



**UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI**

\*\*\*\*\*

**ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR (ED-SDI)**

\*\*\*\*\*

**MASTER DE RECHERCHE GEOTECHNIQUE & INFRASTRUCTURES  
IMMOBILIERES (G2I)**

\*\*\*\*\*

**RAPPORT DE STAGE**

**THEME :**

**ETUDE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT LIE A LA  
PERMEABILITE DES SOLS ARGILEUX : CAS DE LA  
COMMUNE DE HOUEYOGBE**

**Présenté par :**

**Isidore DHOSSOVI**

**Encadré par :**

**Dr. Yvette TANKPINOU KIKI**

**Maître Assistant des Universités du CAMES**

**Sous la direction de :**

**Pr. Dr. Victor S. GBAGUIDI**

**Maître de conférences des Universités du CAMES**

**1<sup>ère</sup> Promotion**

*Année Académique 2016 - 2017*

### DEDICACES

A :

- mon père **Tonassé DHOSSOUVI** et à ma mère **Félicité GANDJI** à qui je dois l'éducation et le désir de toujours faire mieux ;
- mes chers frères et sœurs.
- ma fille **Akpédjé Grâce Akeela DHOSSOUVI**, trouve ici, l'exemple à suivre pour l'accomplissement des âmes engagées.

## REMERCIEMENTS

Ce mémoire de master a été réalisé grâce à la contribution de certaines personnes que je tiens à remercier.

### ❖ **L'intention de mes encadreurs**

- Je remercie sincèrement mon maître de mémoire le Professeur **Victor S. GBAGUIDI**, Maître de Conférences des Universités du CAMES pour avoir dirigé ce travail malgré son calendrier bien chargé. Je ne finirai de le remercier pour tout ce qu'il fait chaque jour allant dans le sens du renforcement de mes capacités scientifiques et professionnelles ;
- Je remercie mon co-maître de mémoire **Dr. Yvette TANKPINOU KIKI**, Maître Assistant des Universités du CAMES dont les conseils et orientations m'ont permis de recadrer ce travail ;
- Je remercie l'aîné **ODUNLAMI Eric**, doctorant à l'Ecole doctorale des sciences de l'Ingénieur pour ses multiples conseils ;
- Je remercie **Virtus TOHOUNGBA**, ingénieur de Conception en génie civil pour son appui scientifique à la réussite de ce travail ;
- Je remercie les membres de mon Jury de soutenance pour le temps et l'énergie accordés à l'évaluation de ce document.
- Mes remerciements vont à l'endroit de mes collègues du bureau d'études ECCO-GC pour leur encouragement et leur apport intellectuel.
- A ma chère épouse Alice AHONON pour ses soutiens et encouragements pour l'aboutissement de ce mémoire.

### ❖ **.L'intention du CNERTP**

Tout le personnel, en occurrence :

- **Joseph AHISSOU** ; Directeur Général
- **Orphée DANSOU** ; Directeur Technique
- **Rodolphe AVOGBANNANON** ; Chef Génie Civil
- **Augustin KOULO** ; ex Chef Service Archive
- **Serge AMOUSSOU** ; Chef Service Archive

- **Samson HOUESSINON** ; Chef Section Méca-Sol
- **Patrick GINHISODE** ; Adjoint Chef Section Méca-Sol
- **Yves VODONOU** ; Chef Section Route

❖ **L'intention de LERGC**

Tout le personnel, en particulier :

- **Crépin ZEVOUNOU ; Directeur Général**
- **Paulin DJIMONNAN** ; Assistant du DG

❖ **L'intention de l'ED-SDI**

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), et plus particulièrement les enseignants du département de génie civil. Nos vives reconnaissances aux :

- **Pr VIANOU Antoine**, Professeur Titulaire des Universités (CAMES), Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-DSI) ;
- **Pr AHOUANNOU Clément**, Maître de Conférences des Universités (CAMES), Directeur Adjoint de l'EPAC et à tout le personnel de l'administration de l'EPAC ;
- **Dr HOUINOU Gossou Jean**, Maître Assistant des Universités (CAMES), chef du département de Génie Civil de l'EPAC ;
- **Pr ADJOVI Edmond**, Professeur Titulaire des Universités (CAMES) ;
- **Dr SAVY Mathias**, Maître Assistant des Universités (CAMES) ;
- **Dr BACHAROU Taofic**, Maître Assistant des Universités (CAMES) ;
- **Dr DIOGO Noel**, Docteur architecte ;
- **Pr CODO François de Paule**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
- **Dr DEGBEGNON Léopold**, Maître Assistant des Universités (CAMES) ;
- **Pr GBAGUIDI Aissè Gérard Léopold**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
- **Dr HOUINOU Agathe**, Maître Assistante des universités (CAMES) ;
- **Dr ZINSOU Luc**, Maître Assistant des Universités (CAMES) ;

- **Pr GIBIGAYE Mohamed**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
  - **Pr TCHEHOUALI Adolphe**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
  - **Dr WANKPO Tonalémi Epiphane Sonon**, Docteur ingénieur en hydraulique ;
  - **Dr ZEVOUNOU Crépin**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
  - **Dr ALLOBA Ezéchiél**, Maître Assistant des universités (CAMES) ;
  - **Dr CHAFFA Gédéon**, Maître Assistant des universités (CAMES) ;
  - **Pr OLODO Emmanuel**, Maître de Conférences des Universités (CAMES) ;
  - **Dr DOKO Valérie**, Assistant des universités ;
  - **Dr Agapi HOUANOU**, Assistant des universités ;
  - **Dr Macaire AGBOMAHENAN**, Assistant des universités
  - **M. ZOHOUNGBOGBO Prosper**, Ingénieur en Génie Civil ;
  - **Mme AHONONGA Elena**, Ingénieur en Génie Civil ;
  - **M. SEWANOUE Cosme**, Professeur de comptabilité ;
  - **M. LAADE Cyprien**, Agent du Laboratoire d'Essais et de Recherche en Génie Civil (LERGC) ;
- Messieurs BOCOVO Mariano, YABI Crépin, AGOSSOU Daniel.**

## RESUME

Notre recherche contribue à l'étude du phénomène de gonflement et de perméabilité des sols argileux de la commune de HOUEYOGBE située dans la dépression de la Lama. Des essais d'identification et mécanique ont été réalisés sur des échantillons intacts comme remaniés prélevés sur neuf (9) sites de cette commune. Le Centre National d'Etudes et de Recherche des Travaux Publics (CNERTP) nous a permis de réaliser ces différents essais. Après analyse et interprétation des résultats d'essais, il en ressort que les propriétés de ces sols varient d'un site à l'autre. En effet, les essais d'identification montrent que les sols étudiés sont plastiques puis sont des argiles ou limon argilo-sableux. L'essai de gonflement à l'œdomètre révèle que le potentiel de gonflement varie de 0,04% à 9,60% tandis que l'essai de la perméabilité à l'œdomètre et la perméabilité sous la contrainte géostatique in situ varie de  $7,60.10^{-7}$  à  $9,62.10^{-5}$  m/s ; il résulte de ces deux derniers essais que plus le sol est perméable moins il est gonflant.

Cette étude a permis de déterminer quelques paramètres physiques et mécaniques des sols argileux de la commune de HOUEYOGBE. Les résultats obtenus seront consignés dans une base de données afin d'aider les concepteurs en génie civil d'en tenir compte dans le dimensionnement des ouvrages.

**Mots clés :** sols argileux, paramètres physico-mécaniques, perméabilité.

## ABSTRACT

Our research contributes to the study of the phenomenon of swelling and permeability of clay soils of HOUEYOGBE commune located in the Lama depression. Identification and mechanical tests were carried out on intact samples as remodeled taken from nine (9) sites of this municipality. The National Center for Studies and Research in Public Works (CNERTP) allowed us to carry out these different tests.

After analysis and interpretation of the test results, it appears that the properties of these soils vary from one site to another. In fact, the identification tests show that the soils studied are plastic then they are clays or silty clay-sand. The swelling test at the oedometer reveals that the swelling potential varies from 0.04% to 9.60% while the oedometer permeability test that the permeability under geostatic stress in situ varies from  $60.10^{-7}$  to  $9.62.10^{-5}$  m / s; it follows from these last two tests that the more the soil is permeable, the less it is swelling.

This study made it possible to determine some physical and mechanical parameters of the clay soils of the commune of HOUEYOGBE. The results obtained will be recorded in a database in order to help the civil engineering designers to take them into account in the design of the structures.

**Key words:** clay soils, physico-mechanical parameters, permeability.

**SOMMAIRES**

DEDICACES .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME .....	iv
ABSTRACT .....	iv
SOMMAIRES .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	xiii
LISTE DES TABLEAUX .....	xv
LISTE DES PHOTORAPHIES .....	xvi
LISTE DES GRAPHES .....	xvii
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS .....	xviii
LISTE DES NOTATIONS .....	xix
LISTE DES ANNEXES .....	xxi
INTRODUCTION GENERALE .....	1
PARTIE 1 : Revue bibliographique .....	5
CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux .....	17
I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	18
II. Définition des argiles .....	19
III. Formation des argiles .....	20
IV. Structure des minéraux argileux .....	25
V. Classification des argileux .....	29
VI. Différents types d'argiles .....	34
VII. Localisation des sols argileux au Bénin .....	41
CHAPITRE 2 : Généralités sur le gonflement et la perméabilité.....	44
I. Gonflement .....	45
II. Méthodes de mesure de la perméabilité saturée .....	56
PARTIE 2 : Matériaux, matériels et méthodologie de recherche .....	61
CHAPITRE 3 : Milieu d'étude .....	62
I. Situation géographique .....	63
II. Population et structure administrative .....	64
III. Climat .....	66
IV. Relief et sols .....	67
V. Présentation des sites de prélèvement .....	68
CHAPITRE 4 : Méthodologie de recherche.....	70
I. Recherche et localisation des sites .....	71
II. Prélèvements .....	72
III. Description des essais .....	73
PARTIE 3 : Analyse et interprétation des résultats .....	77
CHAPITRE 5 : Les essais d'identification .....	78
I. Résultats et interprétation globale des essais .....	79
II. Interprétation spécifique de certains paramètres .....	82

CHAPITRE 6 : Les essais mécaniques .....	88
I. Essai de cisaillement .....	89
II. Essai œdométrique .....	89
III. Essais de gonflement libre et de perméabilité à l'œdomètre .....	91
IV. Influence de la perméabilité sur certains paramètres caractéristiques .....	94
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	98
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	101
TABLES DES MATIERES .....	104
ANNEXES.....	108

**LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : Évolution des minéraux primaires et formation des argiles (Landry et Mercier, 1992). ..... 21

Figure I.2: Origine des minéraux argileux (Velde, 1995). ..... 22

Figure I.3 : Processus d'altération chimique (Chamley, 1989)..... 23

Figure I.4 : Séquence d'altération des minéraux argileux dans les sols : la séquence de Jackson (Jackson 1963, repris de Thorez, 1985). ..... 24

Figure I.6: Tétraèdre de silice couche tétraédrique notation (KIKI S. Y., 2004) ..... 27

Figure I.7: Octaèdre centré sur l'aluminium Couche octaédrique notation (KIKI S. Y., 2004)..... 27

Figure I.8 : Éléments structuraux: les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988). ..... 28

Figure I.9 : Éléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988). ..... 28

Figure I.10 : Agencements des tétraèdres et des octaèdres (Moore & Reynolds, 1989)..... 29

Figure I.11 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 1/1 (KIKI S. Y., 2004) ..... 31

Figure I.12 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 2/1 (KIKI S. Y., 2004) ..... 32

Figure I.13 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 2/1/1 (ERRAIS, 2001) ..... 34

Figure I.14 : Schéma de la particule de kaolinite a- feuillet tétraédrique, b- octaèdre : les atomes coordonnées peuvent être Al, Fe, ou Mg ; c- feuillet octaédrique, d- modèle schématique. (ERRAIS, 2001) ..... 35

Figure I.15 : Schéma de la particule d'halloysite (ERRAIS, 2001)..... 36

Figure I.16 : Schéma de la particule de montmorillonite ..... 37

Figure 3.13 : Schémas de la particule d'illite (ERRAIS, 2001) ..... 38

Figure I.18 : Schéma de la particule de vermiculite (Huder J. & Amberg G., 1970) ..... 39

Figure I.19 : Schéma de la particule de chlorite (Huder J. & Amberg G., 1970) ..... 39

Figure I.20 : Interstratifiés (Huder J. & Amberg G., 1970) ..... 40

Figure II.1: Schéma présentant les différentes origines du gonflement (Gens et Alonso, 1992) ..... 47

Figure II.3 : Procédure d'essai à charge variable..... 56

Figure II.4 : essai oedométrique .....	58
Figure II.5 : Appareil de Richard (Soil Moisture Equipement Corporation, 1985 cité par Sayad Gaidi C. 2003) .....	60
Figure II.6 : Œdomètre à succion contrôlée (Vicol, 1990) .....	61
Figure III.1 : Carte du département du Mono .....	65
Figure III.2 : Carte de la Commune de Houéyogbé .....	67
Figure III.3 : Carte Pédologique de Houéyogbé.....	69
Figure IV.1 : Carte de prélèvements .....	73
Figure V.11 : Abaque de classification triangulaire de Taylor (1948).....	85

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates 1/1 et 2/1 (ERRAIS, 2001).. 30

Tableau I.2 : Différentes substitutions de quelques minéraux du groupe des smectites. (BANKANO S., 2005) ..... 33

Tableau III.1 : Localisation des sites de prélèvements ..... 70

Tableau V.1 : Les résultats des essais d'identification ..... 82

Tableau V.2 : Récapitulatif sur les types de sols argileux selon la classification triangulaire de Taylor (1948) ..... 84

Tableau V.3 : Récapitulatif sur le comportement plastique et le potentiel de gonflement ..... 86

Tableau V.4 : Classification selon la plasticité des sols présenté par J.M. Txhouaninana (1999) ..... 87

Tableau V.5 : Potentiel de gonflement d'après Snethen ..... 87

Tableau V.6 : Dénomination des sols en fonction du coefficient d'activité .. 88

Tableau VI.1 : Récapitulatif des résultats qui émanent de l'essai de cisaillement ..... 90

Tableau VI.2 : Récapitulatif des paramètres issus d'essai œdométrique ..... 91

Tableau VI.3: Valeurs de la perméabilité (m/s) en fonction des contraintes appliquées (KPa)..... 94

**LISTES DES PHOTOGRAPHIES**

Photos IV.1 : Prélèvement d'échantillons..... 74

**LISTE DES GRAPHES**

Graphe V.1 : Courbe d'analyse granulométrique de HOUNGA-HOUEGBE	81
Graphe V.2 : Valeurs de teneur en eau in situ .....	83
Graphe V.3 : Pourcentage de passant au tamis 80 $\mu\text{m}$ .....	83
Graphe V.4 : Pourcentage de passant au tamis 2 $\mu\text{m}$ .....	84
Graphe V.5 : Valeurs d'Indice de Plasticité (IP) .....	86
Graphe V.6 : Valeur des coefficients d'activité .....	88
Graphe VI.1 : Courbe d'essai de cisaillement de HOUNGA-HOUEGBE .....	90
Graphe VI.2 : Courbe œdométrique de HOUNGA-HOUEGBE .....	91
Graphe VI.3 : Variation du potentiel de gonflement en fonction du temps ..	92
Graphe VI.4 : Valeurs du potentiel de gonflement .....	93
Graphe VI.5 : Valeur de la perméabilité (m/s) sous la contrainte géostatique in situ .....	93
Graphe VI.6 : Variation de la perméabilité en fonction des contraintes appliquées.....	95
Graphe VI.7: Evolution de la perméabilité en fonction du gonflement.....	95
Graphe VI.8 : valeur de la perméabilité en fonction de l'activité .....	96
Graphe VI.9 : valeur de la perméabilité en fonction de l'indice de plasticité ..	97
Graphe VI.10 : relation passant au tamis de 80 micron et perméabilité.....	98
Graphe VI.11 : relation VBS et perméabilité.....	99
Graphe VI.12 : relation Indice de vide initial et perméabilité.....	100

## **LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS**

### **LISTE DES SIGLES**

<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>ATS</b>	:	Aïwa Technical Services
<b>CO</b>	:	Couche Octaédrique
<b>CT</b>	:	Couche Tétraédrique
<b>DG</b>	:	Directeur Général
<b>DGI</b>	:	Directeur Général des Infrastructures
<b>DGAI</b>	:	Directeur Général Adjoint des Infrastructures
<b>Dr</b>	:	Docteur
<b>DTN</b>	:	Directeur des Travaux Neufs
<b>EPAC</b>	:	École Polytechnique d'Abomey-Calavi
<b>kPa</b>	:	Kilo Pascals
<b>LPC</b>	::	Laboratoire des Ponts et Chaussées
<b>Pr</b>	:	Professeur
<b>UTM WGS 84</b>	:	Universal Transverse of Mercator World Geodesic System 84

## 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
$\gamma_w$	le 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
$r_{cap}$	Rayon capillaire

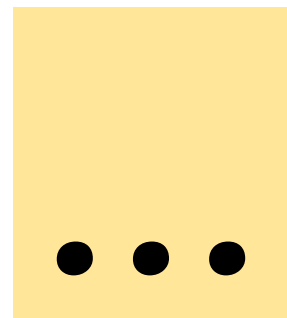
## Liste des symboles et abréviations

---

S	Section de l'éprouvette
$\omega_L$	Limite de liquidité
$\omega_P$	Limite de plasticité
IP	Indice de plasticité
k	Coefficient de perméabilité

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Essais d'identification	A
Annexe 2 : Essai de cisaillement	O
Annexes 3 : Essais œdométriques	P
Annexe 4 : Essais de gonflement libre à l'œdomètre	Q



# INTRODUCTION GENERALE

## **CONTEXTE ET JUSTIFICATIONS**

Dans les pays en voie de développement, le coût des constructions civiles (ouvrages d'art, bâtiments, routes ...) constitue une charge importante du budget national. Une grande partie de ces pays se situe dans des zones climatiques arides ou semi arides, où on rencontre très souvent des sols argileux très sensibles aux variations de teneur en eau. Ces variations soumettent les sols expansifs à un cycle de retrait gonflement. Le caractère différentiel du gonflement ou du retrait des sols argileux entraîne d'importants désordres qui affectent désastreusement les ouvrages, voire la ruine complète de ceux-ci. Les structures légères comme les bâtiments, et particulièrement les logements individuels, ne sont généralement pas étudiées pour résister ou s'adapter aux cycles successifs de gonflement et de tassement de ces sols argileux sensibles, qui accompagnent les cycles de pluie et de sécheresse. Elles subissent donc beaucoup plus de dommages.

Notre pays, le Bénin, fait partie de ces pays. Dans les zones où l'on rencontre ces sols, les constructions tant privées que publiques (écoles, hôpitaux, administrations, etc.) subissent gravement les affres de ce phénomène. Les caractéristiques économiques et sociales particulières de notre cher pays, le Bénin, s'imposent alors dans la politique de conception et de construction des infrastructures, en vue d'assurer leur pérennité. Si nous sommes d'accord au vu de la bibliographie que ce sont les argiles gonflantes qui sont à l'origine de ces désordres, nous n'avons cependant pas encore réussi à caractériser ces argiles surtout au sud du pays dans la dépression de la Lama où ces désordres sont plus accentués.

C'est dans le but de caractériser ces dernières et à la longue établir la carte aléa retrait-gonflement de la dépression de la Lama en vue de compléter la liste des propositions de construction sur ces sols que nous avons choisi, dans le cadre de notre mémoire de recherche en géotechnique et infrastructures immobilières, de travailler sur le thème : **«ETUDE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT LIE A LA PERMEABILITE DES SOLS ARGILEUX : CAS DE HOUEYOGBE»**.

## **PROBLEMATIQUE**

La méconnaissance des caractéristiques physiques et chimiques des sols et des roches est à l'origine de plusieurs catastrophes. Nous pouvons citer entre autres :

- ✚ l'effondrement du barrage de Malpasset le 02 décembre 1959, en Amont de Fréjus dans le sud de la France faisant 423 victimes ;
- ✚ les sinistres liés au retrait gonflement sur le territoire métropolitain en France sont estimés à près de 500 millions d'euros de 1989 à 2003 par la Caisse Centrale de Réassurance ;
- ✚ le 11 août 1979; la rupture d'un barrage à Morvi en Inde pour des causes techniques a fait 15.000 morts ;
- ✚ les phénomènes de retrait-gonflement des sols observés dans certaines localités du Bénin et qui ont pour conséquence l'état délabré des différentes infrastructures ; ce qui handicape leur pérennité ainsi que la sécurité de leurs usagés.

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 qu'entre autres les enlissements et les fissures affectant en occurrence les ouvrages types maisons individuelles construites à faible profondeur et sans précautions particulières ainsi que les chaussées de nos routes. Ils sont plus accentués dans une partie de la région sud du Bénin et cette dernière est intitulée dépression de la Lama ; la maîtrise du comportement physique et mécanique en occurrence le gonflement et la perméabilité des sols de cette région est donc nécessaire pour l'essor de cette zone par le biais de la réalisation des infrastructures stables et durables.

### **OBJECTIF GENERAL**

L'objectif général de notre étude est de caractériser les sols argileux de la commune de HOUEYOGBE en vue d'améliorer les méthodes de construction dans cette zone.

### **OBJECTIFS SPECIFIQUES**

Les objectifs spécifiques visés sont :

- + spécifier les caractéristiques physiques de ces sols argileux;
- + déterminer la cohésion  $C_{uu}$  et l'angle de frottement interne  $\phi_{uu}$  de ces sols argileux grâce à l'essai de cisaillement;
- + estimer les paramètres fondamentaux de ces sols argileux par le biais d'essai œdométrique ;
- + étudier le gonflement et la perméabilité des sols argileux de cette commune.

### **PLAN DU MEMOIRE**

La démarche suivie dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale. Le présent mémoire est subdivisé en trois grandes parties qui se présentent comme suit :

- ❖ dans la première partie nous présenterons la synthèse bibliographique ;
- ❖ la seconde partie concerne le milieu d'étude et les essais géotechniques réalisés ;
- ❖ enfin dans la troisième partie, seront abordées l'analyse et l'interprétation des résultats.

## **PARTIE 1 : Revue bibliographique**

# **CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux**

**L**es sols argileux sont reconnus comme des sols sensibles aux variations hydriques subies au cours des cycles saisonniers, pouvant engendrer des désordres importants sur les constructions au Bénin et à travers le monde mais l'amplitude de ces désordres dépend de la nature minéralogique, chimique et mécanique des constituants du sol argileux. De nombreux travaux ont été réalisés afin d'étudier le problème des différents phénomènes qui charrient à ses désordres.

