaire du réseau cristallin de l'illite [1]

Le tableau 1.1 résume les différentes caractéristiques de chaque argile citée ci-dessus. Dans le cas de l'illite et de la smectite, la structure du feuillet est la même et pourtant les Capacité d'Echange Cationique (CEC) sont très différentes. La différence provient du mode de formation des argiles. Dans le cas de l'illite, les cations intégrés à l'intérieur de la structure sont différents de ceux d'une smectite : le déficit de charge n'est pas le même et les CEC sont donc différentes.

**Tableau 1.1 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles [1]**

Argile	Kaolinite	Illite	Smectite
Type de feuillet	1 :1	2 :1	2 :1
Epaisseur de feuillet (Å)	7	10	9.6
Nombre de feuillets par particule	10-150	5-20	1-10(montmorillonite sodique) 10-40(montmorillonite calcique)
CEC (méq/100g)	5-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	10-45	80-100	700-900
Matériau interfoliaire	-	K <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O, Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> ,...
Comportement dans l'eau	Non-gonflant	Peu gonflant	Gonflant

### 1.1.3 LOCALISATION DES SOLS ARGILEUX AU BENIN [1]

Les principaux types de sols argileux identifiés sur le territoire de la république du Bénin sont:

- les sols ferrugineux tropicaux (65%) ;
- les sols peu évolués (20%) ;
- les sols ferralitiques (10%) ;
- les sols hydromorphes (3%) et
- les vertisols (2%).

Les vertisols ou sols gonflants sont des sols qui, mis en contact avec l'eau, augmentent de volume et au cours de leur dessiccation, subissent de grands retrait.

Morphologiquement, il est établi que les sols gonflants aussi appelés sols expansifs sont des vertisols ou des sous-groupes de sol vertiques.

Les sols gonflants se rencontrent dans les régions semi-arides situées dans les zones tropicales ainsi que dans les régions tempérées où les précipitations sont plus faibles pendant toute ou une grande partie de l'année par rapport à l'évaporation.

Au Bénin, ces sols argileux se rencontrent dans la dépression de la Lama où affleurent des argiles marneuses ou calcaires traversant d'est en ouest le bassin sédimentaire (sud du pays).

La dépression de la Lama (Lama signifie boue en portugais) encore appelée dépression médiane est formée par une bande orientée W. SW-ENE dont la largeur est de 25 km. Elle couvre une aire qui s'étend de l'Est (Pobè, Adja-Ouèrè, Issaba, Onigbolo) à l'Ouest (Allada,

Toffo, Ouèdèmè) du Bénin estimée à plus de 3000 km<sup>2</sup>.

Plusieurs auteurs ont étudié et caractérisé ces sols. Nous pouvons citer entre autres :

- ADJATI Mètonwanou Albert (1986) qui a montré que cette région de la Lama couvre une large bande au sud du Bénin et comporte des sols argileux de types Kaolinite, montmorillonite et illite ;
- AGBELELE et al, (2016) ont déterminé les caractéristiques physico-mécanique de ces sols argileux en confirmant que ces sols sont constitués de limon et d'argile de la famille de l'illite et de montmorillonite ayant un potentiel de gonflement de "élevé" à "très élevé" avec une activité de l'argile variant de "inactif" à "actif,
- GBAGUIDI Victor et al. (2010) dans le cadre de l'étude du phénomène de gonflement des sols argileux du bassin sédimentaire côtier au Bénin ont montré que les mesures des potentiels de gonflement sont variables.
- TANKPINOU S Yvette et al. (2015), ont déterminé les caractéristiques chimiques minéralogique et géotechnique des sols argileux du sol au sud BENIN en montrant que ces sols sont constitués généralement d'au moins trois ou quatre types d'argiles gonflantes à savoir palygorskite, natronite, montmorillonite, saponite ou non gonflant : kaolinite et halloysite.

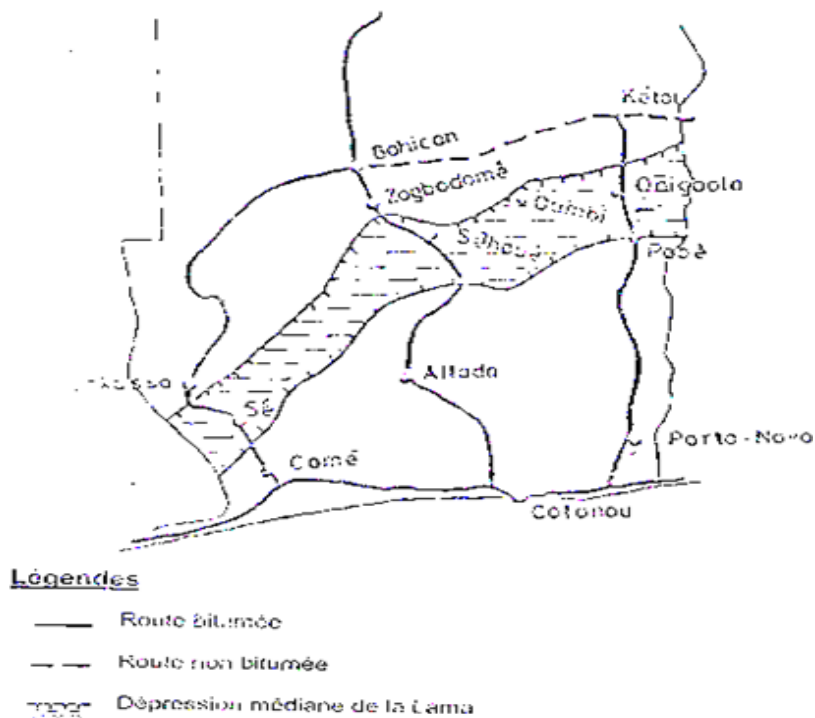
On retrouve également les sols gonflants sur certaines alluvions argileuses des fleuves Mono, Ouémé et Niger et dans le centre du Bénin où ils se localisent sur des secteurs bien circonscrits tels que :

- le secteur des gabbros de Bétékougou, à l'est de Dassa- Zoumè ;
- le secteur des diorites, à l'est de Setto et au sud de Logozohè ;
- le secteur des embréchites et basiques diverses.

On dénombre également des poches d'argiles et de tourbe autour du lac Nokoué, de la rivière Djonou à Godomey, et de la lagune de Porto-Novu.

Dans ces régions, les effets sont multiples pendant et après la pluie : soulèvement des voies, boursoufflement des chaussées, rupture des canalisations, glissement des terrains et des fondations. Les routes conçues sans précautions sur ces sols gonflants sont quasi-détruites après quelques saisons, par l'action conjuguée d'une part du retrait-fissuration qui favorise la pénétration de l'eau et par conséquent le gonflement en profondeur, puis d'autre part, de l'orniérage qui suit la saison des pluies lorsque l'argile gorgée d'eau ne présente plus aucune

résistance au poinçonnement par les roues des véhicules.



*Figure 1.4 : Situation géographique de la dépression de la Lama au sud du Bénin [1]*

## 1.2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Le tableau ci-après présente la synthèse bibliographique relative à la revue des études menées sur le phénomène des cycles de dessiccation/humidification des sols argileux et leur impact sur les paramètres mécaniques. Il présente pour chaque auteur, les titres des études menées, les résultats obtenus, les principales conclusions et les perspectives éventuelles

**Tableau 1.2: Synthèse bibliographique relative à l'influence des cycles dessiccation / humidification sur les sols argileux.**

auteurs	titre	Résultats obtenus / Principales conclusions et perspectives
Hossein Nowamooz et al. (2008)	évolution de la structure interne des sols gonflants soumis aux cycles de séchage/humidification	<p>Deux séries de quatorze échantillons compactés aux densités sèches de 1,27 et 1,57 Mg/m<sup>3</sup> ont été soumises à plusieurs cycles d'humidification puis séchage. Suite à l'imposition des cycles de succion, les échantillons manifestent un retrait cumulé pour le sol lâche et un gonflement cumulé pour le sol dense. les états d'équilibre réversible identiques indiquent que quel que soit l'état initial du sol, il existe une densité sèche initiale pour laquelle un échantillon n'obtient pas de déformation volumique cumulée lors des cycles de séchage/humidification. Pour le sol étudié, cette valeur est de 1,40 Mg.m<sup>-3</sup>; une fois l'équilibre atteint, les deux séries d'échantillons aux densités initiales différentes présentent la même structure interne. <b>La macrostructure évolue vers une gamme de taille de pore identique et plus grande que l'état initial. Cependant, la microstructure n'est pas influencée par ces cycles de séchage/humidification.</b></p> <p>En perspective, il est proposé de compléter cette étude par les cycles hydriques sous les charges mécaniques constantes afin de confirmer l'existence de cet état critique au bout de plusieurs cycles de séchage/humidification, puis d'étudier l'influence de chargement mécanique sur cet état d'équilibre.</p>
Myriam DUC1 et al. (2014)	Impact différentiel des cycles d'humidification-séchage sur le comportement des sols marneux et argileux intacts et remaniés	<p>Il a été procédé au cours de cette étude à des cycles complet de retrait total à l'air libre sans confinement ni chargement pendant 10 jours et gonflement libre à l'oedomètre sans chargement jusqu'à la limite de gonflement pendant 3 à 5 jours.</p> <p>Les résultats ont montré que les sols marneux intacts ont un comportement bien particulier vis-à-vis du retrait/gonflement alors que les sols remaniés tout comme l'argile intacte exprime tout leur potentiel de retrait ou de gonflement dès le premier cycle d'humidification/séchage. Des cycles devraient donc être systématiquement appliqués aux marnes intacts pour ne pas sous-estimer leur amplitude de déformation qui évolue avec le nombre de cycle. <b>Les résultats montrent également que les courbes de porosimétrie et la forme des courbes de retrait permettent d'obtenir des informations sur l'évolution de la microstructure des sols qui gouverne des déformations à l'échelle macroscopique</b></p>

<p>Jean BIAREZ et al (2014)</p>	<p>variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification</p>	<p>Trois matériaux ont été étudiés pour comparer des résultats d'essais de drainage/humidification et de compression oedométrique et isotrope. Il s'agit de : une kaolinite artificielle pratiquement pure; un limon naturel moyennement plastique et une marne fortement cimentée à l'état naturel utilisée sous forme remaniée et non remaniée.</p> <p>On constate que, dans le domaine saturé, les courbes de drainage humidification ont la même allure que les courbes oedométriques et isotropes : au-delà d'une pression de «préconsolidation», ou limite élastique, ces courbes présentent une partie sensiblement linéaire, qui correspond à un comportement non réversible du matériau, sur laquelle on peut définir un indice de drainage. Dans le domaine élastique, on définira de même un indice d'humidification. Pour les deux matériaux, les droites sont parallèles et les indices correspondants sont égaux. Notons que, pour une valeur donnée de la contrainte, la courbe oedométrique se trouve à un indice des vides inférieur ou égal à celui de la courbe de drainage, tandis que celui-ci est légèrement plus élevé pour la compression isotrope. En conclusion, dans le domaine où les échantillons restent saturés, des incréments identiques de pression capillaire ou de contrainte mécanique produisent la même variation d'indice des vides. <b>La comparaison entre les essais de drainage/humidification et les essais mécaniques de compression-décompression oedométriques et isotropes a montré qu'il existe, dans les conditions d'essai considérées, une équivalence entre la contrainte mécanique appliquée et la pression capillaire tant que le sol reste saturé. Ainsi, pour un sol saturé, les variations de volume ne dépendent que des variations de la contrainte effective</b></p>
<p>H. NOWAMOOZ et al. (2007)</p>	<p>Comportement hydromécanique des sols gonflants soumis aux cycles hydriques</p>	<p>Une campagne d'essais a été réalisée dans des oedomètres osmotiques sur deux matériaux compacté et naturel. Dans un premier temps, l'influence des cycles d'humidification/séchage sur le comportement hydromécanique d'un mélange de bentonite-limon compacté a été étudiée. L'application de plusieurs cycles hydriques sur ce sol gonflant à l'état non saturé, en induisant un retrait cumulé, permet de le rigidifier et de lui attribuer un comportement élastique. Dans un second temps, les cycles de d'imbibition dessiccation appliqués sur le sol argileux du site du Deffend ont induit un gonflement cumulé, ce qui a ramolli ce matériau tout en le mettant dans un état élastique réversible.</p> <p>En perspective, il faut étudier comment prévoir a priori si les cycles de succion vont engendrer un retrait ou un gonflement cumulé dans un matériau.</p>

### 1.3 MECANISMES DE RETRAIT/DESATURATION ET DE GONFLEMENT/RESATURATION [2]

Le retrait et le gonflement sont d'origine physico-chimique. Ils s'expliquent par la fixation d'eau par les minéraux hydrophiles, et se distinguent, du point de vue du mécanisme. D'autres phénomènes entraînent également des variations de volume tel que l'hydratation résultant des réactions chimiques, et la dilatance-contratance d'origine mécanique et thermique. Le phénomène de retrait-gonflement est lié à une prise ou un départ d'eau sous l'effet de désaturation-ressaturation et se produit aussi bien à l'état saturé qu'à l'état non-saturé.

#### 1.3.1 Mécanismes de retrait

Les retraits dépendent de l'état de liaison de l'eau avec le squelette solide dans les matériaux. L'étude des mécanismes de retrait correspond à celle de la liaison eau/surface solide (Baroghel-Bouny, 1994). On a identifié trois types de mécanisme de retrait par la désaturation : **le retrait par variation de la dépression capillaire, de la tension superficielle et de la pression de disjonction**, qui correspondent respectivement aux trois types de l'état de l'eau dans les argilites: **l'eau capillaire, adsorbée et interlamellaire**.

Le retrait par variation de la dépression capillaire s'appuie sur l'équation de Kelvin-Laplace. Il se produit pour les fortes humidités relatives pour lesquelles les pores capillaires sont remplis par l'eau. Mais quand les matériaux sont progressivement désaturés, les ménisques dans les pores se créent d'abord, puis les courbes de ces ménisques diminuent pour maintenir l'équilibre entre l'eau liquide et phase gazeuse. Cette dépression provoque une contraction du solide qui engendre les retraits.

La capillarité est souvent illustrée par le schéma dans la figure 1.5 décrivant la remontée capillaire  $h_c$  de l'eau dans un tube de faible rayon  $r$ , plongé dans un liquide seulement partiellement immergé, dans le cas où l'interface liquide-gaz se présente sous forme d'un ménisque concave sphérique.

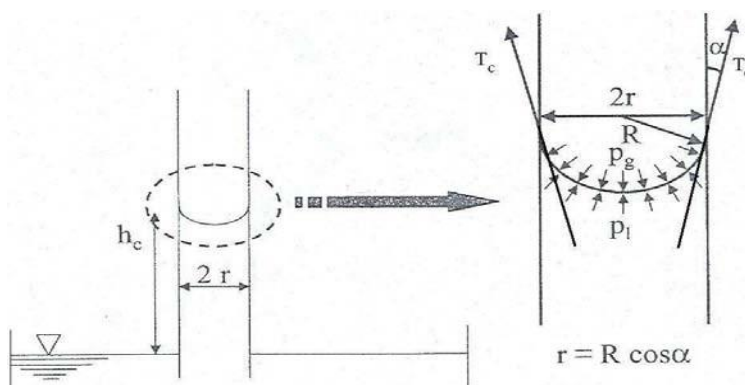


Figure 1.5 : Tube capillaire [2]

La loi de Jurin donne la hauteur  $h_c$  d'ascension capillaire :

$$h_c = \frac{2T_c \cos\alpha}{r\rho_w g}$$

avec  $r$  : rayon capillaire

$T_c$  : tension superficielle

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau

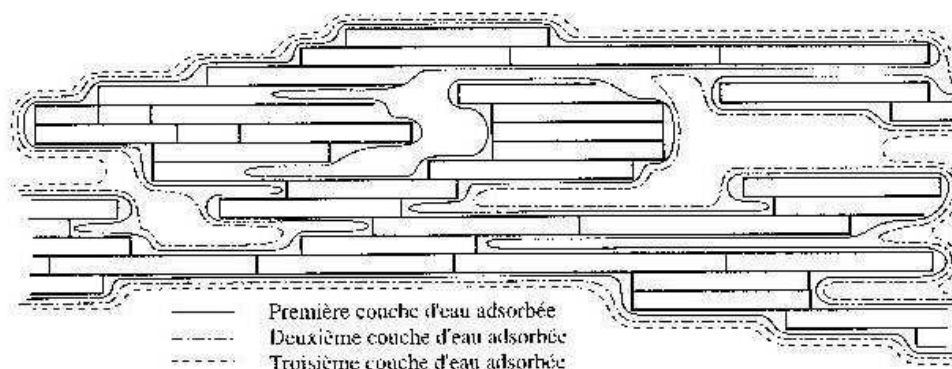
$g$  : accélération de la pesanteur

$\alpha$  : angle de contact entre les deux éléments en présence.