## I SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

De par le monde, certains chercheurs ont abordé d'une manière ou d'une autre des thèmes sur les sols argileux. Nous présenterons dans les lignes qui suivent un résumé de quelques thèmes et conclusions issus de nos recherches documentaires :

📖 **SLANSKY M.**, a mené à partir de **1950**, des études stratigraphiques très précises sur le bassin côtier du Dahomey d'alors et a fait une étude synthétique détaillée de l'ensemble du bassin sédimentaire côtier du Togo et du Dahomey. Après un nombre élevé de puits forés, il a abouti à la conclusion que le bassin contient du quartz et des minéraux argileux où la kaolinite est très largement dominante. Aussi note-t-on la présence d'attapulgite et montmorillonite.

📖 **Huder et Amberg (1970)**, ont travaillé sur le gonflement des argiles. Ils ont montré que d'après leurs résultats d'essais que la cinétique du gonflement est caractérisée par deux phases. La première est intitulée le gonflement primaire et la seconde le gonflement secondaire.

📖 **ADJATI Mètonwanou Albert**, a travaillé en **1986** pour sa thèse d'agrégation, sur l'Etablissement des critères constructifs de l'argile de la Lama. Il a abouti dans ses conclusions que la zone comporte de la Kaolinite, de montmorillonite et de l'illite.

📖 **Yvette KIKI (2004)** a travaillé à la caractérisation des sols argileux d'Issaba dans la dépression de la Lama. Elle a conclu que la cosse de néré

fait baisser les paramètres de gonflement comme la valeur de bleu de méthylène, l'indice de compression, l'indice de gonflement ;

📖 Kirsten Hendriks, à travers ses travaux de fin d'études en 2008 portant sur l'«**Etude et analyse des sols gonflants au Bénin**» a procédé à l'analyse des sols argileux de Lokossa, Atchanou, Sèhouè, Zogbodomè, Onigbolo, **(2008)**.

📖 Enfin **NOUHOLIDJI Bienvenu M. (2014)** a étudié le phénomène de gonflement des sols argileux de la commune de Dogbo dans le bassin sédimentaire côtier au Bénin. Il vient à conclure que les paramètres de gonflement au niveau de Hèdjamè sont plus élevés qu'au niveau de Kénavo. C'est pour continuer cette dernière tâche qu'intervient notre travail.

## II Définition des argiles

Il n'existe pas de définition unique du terme «**argile**». Le mot «argile» englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. Sa définition dépend de la discipline concernée : en mécanique des sols, les argiles sont définies comme des particules d'une **taille inférieure à 2µm** alors qu'en géologie, elles sont caractérisées par leur **composition minéralogique** (KIKI, 2017). Plus loin, les argiles sont assimilées à un minéral qui domine dans la fraction fine inférieure à **2 microns** des roches et des sols (Eslinger et Peaver ,1988). En s'intéressant à leur microstructure, les argiles regrouperont tous les minéraux phyllosilicatés sans aucune connotation de taille et pour éviter des confusions, on se propose d'utiliser le terme de «**physis**» (WEAVER, 1989). Ainsi, le terme « **argile** » a un double sens : il désigne à la fois les minéraux argileux eux-mêmes puis les sols et roches contenant une quantité assez grande de particules argileuses. Ainsi un matériau est lui-même qualifié d'argile s'il contient plus de **50% de minéraux argileux** et une faible quantité de matières organiques (GAOMBALET, 2004).

De plus un sol argileux est dit expansif ou gonflant lorsqu'en fonction de la nature, de la structure et surtout de la teneur en eau de ce sol, on assiste à des cycles de retrait-gonflement pouvant causer des sinistralités notoires au niveau des ouvrages érigés sur celui-ci (BOCOVO M. & HOUEGBAN E., 2010).

Pour comprendre l'ensemble de la théorie des argiles et surtout leur gonflement, nous allons nous concentrer sur l'aspect géologique qui explique leur formation, sur l'aspect minéralogique et la structure de leurs particules.

### **III Formation des argiles**

#### **III.1 Origine des argiles**

Les minéraux argileux résultent soit de l'altération physique c'est-à-dire de la désagrégation d'une roche préexistante (minéraux primaires) sous l'effet des variations de température ; soit et surtout de l'altération chimique (minéraux secondaires) au contact de l'eau qui permet la dégradation en de particules très fines. Dans ce cas, ils sont formés par transformation d'un minéral ou par précipitation à partir d'une solution (minéraux néoformés) (GAOMBALET, 2004). Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles (Grunberger D., 1995). Ainsi ces processus de dissolution et de recristallisation conduisent à la formation ou à la transformation des minéraux argileux. En fait la proportion d'eau par rapport au solide détermine le degré, le type de réactions chimiques et finalement le type de minéral formé. Les modes de formation des argiles sont repris schématiquement dans la **figure I.1.**

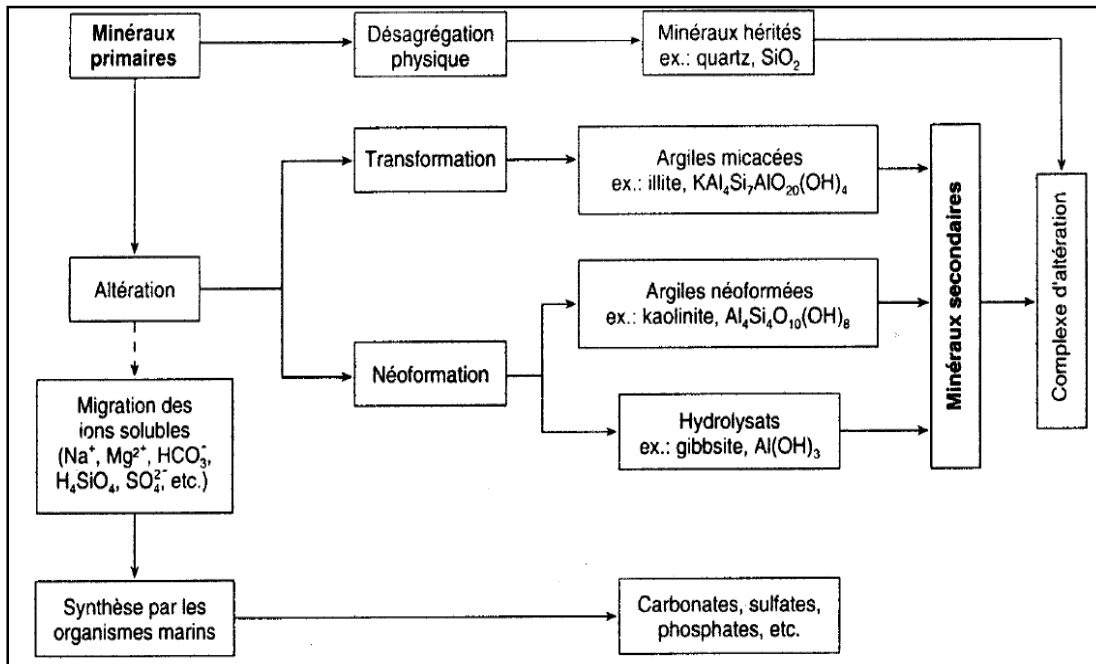


Figure I.1 : Évolution des minéraux primaires et formation des argiles (Landry et Mercier, 1992).

Différents mécanismes offrent trois modes de formation des minéraux argileux (**Figure I.2**). Lesquels modes donnent des informations différentes sur :

- ✓ les **conditions d'altération** au niveau de la région source;
- ✓ les **conditions de transport**;
- ✓ les **conditions géochimiques environnementales**.

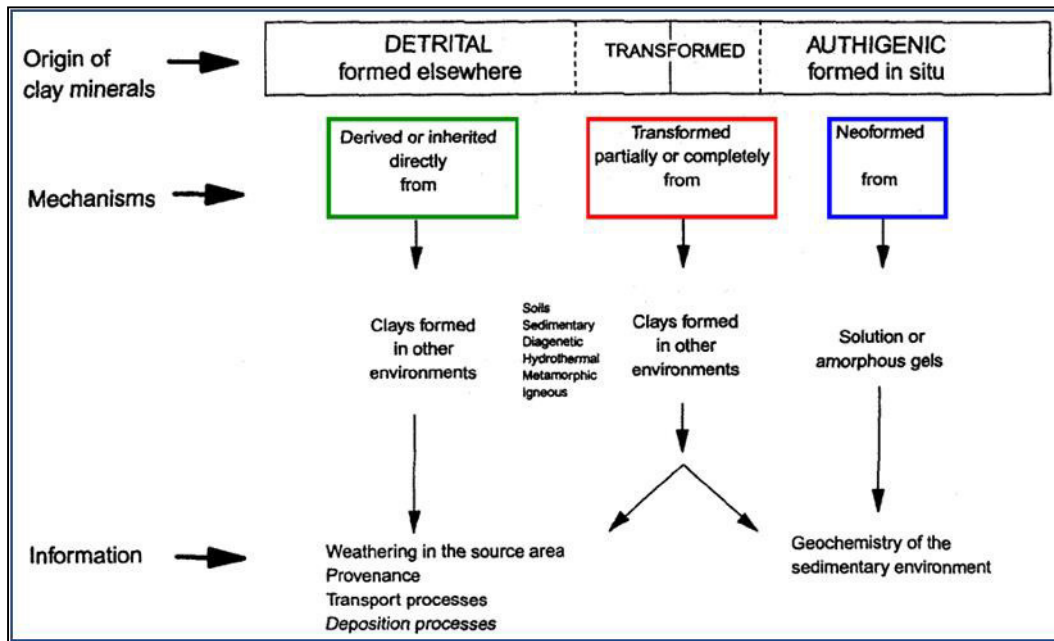


Figure I.2: Origine des minéraux argileux (Velde, 1995).

### III.2 Formation

L'origine principale des minéraux argileux est liée à l'altération suivie de l'érosion, du transport et de la sédimentation, de formations géologiques et pédologiques exposées à la surface terrestre. Tous les processus superficiels résultant de l'interaction entre les roches (lithosphère), l'air (atmosphère), l'eau (hydrosphère) et les organismes (biosphère) sont regroupés sous le terme d'altération.

L'altération tend à atteindre un état d'équilibre si les conditions environnementales restent stables. Par exemple, dans le développement d'un sol, les deux processus (altération physique et chimique) se combinent. L'altération physique permet la fragmentation de la roche-mère. Ensuite la percolation d'eau va progressivement modifier la composition de la roche-mère et des horizons pédologiques vont se développer au fur et à mesure de l'altération. Comme nous l'avons énoncé plus haut, l'altération chimique joue un rôle capital dans la formation des argiles et les paramètres contrôlant l'altération chimique sont résumés sur la **figure I.3**.

Main chemical weathering processes. (After Pédro 1979)			
	pH > 5	5 < pH < 9.6	pH > 9.6
Attack solution depleted in saline elements (Na, K, Ca, Mg)	Acidolysis water rich in dissolved organic acids	Hydrolysis pure water or CO <sub>2</sub> -rich water	
Attack solution concentrated in saline elements		Salinolysis water charged with salts of strong acids (chlorides, sulphates)	Alcalinolysis water charged with salts of weak acids (carbonates, bicarbonates)

Figure I.3 : Processus d'altération chimique (Chamley, 1989)

- **L'acidolyse** se développe dans un environnement riche en matières organiques, de nature acide et est caractérisé par la présence de complexes organico-minéraux.
- **L'alcalinolyse** se développe plutôt en environnement basique avec des solutions chargées en Ca ou Mg.
- **L'hydrolyse**, processus le plus répandu et le mieux connu, correspond à l'attaque d'une roche par l'eau dans des conditions de pH moyen.
- **La salinolyse** se produit en environnement évaporitique salin (Na, K) dans des conditions normales de pH.

Ainsi le degré d'altération et la formation des argiles vont dépendre de la combinaison de plusieurs facteurs qui vont déterminer la nature des minéraux secondaires formés. Les facteurs principaux sont:

✚ **le climat** (température, humidité, alternance saisonnière) qui contrôle le degré d'hydrolyse;

✚ **le relief** qui détermine le degré de drainage ou de confinement;

✚ **la nature** de la roche-mère qui conditionne la séquence des minéraux formés. De façon plus précise, il a été classé, en deux groupes, les matériaux qui donnent naissance au vertisols (Williams A. & Donaldson G., 1980):

❖ les roches ignées basiques telles que les basaltes, les lentilles et les filons de dolorites, les gabbros ainsi que les nortites contiennent des minerais

de feldspaths et de pyroxène qui se décomposent pour former la montmorillonite;

❖ les roches sédimentaires composées en partie ou en totalité de la montmorillonite appelée également smectite, et ou d'illite et ou de kaolin mal cristallisé.

La **figure I.4** suivante résume quelque peu la transformation de certains minéraux de roches mère en minéraux argileux.

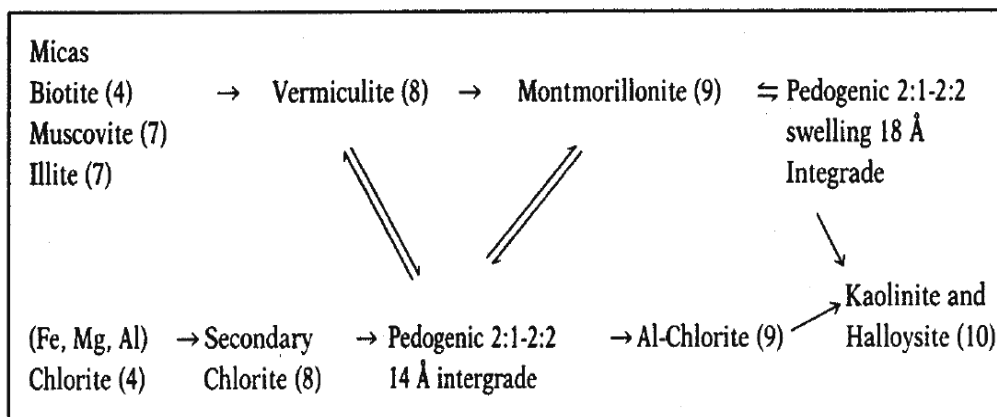


Figure I.4 : Séquence d'altération des minéraux argileux dans les sols : la séquence de Jackson (Jackson 1963, repris de Thorez, 1985).

### III.3 Répartition climatologique de l'altération des roches en argiles

Les sols argileux sont des silicates caractéristiques des zones plus ou moins superficielles de l'écorce terrestre. On distingue la zone d'altération météorique, la zone de sédimentation lacustre ou marine et la zone de la diagenèse par enfouissement. Ils sont très différents selon les zones climatiques.

En **climat équatorial et tropical humide**, les minéraux des roches sont dissous : c'est l'hydrolyse. Presque tous les constituants ainsi libérés sont évacués sauf quelques-uns qui, le plus fréquemment se combinent à la partie restante de la silice pour cristalliser en kaolinite. Quand on est en **climat tropical ou subtropical**, les hydrolyses sont encore puissantes à la saison humide mais l'évacuation des ions est freinée à la saison sèche : elles

crystallisent des smectites issues des transformations des phyllites héritées. Ainsi naissent les argiles des vertisols, des sols de steppe et des sols ferrallitiques. Vers le **climat tempéré**, les hydrolyses sont ménagées du fait de la moindre importance de la température et de la pluviosité. Les silicates des roches mères s'altèrent peu, sauf les micas et argiles qui s'y trouvent déjà, et ces minéraux subissent des transformations qui conduisent à de multiples assemblages : interstratifiés, vermiculites, smectites et chlorites. Enfin sous **les climats extrêmes, périglaciaires ou désertiques**, les altérations sont quasiment inexistantes. La matière organique fait défaut ; l'eau se trouve gelée ou bien manque. Les argiles des sols, généralement maigres, ne sont que des illites et des chlorites, issues de la pulvérisation des phyllites héritées.

#### IV Structure des minéraux argileux

##### IV.1 Terminologie

Avant d'entrer dans les détails de la minéralogie des argiles, il nous semble utile de rappeler la terminologie associée pour éviter toute confusion. En effet un terme donné est parfois utilisé pour désigner plusieurs niveaux de structures différentes, et deux différents termes sont parfois employés pour désigner un même niveau (**Figure I.5**).

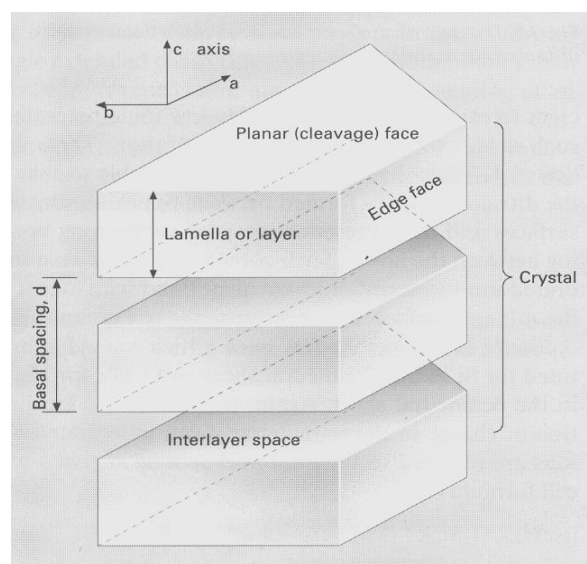


Figure I.5 : Structure générale des phyllosilicatés (White, 1999)

La cellule de base (**unit cell**, en anglais) des minéraux argileux est appelée **crystallite**. Elle est constituée d'un **feuillelet (layer)** et d'un **interfeuillelet (interlayer)** appelé aussi **espace interfoliaire**. Chaque feuillelet est lui-même formé de la superposition de deux ou trois **couches (sheets)** cristallisées (c'est-à-dire dans lesquelles les atomes, solides à température ordinaire, sont régulièrement distribués). L'interfeuillelet est constitué de fluide (eau) assurant une liaison électrochimique entre les feuillelets. Il existe différents types de liaisons interfeuillelets, liées notamment à des phénomènes de substitutions isomorphiques à la surface des cristallites (GAOMBALET, 2004).

Une **particule** d'argile résulte de l'empilement face-à-face de quelques cristallites élémentaires, elle n'est formée parfois que d'une seule cristallite. Il arrive aussi que le terme cristallite soit lui-même employé pour désigner un empilement de plusieurs feuillelets, c'est-à-dire ce que nous avons nous mêmes qualifié de particule. Nous allons voir que ces cristallites peuvent s'assembler de manières très diverses.

Des différentes possibilités d'empilement des couches dans les feuillelets, de substitutions isomorphiques, de liaisons interfeuillelets et enfin d'arrangement spatial des cristallites résulte la grande diversité de structures et de propriétés des argiles (GAOMBALET, 2004). Étudions à présent ces différentes couches.

### IV.2 Éléments structuraux

Les minéraux argileux sont des phyllosilicatés hydratés, se présentant en de très petits cristaux de quelques micromètres. Ces cristaux sont formés d'un empilement de feuillelets constitués par l'association de deux unités structurales de base (KIKI S. Y., 2004):

✚ la **couche tétraédrique (CT)** : c'est une combinaison d'unités cristallines  $\text{SiO}_4$  (tétraèdre de silice); les atomes d'oxygène à la base de chaque tétraèdre sont situés dans un même plan et les sommets qui ne sont pas jointifs pointent tous dans la même direction. Son épaisseur est d'environ trois angströms (3Å).

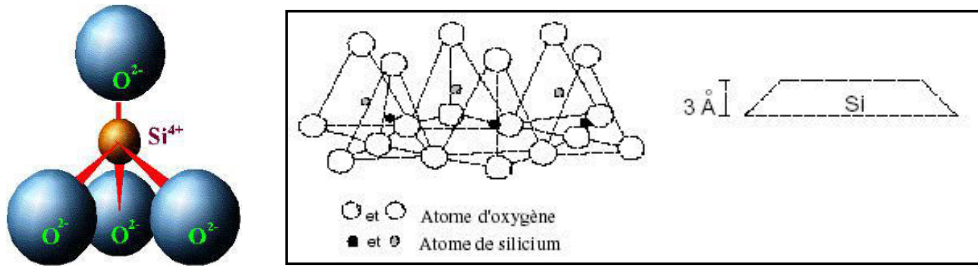


Figure I.6: Tétraèdre de silice couche tétraédrique notation (KIKI S. Y., 2004)

✚ **la couche octaédrique (CO)** : c'est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium  $Al_2(OH)_6$ , de magnésium  $Mg_3(OH)_6$ , éventuellement de fer ou d'un autre élément. Les rangées d'atomes d'oxygène ou d'hydroxyle dans la couche se trouvent sur deux plans. Elle a une épaisseur d'environ quatre angströms (4Å).

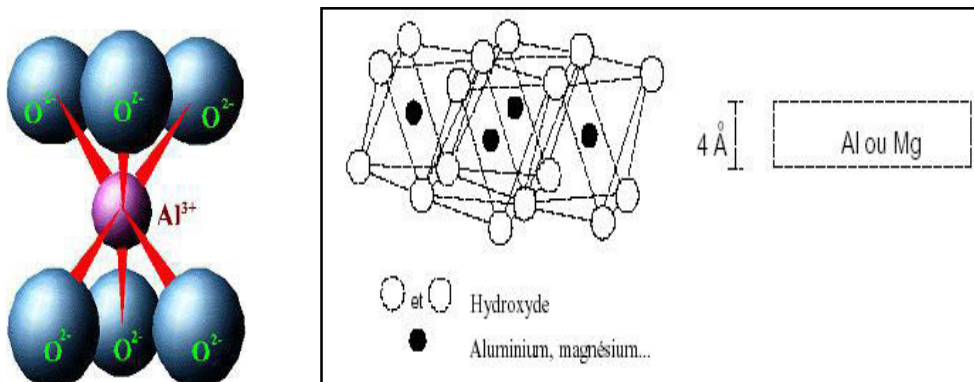


Figure I.7: Octaèdre centré sur l'aluminium Couche octaédrique notation (KIKI S. Y., 2004)

Ainsi les silicates constituent le modèle de base des argiles. Ils sont formés par un agencement de tétraèdres de  $SiO_4$  dans lesquels un atome de Si est entouré de quatre (4) atomes d'Oxygène (**Figure I.8.a**). Les tétraèdres s'agencent en se partageant les oxygènes en maille hexagonales (**Figure 1.8.b**). Les hexagones s'agencent et forment une double chaîne. Dans les phyllosilicates, les tétraèdres forment des feuillets composés de six (6) tétraèdres. Les oxygènes non partagés pointent tous dans la même direction. La formule de base est  $Si_4O_{10}^{4-}$ . La charge négative est compensée par accommodation de cations de petite taille Si, Al et rarement  $Fe^{3+}$  (**Figure I.8**).

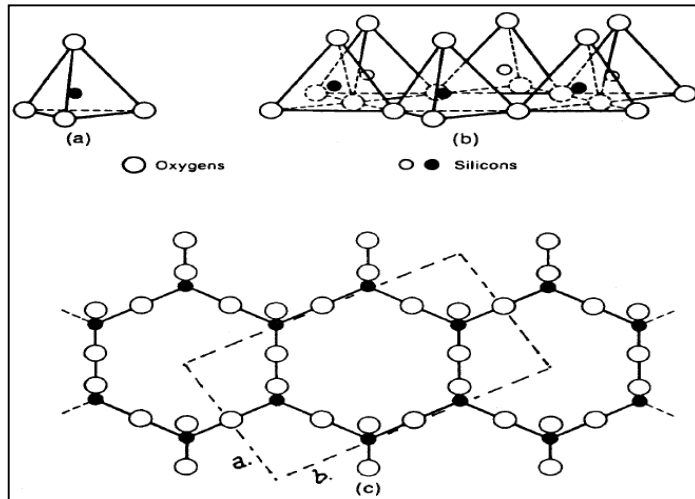


Figure I.8 : Éléments structuraux: les tétraèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

Les tétraèdres s'associent à des feuillets octaédriques composés d'un cation central et six (6) ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) (**Figure I.9.d**). Cette configuration permet d'accommoder des cations plus larges Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> mais pas Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> (trop larges). Le feuillet octaédrique est constitué de deux plans d'hydroxyde ou d'oxygène ; il est couché sur une de ses faces et peut exister seul. Dans la brucite (**Figure I.9.e**), Mg(OH)<sub>6</sub>, toutes les positions cationiques sont occupées. Dans la gibbsite, Al<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>, par contre deux positions sur trois sont occupées (" minéral dioctaédrique ").

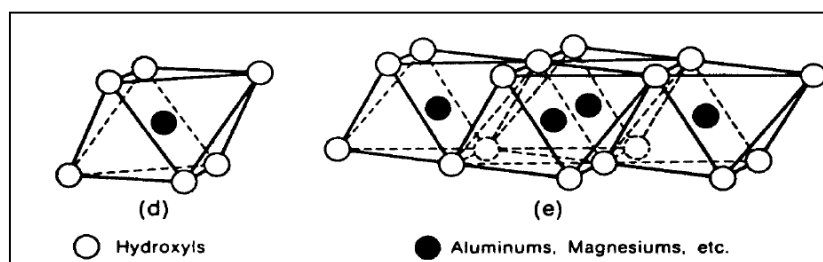


Figure I.9 : Éléments structuraux : les octaèdres (Eslinger & Peaver, 1988).

Les tétraèdres s'agencent avec les octaèdres pour constituer des couches (**Figure I.10**). Les couches peuvent être neutres ou chargées négativement, compensées par des cations qui se logent dans l'espace entre les couches

(espace interfoliaire). La charge de la couche dépend des substitutions de cations dans les feuillets tétraédrique ou octaédrique.

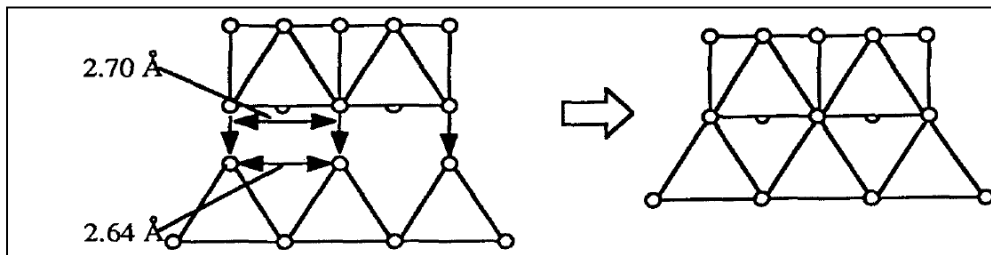


Figure I.10 : Agencements des tétraèdres et des octaèdres (Moore & Reynolds, 1989).

## V Classification des argiles

### V.1 Critères de classification

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Étude des Argiles, 1966-1972) et plus tard ceux de Pedro (1994) (ERRAIS, 2001), ont permis d'aboutir à une classification (**Tableau 3.1**) qui repose sur l'utilisation des critères suivants :

- **la combinaison des feuillets** (T/O ou 1/1; T/O/T ou 2/1; T/O/T/O ou 2/1/1);
- le type de cations dans l'octaèdre;
- la charge de la couche;
- le type de matériel dans l'espace interfoliaire (cations, molécules d'eau,...)

A ces principaux critères s'ajoutent d'autres secondaires à savoir :

- le polytypisme (ou mode d'empilement);
- la composition chimique;
- le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les interstratifiés.

La valeur de la charge permanente du feuillet a servi de critère pour établir une classification des phyllosilicates 1/1 et 2/1. Cette classification est déduite des travaux de MacKenzie (1975) et Brindley (1996) (BANKANO S., 2005).

Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates 1/1 et 2/1 (ERRAIS, 2001)

Feuillet	Charge par maille	Dioctaédriques	Trioctaédriques
1 :1	0	Kaolinite $(\text{Si}_4)(\text{Al}_4)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Antigorite $(\text{Si}_4)(\text{Mg}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	≠0		Berthierines $(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)(\text{Mg}^{2+}_{6-x}\text{M}^{3+x})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	≠0	Pyrophyllite $(\text{Si}_8)(\text{Al}_4)\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Talc $(\text{Si}_8)(\text{Mg}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
	Smectites		
2 :1	0.4 à 1.2	Montmorillonite $(\text{Si}_8)(\text{Al}_{4-y}\text{Mg}_y)\text{O}_{20}(\text{OH})_4, \text{M}_y^+$ Beidellite $(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4, \text{M}_x^+$	Hectorite $(\text{Si}_8)(\text{Mg}_{6-y}\text{Li}_y)\text{O}_{20}(\text{OH})_4, \text{M}_y^+$ Saponite $(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Mg}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_4, \text{M}_x^+$
	1.2 à 1.8	Illites $(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Al}_{4-y}\text{M}^{2+})\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \text{K}^{x+y}$	Vermiculites $(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Mg}_{6-y}\text{M}^{3+}_y)\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \text{K}^{x+y}$
	Micas		
	2	Muscovite $(\text{Si}_6\text{Al}_2)(\text{Al}_4)\text{O}_{20}(\text{OH})_2\text{K}^+_2$	Phlogopite $(\text{Si}_6\text{Al}_2)(\text{Mg}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_2\text{K}^+_2$
	4	Margarite $(\text{Si}_4\text{Al}_4)(\text{Al}_4)\text{O}_{20}(\text{OH})_2\text{Ca}^{2+}_2$	Clintonite $(\text{Si}_4\text{Al}_4)(\text{Mg}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_2\text{Ca}^{2+}_2$

Le feuillet élémentaire idéal d'argile se compose d'une succession de deux ou trois couches. On en distingue les types essentiels suivants :

### V.2 Feuillet de type 1/1

Ils résultent de la combinaison d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique et ont une épaisseur d'environ **7Å** (**Figure I.11**). Pour ces minéraux de type 1/1, la liaison entre feuillets est assurée par une liaison hydrogène entre les groupements hydroxyles de la couche octaédrique de l'un des feuillets et les oxygènes basaux de la couche de tétraèdres du feuillet suivant. Ces argiles, dont l'unité structurale de base est dissymétrique, sont représentées par le groupe des kaolinites et des serpentites, ces dernières étant beaucoup plus rares.

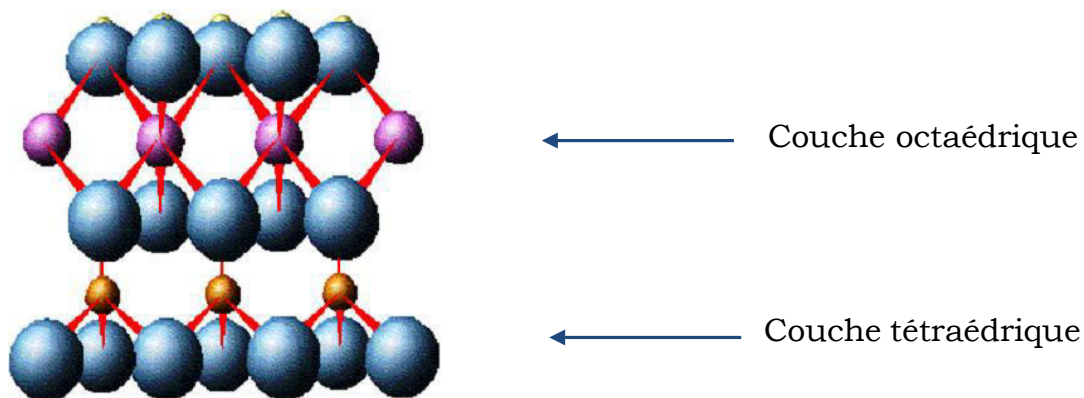


Figure I.11 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 1/1 (KIKI S. Y., 2004)

Le feuillet de type 1/1 a une structure polaire (les deux côtés de la plaquette sont différents). Les liaisons entre les feuillets sont dues à l'ion hydrogène ( $H^+$ ). Elles sont consistantes ; en conséquence, les particules composées de ce type de feuillets sont relativement inertes et leurs caractéristiques sont peu influencées par l'eau. Par leur relative simplicité structurale, les argiles de type 1/1 ne sont pas susceptibles de variations chimiques étendues.

### V.3 Feuillet de type 2/1

Avec une épaisseur d'environ **10 Å**, les feuillets de ces minéraux sont constitués d'une séquence d'empilements comprenant une couche octaédrique alumineuse insérée entre deux couches tétraédriques siliceuses. Dans l'espace compris entre deux feuillets consécutifs sont localisés des cations, éventuellement hydratés, qui compensent le déficit de charge induit par les substitutions atomiques affectant la structure du feuillet. Ces argiles, qui présentent une unité structurale de base symétrique, comportent de nombreux groupes (illites, smectites, interstratifiés, chlorites, vermiculites) dont la structure et les propriétés sont très variables. La **figure I.12** représente la structure tridimensionnelle d'un feuillet 2/1.

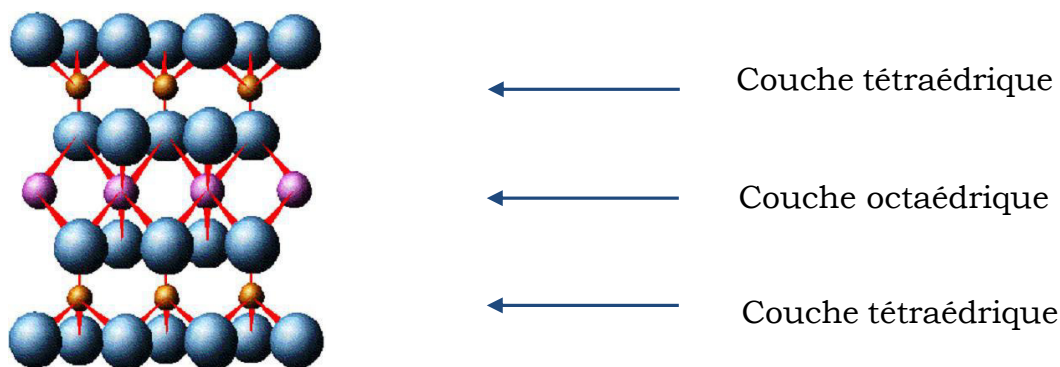


Figure I.12 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 2/1 (KIKI S. Y., 2004)

La structure du feuillet de type 2/1 est symétrique. Entre les feuillets, les ions oxygène sont en contact entre eux. Ces ions se repoussent; dans ces conditions (la montmorillonite par exemple), la liaison entre les feuillets est alors très faible. Il en résulte que l'eau peut facilement pénétrer entre les feuillets et causer ainsi le gonflement du matériau. Le groupe des muscovites (illite, mica) est formé de feuillets de même type que la montmorillonite.

Dans chacun des deux feuillets décrits précédemment, le cation peut être remplacé par un cation de taille voisine (pour « tenir » dans le site octaédrique ou tétraédrique), mais pas nécessairement de même valence. On parle de *substitution isomorphe* car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Ces substitutions entraînent alors un excès de charges négatives à la surface des feuillets. Cette électronégativité des feuillets est l'une des caractéristiques fondamentales des argiles. L'électroneutralité est obtenue par adsorption de cations compensateurs à la surfaces des feuillets : cations ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{2+}...$ ) provenant du fluide.

Par l'importance des substitutions et des propriétés qui en résultent (gonflement par exemple), on peut différencier les phyllosilicates 2/1.

Le **tableau 3.2** donne les différentes substitutions de quelques minéraux du groupe des smectites.

Tableau I.2 : Différentes substitutions de quelques minéraux du groupe des smectites. (BANKANO S., 2005)

<b>Minéraux (groupe des smectites)</b>	<b>Substitution dans la couche tétraédrique</b>	<b>Substitution dans la couche octaédrique</b>
Montmorillonite	Non	1 $Mg^{2+}$ pour tous les $Al^{3+}$
Beidellite	$Al^{3+}$ pour $Si^{4+}$	Non
Nontronite	$Al^{3+}$ pour $Si^{4+}$	$Fe^{3+}$ pour $Al^{3+}$
Hectorite	Non	$Li^+$ pour $Mg^{2+}$
Saponite	$Al^{3+}$ pour $Si^{4+}$	$Fe^{3+}$ pour $Al^{3+}$
Sauconite	$Al^{3+}$ pour $Si^{4+}$	$Zn^{2+}$ pour $Mg^{2+}$

#### V.4 Feuillet de type 2/1/1

Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets TOT et de couche octaédrique interfoliaire (**Figure I.13**). L'épaisseur du feuillet est d'environ **14Å**.

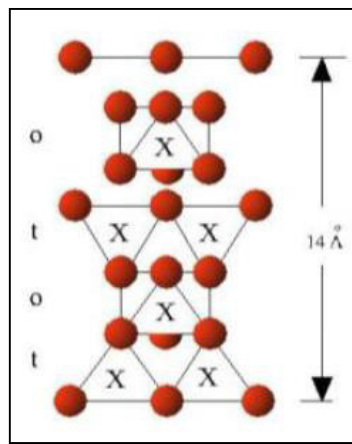


Figure I.13 : Représentation schématique de la structure d'un feuillet de type 2/1/1 (ERRAIS, 2001)

#### V.5 Minéraux interstratifiés

L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argile appartenant aux groupes ci-dessus étudiés.

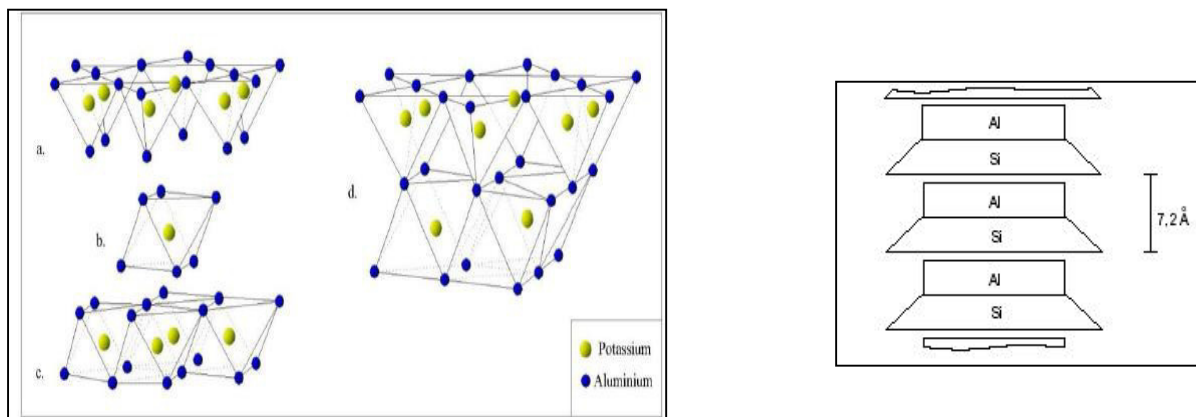
### VI Différents types d'argiles

#### VI.1 Minéral de type 1/1

##### ■ La kaolinite

Les argiles de cette famille sont les éléments essentiels de la plupart des argiles utilisées en céramique et en poterie. La surface spécifique est comprise entre **10 et 20 m<sup>2</sup>/g**. Le diamètre **D** des plaquettes est compris entre **0,3 et 3µm** et l'épaisseur des plaquettes varie de **D/10 à D/3**. L'épaisseur des feuillets est

d'environ **7Å**. Le feuillet est toujours neutre, dioctaédrique et alumineux de formule chimique : **Si<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>**. C'est un minéral de type 1/1 constitué d'une succession alternée de couches octaédriques (aluminium ou gibbsite) et de couches tétraédriques (silicium). Les deux couches sont liées de telle sorte que les sommets de la couche tétraédrique CT et ceux de la couche octaédrique CO se joignent, comme le montre la **figure I.14**.



**Figure I.14** : Schéma de la particule de kaolinite a- feuillet tétraédrique, b- octaèdre : les atomes coordonnés peuvent être Al, Fe, ou Mg ; c- feuillet octaédrique, d- modèle schématisé. (ERRAIS, 2001)

Un cristal de kaolinite est donc constitué d'un empilement de quelques couches de bases de **0,72 nm** d'épaisseur. La substitution isomorphe est très limitée. Les couches de base successives sont maintenues ensemble par les liaisons hydrogènes entre les hydroxyles de la CO et les atomes d'oxygène de la CT. Les liens d'hydrogène étant très forts, ils empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation de cristaux d'assez grandes dimensions. Un cristal de kaolinite peut être constitué d'une succession de soixante-dix (70) à cent (100) couches.

### ■ Halloysite

Elle est formée de feuillets de kaolinite séparés par des couches d'eau. La distance du grand espacement réticulaire devient **10Å** mais par chauffage,

l'eau peut être chassée et on retrouvera celle de la kaolinite **7,2Å**. Cette halloysite déshydratée s'appelle la *métahalloysite*. Au microscope électronique, l'halloysite présente souvent l'aspect de tube qui est dû à l'enroulement des feuillets. Les gisements sont hydrothermaux et parfois sédimentaire.

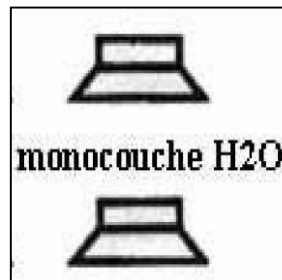


Figure I.15 : Schéma de la particule d'halloysite (ERRAIS, 2001)

## VI.2 Minéral de type 2/1

### ■ La montmorillonite

Contrairement aux kaolinites, la famille montmorillonite présente des propriétés colloïdales en donnant lieu à des gonflements. La surface spécifique de cette argile va jusqu'à **800m<sup>2</sup>/g**. le diamètre des plaquettes oscille entre **0,1 et 1µm**. L'épaisseur des plaquettes est donnée par la relation **D/100**. L'épaisseur des feuillets élémentaires est d'environ **10Å**. Le représentant des argiles de cette famille est appelée la bentonite qui est utilisée de façon systématique depuis plusieurs années pour l'érection des pieux, des parois moulées et des murs porteurs. Composée d'une succession de couche octaédrique insérée entre deux couches tétraédriques, elle est désignée comme un minéral 2/1. Les sommets des CT se confondent avec les hydroxyles de la CO pour ne former qu'une seule couche comme le montre la **figure I.16** .

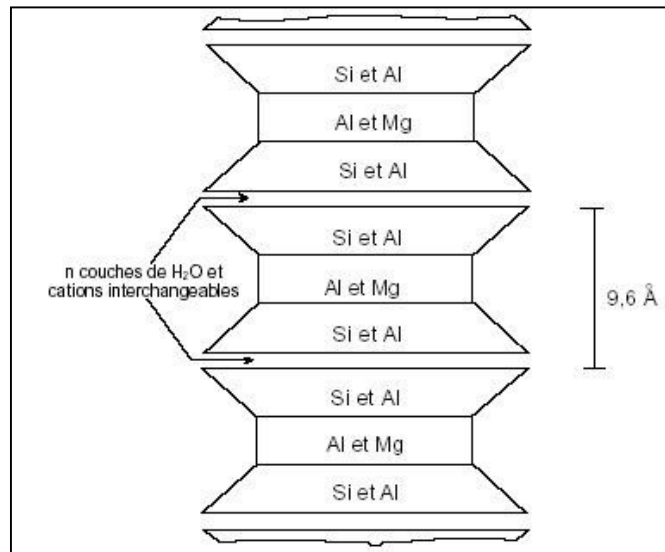


Figure I.16 : Schéma de la particule de montmorillonite

A l'instar de la kaolinite, ses couches peuvent se prolonger dans les deux autres directions. Une substitution partielle de l'aluminium Al par le magnésium Mg est fréquente (KIKI S. Y., 2004).

L'empilement des feuillets élémentaires met en contact deux couches d'atomes d'oxygène provenant du tétraèdre de silicium, rendant la liaison interfeuille faible et propice à la fixation de molécules d'eau et de cations entre ces feuillets. La formule chimique générale des smectites est : **(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(Al<sub>5/3</sub>Mg<sub>1/3</sub>)Na<sub>1/3</sub>(OH)<sub>2</sub>**. Le nombre de feuillets dépend de la nature des cations échangeables et de la concentration en sels. L'épaisseur de l'unité structurale dépend de l'état d'hydratation.

### ■ L'illite

Minéral de type 2/1 comme la montmorillonite, les argiles de la famille illite sont parmi les minéraux les plus répandus de la terre. Leur formule chimique: **(Si<sub>4-x</sub>Al<sub>x</sub>)(Al, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>)<sub>2</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>K**. La surface spécifique est comprise entre **80 et 100m<sup>2</sup>/g**, le diamètre des plaquettes varie de **0,1 à 2µm** et l'épaisseur des plaquettes est de **D/10**. L'épaisseur du feuillet est d'environ **10Å**.

Les espaces entre les feuillets sont reliés par les ions potassium ( $K^+$ ) (**Figure I.17**) qui créent un lien très fort entre les couches. L'illite est donc moins sensible au gonflement que la montmorillonite. Des substitutions partielles de Al par Mg ou Fe, ainsi que de Si par Al sont possibles. En notant  $M_1$  et  $M_2$  respectivement Al et Mg ou Fe, la formule générale des illites est  **$(Si_{4-x}Al_x)(Al, M_1, M_2)_2O_{10}(OH)_2K$** .