La pression capillaire  $p_c$  s'écrit en fonction du rayon capillaire :

$$P_c = P_g - P_l = \frac{2T_c \cos\alpha}{r}$$

Le retrait par variation de la tension superficielle du solide est basé sur l'énergie superficielle du système colloïdal formé par la surface de solide avec l'épaisseur du film d'eau adsorbée, lorsque l'humidité relative est plus faible ( $RH < 40\%$ ). Si l'humidité relative diminue, l'énergie superficielle augmente. Cette augmentation est équilibrée par la décroissance de l'étendue de l'interface qui engendre le retrait.



**Figure 1.6 : L'eau adsorbée dans un paquet de feuillets smectitiques (Van Damme 2001) [2]**

Le retrait par variation de la pression de disjonction se base sur le concept de pression de disjonction due à l'adsorption dans un espace confiné. La pression de disjonction varie avec l'humidité relative. Il en résulte une variation de distance entre surfaces de solides. La désaturation est assistée par le flux chimico-osmotique. L'évaporation dans les larges pores produit la concentration de constituants chimiques dans l'eau interstitielle résiduelle, permettant de retirer l'eau dans l'espace de double couche. Quand le film d'eau s'en va, la pression disparaît, l'espace interparticulaire devient plus petit. Le volume de matériau diminue donc.

### 1.3.2 Mécanismes de gonflement

Selon la force des liens unissant les feuillets d'argile avec l'arrivée d'eau ou non dans l'espace interfoliaire, on peut distinguer l'argile gonflante ou non gonflante. Dans certaines argiles (kaolinites, illites), l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Elles sont faiblement gonflantes. Par contre, dans les smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfeuillet peut s'hydrater. L'amplitude du gonflement dépend de l'état initial, bien sûr, et des contraintes appliquées. Les smectites font partie des argiles gonflantes.

Le phénomène de gonflement paraît relever de deux causes: hydratation des espaces interfoliaire et répulsion entre les particules. L'eau peut latéralement pénétrer dans l'espace interfeuillet. Les feuillets s'écartent, et la liaison entre deux feuillets parallèles doit alors être assurée différemment. Il en résulte une réorganisation complète de la matrice solide. Cette réorganisation est sans doute le premier des deux points essentiels permettant de distinguer le gonflement des argiles gonflantes et celui d'un autre matériau poreux (Gaombalet, 2004). Le

deuxième est l'interaction eau-argile liée aux ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement. Ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cation dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets. De même, les anions qui sont repoussés électrostatiquement par les feuillets, ont une distribution spatiale particulière au voisinage des feuillets. Il en résulte que la distribution des ions dans l'espace interfoliaire est en général différente de celle dans les gros pores. Cela se traduit par une différence entre les pressions osmotiques internes et externes aux particules et donc par des forces exercées sur les feuillets. Cette différence est souvent appelée « pression de gonflement microscopique » ou pression de répulsion interparticulaire.

### **1.4 ETUDES DE L'EFFET DE LA DESSATURATION - RESSATURATION SUR LES MATERIAUX ARGILEUX [2]**

Différentes méthodes permettent de créer la dessaturation et la ressaturation. Elles sont souvent complémentaires car elles ne couvrent pas toujours les mêmes zones de succion (Delage et al., 1998) et (Gasc-Barbier, 2002). Lorsque l'échantillon est dessaturé ou ressaturé grâce à l'humidité de l'air, les échanges se font sous forme gazeuse, on parle respectivement alors de désorption ou sorption. Dans le cas de la ressaturation par contact direct avec l'eau, les échanges entre le matériau et l'environnement sont réalisés sous forme liquide, c'est l'imbibition. On impose également la pression osmotique ou la surpression d'air pour créer la succion dans le matériau. Les principales méthodes classiquement utilisées sont présentées ici.

#### **1.4.1 Plaque tensiométrique**

C'est l'une des premières méthodes utilisées. La plaque tensiométrique consiste à mettre l'eau d'un échantillon sous tension en le mettant au contact d'une pierre poreuse céramique saturée d'eau, connectée à un récipient d'altitude variable par le biais d'un tube en U. Un récipient placé plus bas que l'échantillon permet d'exercer une dépression égale à la hauteur d'eau. Ce système permet d'avoir une excellente précision aux très faibles succions, entre 0 et 10 kPa (1,00 m d'eau).

Dans des conditions normales, l'eau ne peut être mise sous tension que jusqu'à la limite imposée par la cavitation, qui est de 80 kPa pour une eau naturelle, ce qui définit la gamme tensiométrique (0-80 kPa). Cette gamme peut être couverte avec un procédé analogue, en plaçant du mercure dans le tube en U (100 kPa ~76 mm de mercure).

### **1.4.2 La méthode osmotique**

La technique osmotique provient de la biologie, où elle est utilisée en particulier pour les dialyses. Elle est basée sur l'utilisation de membranes semi-perméables et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) (Delage et al., 1998).

Le principe est d'imposer une pression osmotique à la solution interstitielle. Cette pression est provoquée par la différence de concentration existant entre la solution du sol et la solution de concentration connue mise au contact. Cette mise au contact se fait par l'intermédiaire d'une membrane poreuse ne laissant migrer que les molécules d'eau et les ions de la solution du sol. Avec cette méthode, on applique classiquement des pressions de succion comprises entre 0,3 et 12 MPa.

### **1.4.3 L'appareil de Richards (méthode de translation d'axes)**

Le principe de l'appareil de Richards repose sur la méthode des pressions pneumatiques: l'échantillon est mis au contact avec de l'eau, dans une enceinte qui peut être pressurisée; l'eau étant également au contact avec une surface libre. En vertu de la loi de Laplace, l'eau pénètre alors dans (ou se vide de) la classe de capillaires correspondant à la différence de pression entre celle appliquée dans l'enceinte et la pression atmosphérique. Dans le cas de l'appareil de Richards, ce contact échantillon-eau se fait par l'intermédiaire d'une pierre poreuse dont les pores sont suffisamment petits pour qu'elle ne soit pas de-saturée par la pression maximale d'air appliquée dans la cellule. C'est la valeur de la pression au point d'entrée d'air de la pierre poreuse qui limite le potentiel imposable. L'eau sous cette pierre poreuse est maintenue à la pression atmosphérique. La succion produite dans cet échantillon est égale à la pression d'air exercée sur l'échantillon. L'ordre de grandeur des succions maximales imposées avec cette technique est de 1,5 MPa, ce qui impose la réalisation de

cellules métalliques de confinement extrêmement fiables, vu l'énergie élastique emmagasinée par les volumes de gaz comprimé.

#### 1.4.4 La méthode des solutions salines

Cette méthode repose sur un principe physique : à une concentration en sel, une pression d'air et une température donnée correspondent à une seule pression partielle de vapeur d'eau. Il est très important de noter que les valeurs d'humidité relatives données ne sont valables que pour une pression d'air et une température fixée à condition que les solutions soient sursaturées en sel. Suivant les références consultées, de légers écarts pouvant aller jusqu'à 3%, peuvent apparaître (Delage et al. 1998). Cette méthode est plus simple d'emploi et moins dangereuse que les autres, mais les échanges par phase vapeur sont plus lentes.

L'humidité relative de l'air noté RH (exprimé en pourcentage) ou degré d'hygrométrie est directement le rapport de pression de vapeur sur la pression de vapeur saturante  $P_v/P_{v0}$ . En divisant le potentiel chimique par le volume molaire, on obtient une pression équivalente. Dans le cas de potentiels négatifs, la pression ainsi obtenue est aussi négative : son opposée est la succion. La succion (notée  $s$ ) s'exprime en Pa ou en centimètres de colonne d'eau (notée souvent  $h$  au lieu de  $s$ ) :

$$s = \frac{\rho_w RT}{M_v} \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$$

Avec  $s$  : succion (en Pa),

$\rho_w$  : masse spécifique de l'eau soit  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,

$R$  : constante des gaz parfaits soit  $8,31 \text{ J/mol/K}$ ,

$M_v$  : masse molaire de l'eau soit  $0,018 \text{ kg/mol}$ ,

$T$  : température en K,

RH : degré hygrométrique exprimé en %.

L'unité pF, traditionnellement usitée en agronomie, est définie par la relation suivante :

$$pF = \log_{10}(h)$$

avec  $h$  : hauteur d'eau exprimée en centimètres.

Comme nous venons de le voir, l'humidité relative dépend de la température. Il convient donc de réaliser les essais à température constante (20°C dans notre cas).

Le Tableau 1.3 décrit les différentes solutions salines utilisées avec les succions correspondantes (exprimées en MPa et en pF) en mentionnant les limites de solubilité. Les données sont données à 20°C, la température ayant une forte influence sur les solubilités ainsi que sur les pressions de vapeur saturantes donc sur les degrés hygrométriques imposés.

**Tableau 1.3 : Données sur les solutions salines et les succions associées [2]**

Sel	formule chimique	solubilité (g/l) à 20°C	degré hygrométrique (%RH) à 20°C	succion (MPa)	succion (pF)
sulfate de cuivre hydraté	CuSO <sub>4</sub> ,5H <sub>2</sub> O	317	98	2,83	4,45
sulfite de sodium hydraté	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ,7H <sub>2</sub> O		95	6,92	4,84
sulfate de zinc hydraté	ZnSO <sub>4</sub> ,7H <sub>2</sub> O	540	90	15,1	5,18
sulfate d'ammonium	NH <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	754	81	26,3	5,42
chlorure de sodium	NaCl	360	75	40,1	5,6
nitrite de sodium	NaNO <sub>2</sub>	820	66	56,3	5,75
carbonate de potassium hydraté	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,2H <sub>2</sub> O	937	44	115	6,06
chlorure de calcium hydraté	CaCl <sub>2</sub> ,6H <sub>2</sub> O	5360	32,5	158,5	6,20

### Conclusion partielle :

Au Bénin, les sols argileux se rencontrent dans la dépression de la Lama où affleurent des argiles marneuses et calcaires traversant d'est en ouest le bassin sédimentaire sud du pays. Plusieurs auteurs ont étudié et caractérisé ces sols et ont montré que ce sont des sols argileux de types kaolinite, montmorillonite et illite palygorskite, nanontronite, montmorillonite, saponite ou non gonflant : kaolinite et halloysite

Des auteurs consultés, ont également mené des études sur le phénomène des cycles de dessiccation/humidification des sols argileux et leur influence sur les paramètres mécaniques :

ils ont tiré, entre autres, les conclusions suivantes :

- l'application de plusieurs cycles hydriques sur un sol gonflant compacté à l'état non saturé, en induisant un retrait cumulé, permet de le rigidifier et de lui attribuer un comportement élastique ;
- la macrostructure d'un sol argileux évolue vers une gamme de taille de pore identique et plus grande que l'état initial. Cependant, la microstructure n'est pas influencée par les cycles de séchage/humidification ;
- les courbes de porosimétrie et la forme des courbes de retrait permettent d'obtenir des informations sur l'évolution de la microstructure des sols qui gouverne des déformations à l'échelle macroscopique ;
- il existe, dans les conditions d'essais considérées, une équivalence entre la contrainte mécanique appliquée et la pression capillaire tant que le sol reste saturé. Ainsi, pour un sol saturé, les variations de volume ne dépendent que des variations de la contrainte effective.

## CHAPITRE 2 : Matériaux, matériels et méthodologie de recherche

### Introduction

De la revue bibliographique, il ressort que les sols argileux sont localisés dans la dépression de la lama formée par une bande orientée SW-NE dont la largeur est de 25 km. Elle couvre une aire qui s'étend de l'Est (Pobè, Adja-Ouèrè, Issaba, Onigbolo) à l'Ouest (Allada, Toffo, Ouèdèmè) au Bénin estimée à plus de 3000 km<sup>2</sup>. Cette dépression couvre plusieurs communes dont celle de Houeyogbé identifiée comme site de prélèvement notamment les localités de Salahoué et Tohonou. Il est également prouvé que les cycles de dessiccation/humidification influencent les propriétés mécaniques lorsque les conditions hydriques et l'état des contraintes sont modifiés. Dans ce chapitre 2, il est décrit le milieu d'étude, le matériel de laboratoire et les protocoles d'essais utilisés.

### 2.1 MILIEU D'ÉTUDE [1]

#### 2.1.1 Présentation de la Commune de Houéyogbe

D'une superficie de 320 km<sup>2</sup>, la commune de Houéyogbé couvre 19,94% de la superficie du département du mono. Elle fait partie des six (06) communes du département et est comprise entre 6°26' et 6°42' de latitude Nord et 1°46' et 1°57' de longitude Est sur le globe. Elle s'étend sur 16,25 km du Nord au Sud et sur 13,75 km de l'Est à l'Ouest. Elle est limitée au Nord par la commune de Lokossa, à l'Est par la commune de Bopa, au Sud par la commune de Comè, au Sud-Ouest par la commune de Grand-Popo, et à l'Ouest par la commune d'Athiémé. La Commune de Houéyogbé est dans son ensemble constituée de terrains plats à faibles altitude, très peu accidenté et offrant une diversité de sols pour divers usages. Elle occupe la partie Nord du plateau de Comè qui constitue, avec la dorsale Lokossa-Agamè ou plateau d'Agamè et le plateau d'Aplahoué ou Plateau Adja, le complexe de plateaux de terre de barre du Mono- Couffo dont il est l'un des cinq espaces homogènes aux plans physique, humain et économique

La Commune de Houéyogbé est située dans une région à climat subéquatorial. On y observe la succession annuelle de quatre saisons. Deux saisons sèches (entre mi-novembre et mi-mars puis mi-juillet et mi- septembre) suivies par deux saisons pluvieuses (de mi-mars à mi-juillet et de mi-septembre à mi- novembre). Ce climat s'identifie par de faibles écarts de température variant entre 24,9 °C en juillet et 27,9 °C en mars avec une moyenne annuelle tournant autour de 26°C.

Le réseau hydrographique est très riche en cours et plans d'eau d'importance secondaire. Les eaux de surface sont fournies par des lacs et des rivières. Le lac Toho arrose les arrondissements de Doutou et de Zoungbonou et sert de frontières naturelles entre les Communes de Houéyogbé, d'Athiémé et de Lokossa. C'est le plus grand lac de la Commune.