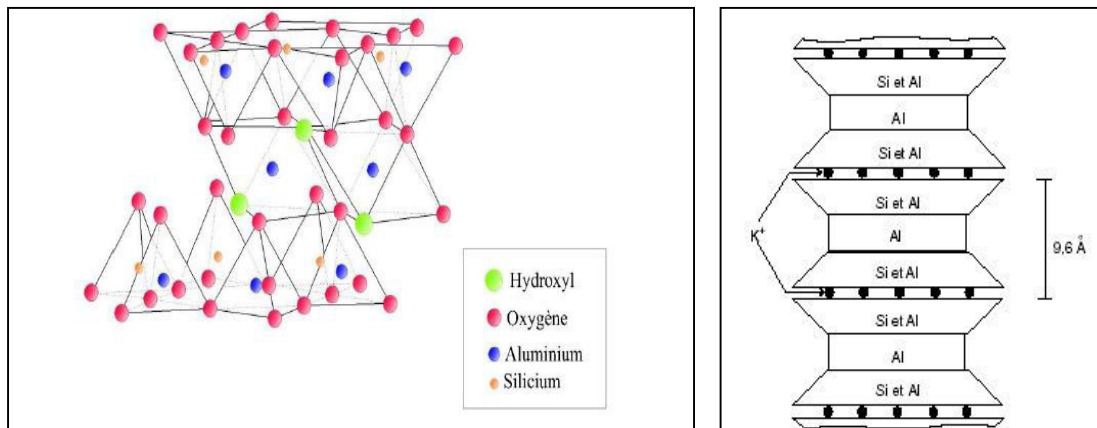


Figure 3.13 : Schémas de la particule d'illite (ERRAIS, 2001)

### ■ La vermiculite

La vermiculite est un minéral naturel de formule chimique  **$(Mg,Ca)_{0,7}(Mg,Fe,Al)_6(Al,Si)_8O_{22}(OH)_{4,8}H_2O$**  formé par l'hydratation de certains minéraux basaltiques, et souvent associé dans la nature à l'amiante. C'est un minéral 2/1 semblable à la montmorillonite (**Figure I.18**), mais qui ne comporte que deux espèces d'eaux entre les couches. La vermiculite possède des propriétés d'expansion sous l'effet de la chaleur (exfoliation), et est principalement utilisé commercialement sous forme exfoliée.

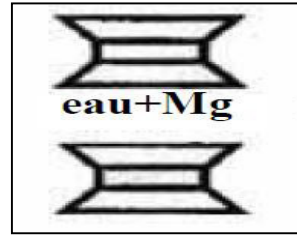


Figure I.18 : Schéma de la particule de vermiculite (Huder J. & Amberg G., 1970)

### VI.3 Minéral de type 2/1/1 : la chlorite

La chlorite est une argile moins fréquente que celles citées précédemment (sauf en traces) et résulte de l'altération de la biotite en particulier (mica noir des granites, des gneiss ou des schistes). Elle a un feuillet d'une épaisseur double de celui de la kaolinite et comprend un feuillet brucitique. Elle est constituée d'une répétition des couches suivantes : une CO, une CT, une autre CO et finalement une couche de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg) (**Figure I.19**). Sa formule est  $(\text{OH})_4(\text{SiAl})_8(\text{Mg, Fe})_6\text{O}_{20}$ . Considérée comme un minéral 2/1/1 la chlorite peut aussi comporter plusieurs substitutions isomorphes et dans certains cas, perdre une couche de brucite ou de gibbsite. La liaison assez faible permet l'introduction de l'eau. Les argiles contenant un pourcentage important de chlorite (> 15%) peuvent donc être sujettes au gonflement.

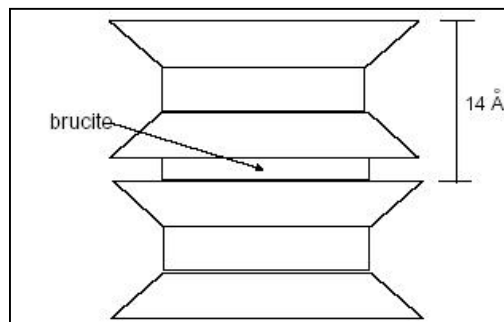


Figure I.19 : Schéma de la particule de chlorite (Huder J. & Amberg G., 1970)

#### VI.4 Minéraux interstratifiés

Ce sont des minéraux argileux dans lesquels alternent de façon plus ou moins régulière des feuillets de natures différentes ou, le plus souvent des espaces interfoliaires différents par exemple illite-montmorillonite, illite-chlorite. Les interstratifiés sont les étapes des transformations d'un minéral argileux à l'autre.

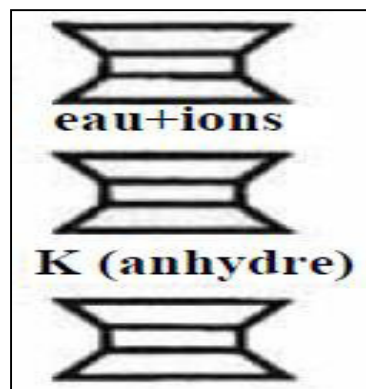


Figure I.20 : Interstratifiés (Huder J. & Amberg G., 1970)

#### VI.5 Autres minéraux argileux

Il y a une douzaine de minéraux argileux qui représentent particulièrement toutes les combinaisons possibles d'ion substituées, d'eau dans l'espace entre les couches et de cation changeables. Les minéraux les plus fréquents sont :

##### ■ L'attapulgite

Encore appelée palygorskites (de Palygorsk, province de Perm, ex URSS), l'attapulgite est un minéral argileux qui n'a pas de structure en feuillets ; elle est constituée d'une chaîne de silicate et a la forme d'une aiguille ou d'une tige de l'ordre de **1 à 3 microns** de long. D'après les recommandations de l'Association Internationale pour l'Étude des Argiles, le terme "palygorskite" devrait être employé en priorité. Mais on utilise généralement le terme

"attapulгите" pour qualifier les argiles de ce type exploitées en carrière et ayant des applications industrielles (attapulгите du Sénégal ou des USA par exemple).

### ■ L'allophane

C'est un silicate d'aluminium, on la classifie souvent comme un minéral argileux. Elle est cependant amorphe, ce qui signifie qu'elle n'a pas de structure cristalline régulière. Dans certaines conditions particulières d'altération, elle devient parfois une composante importante de sols argileux.

La synthèse des grands types d'argiles étant établie ; nous allons, dans le chapitre suivant, nous intéresser aux argiles expansives c'est-à-dire argiles gonflantes et comment peut-on expliquer leur comportement ?

## VII Localisation des sols argileux au Bénin

. Les principaux types de sols au 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 retraites.

Morphologiquement, il est établi que les sols gonflants aussi appelés sols expansifs sont des vertisols ou des sous-groupes de vertic d'autres ordres ayant une propriété commune, l'instabilité à cause du gonflement.

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>.

On retrouve également les sols gonflants sur certaines alluvions argileuses des fleuves Mono, Ouémé et Niger et dans le centre du pays où ils se localisent sur des secteurs bien circonscrits : le secteur des gabbros de Mbétékourou, à l'est de Dassa- Zoumè, sur des diorites, à l'est de Setto et au sud de Logozohè sur des embréchites et basiques diverses. Aussi, on dénombre des poches d'argiles et de tourbe autour du lac Nokoué, de la rivière Djonou à Godomey, et de la lagune de Porto-Novo.

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 des 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.

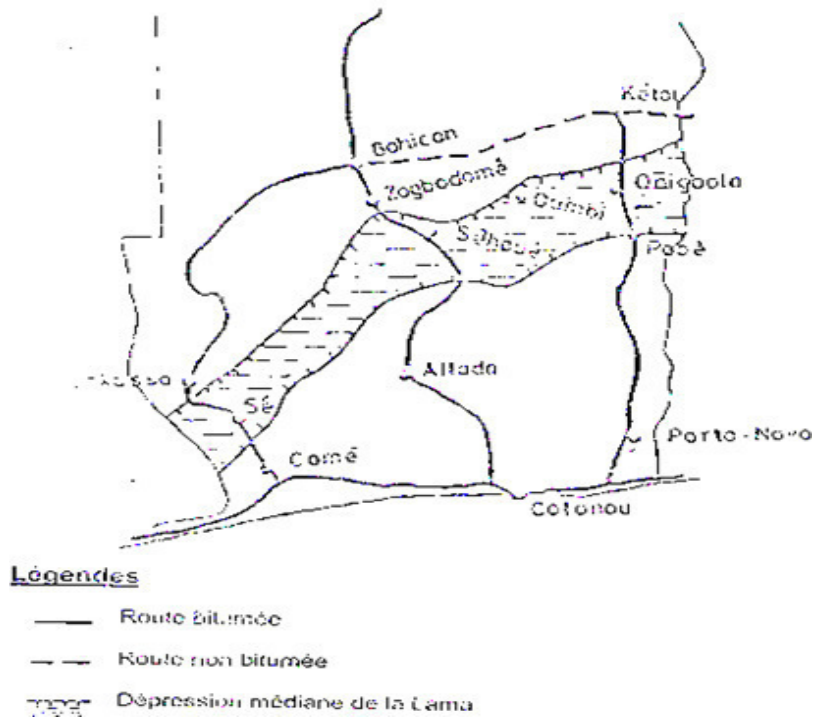


Figure I.21 Bénin

**L**es argiles de la dépression de la Lama situé au sud du Bénin requiert des études minutieuses afin de connaître rigoureusement et de prendre en compte leur nature minéralogique, chimique et mécanique dans les conceptions des infrastructures.

2

# **CHAPITRE 2 : Généralités sur le gonflement et la perméabilité**

## **I Gonflement**

### **I.1 Gonflement au sens physico-chimique**

Les particules argileuses sont de type colloïdal, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas contrôlées par des forces gravitationnelles, mais par des forces de surface. Celles-ci provoquent donc le phénomène de gonflement dont le mécanisme peut se produire à deux niveaux : aux niveaux interfoliaire et interparticulaire (Didier G., 1972).

#### **I.1.1 Gonflement interfoliaire**

Le gonflement interfoliaire ou intraparticulaire résulte de l'introduction de molécules d'eau à l'intérieur des particules d'argiles, entre les feuillets élémentaires. Les caractéristiques de ce gonflement dépendent essentiellement de la structure du minéral gonflant. Le gonflement devient notable lorsque l'eau peut pénétrer entre les feuillets d'argile et créer une juxtaposition de plusieurs couches mono moléculaires d'eau.

En effet lors de l'hydratation d'une éprouvette d'argile sèche, l'eau pénètre à l'intérieur des particules (dans l'espace interfoliaire) et s'organise en couches moléculaire, puis interagit avec les feuillets et les cations déjà présents. Cette hydratation favorise la création d'une pression, appelée pression de disjonction, qui a pour conséquences une augmentation de la distance interfoliaire et donc un gonflement de l'ensemble des deux feuillets : c'est le gonflement cristallin. Ce gonflement n'est possible que lorsque les liaisons interfeuillelet sont très faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. C'est le cas par exemple de la montmorillonite. Le phénomène de gonflement est influencé par la nature des cations interfoliaires. Ainsi la montmorillonite sodique ( $\text{Na}^+$ ) gonfle plus que la montmorillonite calcique ( $\text{Ca}^{2+}$ ). L'eau se répartit alors plus facilement à la surface du feuillet. Dans les argiles illitiques, le gonflement cristallin est très faible et il est quasiment inexistant dans les kaolinites. Ce type de gonflement ne représente environs qu'une dizaine de pourcentage du gonflement macroscopique total. Il est donc

nécessaire d'envisager un autre mécanisme de gonflement que celui relevant des seules variations interfoliaires.

### **I.1.2 Gonflement interparticulaire**

Le gonflement interparticulaire est dû à l'**attraction** entre les **particules d'argile chargées négativement en surface et la charge positive du dipôle des molécules d'eau**. Sur la surface des particules d'argile, se fixe ainsi une première couche d'eau dont les extrémités négatives attirent à leur tour une seconde couche et ainsi de suite. Mais l'orientation préférentielle des premières couches d'eau autour de la particule d'argile tend à diminuer pour les couches d'eau plus lointaines, la transition entre l'eau liée et l'eau libre interstitielle étant graduelle. Ce mécanisme existe pour tous les minéraux.

En effet l'absorption des cations par les particules argileuses et la formation de la double couche diffuse sont responsables de la répulsion de deux particules. Dans une argile sèche, les cations sont très fortement absorbés à la surface des feuillets argileux. Les cations en excès de ceux nécessaires à assurer l'électroneutralité des particules argileuses et les anions associés sont présents sous forme de sels. Si l'argile sèche est placée au contact de l'eau, les sels se dissolvent dans la solution, mais les différents ions se répartissent de manière non homogène : la concentration en cation devient très forte au voisinage des surfaces argileuses (surfaces externes), tandis que les anions ont plutôt tendance à s'éloigner des surfaces argileuses. La zone perturbée, ainsi créée par cette répartition non-homogène de cation et d'anion est la *double couche diffuse*. Comme cette dernière est chargée positivement, l'électroneutralité du système (argile/couche diffuse) est alors assurée (Bolt 1956 ; Mitchell 1976 cité par Coussy et al. 1998).

La théorie de la double couche diffuse a permis de démontrer mathématiquement que le recouvrement de deux couches diffuses de même signe est responsable de la répulsion de deux particules. Appliquée à la multitude de particules constituant une éprouvette d'argile, cette théorie permet donc d'expliquer le gonflement à l'échelle macroscopique.

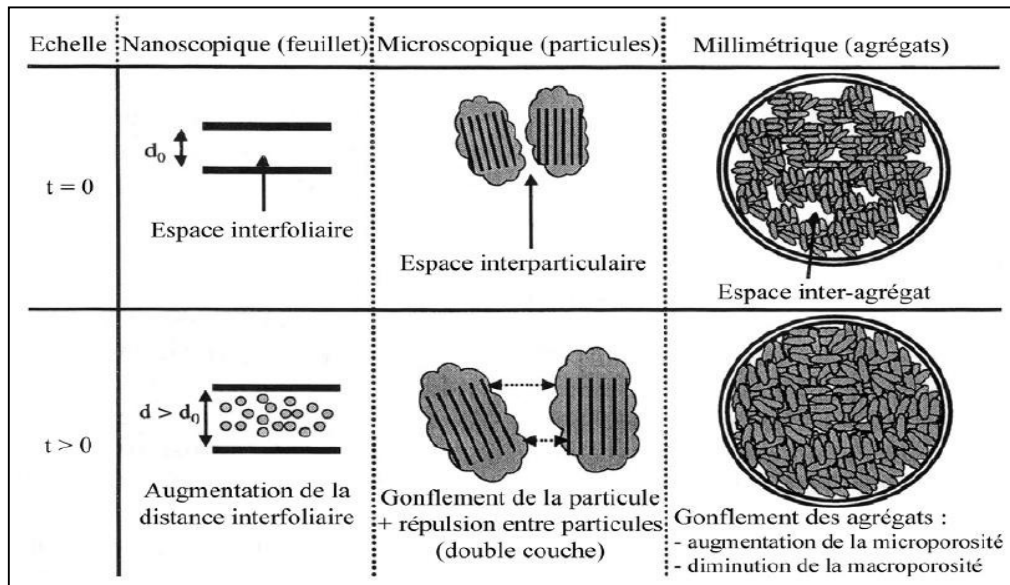


Figure II.1: Schéma présentant les différentes origines du gonflement (Gens et Alonso, 1992)

### I.1.3 Facteurs de gonflement

Nous pouvons citer en premier lieu **les forces électrostatiques**. La montmorillonite présente une attraction électrique plus élevée que la kaolinite ou l'illite. Cela est dû aux chargements négatifs sur les interfaces et à la surface spécifique plus élevée. Les échanges avec les cations présents dans l'eau sont donc également plus importants dans le cas de la montmorillonite.

Comme les forces électrostatiques, celles de **Van der Waals** font aussi partie des forces surfaciques qui favorisent le gonflement. Il s'agit de forces intermoléculaires qui dépendent de la polarité et de la distance entre les particules.

Parmi les facteurs de gonflement, on apostille **la pression osmotique** qui joue un rôle important dans le phénomène de gonflement. Elle est due à la concentration plus élevée en cations dans l'eau adsorbée à proximité des particules. Lorsqu'une contrainte extérieure est appliquée, la distance qui sépare les particules diminue et l'eau est expulsée. En conséquence, la concentration des cations et la pression osmotique augmentent. L'état

d'équilibre est atteint quand la pression osmotique est égale à la pression extérieure appliquée. On observe le phénomène contraire lorsqu'on diminue la pression extérieure. La diminution de la pression osmotique résultante provoque une succion de liquides pour diminuer la concentration des ions. La distance entre les particules est donc augmentée et le sol gonfle.

Ainsi, le phénomène de gonflement est non seulement lié aux forces intermoléculaires de l'argile, aux forces d'interaction avec les liquides, mais encore à la pression extérieure appliquée (HENDRIKS, 2008).

### **I.2 Gonflement au sens mécanique**

Le phénomène de gonflement, ainsi que le tassement, peuvent provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Il est donc important de rappeler les bases de la mécanique des sols appliquées à l'état de contraintes dans un sol.

#### **I.2.1 Contraintes dans un sol**

Un sol est un système constitué de 3 phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau en général) et une phase gazeuse (bulles d'air ou film d'air continu). Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire si tous les vides inter particulaires sont occupés par l'eau. Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale  $\sigma$  (géostatique ou surcharge extérieure), cette dernière se décompose en :

$$\sigma = \sigma' + u \quad (\text{Postulat de Terzaghi}) \quad (\text{Formule 4.1})$$

$u$  : désignant la pression interstitielle à savoir la pression de l'eau des pores et

$\sigma'$  : la contrainte effective, c'est-à-dire la contrainte qui s'exerce réellement sur le squelette solide. Si le sol est sec, la pression interstitielle  $u$  est nulle et on a :

$$\sigma = \sigma' \quad (\text{Formule 4.2})$$

Si l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une cote  $z$ , la pression interstitielle est égale à la pression exercée par la colonne d'eau sus-jacente soit :

$$u = \gamma_w \cdot z \quad (\text{Formule 4.3})$$

Avec  $\gamma_w$  le poids volumique de l'eau

Par contre s'il se situe au-dessus de la nappe phréatique, il peut être saturé ou non, selon les caractéristiques du matériau qui le compose et la distance qui le sépare du toit de la nappe.

L'attraction entre les molécules adjacentes à la surface d'un fluide (tension de surface) lui permet de s'élever dans un capillaire au-dessus de la ligne de pression atmosphérique. La hauteur de fluide dans le capillaire est donnée par la loi de Jurin :

$$H_{cap} = \frac{2 \cdot \sigma_{cap} \cos \theta_{cap}}{\gamma_{fl} r_{cap}} \quad (\text{Formule 4.4})$$

Où :

$H_{cap}$  est la hauteur de capillarité

$\sigma_{cap}$ , la tension de surface ;

$r_{cap}$ , rayon capillaire ;

$\theta_{cap}$ , l'angle de contact solide/fluide et

$\gamma_{fl}$ , le poids volumique du fluide.

C'est ce phénomène qui permet à un sol de retenir de l'eau au-dessus du toit de la nappe, par l'intermédiaire de son réseau poreux. Il est caractérisé par une pression interstitielle négative appelée suction.

Si, l'élément de terrain n'est pas saturé, la pression interstitielle négative est fonction de la pression d'eau  $u_w$  et de la pression d'air  $u_a$  dans le sol. Bishop a proposé une pression interstitielle équivalente  $u^*$  définie par :

$$u^* = u_a + \chi (u_w - u_a) \quad (\text{Formule 4.5})$$

où

$\chi$  : est un coefficient qui dépend du degré de saturation du sol : il varie entre **0 et 1** et est égal à 1 pour un sol saturé.

### **1.2.2 Gonflement dû à une modification de l'état de contraintes**

Considérons un élément de sol saturé à l'équilibre. Si une contrainte extérieure  $\sigma_e$  est appliquée à cet élément de sol, celle-ci est immédiatement reprise par la phase liquide et au temps initial  $t = 0$  on a :

$$u = \sigma_e \quad (\text{Formule 4.6})$$

$$\sigma' = 0$$

Si l'on permet alors au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, correspondant à l'évacuation de l'eau et au transfert de contrainte de l'eau sur le squelette solide. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes :

$$u = 0 \quad (\text{Formule 4.7})$$

$$\sigma' = \sigma_e$$

Si la contrainte  $\sigma_e$  est alors supprimée, le même phénomène se produit, et immédiatement :

$$u = -\sigma_e \quad (\text{Formule 4.8})$$

$$\sigma' = \sigma_e$$

La pression interstitielle devient négative (dans le domaine des succions) et opposée à la variation de contrainte totale. Dans des conditions de libre accès de l'eau, un phénomène de gonflement va se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert de contrainte négative de l'eau sur le squelette solide, jusqu'à l'état final :

$$\sigma' = 0$$

(Formule 4.9)

*Nous déduisons que la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à son annulation alors que le gonflement exprime la diminution de la succion ( $-u$ ) jusqu'à son annulation.*

### **1.2.3 Cinétique du gonflement**

Le processus du gonflement est gouverné par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée dans le temps à l'échelle macroscopique. Les résultats d'un essai de gonflement réalisé par la méthode de Huder et Amberg (1970) sont donnés sur la figure 2.

L'éprouvette est mise en place dans un œdomètre et elle est soumise à un cycle de chargement-déchargement-rechargement par paliers (1, 2, 3) dans son état naturel, à une imbibition (4) puis à des paliers de déchargement sous imbibition (5), notés p1 à p14. La figure II.2 représente la courbe contrainte-déformation exprimée par l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la contrainte totale  $\sigma_a$  obtenue à la fin de chaque palier.

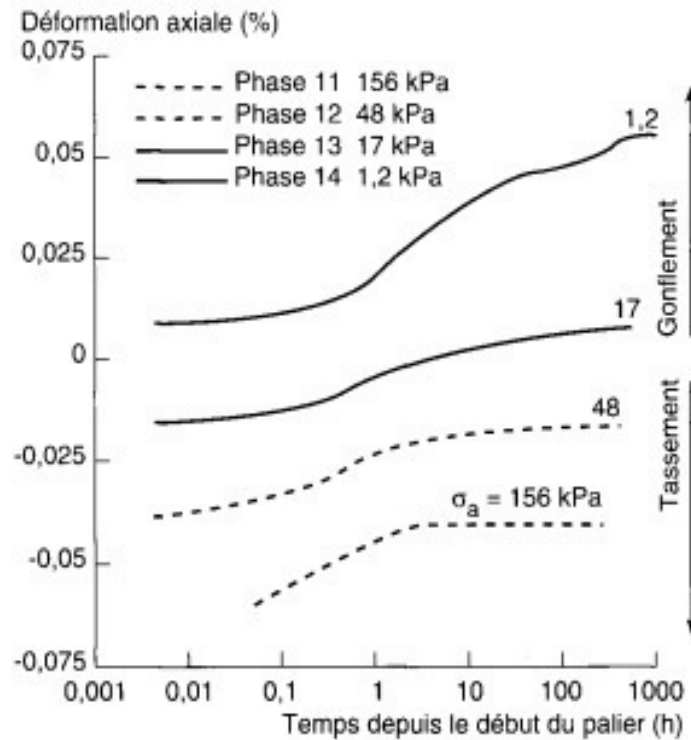


Figure II.2 : Courbes de gonflement en fonction du temps (échelle logarithmique) pour les paliers de déchargement p11 à p14 (séquence 5)

Les courbes de gonflement atteintes pendant chacun des paliers de déchargement sous imbibition (phases 11 à 14) sont représentées dans le plan  $(\lg t, \epsilon_a)$ , où  $t$  est le temps de puis le début du palier et  $\epsilon_a$  la déformation axiale (positive pour un gonflement). Ces courbes montrent que la déformation, pendant chacun des paliers, peut se décomposer en un gonflement primaire et un gonflement secondaire à l'image de la consolidation hydrodynamique des sols, mais dans une direction opposée.