Du point de vue démographique, la commune de Houéyogbé a une population de 101893 habitants, selon les résultats du recensement de 2013 (RGPH 4- 2013), soit une densité de 318 habitants/km<sup>2</sup> et un accroissement inter censitaire de 2,81%. La population féminine (52 706) de la commune dépasse la population masculine avec un rapport de masculinité de 93 hommes pour 100 femmes (*Monographies communales \_ Mission de spatialisation des cibles prioritaires des ODD au Bénin, 2019*)

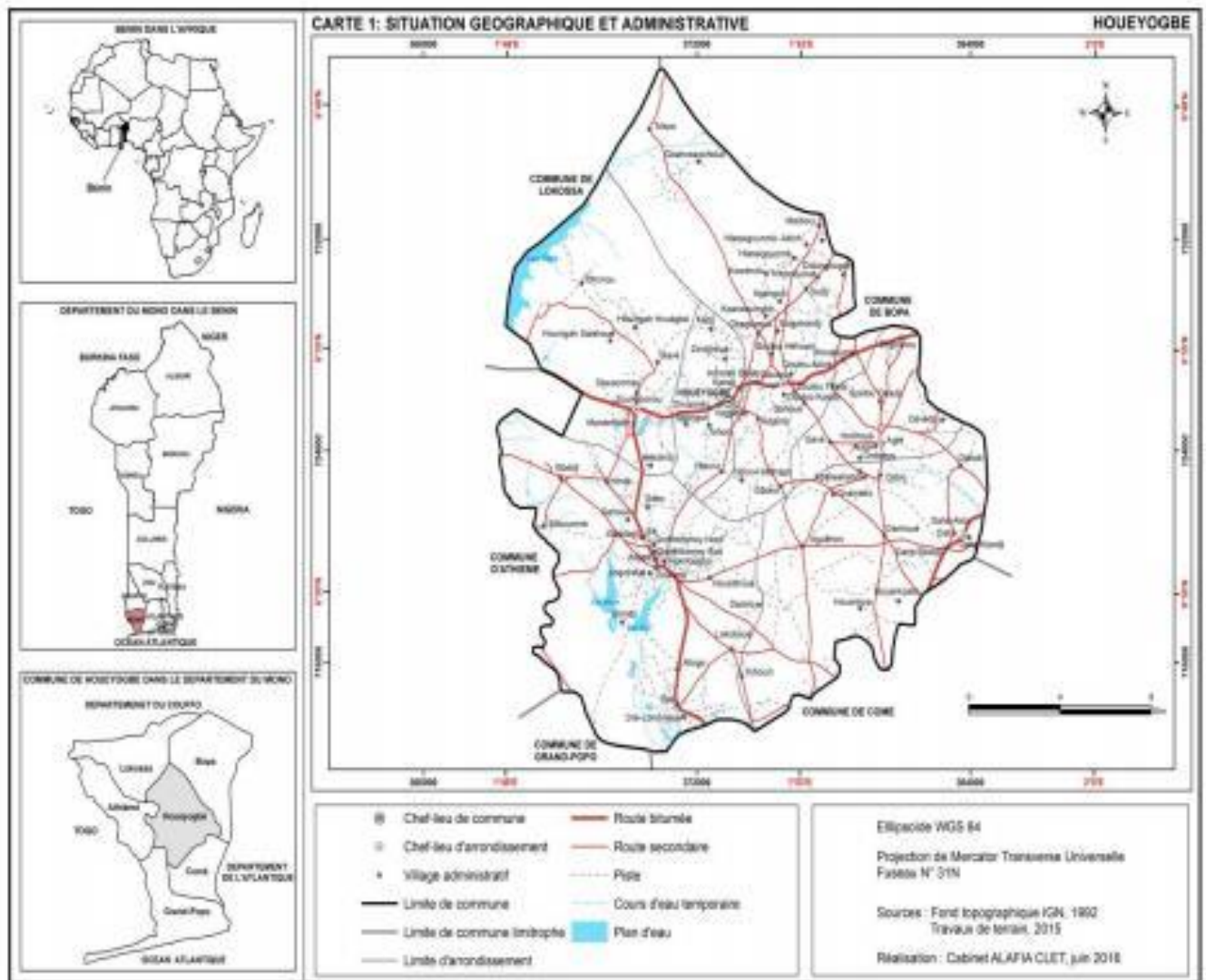


Figure 2.1 : Carte de la Commune de Houéyogbé [1]

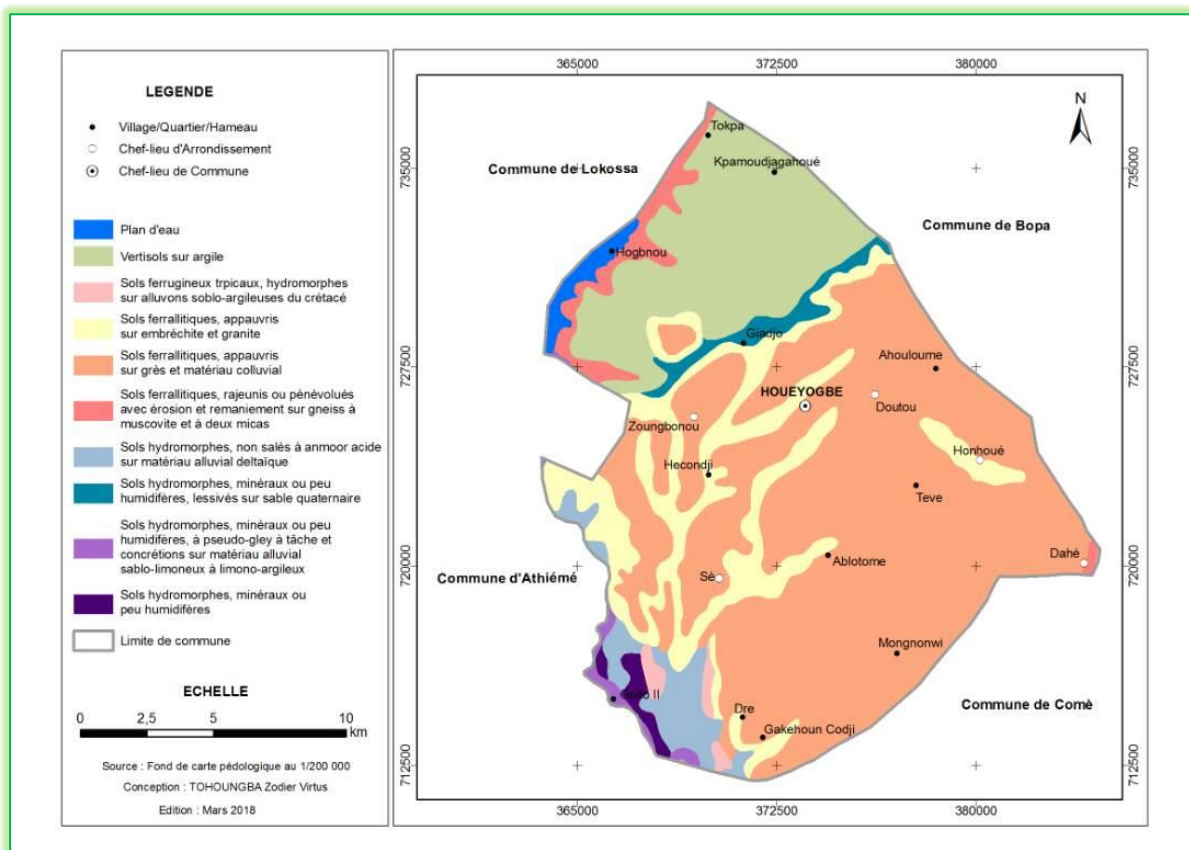


Figure 2.2: Carte Pédologique de Houéyogbé [1]

### 2.1.2 Présentation des sites de prélèvement

Les coordonnées géographiques en projection sont prises par rapport à la référence mondiale UTM WGS 84. Le tableau suivant présente les coordonnées géographiques et la profondeur de chaque prélèvement.

Tableau 2.1 : Localisation des sites de prélèvements et profondeur

LOCALITES	COORDONNEES GEOGRAPHIQUES EN PROJECTION	PROFONDEUR DE PRELEVEMENT (m)
SALAHOUÉ	31N 36 84 01,455 728586,396	1,50 – 1,66
TOHONOU	31N 36 63 88,918 731348,531	1,50 – 1,66

Les fosses pédologiques, de dimensions 2 m (L) x 1.5 m (l) x 1.5 m (H) de ces différents sites nous ont permis d'avoir une idée sur la stratification des couches de sols traversés. L'intérêt de ces fosses est de permettre de visualiser la transition entre les formations argileuses.



*Photo 2.1 : Puits manuel de prélèvement d'échantillons*

## **2.2 MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE**

### **2.2.1 Aspects généraux**

Le but de ce travail est de contribuer à mesurer l'influence des cycles de dessiccation-humification sur les paramètres de cisaillement des sols argileux dans la commune de HOUEYOGBE. Pour ce faire, il a fallu :

- procéder au prélèvement des échantillons des sols argileux sur les sites identifiés de la commune de Houeyogbé à savoir : Salahoué et Tohonou ;
- réaliser des essais d'identification sur les matériaux prélevés ;
- réaliser les essais de cisaillement direct sur les échantillons témoins C0 ;
- soumettre les échantillons à un cycle de dessiccation puis d'humidification C1;
- réaliser les essais de cisaillement direct sur les échantillons C1 ;
- soumettre les échantillons à deux cycles de dessiccation-humidification C2;
- réaliser les essais de cisaillement direct sur ces échantillon C2 ;
- soumettre les échantillons à trois cycles de dessiccation-humidification C3;
- réaliser les essais de cisaillement direct sur ces échantillons C3.

Le matériel utilisé au laboratoire du Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP) pour réaliser ces essais est récapitulé dans le tableau suivant

**Tableau 2.2 : Récapitulatif des essais et leurs matériels**

N°	ESSAIS	NORMES - APPAREILS
	<b>ESSAIS PHYSIQUES</b>	
1	Analyse granulométrique par tamisage [3]	Série de tamis normalisés AFNOR
2	Analyse granulométrique par sédimentométrie [4]	Densimètre, éprouvette, défloculant etc
3	Teneur en eau [5]	Etuve de 0°C à 150°C au moins
4	Poids spécifique [6]	Eau distillée, fiole jaugée etc
5	Teneur en matières organiques [7]	Bain marin, eau oxygénée, fiole jaugée etc
6	Limites d'Atterberg [8]	Boîte de Casagrande
7	Valeur au bleu de méthylène [9]	Eprouvette, bleu de méthylène etc
	<b>ESSAIS MECANQUES ET HYDRIQUES</b>	<b>APPAREILS</b>
8	Dessiccation-humidification	Etuve, enceinte adiabatique
9	Cisaillement direct [10]	Appareil de cisaillement de Casagrande

### 2.2.2 Essai de dessiccation-humidification

#### ➤ But de l'essai

Ce protocole est mis au point afin d'effectuer l'humidification avec de l'eau dans une enceinte adiabatique puis la dessiccation avec une étuve.

➤ **Matériels**

- Une étuve
- Une enceinte adiabatique
- Une picette
- Des bagues
- Des papiers filtres
- Eau distillée
- Un Marteau
- Des tarres
- Une balance

➤ **Mode opératoire**

✚ **Dessiccation :**

- Prélever les échantillons avec les bagues munies d'une trousse coupante ;
- recouvrir les échantillons prélevés par du papier filtre sur les deux faces ;
- peser et disposer ces échantillons dans l'étuve à  $105^{\circ}\text{c} \pm 5^{\circ}\text{c}$  ;
- étuver ces échantillons pendant quarante-huit (48) heures.



*Photo 2.2 : Appareillage de dessiccation : étuve et pesée*

✚ **Humidification**

Après avoir effectué la dessiccation à l'étuve,

- disposer les échantillons étuvés dans l'enceinte adiabatique ;
- remplir l'enceinte adiabatique d'eau de manière à ce que cette eau dépasse un peu l'arase supérieure des échantillons ;
- fermer l'enceinte adiabatique puis laisser les échantillons séjournés pendant quarante-huit (48) heures ;

- enlever ces échantillons une fois le délai escompté puis les peser encore afin de déterminer le degré de saturation par le biais de la détermination de la teneur en eau selon la norme NFP 94-050.



*Photo 2.3 : Appareillage pour l'humidification*

La réalisation d'une dessiccation et d'une humidification sur un échantillon représente la simulation d'un cycle C1 respectivement d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse. La répétitivité de ce cycle nous a permis de réaliser deux cycles C2 et trois cycles C3. Après chaque cycle réalisé, nous avons effectué des essais de cisaillement direct sur ces échantillons.

### **Conclusion partielle :**

Les échantillons ont été prélevés dans les localités de Tohonou et de salahoué dans la commune de Houéyobgbé situé dans la dépression de la Lama. Les essais ont été réalisés au laboratoire du CNERTP.

## CHAPITRE 3 : Résultats : analyses et interprétation

### Introduction :

Les essais d'identification des matériaux prélevés, les cycles d'humidification/dessiccation et des essais de cisaillement direct constituent les expérimentations réalisées dans le cadre de ce mémoire. Ces expérimentations ont permis d'obtenir les résultats qui ont été analysés et interprétés pour confirmer l'hypothèse de l'influence des cycles de d'humidification/dessiccation sur la cohésion et l'angle de frottement interne des sols argileux. Ce chapitre 3 présente les résultats obtenus, les analyses et leurs interprétations.

### 3.1 LES ESSAIS D'IDENTIFICATION

#### 3.1.1 Essais réalisés

Les essais réalisés pour identifier les matériaux argileux prélevés sur les différents sites sont :

- l'analyse granulométrique ;
- la masse volumique des grains solides  $\gamma_s$  (T/m<sup>3</sup>)
- la teneur en matière organique ;
- la valeur au bleu de Méthylène VBS ;
- les limites d'Atterberg :

#### 3.1.2 Résultats

Les résultats des essais d'identification des sols de ces deux localités sont récapitulés dans le tableau ci-après :

les fiches de laboratoire sont jointes en annexe 1

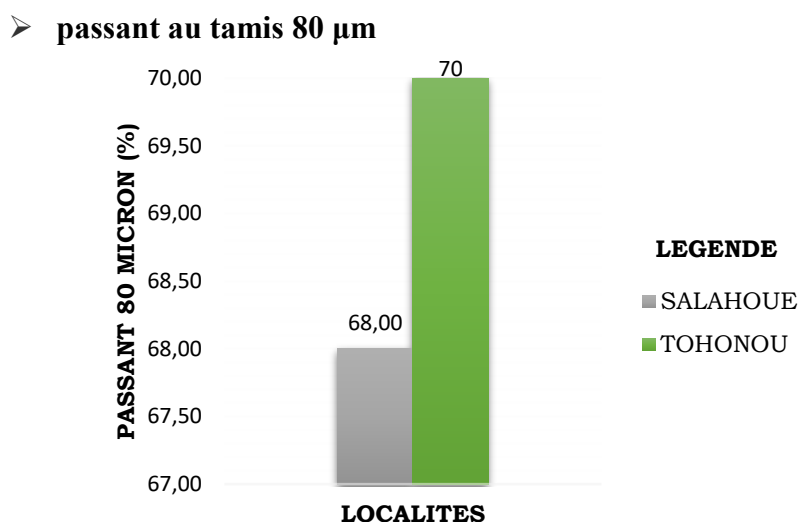
**Tableau 3.1 : Récapitulatif des résultats d'essais d'identification de sol de TOHONOU et de SALAHOUE**

DESIGNATIONS	SALAHOUÉ	TOHONOU
% ≤ 0,315 mm	77	82
% ≤ 0,08 mm	68	70
% > 0,050 mm	35,59	31,59
% ≤ 0,002 mm	38,50	36,50
MO (%)	0,30	0,40
γ <sub>s</sub> (T/m <sup>3</sup> )	2,34	2,27
W (%)	50,61	45,16
VBS	0,43	11,00
IP (%)	34,00	35,00
Ac	0,88	0,96

### 3.1.3 Analyse et Interprétation

#### 3.1.3.1 Paramètres de granulométrie

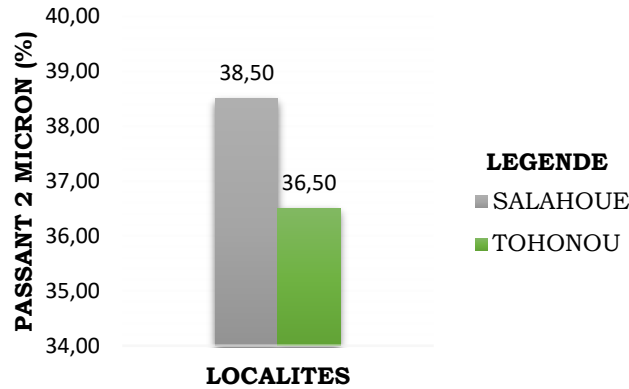
L'analyse des résultats de granulométrie a été faite en comparaison avec l'abaque de classification de classification triangulaire de Taylor (1948) indiquée à la figure 3.1 ci-dessous.



**Graph 3.1 : Pourcentage de passant au tamis 80 μm**

L'analyse de ce graphe nous permet de conclure que les sols prélevés dans la localité de SALAHOUE et de TOHOUNOU sont des sols fins en raison de leur pourcentage de passant au tamis 80 μm qui atteint 50%.

➤ Passant au tamis 2 µm



Graph 3.2 : Pourcentage de passant au tamis 2 µm

On peut déduire que les sols provenant de la localité de SALAHOUE et de TOHONOU sont des limons argileux.