De très nombreux travaux expérimentaux font apparaître ce type de cinétique (Ladd et Lambe, 1961; Seed et al., 1962; Blight, 1965; Parcher et Liu, 1965; Baker et Kassif, 1968; Komornik et Zeitlen, 1970; Kassif et Ben Shalom, 1973, etc.). La première phase de gonflement, avec la migration de l'eau dans l'éprouvette à partir de ses extrémités, relève d'un processus de diffusion. Elle est plus ou moins lente suivant la nature du matériau, son état et selon l'état de chargement, et dure quelques heures. Mais cette phase peut être très lente

dont le «temps de gonflement» (par analogie au temps de consolidation) dépasse un mois dans les mêmes conditions d'essai.

La phase de gonflement secondaire est plus problématique, car la direction de la déformation de gonflement est opposée à celle du chargement contrairement au fluage qui produit des déformations de compression sous des charges de compression.

En tout cas, la cinétique du gonflement est alors très lente et dépend du Niveau de chargement. Pour les faibles charges, il est souvent impossible d'atteindre un équilibre dans des conditions raisonnables de réalisation des essais en laboratoire. Ces faibles vitesses de déformation de gonflement sont en accord avec les observations faites dans les massifs de sol ou de roche, autour des tunnels notamment, où le processus du gonflement peut se dérouler pendant plusieurs années, voire plusieurs décennies (Didieretal.,1984; Steiner,1993).

La modélisation de l'évolution du gonflement en fonction du temps a été proposée par différents auteurs en considérant la dissipation de la succion (Baker et Kassif,1968), ou en distinguant une phase de gonflement primaire, avec la diffusion de l'eau dans les pores, d'une phase de gonflement secondaire d'hydratation des minéraux argileux (Alons oetal., 1989; Gensetal., 1993). D'un point de vue empirique, certains auteurs (Dakshanamurthy, 1978; Sridharanetal., 1986; Didieretal., 1987) préconisent de représenter la cinétique du gonflement par une loi hyperbolique, d'autres par une loi logarithmique ou une loi puissance.

### **1.2.4 Propriétés de l'environnement**

Observons attentivement les variations d'humidité. Les plus grandes variations se déroulent au niveau de la surface sur laquelle se produisent la succion et l'évaporation. On observe donc les plus grandes variations de volume à la surface. En outre, les variations d'humidité du sol sont conditionnées par la fluctuation de la nappe phréatique. Les facteurs locaux

qui font varier la teneur en eau peuvent être de type artificiel ou de type naturel.

D'une part, on peut citer les systèmes de drainage qui doivent être placés avec précaution et, d'autre part, les plantes, telles que les arbres ou les herbes, qui peuvent provoquer d'importantes variations d'humidité. Il est donc important de ne pas construire à trop grande proximité de ces éléments qui provoquent des variations considérables.

La nature du sol modifie aussi les conditions de variation d'eau. Il est connu qu'un sol, sensible aux variations hydriques, présente des fissures profondes après la phase de retrait. Ainsi, l'eau s'infiltré plus rapidement dans ce sol fissuré, ce qui amplifie la variation de teneur en eau et donc le gonflement.

A la plus grande échelle, c'est le climat qui conditionne la teneur en eau des sols. Les variations de teneur en eau sont particulièrement prononcées dans un climat semi-aride où le sol présente une très faible teneur en eau pendant les périodes sèches. Par contre, pendant les périodes de pluie, le sol peut être complètement saturé. Il peut donc atteindre toute l'amplitude de son potentiel de gonflement. Ce phénomène s'aggrave lorsque l'on tient compte de la température élevée qui règne le plus souvent dans ces pays et qui favorise encore l'évaporation rapide de l'eau. Finalement, il importe de connaître l'histoire de chargement du sol car des essais ont montré que des sols surconsolidés présentent un potentiel de gonflement plus élevé et on comprendra qu'un chargement important empêche le gonflement du sol. Même le poids du sol dans son positionnement naturel peut donc influencer, voire annuler le potentiel de gonflement d'une couche donnée. Par ailleurs, les cycles d'humidification influencent le potentiel de gonflement. Les expériences ont montré que l'amplitude des variations de volume diminue après quelques cycles de gonflement et que d'autres facteurs peuvent aussi influencer le gonflement.

### **I.2.5 Facteurs d'influence**

Le potentiel de gonflement dépend tout d'abord de la structure minéralogique du sol. Nous avons vu que c'est principalement la microstructure de la montmorillonite qui représente un danger de gonflement. Cela est dû aux faibles forces d'attraction entre les atomes. La taille des particules joue également un rôle très important. Plus les particules sont petites, plus la surface spécifique et le potentiel de réaction sont grands. Cela est encore amplifié par la forme allongée des feuillets qui augmente davantage la surface spécifique sur laquelle se déroule la réaction avec l'eau provoquant le gonflement.

La teneur en eau du sol est prépondérante pour l'amplitude de gonflement. Un sol humide indique que les variations de volume ont déjà eu lieu alors qu'un sol sec présente encore toute son amplitude de gonflement. Cependant, il faut non seulement examiner la valeur initiale de la teneur en eau, mais aussi, et surtout, l'amplitude des variations de l'humidité car ce sont ces dernières qui déclenchent le phénomène. Il est évident que la nature du liquide influence aussi les réactions surfaciques et, par la même occasion, le potentiel de gonflement. On s'intéresse donc à la composition chimique de l'eau, toujours présente dans le sol. Le nombre et la nature des cations en solution déterminent l'amplitude de réaction. La succion du sol constitue un autre élément très important qui ne dépend pas seulement du degré de saturation, mais de nombreux autres facteurs, comme le nombre, la forme et la taille des vides. Par ailleurs, les caractéristiques chimiques et électriques du sol et de l'eau sont déterminantes au niveau de la succion. L'état de contrainte fait également varier la pression négative dans les pores ainsi que les pressions surfaciques qui déterminent la succion.

De plus, la densité sèche du sol influence l'amplitude de gonflement. Plus les particules sont proches les unes des autres, plus les forces répulsives sont grandes. Cela augmente le potentiel de réaction avec un liquide. On peut donc dire que le potentiel de gonflement augmente avec la densité sèche du sol.

## II Méthodes de mesure de la perméabilité saturée

### II.1 Mesures en régime permanent

#### II.1.1 Essai à charge constante

Cette méthode de mesure consiste à maintenir une charge hydraulique constante dans l'échantillon. Le flux traversant l'échantillon est engendré par un gradient de charge hydraulique constant. Les conditions du régime permanent seront atteintes lorsque le débit d'eau entrant est égal au débit sortant de l'échantillon. La perméabilité est calculée en utilisant la loi de Darcy.

Cette méthode de mesure peut être appliquée aussi bien aux échantillons intacts qu'aux échantillons remaniés. Il est certain qu'avec cette méthode, on peut obtenir des résultats assez précis mais elles présentent des temps d'essais assez importants.

#### II.1.2 Essai à charge variable

Cette procédure d'essai est généralement employée pour les sols fins qui présentent des coefficients de perméabilité assez faibles ( $<10^{-7}$  m/s). Le sol à étudier est placé dans le perméamètre (figure II.3). On mesure le temps nécessaire pour que le niveau de l'eau descende du niveau  $h_1$  au niveau  $h_2$ . On se trouve bien dans le cas d'un écoulement à une dimension, et on peut appliquer la loi de Darcy pour chaque intervalle élémentaire de temps ( $t, t+dt$ ).

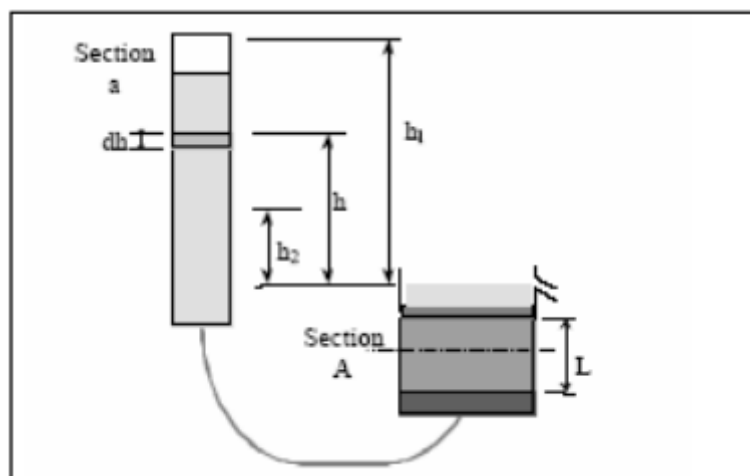


Figure II.3 : Procédure d'essai à charge variable

Avec :

A : section de l'échantillon;

L : hauteur de l'échantillon;

a : section du tube où s'effectuent les lectures.

$h_i$  : charge hydraulique à l'instant  $t_i$ .

La perméabilité est donnée par l'expression suivante :

$$K = 2,3a/A * L / (t_2 - t_1) * \log h_1 / \log h_2$$

On remarque que pour avoir une bonne précision, il faut avoir un tube de petite section mais dans lequel les effets capillaires doivent rester négligeables.

### II.1.3 Mesure de la perméabilité dans l'œdoperméamètre

Le principe de l'appareillage est reproduit sur la figure II.4, un échantillon de sol est placé dans une enceinte cylindrique rigide de section circulaire entre deux pierres poreuses assurant son drainage. Un piston permet d'appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme constante pendant un temps déterminé. On peut établir des courbes de compressibilité (indice des vides en fonction de la contrainte) et de consolidation (variation relative de tassement en fonction du logarithme du temps).

Pour mesurer la perméabilité, le sol peut être donc consolidé et on calcule la perméabilité à partir du taux de consolidation :

$$K = C_v * \gamma_w / E'$$

$C_v$  : coefficient de consolidation,  $E'$  : module œdométrique.

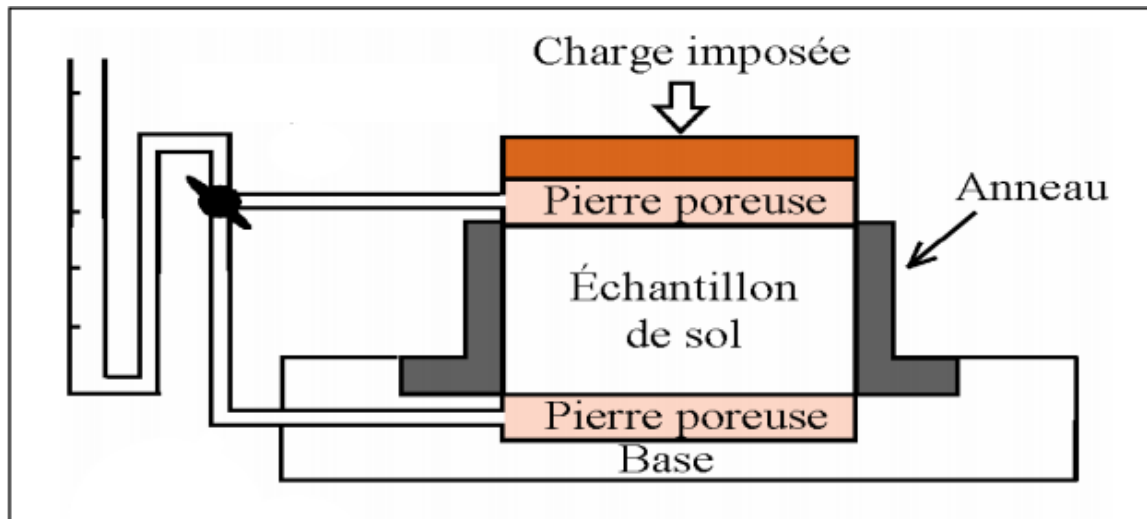


Figure II.4 : essai oedométrique

L'avantage d'appliquer une charge verticale sur la surface supérieure de l'échantillon est :

- de réduire l'écoulement différentiel sur le contour de l'échantillon.
- de reproduire les conditions de chargement in situ.
- de suivre l'évolution de  $k$  en fonction de l'indice des vides ou du degré de consolidation.

## II.2 Mesures en régime non permanent

### II.2.1 Essai de choc impulsif dit pulse test

Brace et al. (1968) ont initialement introduit la méthode pulse en mécanique des roches et ont employé avec succès cette technique pour estimer la perméabilité du granite de Westerly sous de fortes pressions de confinement. Depuis, la technique par impulsion est reconnue comme une méthode fiable pour déterminer la perméabilité des roches. Plusieurs auteurs ont ensuite contribué à sa généralisation. Le concept de base de cette technique consiste à relier les extrémités d'un échantillon de sol ou de roche à deux réservoirs de liquide ; à l'instant  $t$ , on impose une légère augmentation de la pression du liquide dans l'un des deux réservoirs (réservoir supérieur). L'observation de la dissipation de la pression en fonction du temps permet la détermination de la perméabilité.

### **II.2.2 Essai harmonique**

Cette méthode a été développée par Jouanna (1981), Kranz et al. (1990) et Fisher (1992). Le principe consiste à relier les extrémités d'un échantillon de sol à deux réservoirs de liquide ; à l'instant  $t$ , on crée une onde de pression sinusoïdale dans le réservoir supérieur de l'échantillon.

Cette onde se propage à travers l'échantillon, s'atténue et donne lieu à une onde déphasée par rapport au signal initial. La mesure dans le réservoir inférieur du rapport des amplitudes et de déphasage des deux ondes permet la détermination de la perméabilité  $k$ .

## **II.3 Méthodes de mesure de la perméabilité non saturée**

### **II.3.1 Mesures en régime permanent**

Ces mesures sont réalisées selon le même principe que pour les essais saturés. La succion, et par conséquent la teneur en eau volumique du sol sont maintenues constantes. La perméabilité, qui dépend de la succion et donc de la teneur en eau imposée, est calculée de la même manière que dans un essai de perméabilité classique pour sols saturés en appliquant la loi de Darcy généralisée. Cette procédure est répétée pour différentes valeurs de succion ou de teneur en eau afin d'établir les relations  $k(\theta)$  et  $k(\psi)$ .

### **II.3.2 Mesures en régime non permanent**

#### **■ Méthode des profils instantanés**

La méthode consiste à imposer une infiltration ou un drainage à une des extrémités d'une colonne de sol et à mesurer la variation spatio-temporelle de l'humidité ( $\theta(z,t)$ ).

#### **■ Méthode à contre pression d'air**

Cette méthode est basée sur la mesure de la diminution de l'écoulement d'eau dans un échantillon de sol placé dans un appareil de Richards (figure II.5) quand la pression est augmentée d'une certaine quantité, autrement dit ; la procédure consiste à appliquer de faibles incréments de pression  $\Delta p$  de

façon à provoquer soit un drainage ( $\Delta u > 0$ ), soit une imbibition ( $\Delta p < 0$ ). A chaque application de l'incrément de pression, on mesure le débit écoulé au cours du temps, et ce, jusqu'à ce que l'équilibre hydrique dans le sol soit atteint.

### ■ Méthode osmotique

Cette méthode utilise un oedomètre à succion contrôlée (figure II.6) pour provoquer un écoulement dans un échantillon en utilisant une solution osmotique à une certaine concentration en PEG 20000.

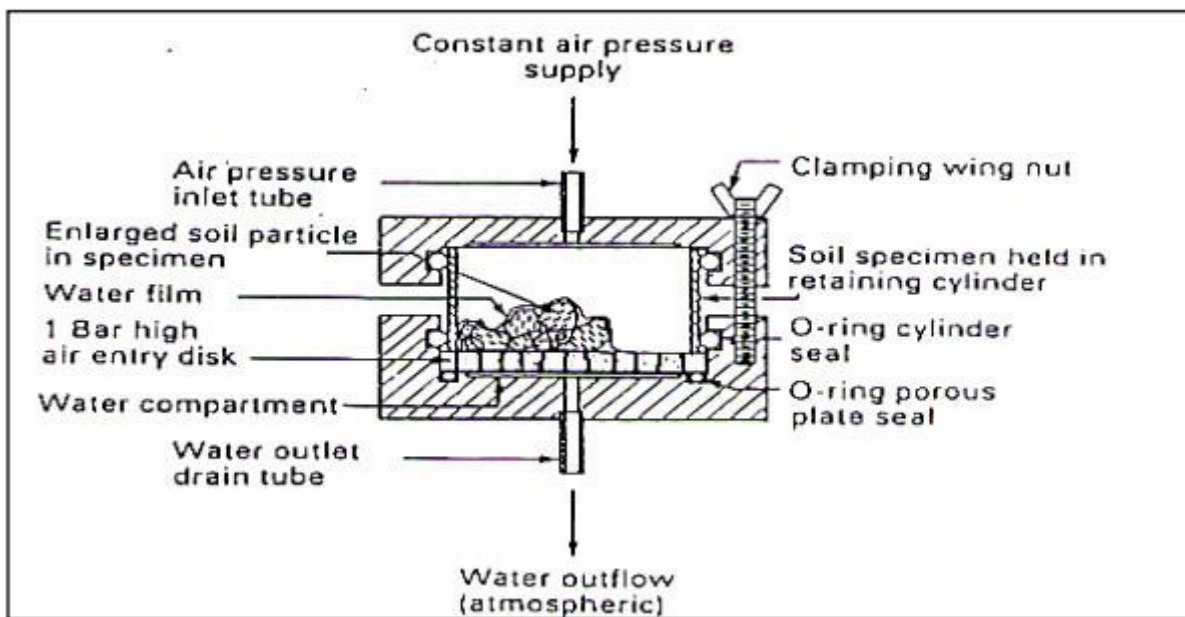


Figure II.5 : Appareil de Richard (Soil Moisture Equipment Corporation, 1985 cité par Sayad Gaidi C. 2003)

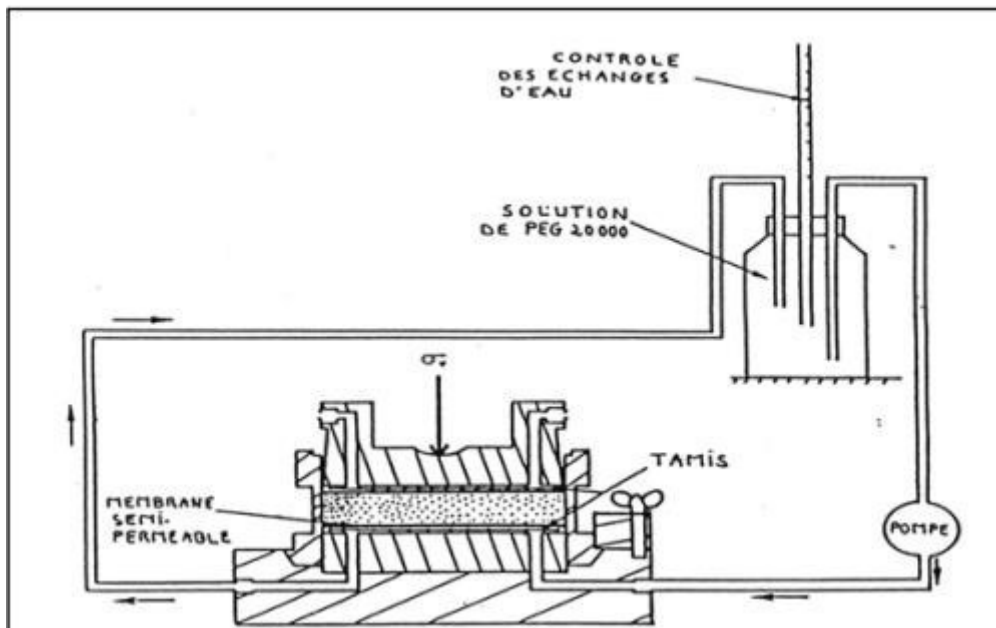


Figure II.6 : CEdomètre à succion contrôlée (Vicol, 1990)

**PARTIE 2 : Matériaux, matériels et  
méthodologie de recherche**

## **CHAPITRE 3 : Milieu d'étude**

**D**e par notre objectif général, notre étude s'intéresse à la commune de HOUEYOGBE située dans bassin sédimentaire côtier de la République du Bénin. En se penchant sur l'étude générale des sols du Bénin, les recherches et réflexions issues de la quatorzième réunion du Sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols qui s'est tenu à Abomey du 09 au 13 Octobre 2000 stipulent que ces sols se sont formés à partir des roches sédimentaires, du socle cristallin et des dépôts alluviaux et ont été corrélés avec la BRM. Avant de nous atteler à leur étude il est important que nous présentions les facteurs qui favorisent ou qui sont à l'origine de leur présence au Bénin.

### **I. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

La commune de Houéyogbé située au centre du département du Mono occupe une partie de la dépression de la Lama. Elle est limitée au Nord par les communes de Lokossa et de Bopa, au Sud par les communes de Comè et de Grand-Popo, à l'Est par la commune de Bopa et à l'Ouest par la commune d'Athiémè. Comprise entre 6°20' et 6°40' latitude Nord et 1°45' et 1°57' longitude Est, la Commune de Houéyogbé a une superficie de 320 km<sup>2</sup>, et s'étend sur 16,25 km du Nord au Sud et sur 13,75 km de l'Est à l'Ouest.

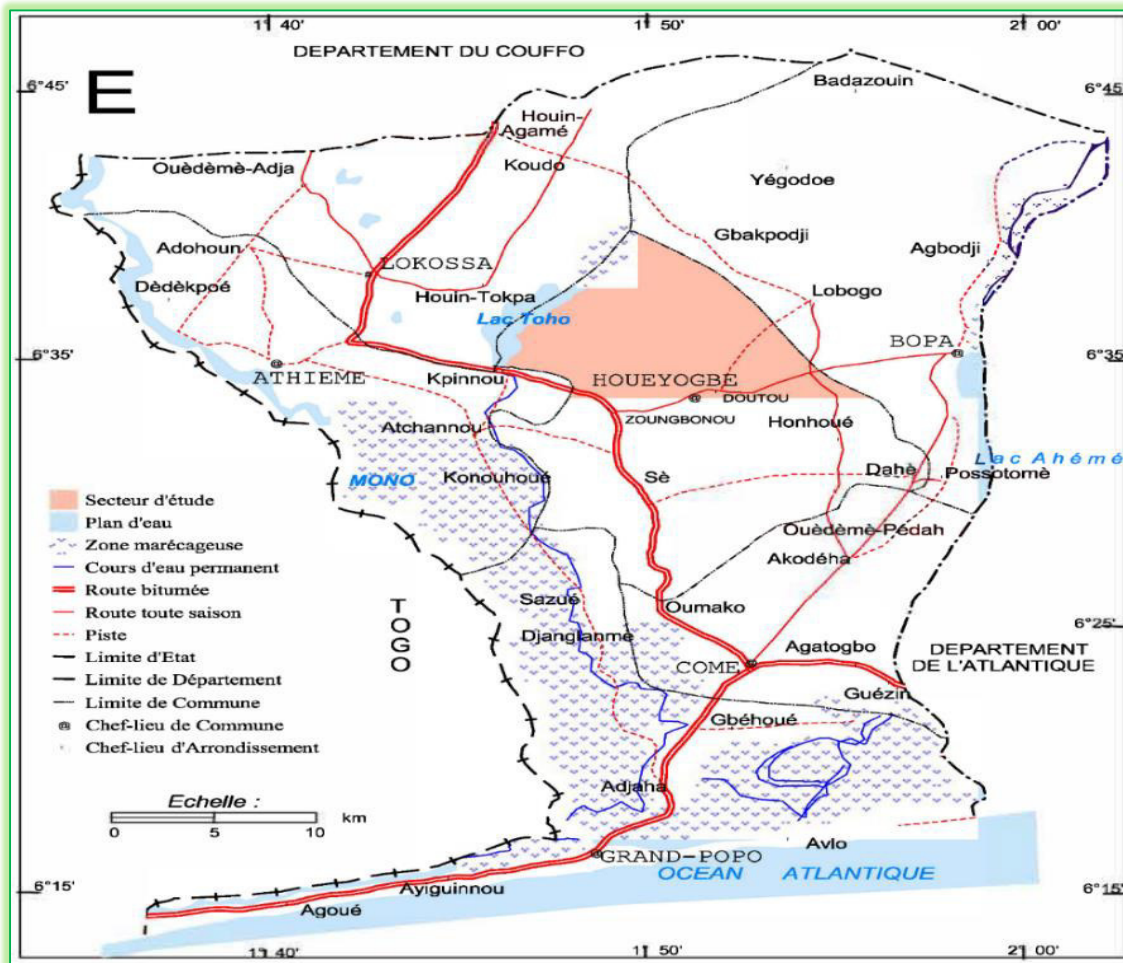


Figure III.1 : Carte du département du Mono

## II. POPULATION ET STRUCTURE ADMINISTRATIVE

La population de la commune de Houéyogbé est aujourd'hui estimée à 74.492 habitants (Recensement de 2004). Le taux d'accroissement annuel est de 2,65%. (RGPH-3)

La population de l'arrondissement de Doutou représente environ 30 % de la population communale. Il est suivi de l'arrondissement de Sè (environ 26%), de l'arrondissement de Dahè (environ 20%), de l'arrondissement de Zoungbonou (plus de 9%), de l'arrondissement de Houéyogbé (environ 9%) puis de l'arrondissement de Honhoué (environ 6%).

Avant 1986, la commune de Houéyogbé alors Sous-Préfecture selon le décret n° 78-356 de décembre 1978 portant limites et dénominations des circonscriptions administratives comptait quatre (4) communes : Dahè,

Doutou, Houéyogbé, Sè. C'est en 1986 que Honhoué et Zoungbonou sont érigés au rang de commune portant le nombre de communes à six (6), actuels arrondissements dans le contexte de la décentralisation. Les arrondissements sont subdivisés en cinquante neuf (59) villages dont vingt et un (21) quartiers de ville. L'arrondissement de :

- Dahè compte 10 villages et une population de 14 622 habitants,
- Doutou compte 17 villages et 22 099 habitants,
- Houéyogbé compte 7 villages et 6 640 habitants,
- Honhoué compte 5 villages et 4 648 habitants,
- Sè compte 14 villages et 19 630 habitants,
- Zoungbonou compte 6 villages 6 853 habitants.

Le pullulement de la démographique observé au cours de ces dernières années dans cette commune requiert donc la mise en place d'infrastructures pérennes dans l'optique de favoriser l'épanouissement de cette population.

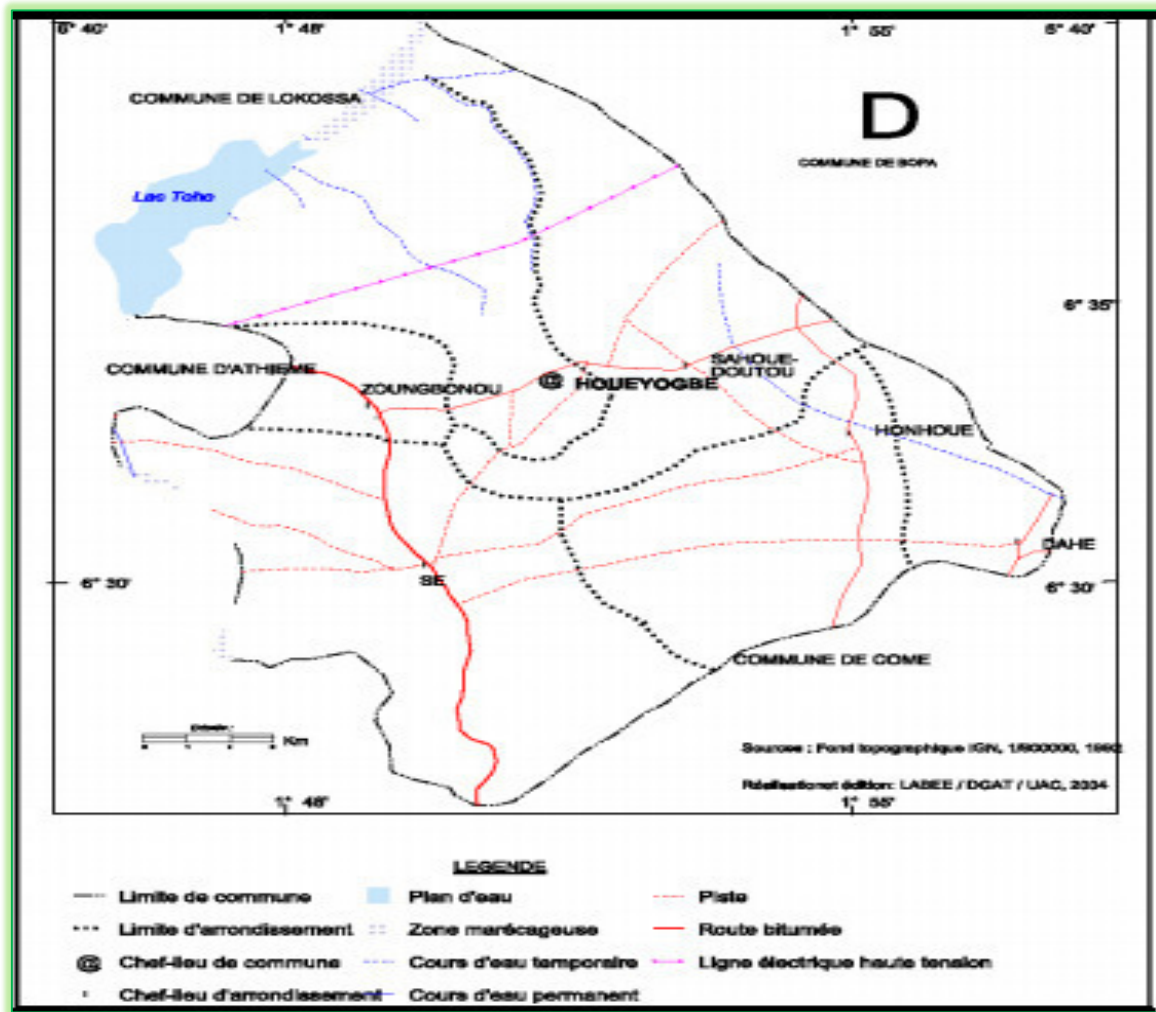


Figure III.2 : Carte de la Commune de Houéyogbé

### III. CLIMAT

Le climat est de type subéquatorial et est caractérisé par la succession annuelle de quatre saisons : deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses en alternance.

L'humidité relative moyenne (2001) est de 91 (matin), 62 (midi) et 70 (soir). La température sous abri (2001) est de 33,7 pour la moyenne des maxima et de 24°C pour la moyenne des minima.

Elle jouit donc d'un climat de type soudano guinéen caractéristique des régions du Sud-Bénin en général. Ce climat est marqué par deux saisons de pluies (mimars à mi- juillet et mi-septembre à mi-novembre) alternant avec deux saisons sèches (mi-novembre à mi-mars et mi-juillet à mi-septembre).

La moyenne de pluie pendant les dix (10) dernières années est de 936 mm. Les moyennes annuelles varient entre 1266,3 mm en 1997 et 618 mm en 1998. Les moyennes de températures varient entre 20, 74 °C et 33,03°C.

#### **IV. RELIEF ET SOLS**

Le milieu physique de la commune de Houéyogbé comprend trois formations:

- une zone de plateau aux sols ferrallitiques (région de Houéyogbé et de Dotou);
- une zone de vallée (Zoungbonou, Manonkpon, Davè et Honhoué) ;
- une zone de terre noire aux sols hydromorphes (Tokpa Tohonou et Sohounmè).

Il faut dire alors que les sols dans la commune de Houéyogbé sont en rapport avec les données géologiques et géomorphologiques. Ainsi, au Nord et précisément au Nord-Ouest (DOUTOU, HONHOUE) de la commune se rencontrent des sols peu évolués d'apport alluvio-colluvial, des sols ferrallitiques remaniés et des vertisols. Ceux-ci caractérisant tout particulièrement la dépression de la Lama. Ils sont très fertiles.

D'une façon générale, les vertisols comptent du point de vue chimique parmi les meilleurs sols ; leur fertilité potentielle est très élevée et elles constituent d'excellentes terres céréalières.

Du point de point de vue physique, ses sols présentent des désavantages car leur nature argileuse a une fâcheuse tendance à l'engorgement et à être inondés en saisons pluvieuses.

En saisons sèches, ils se dessèchent. Lors de ces dessiccations la rétraction de l'argile cause de larges fentes dans lesquelles s'accumule la matière organique ; ce qui explique les horizons riches en humus. Ces sols répondent favorablement à la riziculture et au maraîchage.

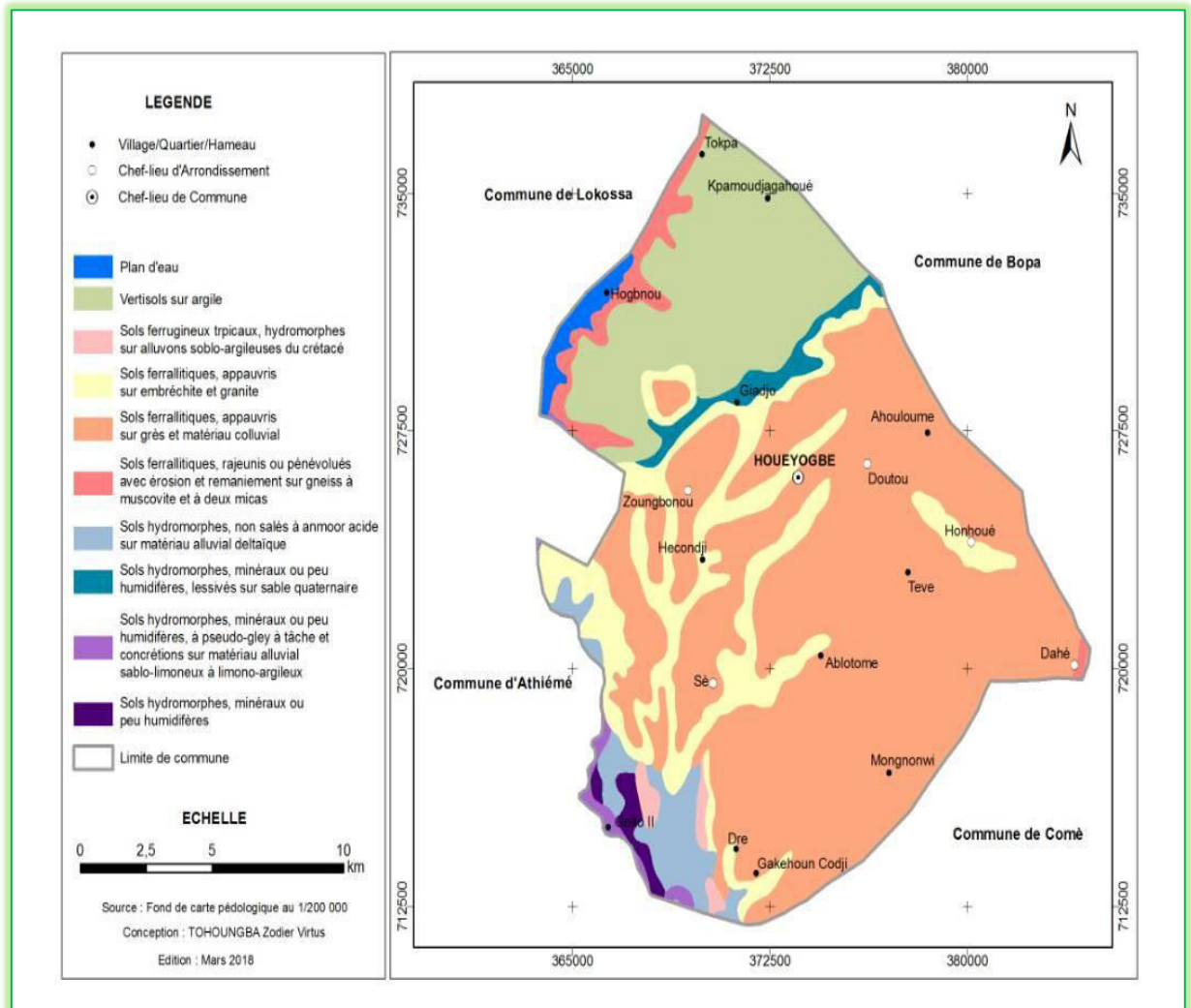


Figure III.3 : Carte Pédologique de Houéyogbé

## V. PRESENTATION DES SITES DE PRELEVEMENT

Les coordonnées géographiques en projection sont prises par rapport à la référence mondiale UTM WGS 84. Ainsi le tableau suivant nous renseigne sur les coordonnées géographiques de chaque site de prélèvements de même que la profondeur à laquelle ces derniers ont été réalisés.

Tableau III.1 : Localisation des sites de prélèvements

LOCALITES	COORDONNEES GEOGRAPHIQUES EN PROJECTION	PROFONDEUR DE PRELEVEMENT (m)
<b>DOTA</b>	31N0366676 0718416	1,50
<b>HOUNGA-HOUEGBE</b>	31N0368748 0730147	1,50
<b>SALAHOUÉ</b>	31N0367848 0729547	1.85
<b>SEWAKOMEY</b>	31N0370284 0725385	1,50
<b>SOHOUNME</b>	31N0365499 0721423	1,50
<b>TOHONOU 1</b>	31N0366649 0730393	1,50
<b>TOHONOU 2</b>	31N0364865 0729728	1,50
<b>TOKPA</b>	31N0371437 0729790	1,50
<b>ZONGO</b>	31N0367845 0726210	1,50

L'identification de notre zone d'étude en ce qui concerne entre autres ses phénomènes naturels et sa démographie nous a permis de localiser au mieux nos sites de prélèvement dans le dessein d'escamoter les péripéties qui vont inhiber l'obtention de prélèvements adéquats.

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



4

# **CHAPITRE 4 : Méthodologie de recherche**

**L**e thème faisant l'objet de notre étude requiert un certain nombre d'essais convenablement analysés et interprétés. Pour obtenir les résultats escomptés, il est impérieux de définir les matériels et les méthodes au moyens d'essais pour atteindre les objectifs visés. C'est à cette tâche que nous nous consacrerons dans cette partie de notre travail.

Nos essais d'indentification et ceux mécaniques ont été réalisés au Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP). Toute la méthodologie décrite dans le présent chapitre se base sur des normes françaises et des méthodes expérimentales appliquées rigoureusement dans ces différentes structures d'accueil.

### **I RECHERCHE ET LOCALISATION DE SITE**

Nous avons procédé à la recherche des sites en se servant au prime abord de la carte pédologique de la commune puis effectué une descente sur les lieux afin de définir des sites de prélèvement des échantillons sur la base des informations collectées et celles recueillies sur le terrain. Compte tenu des essais à réaliser (essais d'identification et mécaniques) nous avons procédé aux prélèvements des échantillons remaniés et non-remaniés.

Les formations argileuses se trouvent un peu partout dans le secteur d'étude . Des prélèvements y sont donc réalisés. La figure 26 ci-dessous indique la situation des différents puits de prélèvement.

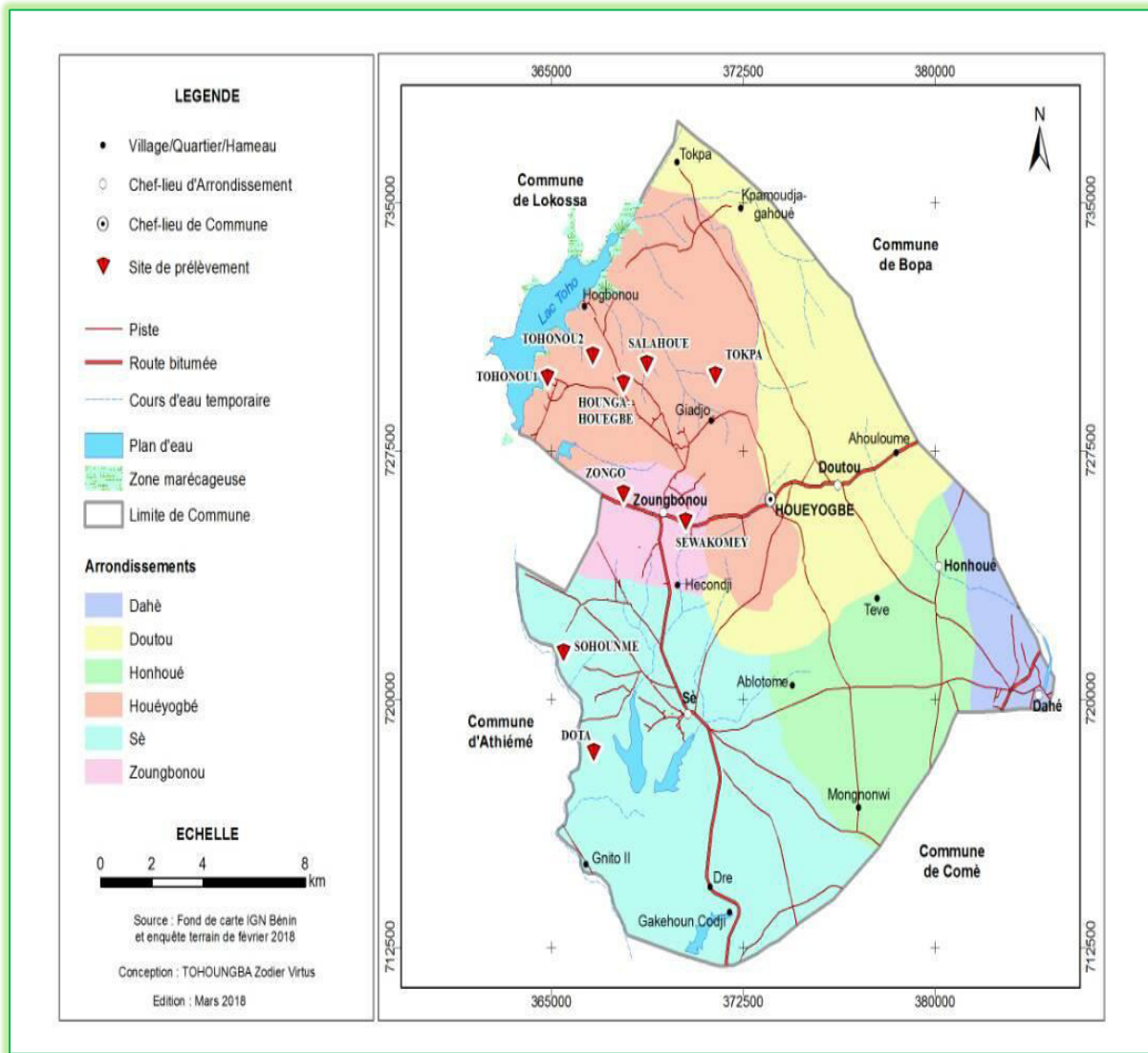


Figure IV.1 : Carte de prélèvements

## II PRELEVEMENTS

Nous avons procédé aux missions prélèvements dans les différentes régions du Mardi 28 Novembre au Samedi 02 Décembre 2017. Compte tenu des essais à réaliser, nous avons procédé à des prélèvements d'échantillons intacts et remaniés ; ce qui a nécessité l'utilisation des caisses cubiques pour le prélèvement d'échantillon intacts, de dames pour le battage, des caissons en bois pour le transport.

Pour chaque prélèvement, un puits de 1,5 m au moins de profondeur est creusé. A ce niveau, nous enfonçons des PCV cylindriques de diamètre 10cm et de hauteur 20cm par battage dans le sol en procédant de manière à ce que l'enfoncement soit le plus

uniforme possible. La terre située autour du cylindre est soigneusement enlevée. Afin de disposer d'échantillons dont les caractéristiques hydriques soient les plus proches possibles des conditions in situ au moment du prélèvement, de la paraffine est appliquée sur les deux faces libres du bloc et la boîte est disposée dans une caisse en bois conçue selon les dimensions du boîtier. De la sciure d'épaisseur 3cm est mise au fond du caisson en bois afin d'amortir les chocs lors du trafic. Les échantillons remaniés sont prélevés dans deux à trois sac de jute.



Photos IV.1 : Prélèvement d'échantillons

*Source : Cliché Isidore DHOSSOUVI, 2017*

### III DESCRIPTION DES ESSAIS

#### III.1 Essais d'identification

##### III.1.1 Essai de détermination de la teneur en eau pondérale (NFP 94-050)

Cet essai a pour but de déterminer la quantité d'eau contenu dans une masse humide d'échantillon prélevé et étuvé. Cette quantité d'eau est exprimée en pourcentage d'eau par rapport à sa masse sèche ; c'est la teneur en eau.

### **III.1.2 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)**

L'analyse granulométrique par tamisage est un essai d'identification qui permet de connaître la granulométrie d'un matériau tout en le faisant passer par une série de tamis normalisés. Elle a ainsi pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans un échantillon.

### **III.1.3 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057)**

L'essai d'analyse granulométriques par sédimentation est réalisé afin de compléter la courbe granulométrique par tamisage sur les particules de tailles inférieures à 80  $\mu\text{m}$ . L'essai est réalisé sur les passants issus du tamisage par voie humide lors de l'exécution de l'analyse granulométrique par tamisage.

### **III.1.4 Essai de détermination de la teneur en matière organique (XP P 94-055)**

Cet essai a pour objectif la détermination pour le tamisât du tamis 400  $\mu\text{m}$  d'un matériau humide la proportion de matière organique contenu dans 80g de son matériau sèche au moyen d'eau oxygéné.

### **III.1.5 Détermination du Poids spécifique des grains solides (NF P 94-054)**

**III.1.6 L'essai consiste en la détermination de la masse volumique des grains solides d'un échantillon de sol à l'aide de pycnomètre.**

### **III.1.7 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)**

Les limites d'Atterberg sont des paramètres d'identification des sols fins nous permettant de connaître la limite de liquidité ( $\omega_L$ ), de plasticité ( $\omega_P$ ) et l'indice de plasticité ( $I_p$ ).