Tableau 3.2 : Récapitulatif sur les types de sols selon la classification triangulaire de Taylor (1948)

LOCALITES	% > 50 µm	% ≤ 2 µm	NATURE
SALAHOUÉ	35,59	38,50	Limon argileux
TOHONOU	31,59	36,50	Limon argileux

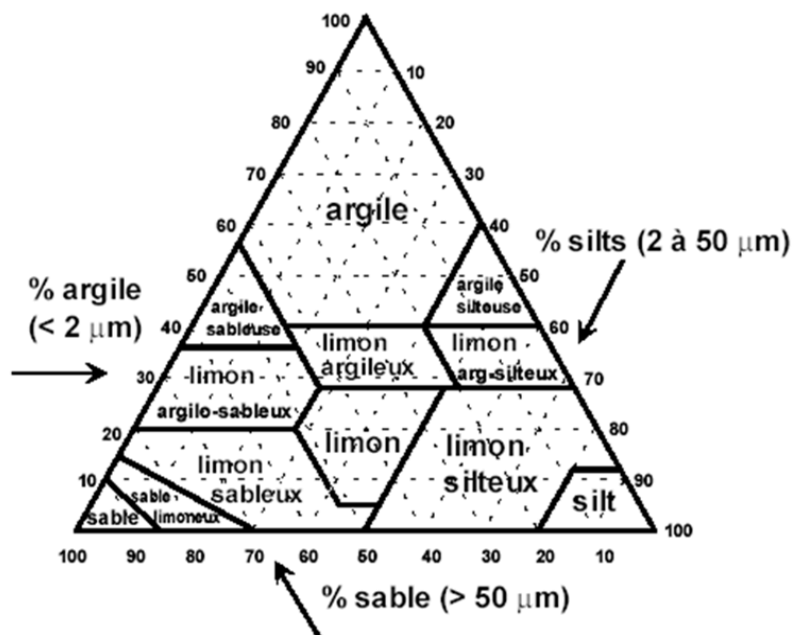


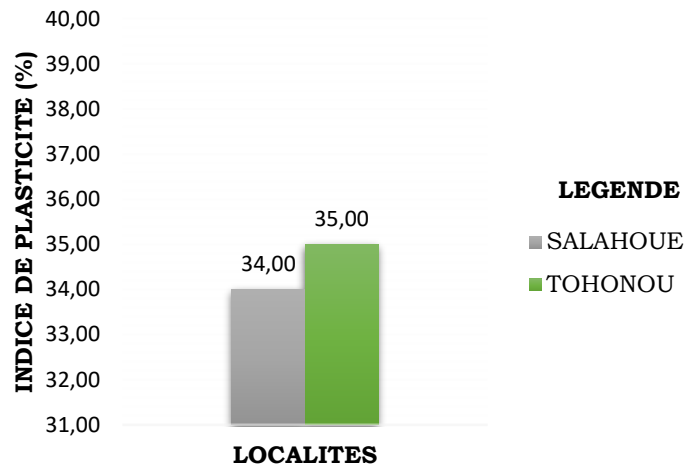
Figure 3.1 : Abaque de classification triangulaire de Taylor (1948) [1]

### 3.1.3.2 Paramètres de consistance

#### ➤ Indice de plasticité

L'indice de plasticité  $I_p$  qui s'évalue à partir de la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité caractérise également les argiles.

Les valeurs selon les différentes localités sont résumées sur le graphe ci-dessous.



**Graphe 3.3 : Valeurs d'Indice de Plasticité ( $I_p$ )**

La valeur de l'indice de plasticité de chaque localité combinée à la limite de liquidité et à la granularité, nous a permis de donner la nature des sols en utilisant la classification américaine des sols intitulée **Highway Research Board (HRB)** [11]. Les désignations issues de cette classification sont consignées dans le tableau suivant :

**Tableau 3.3 : Récapitulatif sur les types de sols selon la classification HRB**

LOCALITES	% $\leq$ 0,315 mm	% $\leq$ 80 $\mu$ m	$I_p$ (%)	$W_1$ (%)	NATURE
SALAHOUÉ	77	35,59	34	76	A7-5 Sol argileux
TOHONOU	82	31,59	35	81	A7-5 Sol argileux

La valeur de l'indice de plasticité de chaque localité montrée au graphe 3.3 ci-dessus nous a permis de caractériser d'une part le comportement plastique par le biais de la classification des sols présenté par **J.M. Txhouaninana (1999)** et d'autre part le potentiel de gonflement au moyen de la classification de **Sneath (1980)**. A travers des résultats provenant de ces

différentes classifications, nous pouvons conclure que les sols de SALAHOUE et de TOHONOU *sont plastiques et ont un potentiel de gonflement élevé*. Ces différents résultats sont consignés dans le tableau suivant.

**Tableau 3.4 : Récapitulatif sur le comportement plastique et le potentiel de gonflement**

<i>LOCALITES</i>	<i>Ip (%)</i>	<i>DEGRE DE PLASTICITE</i>	<i>GONFLEMENT</i>
<i>SALAHOUÉ</i>	<i>34</i>	<i>Plastique</i>	<i>Elevé</i>
<i>TOHONOU</i>	<i>35</i>	<i>Plastique</i>	<i>Elevé</i>

**Tableau 3.5 : Classification selon la plasticité des sols présenté par J.M. Txhouaninana (1999) [1]**

<i>Indice de plasticité</i>	<i>Degré de plasticité</i>
<i>0 &lt; IP &lt; 5</i>	<i>Sol non plastique</i>
<i>5 &lt; IP &lt; 30</i>	<i>Sol peu plastique</i>
<i>30 &lt; IP &lt; 50</i>	<i>Sol plastique</i>
<i>50 &lt; IP</i>	<i>Sol très plastique</i>

**Tableau 3.6 : Potentiel de gonflement d'après Snethen [1]**

<i>Potentiel de gonflement</i>	<i>Ip (%)</i>
<i>Faible</i>	<i>&lt;18</i>
<i>Moyen</i>	<i>18-32</i>
<i>Elevé</i>	<i>32-48</i>
<i>Très élevé</i>	<i>&gt;48</i>

➤ **Activité de l'argile**

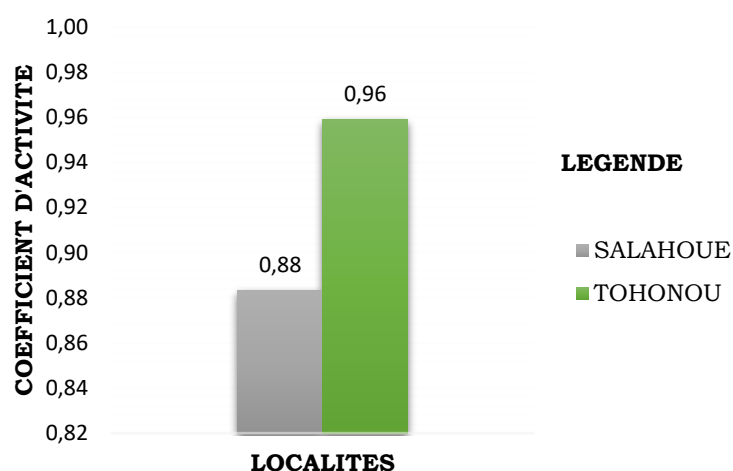
Le coefficient d'activité «  $A_c$  » d'un granulat (connu sous le nom de coefficient de SKEMPTON) fut défini en 1953 par SKEMPTON, comme étant le rapport de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) de ce granulat à sa teneur en éléments de diamètres inférieurs à  $2\ \mu\text{m}$  « la fraction argileuse (FA) ». A chaque tranche donnée de la valeur de l'activité, on attribue une dénomination.

$$A_c = \frac{I_p}{\% < 2\mu\text{m}}$$

En se basant sur les dénominations qui émanent de cette classification, nous déduisons que tous les sols sont des sols peu actifs. Le graphe suivant renseigne sur la valeur du coefficient d'activité des sols de chaque localité et le tableau sur leur dénomination conséquente.

**Tableau 3.7 : Dénomination des sols en fonction du coefficient d'activité**

LOCALITES	Ac	DENOMINATION
SALAHOUÉ	0,88	Peu actif
TOHONOU	0,96	Peu actif



**Graphe 3.4 : Valeur des coefficients d'activité**

**Tableau 3. 8 : Classification des sols en fonction du coefficient d'activité (SKEMPTON 1953) [1]**

Activité Ac	Type de sol
0,50 – 0,75	Sol inactif
0,75 – 1,25	Sol peu actif
1,25 – 2,00	Sol actif
> 2	Sol très actif

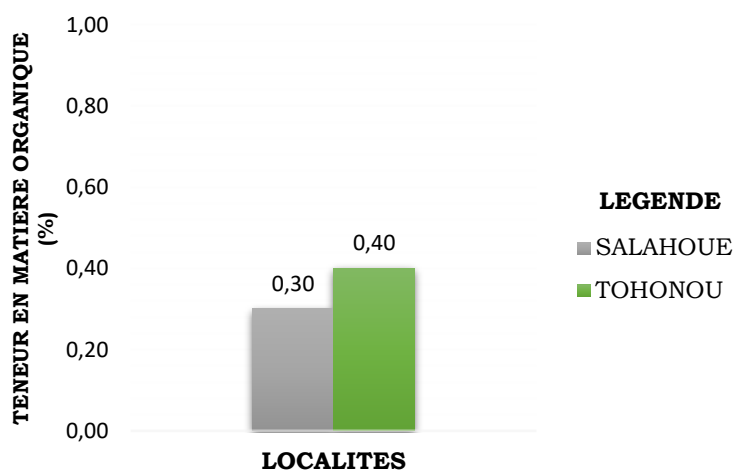
### 3.1.3.3 Teneur en matières organiques

La teneur en matière organique influe sur la qualité des argiles. La classification des sols selon leur teneur en matière organique est faite selon les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3. 9 : Classification des sols selon leur teneur en matières organiques [1]**

Teneur en matières organique (%)	Qualificatif	
$C_{MO} \leq 3$	Non organique	
$3 < C_{MO} \leq 10$	Faiblement organique	
$10 < C_{MO} \leq 30$	Moyennement organique	à matrice organique amorphe
		à matrice organique semi-fibreuse
		à matrice organique fibreuse
$C_{MO} > 30$	Très organique	à matrice organique amorphe
		à matrice organique semi-fibreuse
		à matrice organique fibreuse

Les valeurs de teneur matière organique sont présentés sur le graphe 3.5.



**Graphe 3.5 : Valeur de teneur en matière organique**

Après l’analyse de ce graphe, en tenant compte du tableau de Classification des sols selon leur teneur en matières organiques, nous concluons que **les sols prélevés sont tous des sols non organiques.**

**Conclusion partielle.**

Au regard de ce qui précède, nous déduisons que les des sols prélevés dans ces deux localités sont de type limon argileux. Leur degré de plasticité et leur potentiel de gonflement sont élevés et ils sont peu actifs et inorganiques.

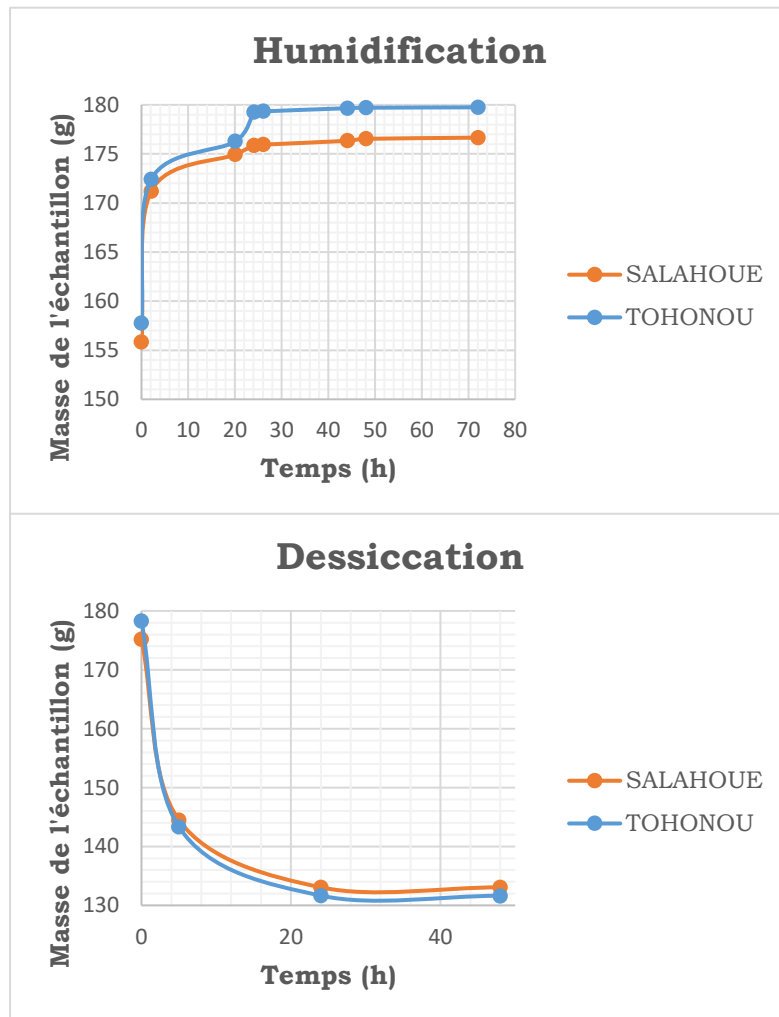
### 3.2 LES ESSAIS HYDRIQUES ET MECANIQUES

#### 3.2.1 Essais de dessiccation-humidification

Les essais hydriques réalisés sont les essais de dessiccation- humidification ou dessaturation-saturation.

Il a été mesuré les temps de dessiccation puis de l’humidification. A cet effet, l’échantillon de sol est mis à sécher à l’étuve puis peser jusqu’à poids constant. Le temps mesuré est dit temps de dessiccation. Le même échantillon est mis à l’humidification dans une enceinte humidificateur puis peser jusqu’à poids constant. Le temps relevé est dit temps d’humidification.

Le graphe suivant représente l’allure du temps de dessiccation et de l’humidification pour les échantillons de sol pour chaque localité en étude.



Graphe 3. 6 : Résultats de (a) humidification et (b) dessiccation

L'analyse du graphe 3.6 montre qu'à partir de 24 heures:

- (a), la masse de l'échantillon tend asymptotiquement vers 177g pour SALAHOUE et 180g pour TOHONOU ;
- (b), la masse de l'échantillon tend asymptotiquement vers 134g pour SALAHOUE et 132g pour TOHONOU.

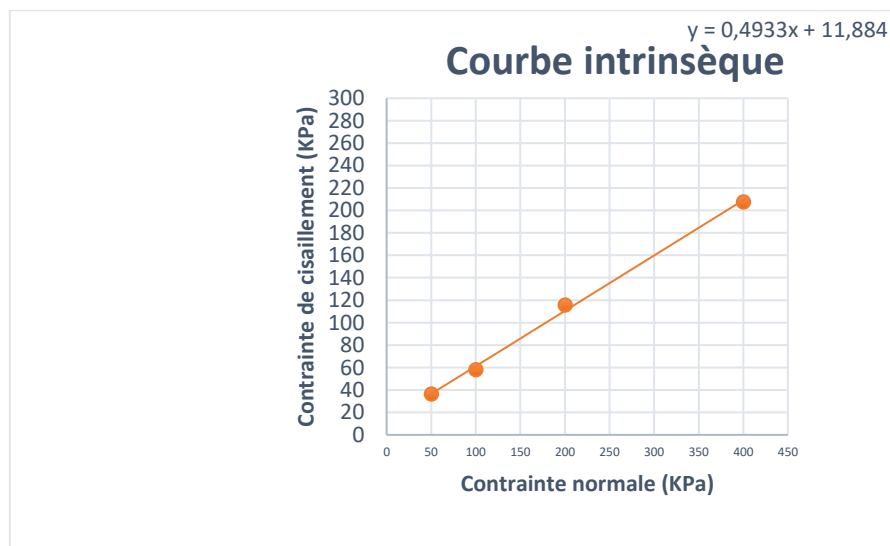
Nous avons donc déduit la plage du cycle de dessiccation-humidification 48h de dessiccation et 48h d'humification.