### **III.1.8 Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)**

Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives, jusqu'à ce que les particules argileuses en soient

saturées ; il apparait alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit de la tâche. L'excès se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole bleu clair.

### **III.2 Essais mécaniques**

#### **III.2.1 Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1)**

Il consiste à déterminer pour un échantillon de sol intact sa cohésion  $C_{uu}$  et son angle de frottement interne  $\phi_{uu}$  par le biais d'un appareil de cisaillement.

#### **III.2.2 Essai œdométrique (XP P 94-090-1)**

Cet essai consiste en la détermination pour un sol, entre autres indice de compression  $C_c$ , indice de décompression  $C_s$ , la contrainte verticale effective de préconsolidation  $\sigma'_p$ , l'indice des vides du sol en place  $e_0$ , coefficient de consolidation vertical  $C_v$ , coefficient de compressibilité  $m_v$ , la perméabilité verticale  $K_v$ .

#### **III.2.3 Essais de gonflement libre à l'œdomètre**

##### **1- But de l'essai :**

L'essai consiste en la détermination du potentiel de gonflement  $\mathcal{E}_s$  et la pression de neutralisation du gonflement  $\sigma_g$ .

##### **2- principe de la méthode :**

- réaliser l'éprouvette de l'échantillon ;
- placer l'éprouvette dans la cellule œdométrique tout en s'assurant que les pierres poreuses ne contiennent pas d'eau ;
- régler le comparateur du bâti œdométrique ;
- saturer l'échantillon dans la cellule œdométrique ;
- relever les lectures du comparateur à aux temps subséquents 6s, 8s, 10s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 10h, 24h...

La détermination des deux paramètres se fait de la manière suivante :

- au moyen des lectures relevées sur le comparateur, on évalue le potentiel de gonflement qui est le rapport du gonflement uniaxial à la hauteur initiale de l'éprouvette ;
- la pression de gonflement est correspond à la contrainte finale qui a permis de neutraliser le gonflement après application successive de charge.

### III.2.4 Essais de perméabilité à l'œdomètre

#### 1- But de l'essai :

L'essai consiste en la détermination de la perméabilité du sol à sa contrainte géostatique  $\sigma'_{vo}$  in situ.

#### 2- principe de la méthode :

- réaliser l'éprouvette de l'échantillon ;
- placer l'éprouvette dans la cellule œdométrique (de TERZAGHI dans notre cas) puis le saturé pendant au moins 24h ;
- appliquer la contrainte  $\sigma'_{vo}$  sur l'éprouvette puis effectuer la lecture du comparateur jusqu'à la stabilisation du tassement ;
- remplir d'eau le ménisque du perméamètre puis le connecter à la cellule œdométrique ;
- effectuer des lectures à intervalle de perte de charge.

La perméabilité étant la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le sol, elle est obtenue en faisant le rapport de la variation de la perte de charge sur sa durée.

**L**es différents essais d'identification et essais mécaniques sont effectués conformément à des normes et méthodes expérimentales. Le respect de ces normes et prescriptions techniques nécessite un minimum de rigueur, d'éthique et d'esprit scientifique afin d'éviter des résultats incohérents. En effet, une réalisation de ces essais charrie à une étude du gonflement et de la perméabilité.

## **PARTIE 3 : Analyse et interprétation des résultats**

# **CHAPITRE 5 : Les essais d'identification**

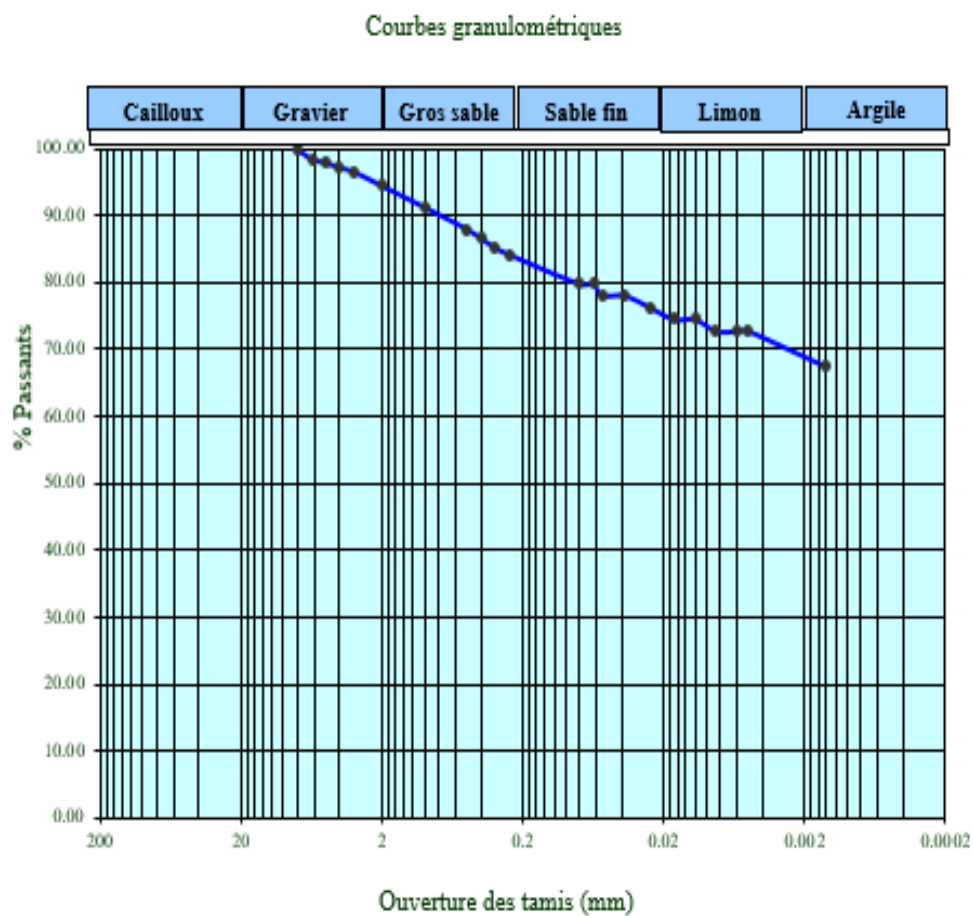
**L**es essais d'identification sont constitués des essais à savoir entre autres l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, limites d'Atterberg, valeur au bleu de méthylène, matière organique, le poids spécifique ainsi que la teneur en eau. Ces différents essais nous permettront de connaître les caractéristiques physiques des sols argileux de ces différentes localités de la commune faisant l'objet de notre étude.

### **I RESULTATS ET INTERPRETATIONS GLOBAL DES ESSAIS**

Les sols prélevés présentent différentes propriétés physiques d'après les résultats obtenus des essais d'identification. Après analyse des résultats obtenus sur les échantillons remaniés de chaque localité, nous avons constaté que les sols les plus argileux sont ceux des localités à savoir HOUNGA-HOUEGBE, TOHONOU 01 et TOHONOU 02 en occurrence celui de HOUNGA-HOUEGBE qui l'est plus. Par contre, nous avons remarqué également que tous les sols prélevés dans ces différentes localités de la commune de HOUEYOGBE ne sont pas des argiles ; ceci s'observe surtout par le biais des essais d'analyse granulométrique, de valeur au bleu de méthylène ainsi qu'aux limites d'Atterberg.

Les classifications utilisées afin de préciser la nature de ces sols sont la classification triangulaire de **Taylor (1948)** qui se base surtout sur le pourcentage des refus au tamis 50  $\mu\text{m}$  et celui des passant du tamis 2  $\mu\text{m}$ , la classification américaine des sols intitulée **Highway Research Board (HRB)** qui considère le pourcentage des passants aux tamis 0,315mm et 80 $\mu\text{m}$  ainsi que la limite de liquidité  $W_L$  puis la classification **Guide des Terrassements Routiers (GTR)** qui tient compte de la granularité, de l'indice de plasticité  $I_p$  et de la valeur au bleu de méthylène VBS.

Les différents résultats obtenus au cours de ces différents essais d'identification sont consignés dans le tableau subséquent.



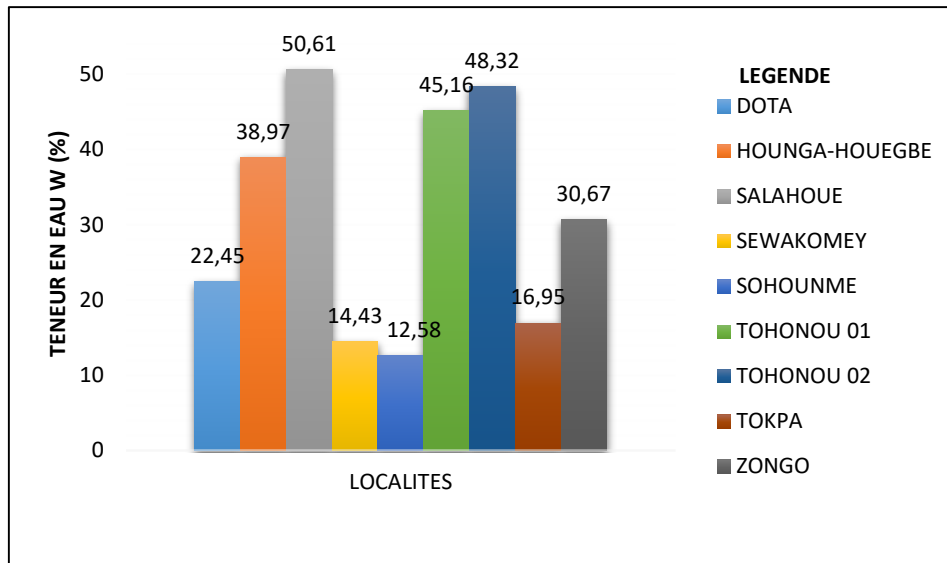
Graphe V.1 : Courbe d'analyse granulométrique de HOUNGA-HOUEGBE

Tableau V.1 : Les résultats des essais d'identification

	<b>DOTA</b>	<b>HOUNGA-HOUEGBE</b>	<b>SALAHOUÉ</b>	<b>SEWAKOMEY</b>	<b>SOHOUNME</b>	<b>TOHONOU 01</b>	<b>TOHONOU 02</b>	<b>TOKPA</b>	<b>ZONGO</b>
<b>Inf 0,315 (%)</b>	84,55	85,21	94,38	71,46	65,97	66,39	66,39	82,13	84,26
<b>Inf à 80µm (%)</b>	74,47	79,80	93,43	48,74	47,34	64,54	64,54	45,57	74,54
<b>WL (%)</b>	69,00	90,00	94,00	45,00	35,00	77,00	77,00	48,00	74,00
<b>WP (%)</b>	37,00	49,00	50,00	25,00	23,00	41,00	41,00	28,00	40,00
<b>VBS</b>	0,92	11,94	5,65	1,00	0,58	9,14	8,00	4,46	5,38
<b>MO (%)</b>	0,96	0,58	0,84	0,08	0,78	0,56	0,03	0,04	0,69
<b>γs (T/m3)</b>	2,13	2,21	2,23	2,18	2,58	2,31	2,22	2,32	2,25
<b>IP</b>	32,00	41,00	44,00	20,00	12,00	36,00	42,00	20,00	34,00
<b>Ac</b>	0,50	0,60	0,63	0,60	0,33	0,62	0,62	0,67	0,58

## II INTERPRETATION SPECIFIQUE DE CERTAINS PARAMETRES

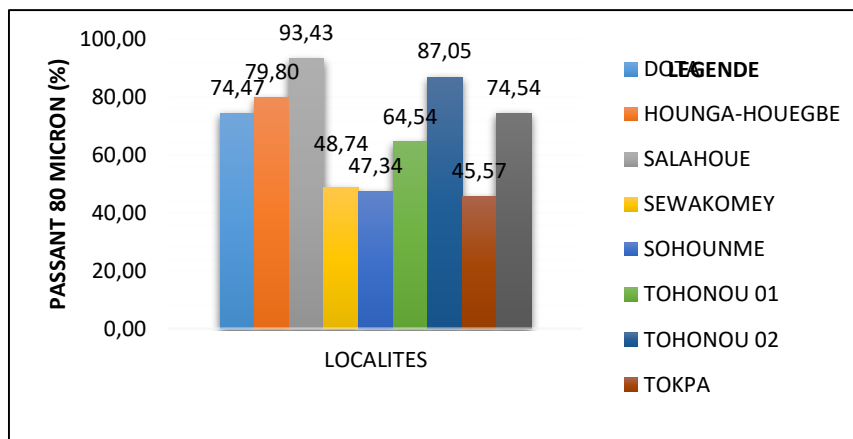
### II.1 Teneur en eau in situ



Graphe V.2 : Valeurs de teneur en eau in situ

Ce graphe présente les valeurs de teneur en eau in situ des sols prélevés dans ces différentes localités. Il en découle que le sol de certaines localités contient plus d'eau que d'autre.

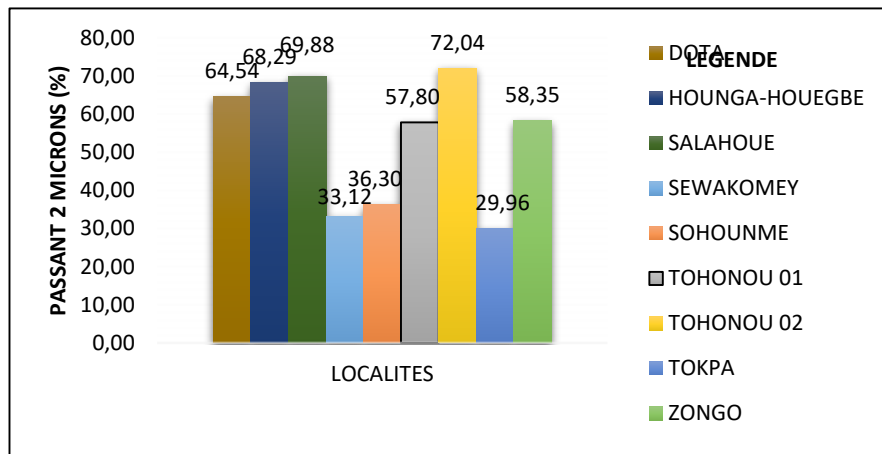
### II.2 Passant au tamis 80 µm



Graphe V.3 : Pourcentage de passant au tamis 80 µm

Après analyse de ce graphe, nous pouvons relater qu'outre la localité de SEWAKOMEY, de SOHOUNME et de TOKPA, tous les sols prélevés dans ladite commune sont des sols fins car leur pourcentage atteint au moins 50%.

### II.3 Passant au tamis 2 µm



Graph V.4 : Pourcentage de passant au tamis 2 µm

Après analyse de ce graphe, en tenant compte de la classification triangulaire de Taylor (1948), nous remarquons que seuls les sols provenant de la localité de SEWAKOMEY, de SOHOUNME, de TOHONOU 01, de TOKPA et de ZONGO ne sont pas des argiles mais qu'ils contiennent une quantité d'argile. Cette interprétation émane de la clarification sur le type de sol argileux selon cette classification et qui est stipulée dans le tableau subséquent.

Tableau V.2 : Récapitulatif sur les types de sols argileux selon la classification triangulaire de Taylor (1948)

LOCALITES	% > 50 µm	% ≤ 2 µm	NATURE
DOTA	26,84	64,54	Argile
HOUNGA-HOUEGBE	21,97	68,29	Argile
SALAHOUÉ	09,52	69,88	Argile
SEWAKOMEY	53,41	33,12	Limon argilo-sableux
SOHOUNME	54,19	36,30	Limon argilo-sableux
TOHONOU 01	35,46	58,03	Limon argilo-sableux
TOHONOU 02	15,52	72,04	Argile
TOKPA	57,26	29,96	Limon argilo-sableux
ZONGO	30,28	58,35	Limon argilo-sableux

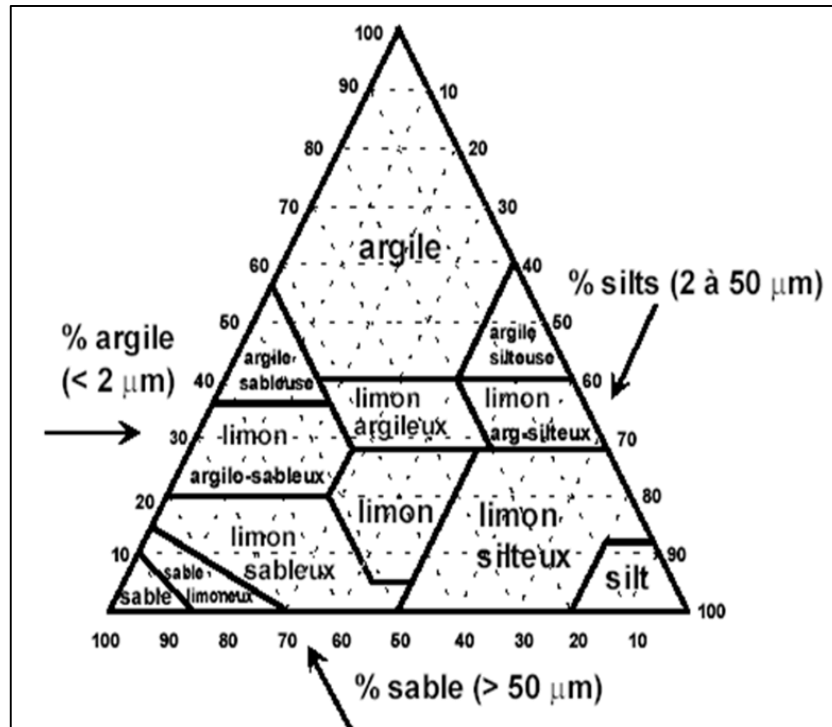
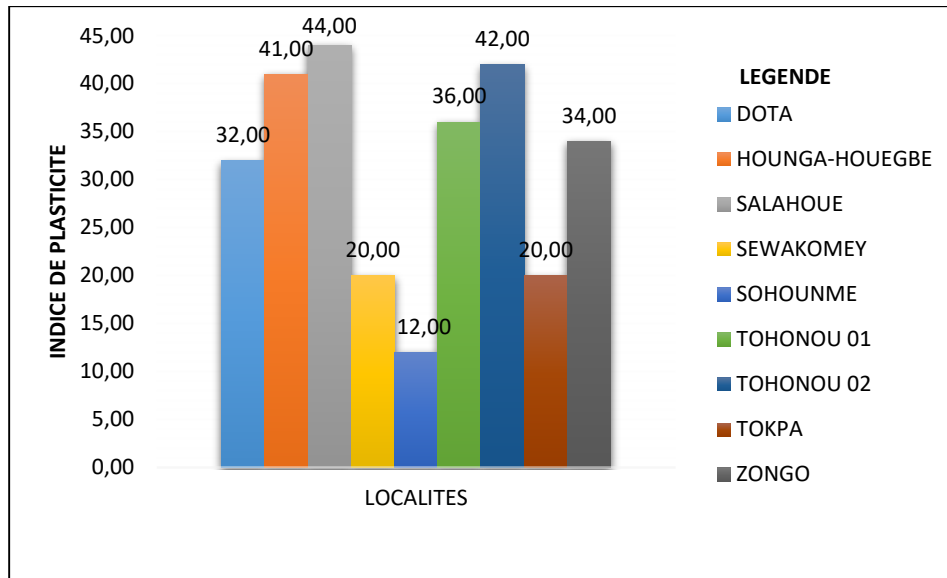


Figure V.11 : Abaque de classification triangulaire de Taylor (1948)

#### II.4 Indice de plasticité

Un autre paramètre qui caractérise les argiles et qui est souvent rencontré dans la revue bibliographique est l'indice de plasticité  $I_p$ . Il est la différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité. Les valeurs selon les différentes localités sont résumées sur le graphe ci-dessous.



Graph V.5 : Valeurs d'Indice de Plasticité (IP)

La valeur de l'indice de plasticité de chaque localité qu'exhibe ce graphe, nous a permis de caractériser d'une part le comportement plastique par le biais de la classification des sols présentée par **J.M. Txhouaninana (1999)** puis d'autre part le potentiel de gonflement au moyen de la classification de **Snethen (1980)**. A travers des résultats provenant de ces différentes classifications, nous pouvons notifier que le sol de SALAHOUÉ est le plus plastique et possède le potentiel de gonflement le plus élevé. Ces différents résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau V.3 : Récapitulatif sur le comportement plastique et le potentiel de gonflement

LOCALITES	Ip	DEGRE DE PLASTICITE	GONFLEMENT
<b>DOTA</b>	32	Plastique	Moyen
<b>HOUNGA-HOUEGBE</b>	41	Plastique	Elevé
<b>SALAHOUÉ</b>	44	Plastique	Elevé
<b>SEWAKOMEY</b>	20	Peu plastique	Moyen
<b>SOHOUNME</b>	12	Peu plastique	Faible
<b>TOHONOU 01</b>	36	Plastique	Elevé
<b>TOHONOU 02</b>	42	Plastique	Elevé
<b>TOKPA</b>	20	Peu plastique	Moyen
<b>ZONGO</b>	34	Plastique	Elevé

Tableau V.4 : Classification selon la plasticité des sols présenté par J.M. Txhouaninana (1999)

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Sol non plastique
$5 < IP < 30$	Sol peu plastique
$30 < IP < 50$	Sol plastique
$50 < IP$	Sol très plastique

Tableau V.5 : Potentiel de gonflement d'après Snethen

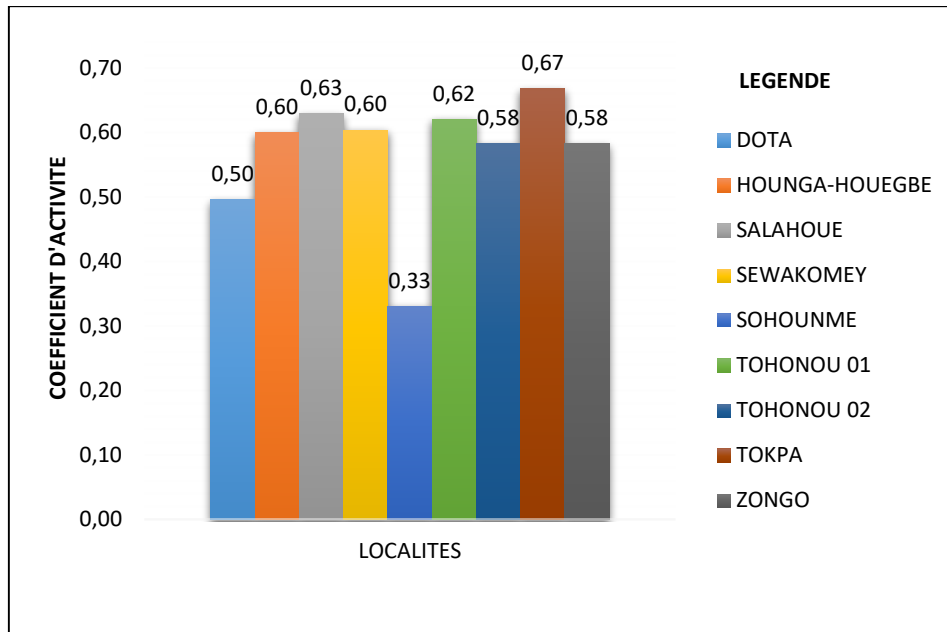
Potentiel de gonflement	Ip (%)
Faible	<18
Moyen	18-32
Elevé	32-48
Très élevé	>48

## II.5 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 stipulée dans différents ouvrages abordés à travers notre revue bibliographique.