### 3.2.2 Essais de cisaillement direct

Les essais de cisaillement ont été réalisés sur les échantillons de sols témoins C0 puis sur les échantillons qui ont subi de cycle d'humidification – dessiccation. A cet effet, quatre (04) éprouvettes prismatiques sont réalisés à partir de chaque échantillon de sol puis, l'essai de cisaillement directe non consolidé-non drainé a été conduit en appliquant respectivement les contraintes normales respectives de 0,5, 1, 2 et 4 bars jusqu'au déplacement de 5 mm.

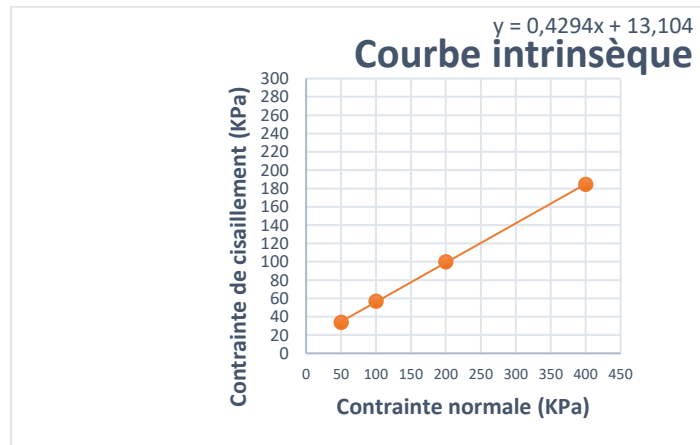
Les courbes intrinsèques de chaque cycle sont présentées ci-après :

- C1 :



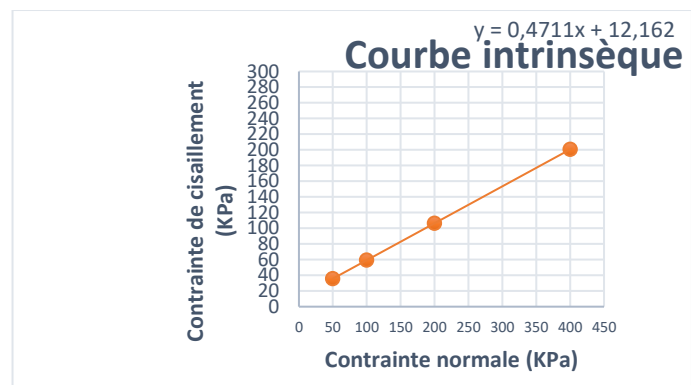
Graph 3.7 : Courbe intrinsèque de SALAHOUE C1

- C2



**Grphe 3.8 : Courbe intrinsèque de SALAHOUE C2**

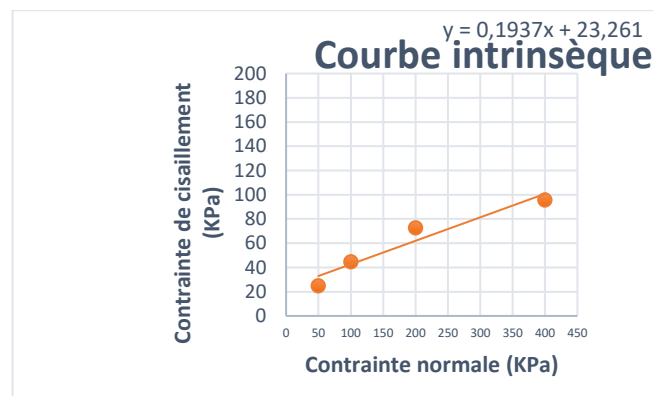
- C3



**Grphe 3.9 : Courbe intrinsèque de SALAHOUE C3**

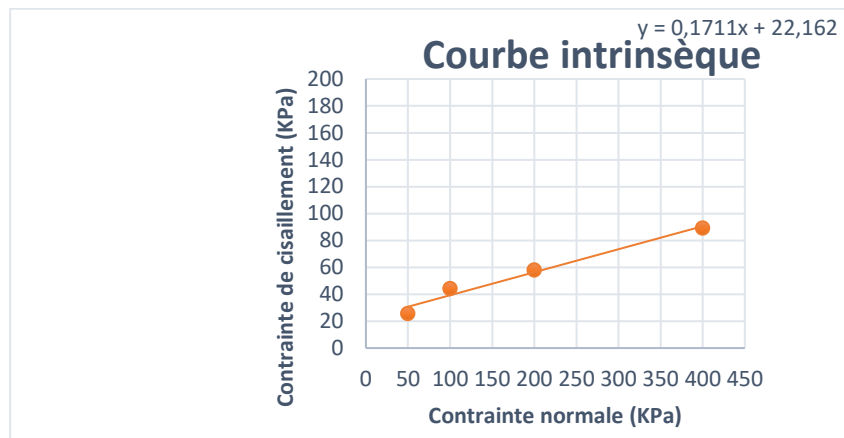
➤ **TONOUHOUE**

- C1



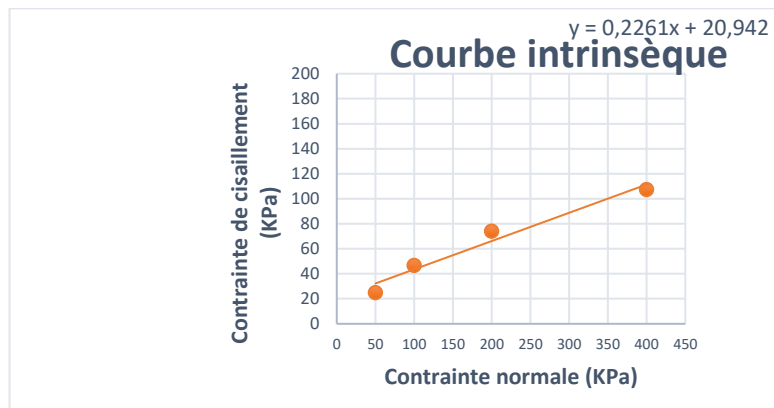
**Grphe 3.10 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C1**

- C2



**Graph 3.11 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C2**

- C3



**Graph 3.12 : Courbe intrinsèque de TOHONOU C3**

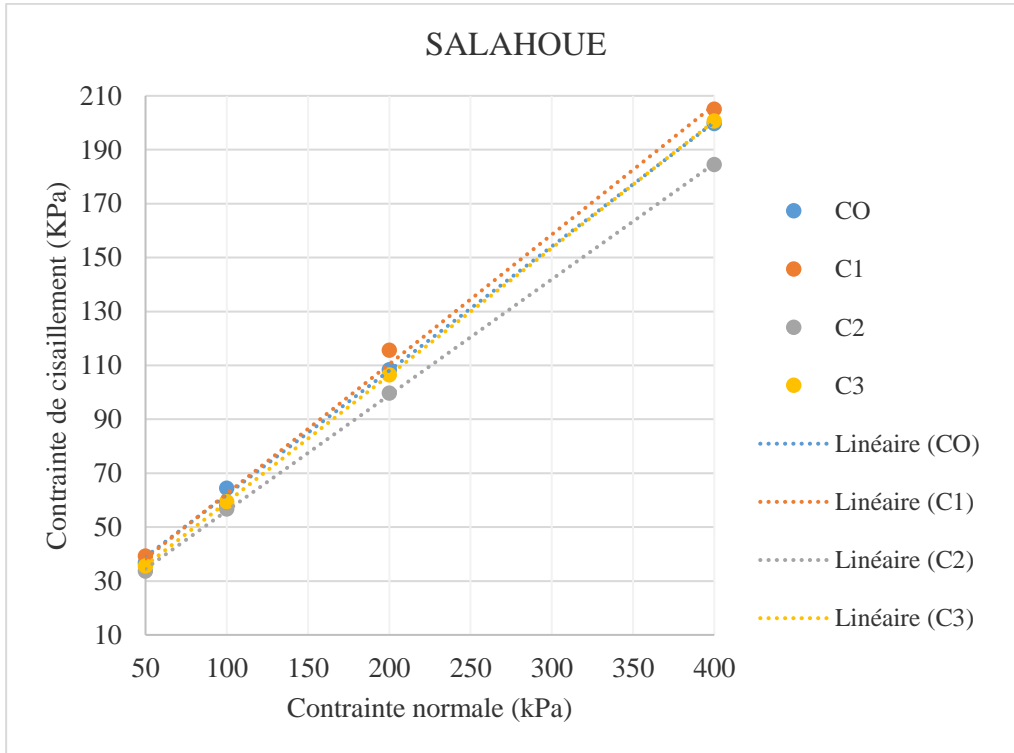
La même approche a permis d’obtenir les résultats de la cohésion et de l’angle de frottement interne non consolidé et non drainé pour les deux sites et les trois cycles

Les fiches de résultat de laboratoire sont jointes en annexe 2.

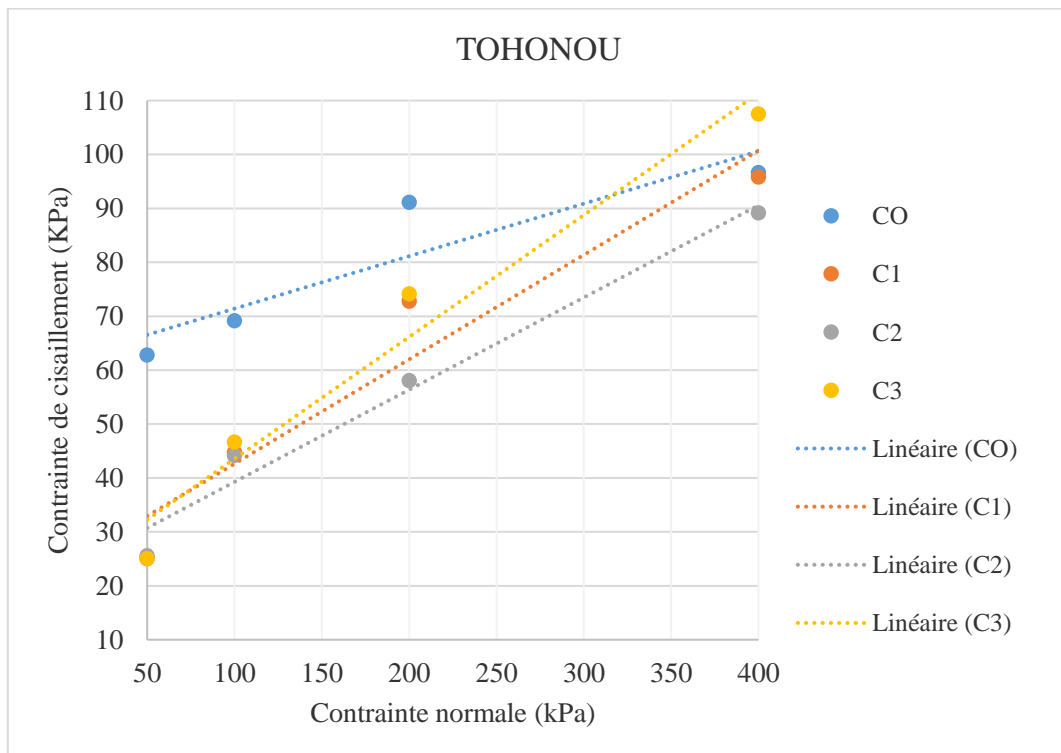
Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après :

**Tableau 3.10 : Récapitulatif des paramètres de cisaillement des sols**

	SALAHOU				TOHONOU			
	C0	C1	C2	C3	C0	C1	C2	C3
<b>C<sub>uu</sub> (kPa)</b>	15,91	14,34	13,10	12,16	61,68	23,26	22,16	20,94
<b>Φ<sub>uu</sub> (°)</b>	24,74	25,67	23,24	25,23	5,56	10,96	9,71	12,74



*Graphe 3.13 : Synthèse des courbes intrinsèques de Salahoou*



*Graphe 3.14 : Synthèse des courbes intrinsèques de Tohonou*

L'analyse croisée des valeurs de  $C_{uu}$  en fonction de l'évolution du nombre de cycle (voir graphe 3.14 ci-dessous) montre que les valeurs décroissent du C0 vers C3. Cela peut s'interpréter par le fait que plus le sol subit des cycles de dessiccation humidification, plus la valeur de la cohésion baisse.

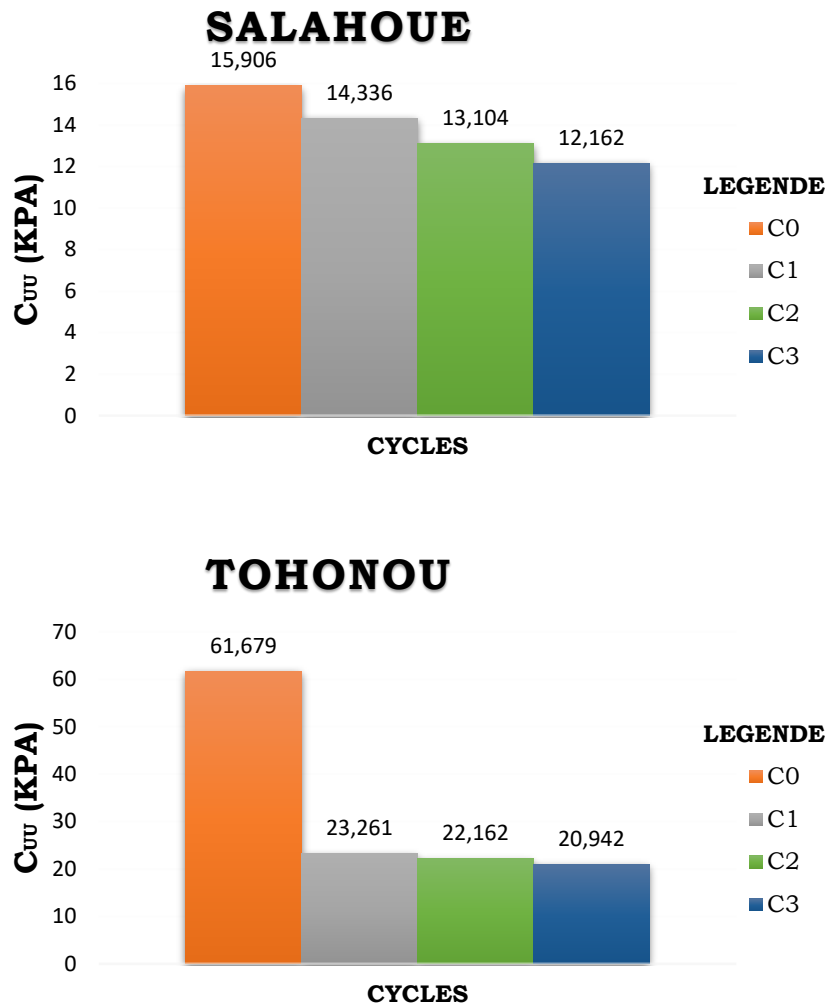
Il convient de rappeler que la contrainte de cisaillement est liée à la contrainte normale par la relation ci-après désignée équation de Mohr- coulomb où  $C$  et  $\Phi$  sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne.

$$T = C + \sigma \tan \Phi$$

La cohésion  $C$ , indépendante de la contrainte normale  $\sigma$ , est due :

- pour partie aux liaisons mécaniques pouvant exister entre les grains et créées par la cimentation ;
- pour partie aux ménisques d'eau existant aux points de contact entre les grains. Cette dernière composante disparaît dès que la teneur en eau du sable augmente.

Ainsi, en observant le graphe de la cohésion en fonction des cycles, on remarque que pour le cas de Salahoué la décroissance est légère (baisse de 1 à 2 points soit 13%) tandis que pour Tohonou, le premier cycle a fait baisser la cohésion de façon brutale (de 61 à 23 soit une chute de 38 points soit 62%). Cette différence peut s'expliquer par la différence dans la valeur du VBS du sol des deux localités  $VBS=0,43$  pour Salahoué et 11 pour Tohonou : le sol de salahoué est moins cohésif que le sol de Tohonou.



Grphe 3.15 : Valeurs de la cohésion C<sub>uv</sub>

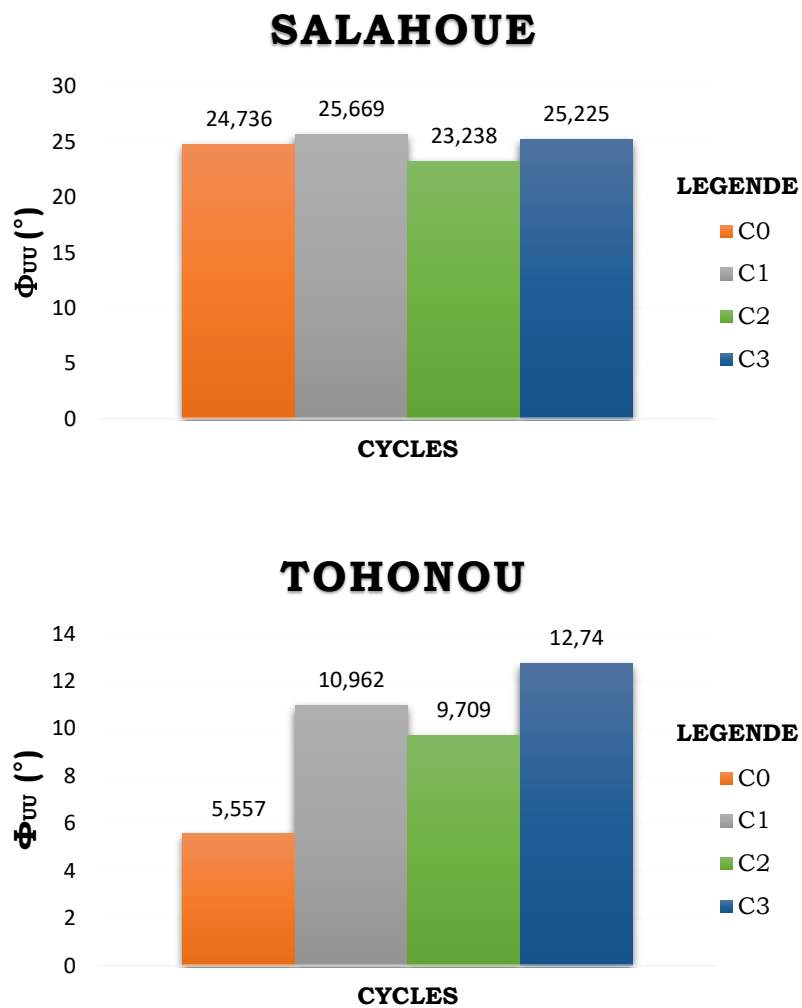
S'agissant de l'analyse des valeurs de  $\Phi_{uv}$ , il n'est pas aisé de définir un modèle de croissance à partir des essais réalisés.

La variabilité de l'angle de frottement interne peut s'interpréter par le fait que:

L'angle de frottement interne  $\Phi_{uv}$  croît, à compacité donnée, avec le diamètre moyen des grains.

—  $\Phi_{uv}$  dépend de la forme et de l'état de surface des grains. Il est plus élevé pour les sols à grains anguleux que pour les sols à grains ronds, et pour un état de surface rugueux que pour un état de surface lisse des grains.

- $\Phi_{uu}$  croît avec l'étalement de la granularité du sol.
- Par contre, pour un état donné de compacité, l'angle de frottement interne  $\Phi_{uu}$  est pratiquement indépendant de la teneur en eau du sol.



Graphe 3.16 : Valeurs de l'angle de frottement interne  $\Phi_{uu}$

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La recherche des réponses aux phénomènes naturels de retrait et de gonflement des sols argileux dont les manifestations sont les tassements sous les ouvrages de génie civil passe par des études approfondis dudit phénomène.

C'est à cet exercice que les présentes recherches ont été consacrées pour analyser l'influence des cycles de dessiccation-humidification sur le comportement des sols argileux en étudiant le cas spécifique des sols prélevés dans deux localités Salahoué et Tohonoude situées dans la commune de Houeyogbé.

Ces sols ont été identifiés comme des limons argileux. Leur degré de plasticité et leur potentiel de gonflement sont élevés et ils sont peu actifs et inorganiques.

Les essais mécaniques de cisaillement direct ont été réalisés sur des échantillons témoins prélevés sur les deux sites puis sur les échantillons ayant préalablement subis des essais de dessiccation humidification pour une durée de 96 heures par cycle. Les résultats obtenus montrent que plus le sol subit des cycles de dessiccation humidification, plus la valeur de la cohésion baisse et la valeur de l'angle de frottement interne croit. Pour le même type de sol identifié dans les deux localités, la baisse de la valeur de la cohésion à Salahoué dès l'application du premier cycle est plus légère (13%) que celle de Tohonou pour lequel il est noté une chute brutale (62%) plus importante.

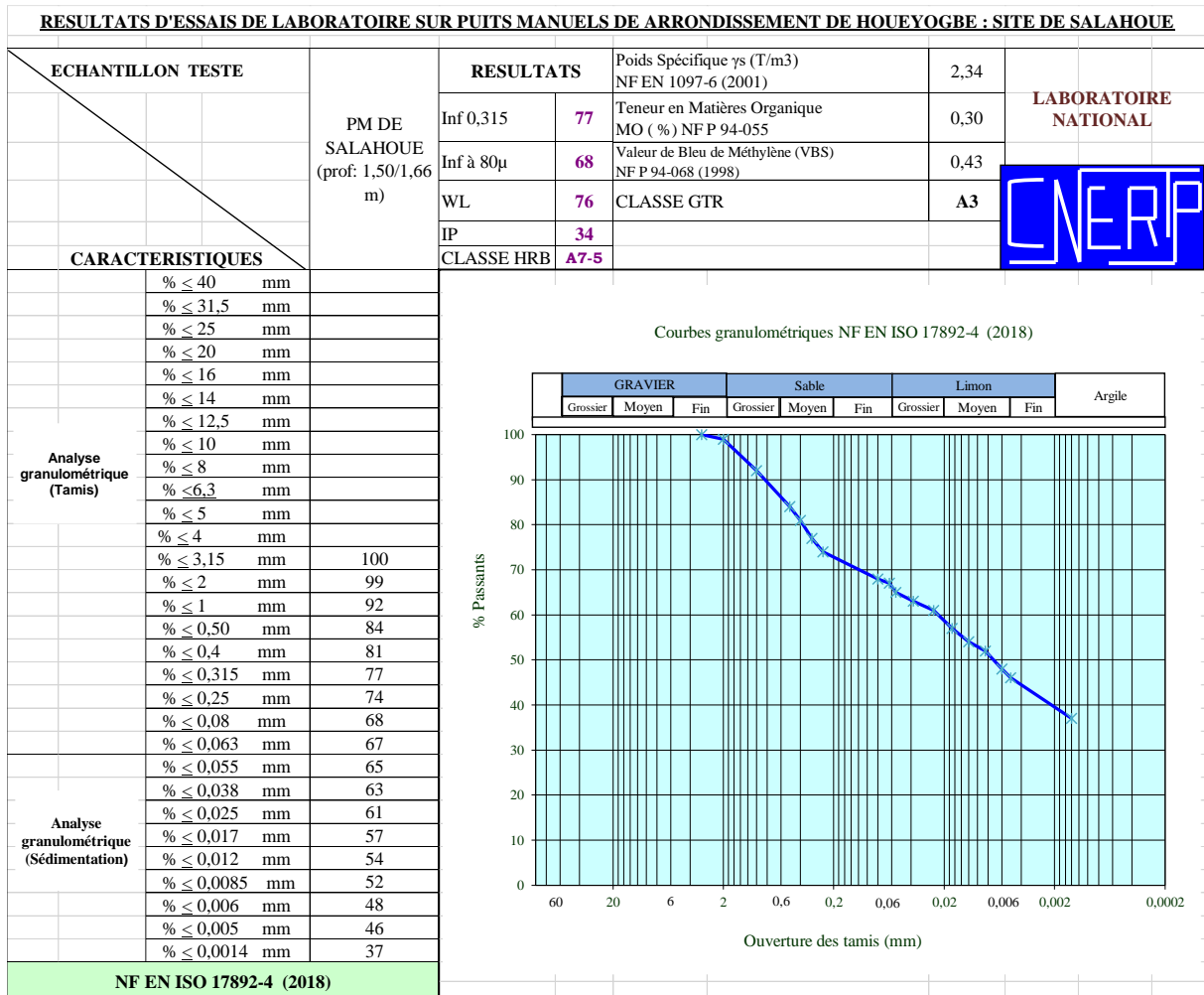
En perspective, cette étude mérite d'être poursuivie en multipliant le nombre de cycles d'humidification/séchage pour voir si les paramètres mécanique  $C$  et  $\Phi$  se stabilisent. La même étude pourrait être envisagée par d'autres essais mécaniques tels que l'essai triaxial qui renseignerait outre les paramètres  $C$  et  $\Phi$  sur le comportement volumique du sol argileux, éventuellement le comportement de dilatance – contractance et l'identification des états caractéristiques.

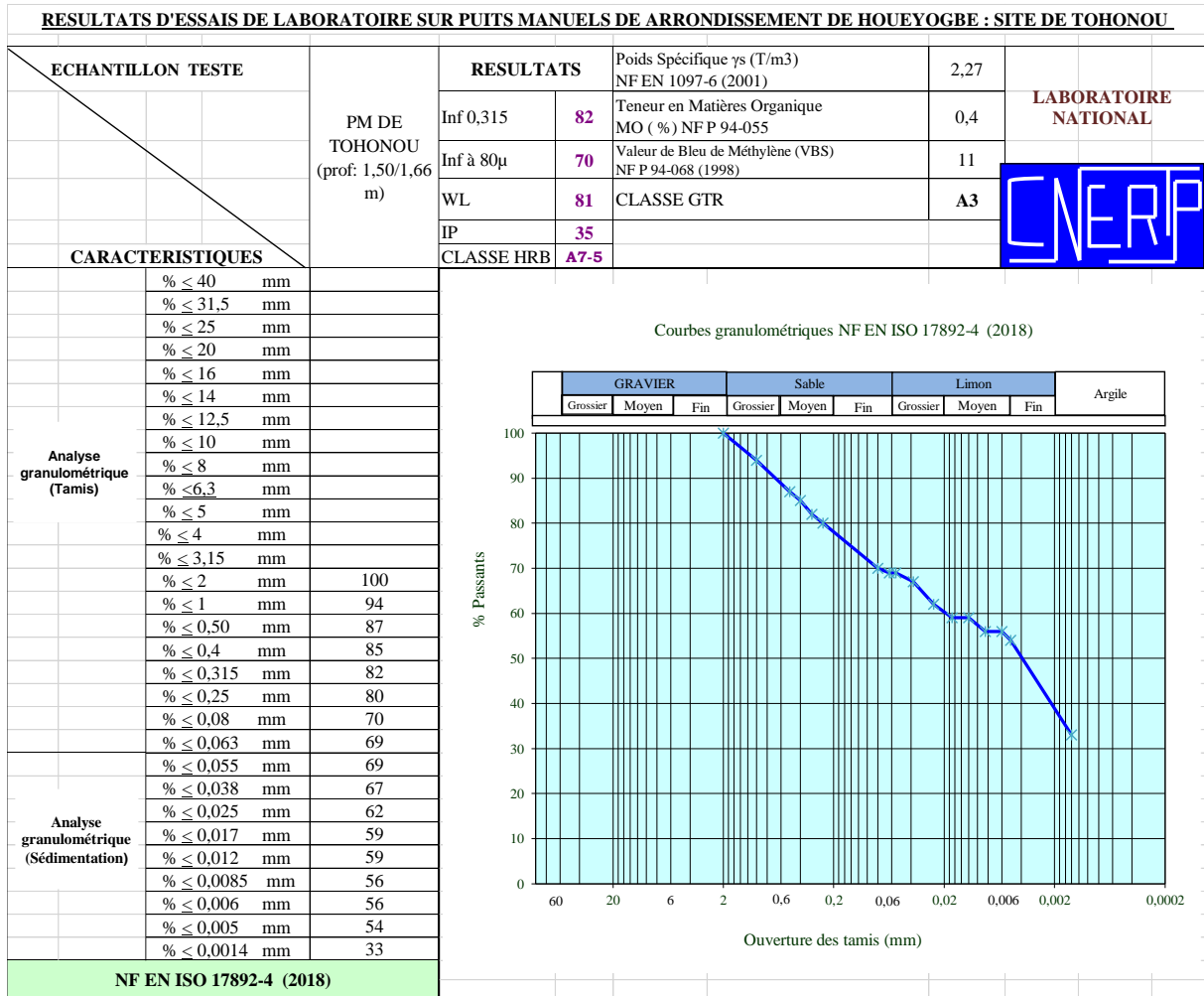
## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Z. TOHOUNGBA**, « Etude physico-mecanique et rhéologique des sols argileux de la région ouest de la dépression de la Lama : cas de la commune de Houéyogbe », Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Bénin, Mémoire, 2018.
- [2] **Q. THAI PHAM**, « Effets de la désaturation et de la resaturation sur l'argilite dans les ouvrages souterrains », Ecole Polytechnique X, France, Thèse, 2010.
- [3] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Sols : reconnaissance et essais Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux méthode par étuvage NFP 94-050 », sept-1995.
- [4] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Sols : reconnaissance et essais Analyse Granulométrique Méthode par tamisage à sec après lavage NF P94-056 », mars-1996.
- [5] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Sols : reconnaissance et essais Analyse Granulométrique des sols Méthode par sédimentation NF P94-057 », mai-1992.
- [6] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Détermination de la teneur en matière organique XP P 94-055 », 1996.
- [7] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Détermination de la masse volumique des particules solides des sols NF P 94-054 », oct-1991.
- [8] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Sols : reconnaissance et essais Détermination des Limites d'ATTERBERG NF P94-051 », mars-1993.
- [9] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux NF P 94-068 », oct-1998.
- [10] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Partie 1 : cisaillement direct NF P 94-071-1 », août-1994.
- [11] Highway Research Board (HRB), « Classification américaine des sols », 1992.
- [12] Association Française de Normalisation (AFNOR), « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières NF-P-11-300 », sept-1992.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Essais d'identification

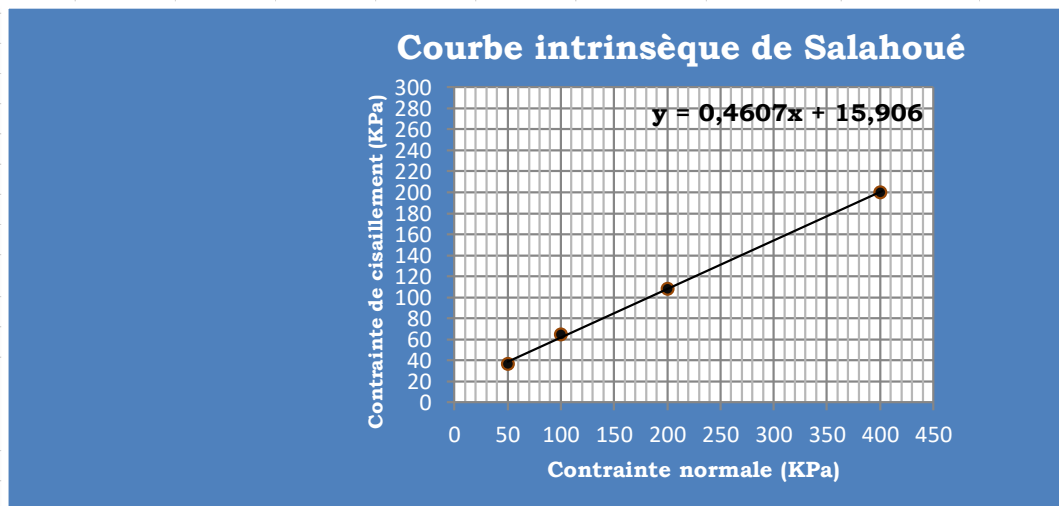
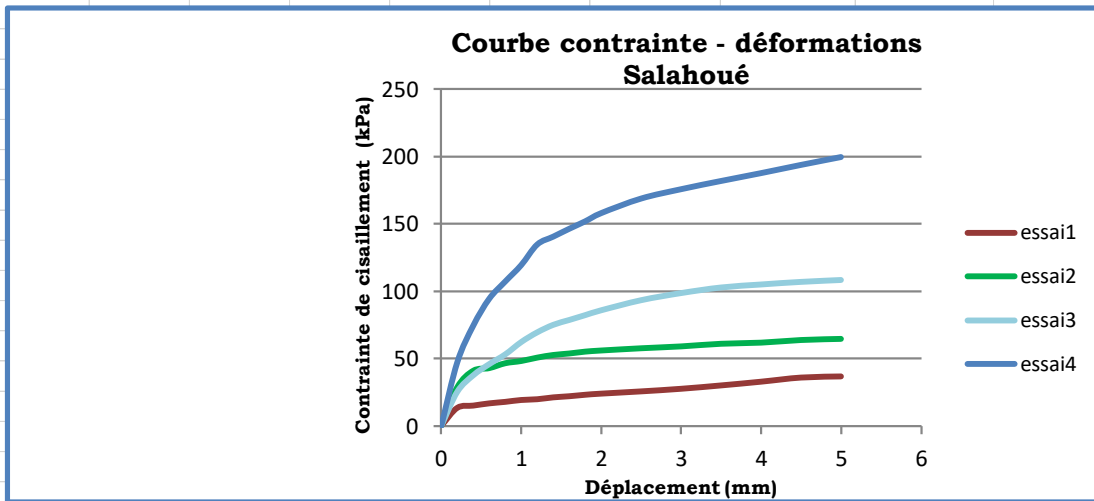




Annexe 2 : Essais de cisaillement

ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

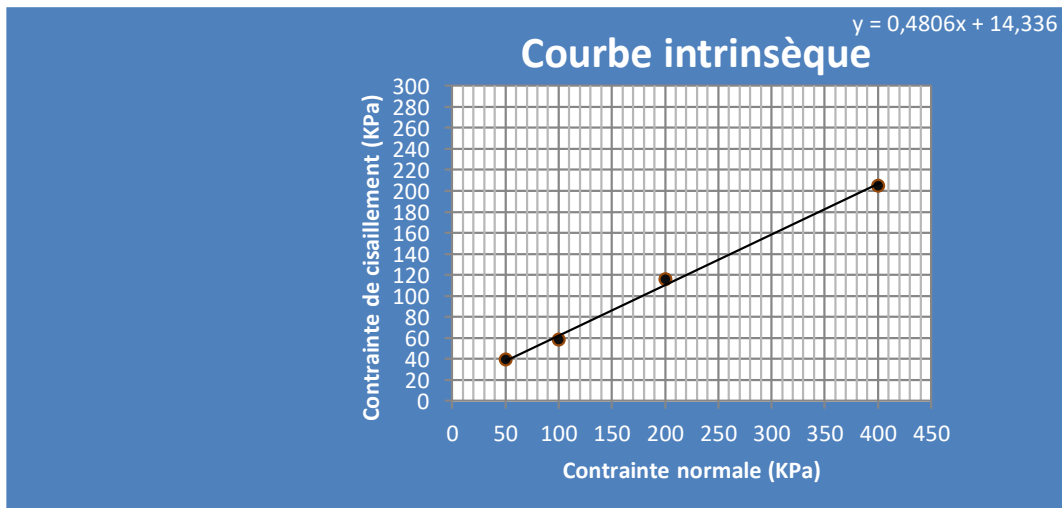
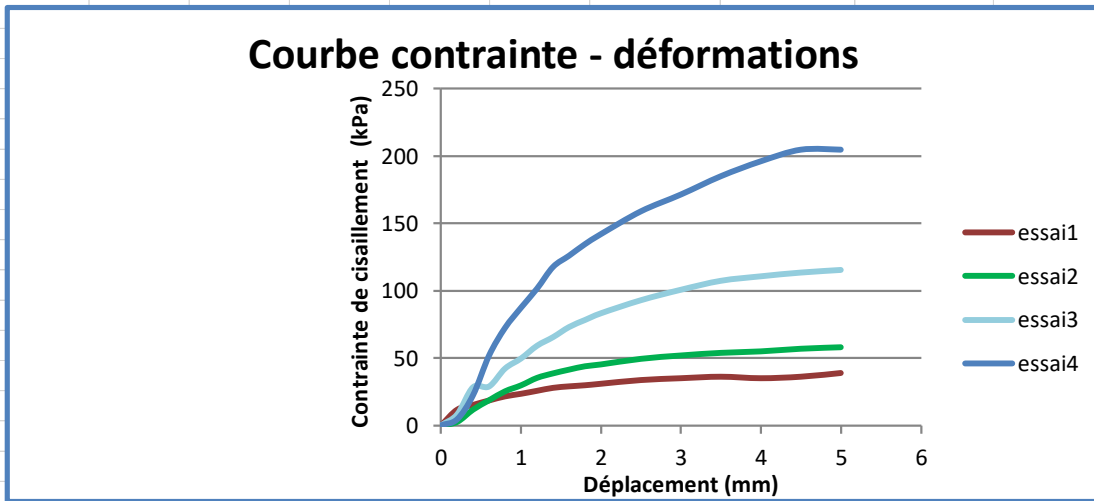
CNERTP		UU			
<b>Identification de l'échantillon</b>					
Date et lieu de prélèvement	SALAHOUÉ				
N° sondage	C0				
Profondeur (m)					
Nature du sol					
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
Charge (kg)	18	36	72	144	
Contrainte normale (kpa)	50,00	100,00	200,00	400,00	
Contrainte de cisaillement (kPa)	36,67	64,44	108,33	199,72	
Teneur en eau initiale (%)	16,42	16,46	15,37	15,73	
Teneur en eau finale (%)	23,23	21,93	21,90	20,83	



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	γ <sub>h</sub> (KN/m3)	γ <sub>d</sub> (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	C <sub>u</sub> (Kpa)	φ <sub>u</sub> (dégrés)
16,00	21,97				17,47	15,06	1,5	15,9	24,7

**ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)**

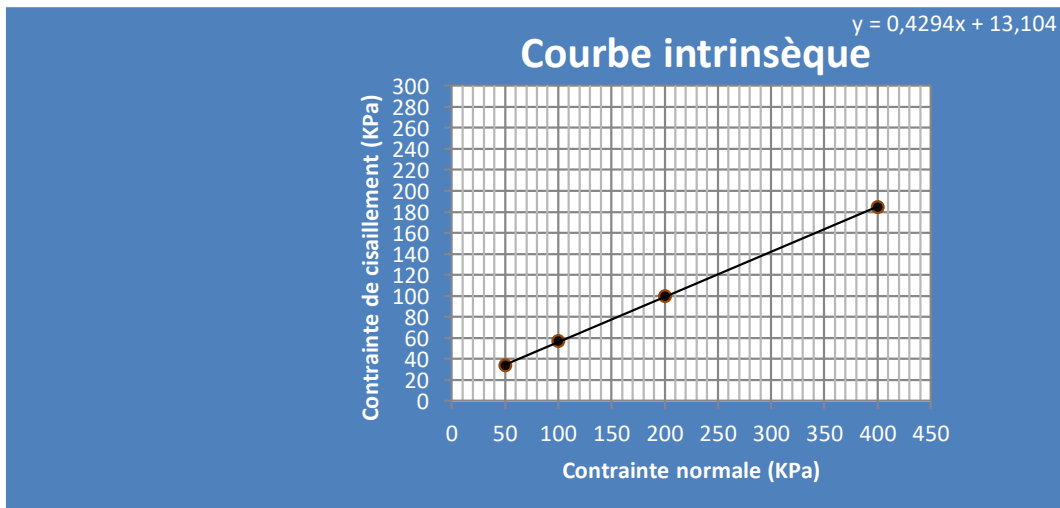
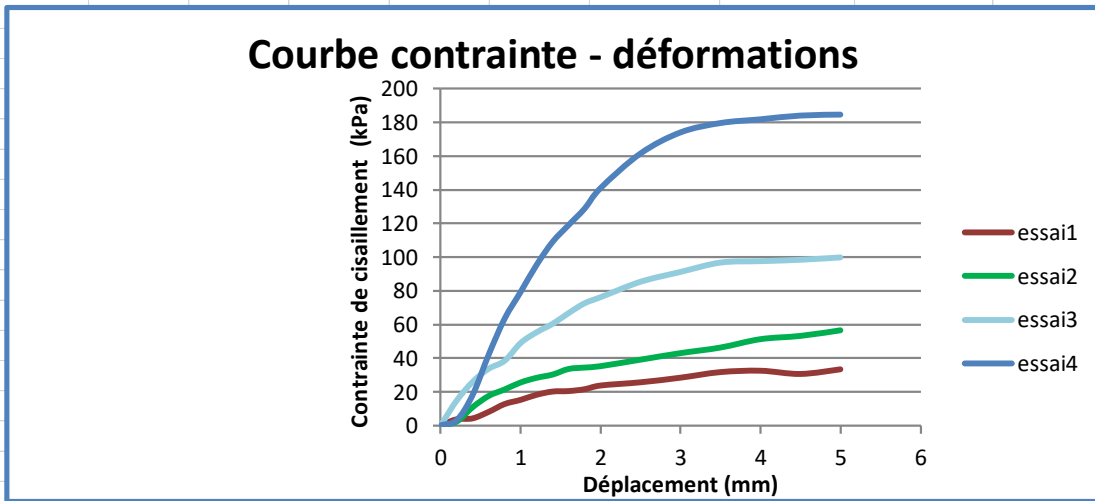
CNERTP		UU			
<b>Identification de l'échantillon</b>					
Date et lieu de prélèvement	SALAHOUÉ				
N° sondage	C1				
Profondeur (m)					
Nature du sol					
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
Charge (kg)	18	36	72	144	
Contrainte normale (kpa)	50,00	100,00	200,00	400,00	
Contrainte de cisaillement (kPa)	39,17	58,06	115,56	205,00	
Teneur en eau initiale (%)	16,42	16,46	15,37	15,73	
Teneur en eau finale (%)	26,53	25,21	23,75	22,05	



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	γ <sub>n</sub> (KN/m3)	γ <sub>d</sub> (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	C <sub>U</sub> (Kpa)	φ <sub>U</sub> (degrés)
16,00	24,38				19,83	17,09	1,5	14,3	25,7

### ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

CNERTP		UU			
<b>Identification de l'échantillon</b>					
Date et lieu de prélèvement	SALAHOUÉ				
N° sondage	C2				
Profondeur (m)					
Nature du sol					
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144	
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50,00	100,00	200,00	400,00	
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	33,61	56,67	99,72	184,44	
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	16,42	16,46	15,37	15,73	
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	26,53	25,21	23,75	22,05	



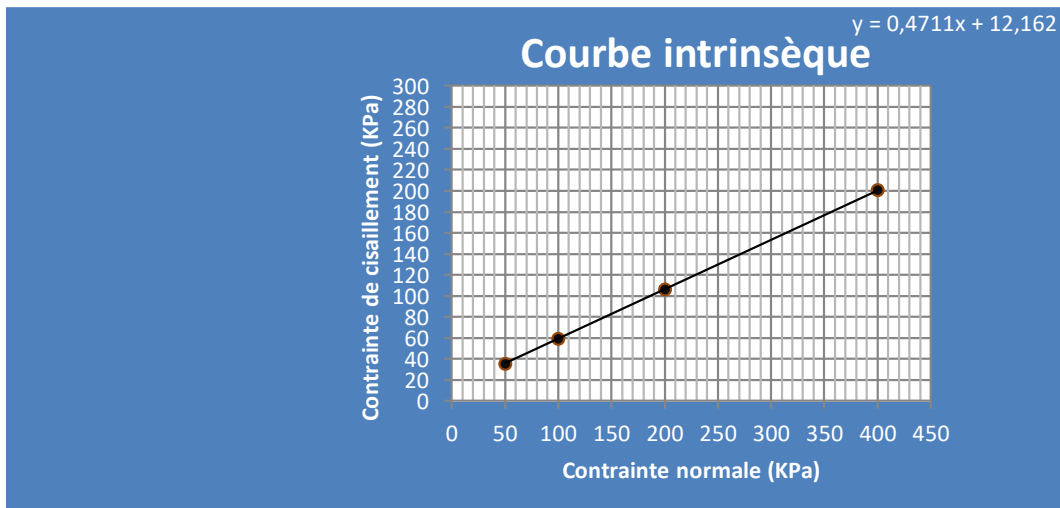
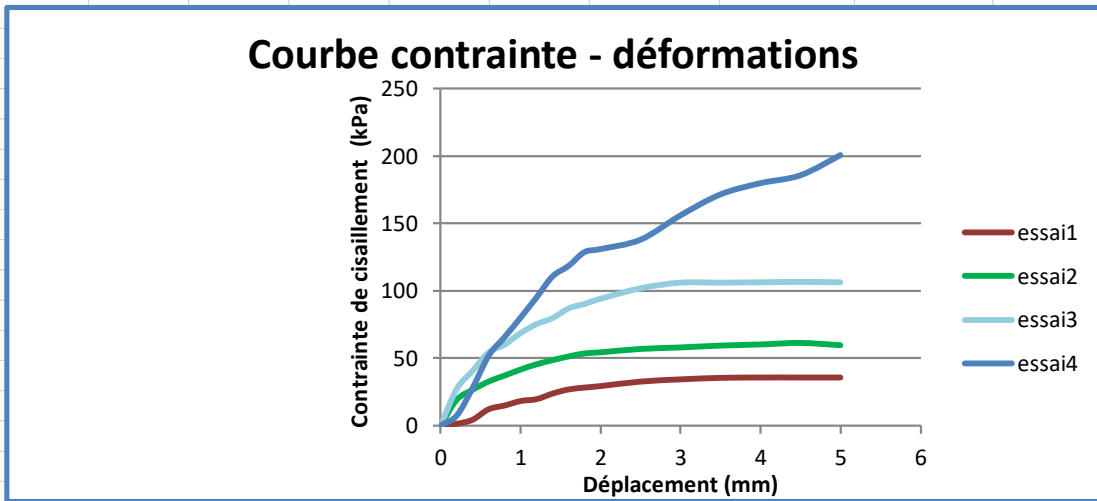
W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	γ <sub>n</sub> (KN/m3)	γ <sub>d</sub> (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	C <sub>U</sub> (Kpa)	φ <sub>U</sub> (dégrés)
16,00	24,38				19,83	17,09	1,5	13,1	23,2

### ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

<b>CNERTP</b>	<b>UU</b>
---------------	-----------

Identification de l'échantillon	
Date et lieu de prélèvement	SALAHOUÉ
N° sondage	C3
Profondeur (m)	
Nature du sol	

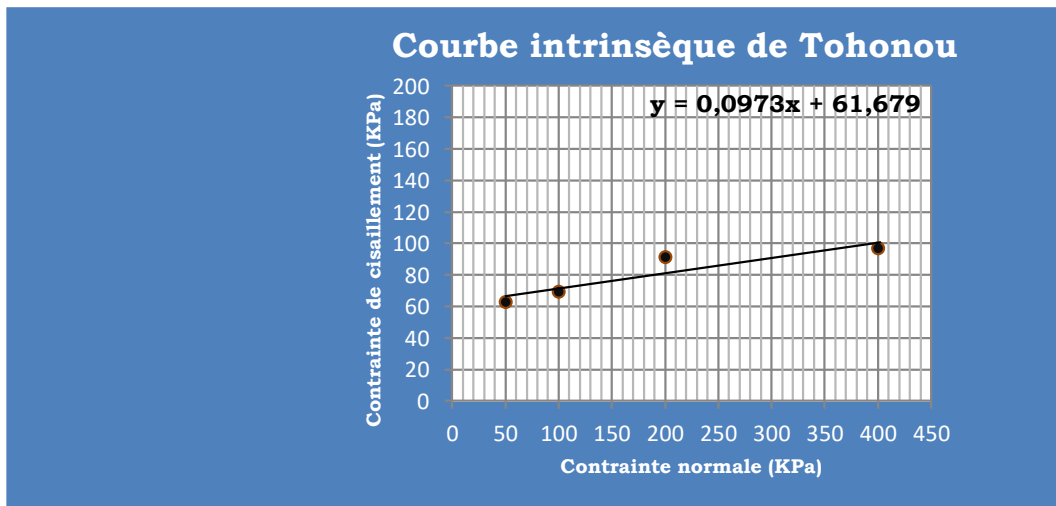
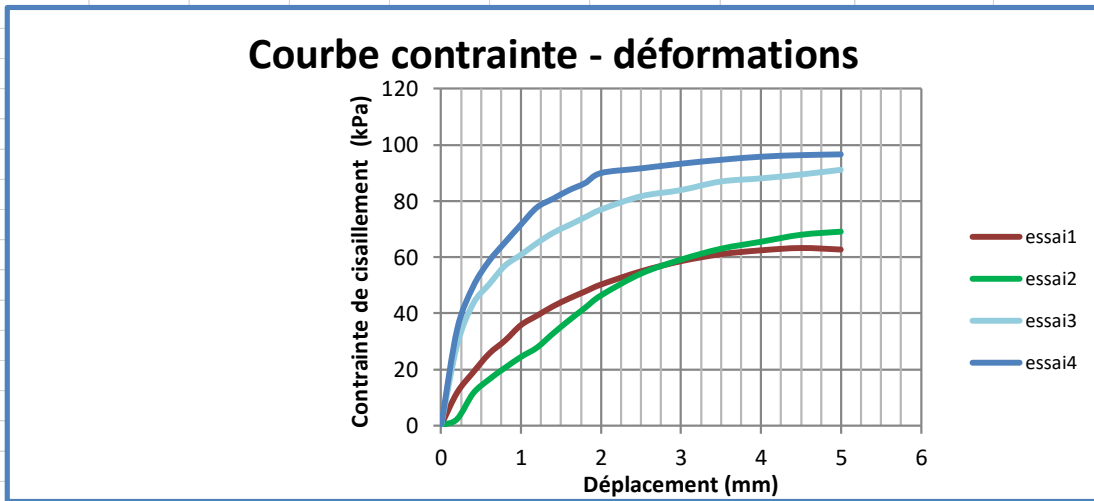
Point	1	2	3	4
Charge (kg)	18	36	72	144
Contrainte normale (kpa)	50,00	100,00	200,00	400,00
Contrainte de cisaillement (kPa)	35,56	59,44	106,39	200,56
Teneur en eau initiale (%)	16,42	16,46	15,37	15,73
Teneur en eau finale (%)	26,68	23,94	23,21	21,32



W% initiale	W% finale	% < 80 $\mu$	LL	IP	$\gamma_h$ (KN/m3)	$\gamma_d$ (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	$C_U$ (Kpa)	$\phi_U$ (degrés)
16,00	23,79				20,23	17,44	1,5	12,2	25,2

**ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)**

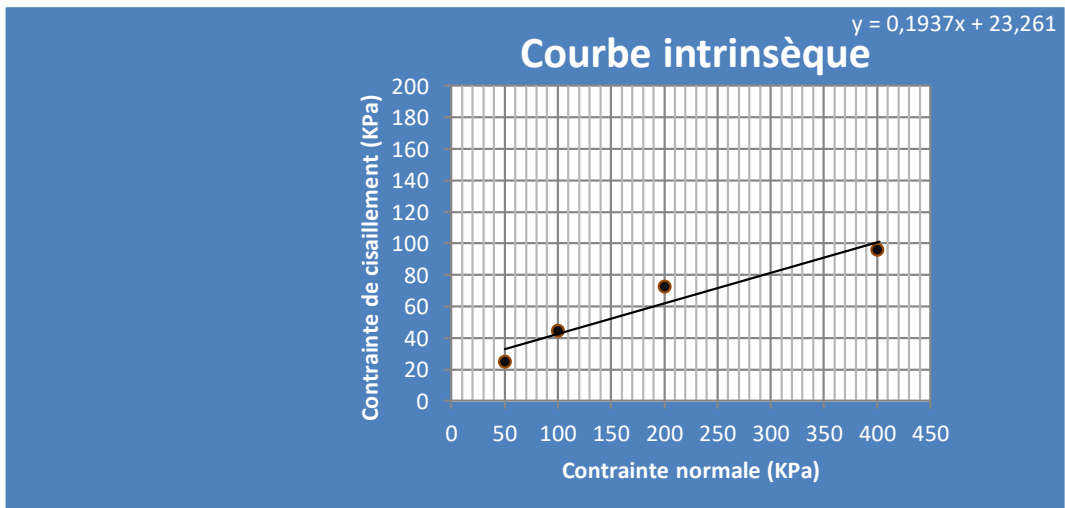
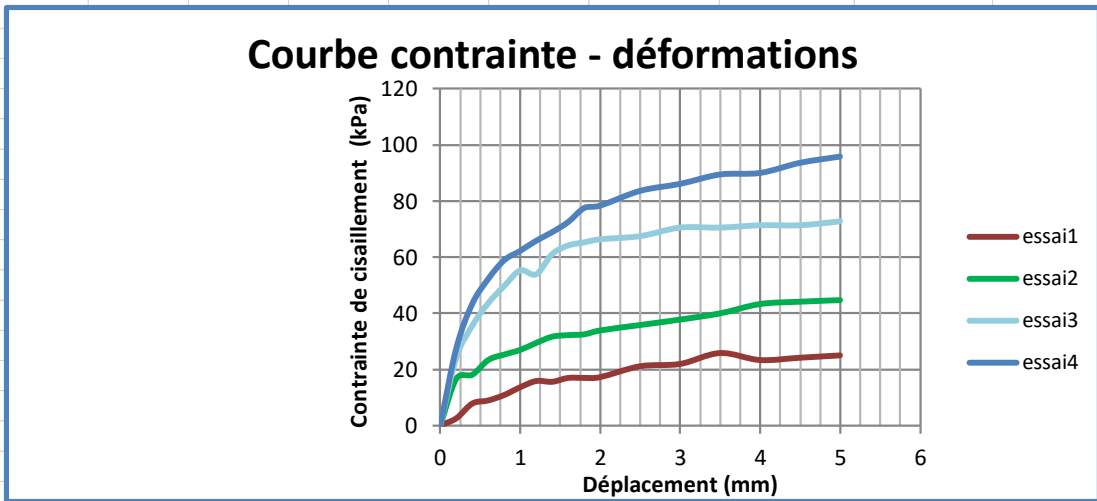
<b>CNERTP</b>		<b>UU</b>		
Date de l'essai:		20/08/2020		
<b>Identification de l'échantillon</b>				
Date et lieu de prélèvement	TOHONOU			
N° sondage	C0			
Profondeur (m)	1,50-1,66 m			
Nature du sol	Argile noirâtre			
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50,00	100,00	200,00	400,00
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	62,78	69,17	91,11	96,67
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	65,41	49,41	59,11	48,89
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	64,01	59,55	58,59	49,16



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	γ <sub>n</sub> (KN/m3)	γ <sub>d</sub> (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	C <sub>U</sub> (Kpa)	φ <sub>U</sub> (degrés)
55,70	57,83				14,98	9,64	1,5	61,7	5,6

### ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

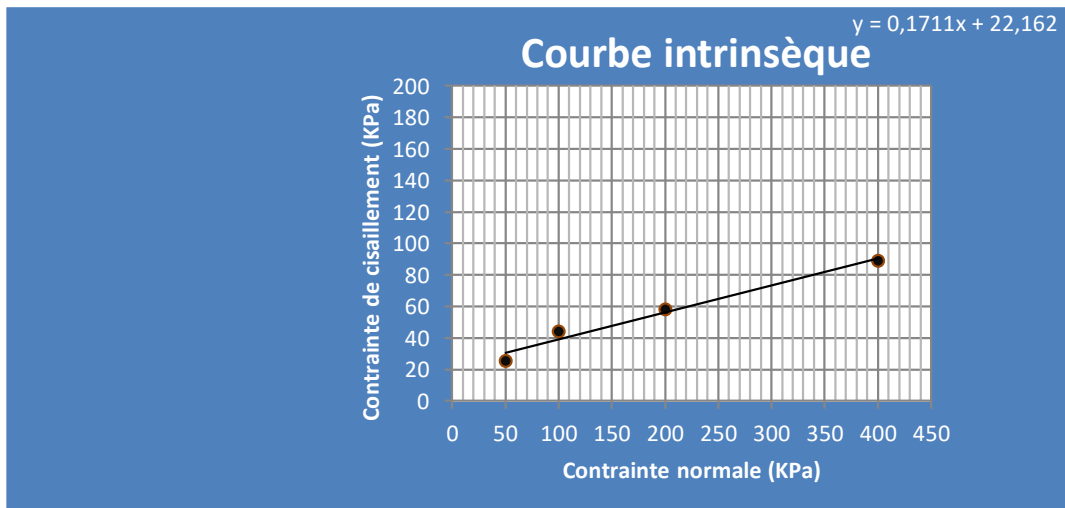
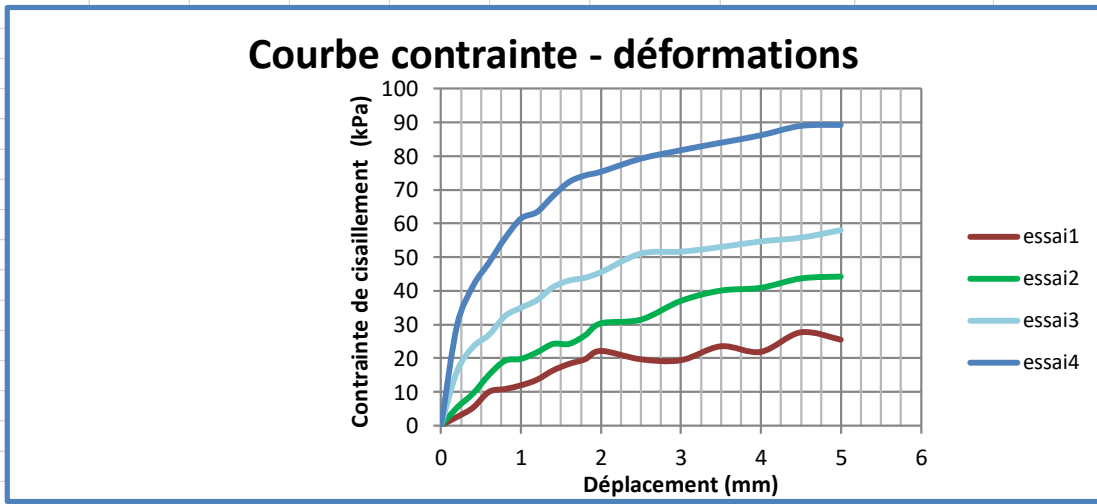
<b>CNERTP</b>		<b>UU</b>		
Date de l'essai:		03/09/2020		
<b>Identification de l'échantillon</b>				
Date et lieu de prélèvement	TOHONOU			
N° sondage	C1 bon			
Profondeur (m)	1,50-1,66 m			
Nature du sol	Argile noirâtre			
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50,00	100,00	200,00	400,00
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	25,00	44,72	72,78	95,83
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	65,41	49,41	59,11	48,89
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	38,11	36,58	34,20	35,11



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	$\gamma_n$ (KN/m3)	$\gamma_d$ (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	$C_U$ (Kpa)	$\phi_U$ (degrés)
55,70	36,00				15,81	10,18	1,5	23,3	11,0

### ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)

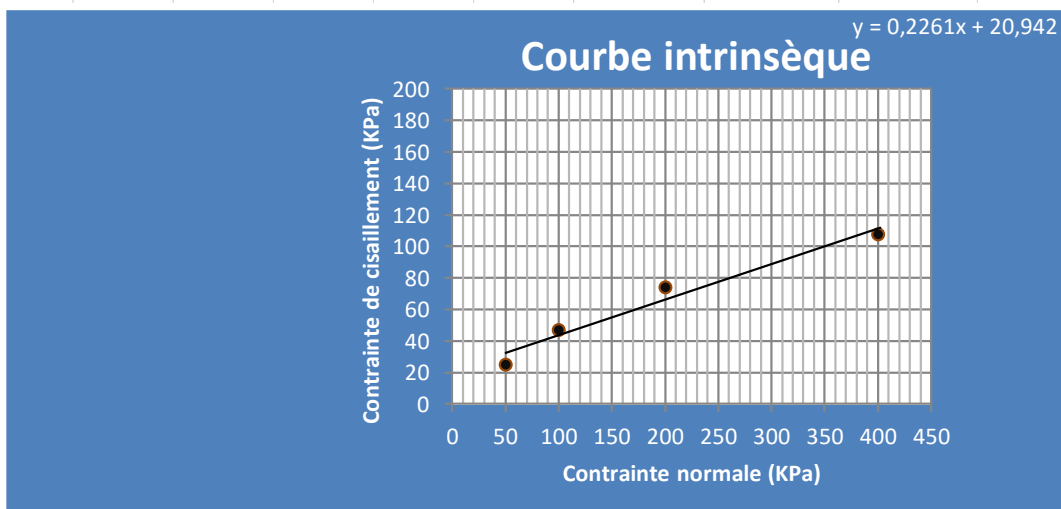
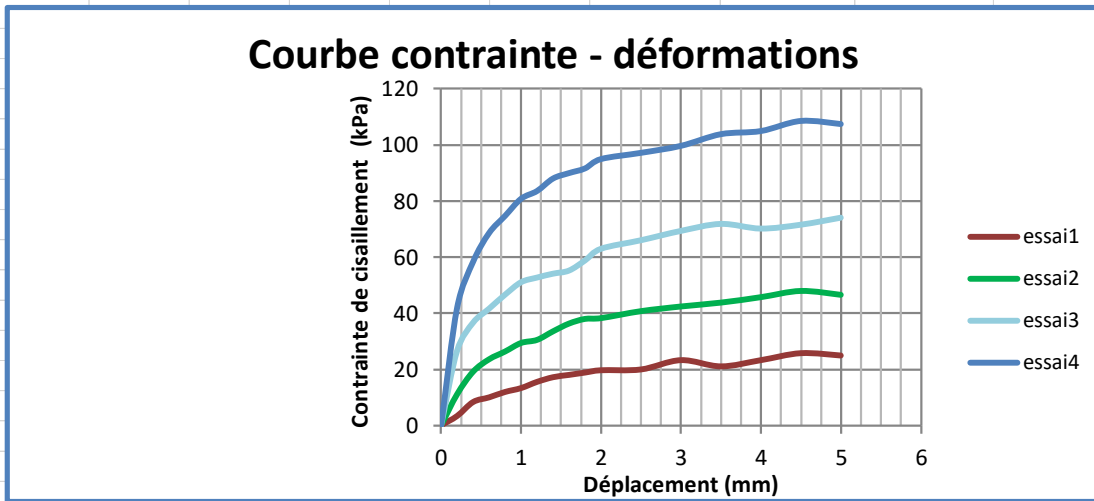
<b>CNERTP</b>		<b>UU</b>		
Date de l'essai:		29/09/2020		
<b>Identification de l'échantillon</b>				
Date et lieu de prélèvement	TOHONOU			
N° sondage	C2			
Profondeur (m)	1,50-1,66 m			
Nature du sol	Argile noirâtre			
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50,00	100,00	200,00	400,00
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	25,56	44,17	58,06	89,17
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	65,41	49,41	59,11	48,89
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	49,24	48,27	41,55	41,73



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	$\gamma_h$ (KN/m3)	$\gamma_d$ (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	$C_u$ (Kpa)	$\phi_u$ (dégrés)
55,70	45,20				19,46	12,52	1,5	22,2	9,7

**ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)**

<b>CNERTP</b>		<b>UU</b>		
Date de l'essai:		01/10/2020		
<b>Identification de l'échantillon</b>				
Date et lieu de prélèvement	TOHONOU			
N° sondage	C3			
Profondeur (m)	1,50-1,66 m			
Nature du sol	Argile noirâtre			
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50,00	100,00	200,00	400,00
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	25,00	46,67	74,17	107,50
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	65,41	49,41	59,11	48,89
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	47,05	44,67	39,49	37,68



W% initiale	W% finale	% < 80μ	LL	IP	γ <sub>n</sub> (KN/m3)	γ <sub>d</sub> (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	C <sub>u</sub> (Kpa)	φ <sub>u</sub> (degrés)
55,70	42,22				20,07	12,91	1,5	20,9	12,7