En se basant sur les dénominations qui émanent de cette classification, nous relatons que tous les sols argileux de cette commune sont peu actifs en dehors de ceux provenant de la localité de DOTA et de SOHOUNME.

Le graphe suivant renseigne sur la valeur du coefficient d'activité des sols de chaque localité et le tableau sur leur dénomination conséquente.



Graph V.6 : Valeur des coefficients d'activité

Tableau V.6 : Dénomination des sols en fonction du coefficient d'activité

LOCALITES	Ac	DENOMINATION
DOTA	0,50	Inactif
HOUNGA-HOUEGBE	0,60	Peu actif
SALAHOUE	0,63	Peu actif
SEWAKOMEY	0,60	Peu actif
SOHOUNME	0,33	Inactif
TOHONOU 01	0,62	Peu actif
TOHONOU 02	0,58	Peu actif
TOKPA	0,67	Peu actif
ZONGO	0,58	Peu actif

**L**es différents paramètres mesurés au cours des essais d'identification ont permis d'étayer de façon plus précise les caractéristiques physiques des différents sols prélevés. En effet, ces paramètres ont favorisé la connaissance de la nature et d'autres propriétés à savoir la plasticité, le potentiel de gonflement et l'activité de ces sols argileux.

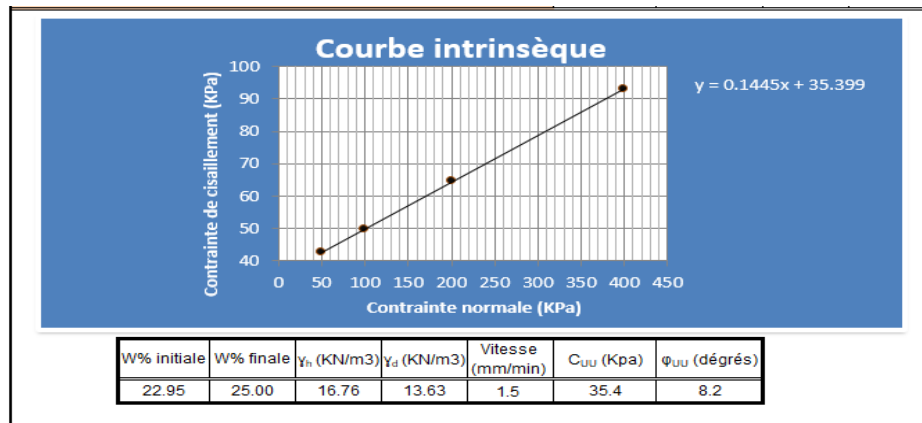
# CHAPITRE 6 : Les essais mécaniques

# D

ans cette partie nous présenterons les résultats et interprétations issus des essais de cisaillement, des œdométriques. Ces différents essais nous permettront de connaître les caractéristiques mécaniques des sols argileux de ces différentes localités de la commune faisant l’objet de notre étude.

## I ESSAI DE CISAILLEMENT

Les résultats provenant de l’essai de cisaillement précisent en occurrence la cohésion et l’angle de frottement interne de ces sols argileux. Ils révèlent que le sol le plus lâche est celui de SEWAKOMEY tandis que le plus cohésif est celui de TOKPA.

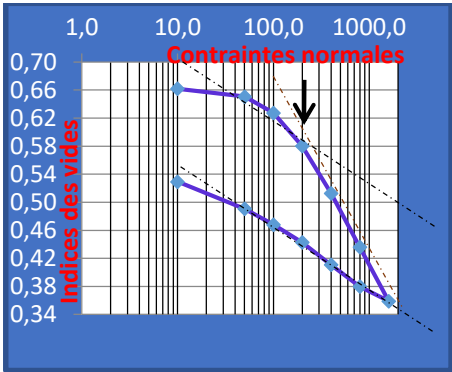


Graph VI.1 : Courbe d’essai de cisaillement de HOUNGA-HOUEGBE

Tableau VI.1 : Récapitulatif des résultats qui émanent de l’essai de cisaillement

LOCALITES	$C_{uu}$ (KPa)	$\phi_{uu}$ (degrés)
DOTA	45,00	24,00
HOUNGA-HOUEGBE	35,40	08,20
SALAHOUÉ	34,20	09,00
SEWAKOMEY	05,50	26,50
SOHOUNME	09,60	24,30
TOHONOU 01	-	-
TOHONOU 02	-	-
TOKPA	58,00	05,30
ZONGO	19,60	13,90

## II ESSAI OEDOMETRIQUE



Graph VI.2 : Courbe œdométrique de HOUNGA-HOUEGBE

Tableau VI.2 : Récapitulatif des paramètres issus d'essai œdométrique

	DOTA	HOUNGA-HOUEGBE	SALAHOUÉ	SEWAKOMEY	SOHOUNME	TOHONOU 01	TOHONOU 02	TOKPA	ZONGO
$e_i$	0,365	0,662	0,839	0,376	0,426	-	-	0,330	0,567
$e_o$	0,360	0,685	0,850	0,446	0,420	-	-	0,324	0,548
$\sigma'_{vo}$	27	27	33	27	27	-	-	27	27
$\sigma'_p$	95	175	250	40	185	-	-	110	245
$C_c$	1,25E-01	2,56E-01	2,91E-01	2,03E-01	1,52E-01	-	-	1,35E-01	1,76E-01
$C_s$	2,22E-02	1,05E-01	9,64E-02	1,15E-02	1,16E-02	-	-	4,27E-02	5,95E-02
$C_v$	7,12E-09	7,90E-10	4,02E-09	1,16E-06	4,75E-07	-	-	5,04E-09	3,30E-09
$mv$	3,50E-02	5,8 E-02	6,58E-02	3,50E-02	4,20E-02	-	-	3,90E-02	5,20E-02

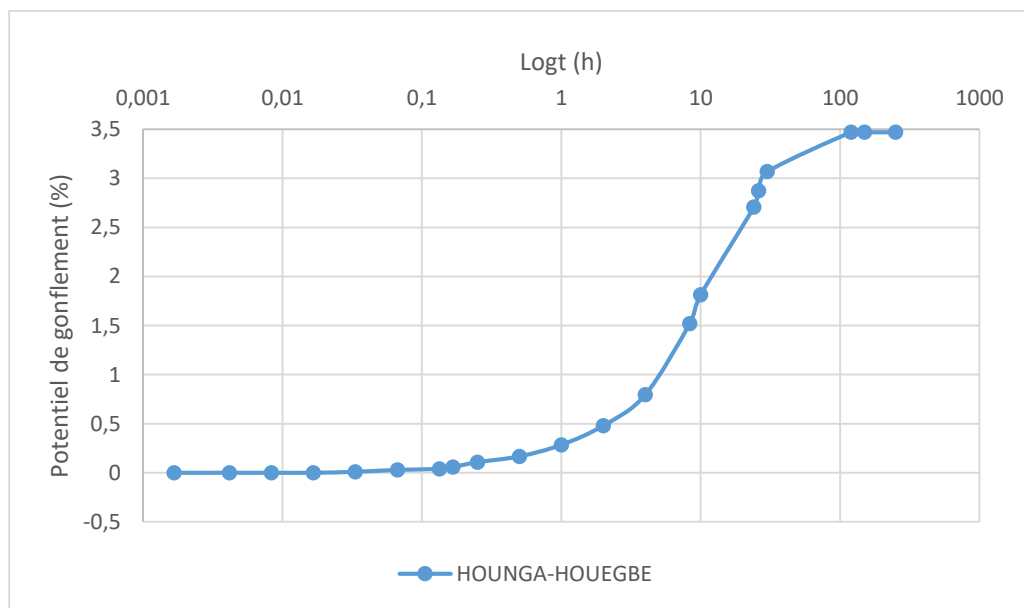
L'examen du graphe montre que la courbe œdométrique de HOUNGA-HOUEGBE présente l'allure d'un sol gonflant. Ses courbes de consolidations sont donc étudiées selon la méthode de CASAGRANDE.

L'examen du tableau permet de stipuler :

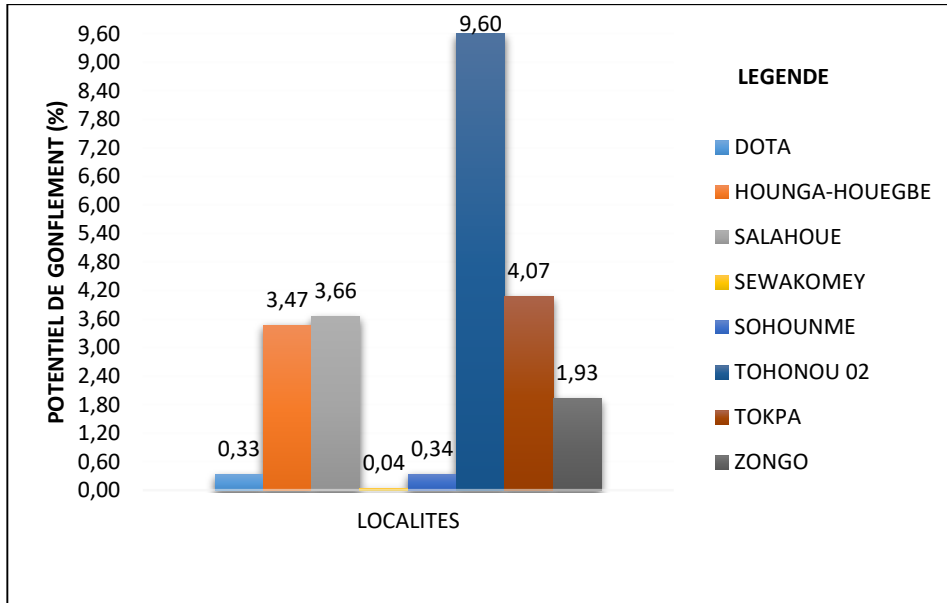
- ✚ d'après  $\sigma'_{vo}$  et  $\sigma'_p$  tous les sols argileux provenant de ces localités sont surconsolidés ;
- ✚ d'après  $C_s$  que le sol de HOUNGA-HOUEGBE est le plus gonflant ;
- ✚ d'après  $C_v$  que le sol de DOTA est le plus compressible.

### III ESSAIS DE GONFLEMENT LIBRE ET DE PERMEABILITE

Les essais de gonflement libre à l'œdomètre ; effectués sur des différents échantillons montrent que le potentiel de gonflement croît avec le temps. Ceci s'exhibe par le graphe suivant.

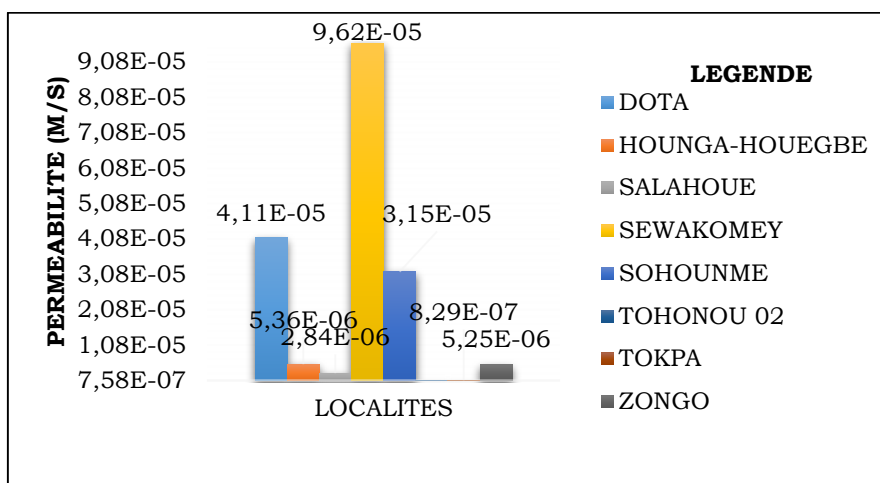


Graphe VI.3 : Variation du potentiel de gonflement en fonction du temps



Graphe VI.4 : Valeurs du potentiel de gonflement

Après une comparaison du classement selon les localités des valeurs d'indice gonflement du tableau VI.2 et de celles du potentiel de gonflement, on observe que ces classements ne sont pas les mêmes. On pourrait en déduire que l'effet mécanique agit sur le gonflement obtenu lors du déchargement à l'œdomètre. En outre, nous devons notifier que la valeur réelle du potentiel de gonflement de la localité de TOHONOU 02 n'a pas pu être obtenue. En effet, le bâti œdométrique dont nous disposons n'est pas adapté pour obtenir la valeur du gonflement final du sol de cette localité.



Graphe VI.5 : Valeur de la perméabilité (m/s) sous la contrainte géostatique in situ

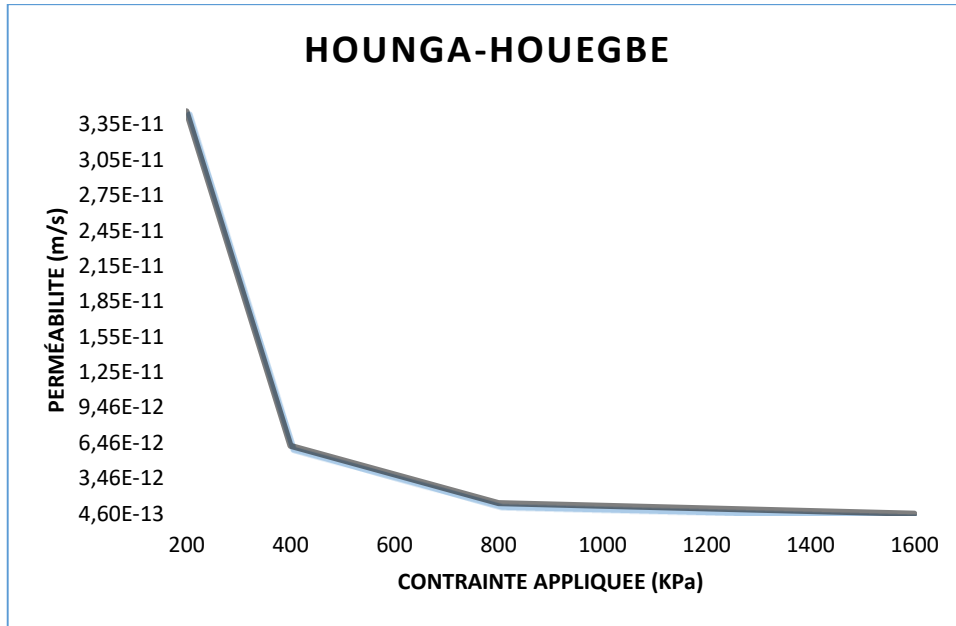
## Conclusion générale et perspectives

Le graphe suivant nous exhibe la variation de la perméabilité en fonction de la contrainte géostatique, nous pouvons déduire que c'est le sol de la localité de DOTA qui est le plus perméable tandis que celui de TOKPA est le moins. En outre, après comparaison des deux derniers graphes, nous pouvons relater que plus le sol est perméable moins il est gonflant.

Tableau VI.3: Valeurs de la perméabilité (m/s) en fonction des contraintes appliquées (KPa)

CONTRAINTES APPLIQUEES	DOTA	HOUNGA-HOUEGBE	SALAHOUÉ	SEWAKOMEY	SOHOUNME	TOKPA	ZONGO
<b>200</b>	5.58E-10	3.46E-11	3.42E-10	6.32E-09	2.77E-09	4,52E-10	7.08E-11
<b>400</b>	3.23E-10	6.23E-12	5.94E-11	4.29E-09	1.01E-09	7,18E-11	4.58E-11
<b>800</b>	8.14E-11	1.35E-12	8.91E-12	1.77E-09	9.45E-10	3.31E-12	1.21E-11
<b>1600</b>	2.46E-11	4.57E-13	2.64E-12	5.54E-10	1.99E-10	1.97E-12	1.70E-12

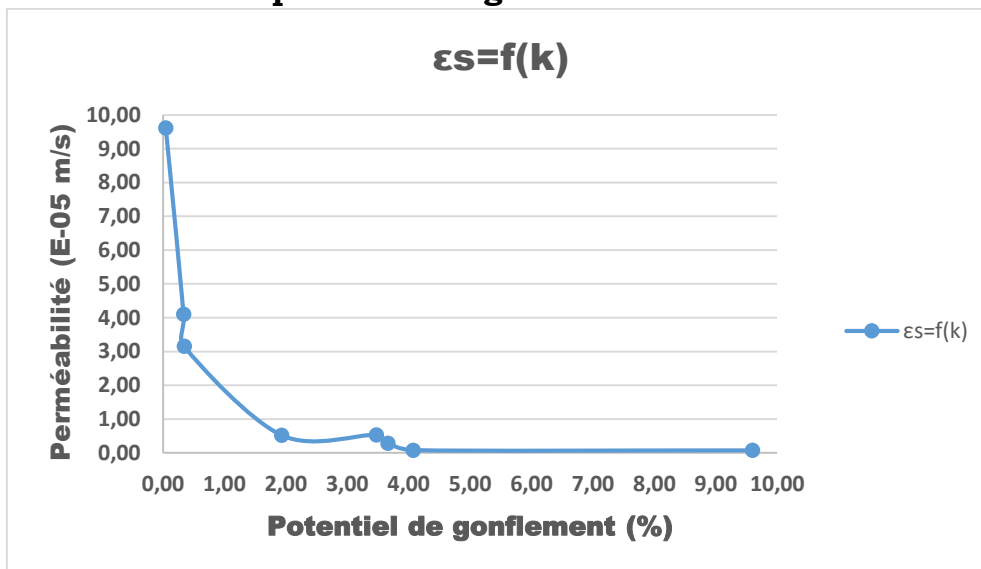
Le présent tableau VI.3 donne les différentes valeurs de la perméabilité en fonction des contraintes appliquées lors de l'essai œdométrique à incrémentation de charge successive suivant la norme XPP94-090-1.



Graph VI.6 : Variation de la perméabilité en fonction des contraintes appliquées  
 On remarque du tableau VI.3 et du graphe VI.6 précédant que la perméabilité du sol diminue au fur et à mesure que la contrainte qui lui est appliquée augmente.

#### IV INFLUENCE DE LA PERMEABILITE SUR CERTAINS PARAMETRES CARACTERISTIQUES

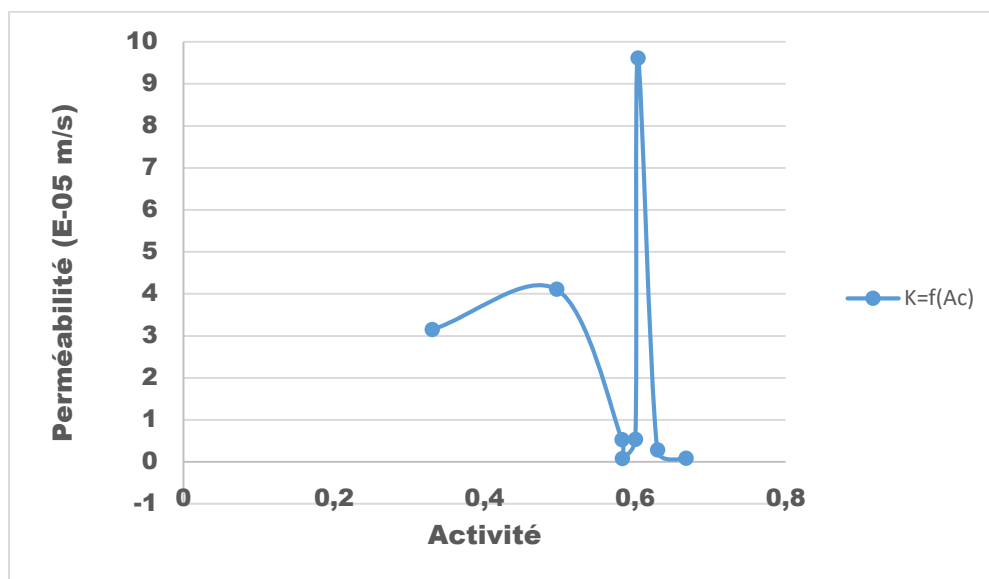
##### ❖ Perméabilité et potentiel de gonflement



Graph VI.7 : Evolution de la perméabilité en fonction du gonflement

La courbe du graphe VI.7 montre l'évolution de la perméabilité en fonction du gonflement. Il ressort de l'analyse que plus le sol est gonflant moins est sa perméabilité. On conclut donc que le gonflement a une influence sur la perméabilité. On en déduit que plus un sol argileux est gonflant moins il est perméable.

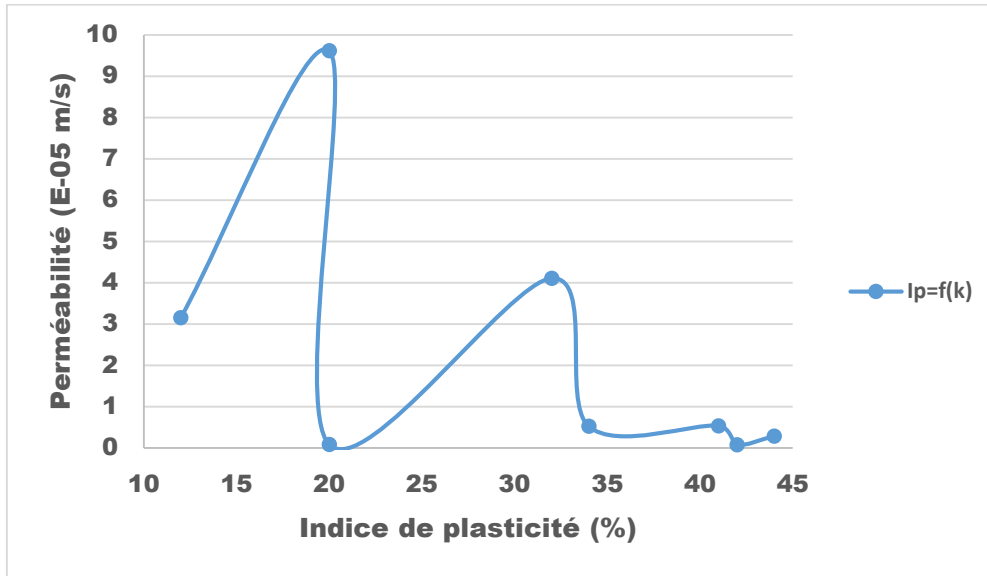
❖ **Perméabilité et activité de gonflement**



Graphe VI.8 : valeur de la perméabilité en fonction de l'activité

La courbe VI.8 montre la variation de la perméabilité en fonction de l'activité. Il ressort de l'analyse que la perméabilité varie en fonction de l'activité du sol argileux.

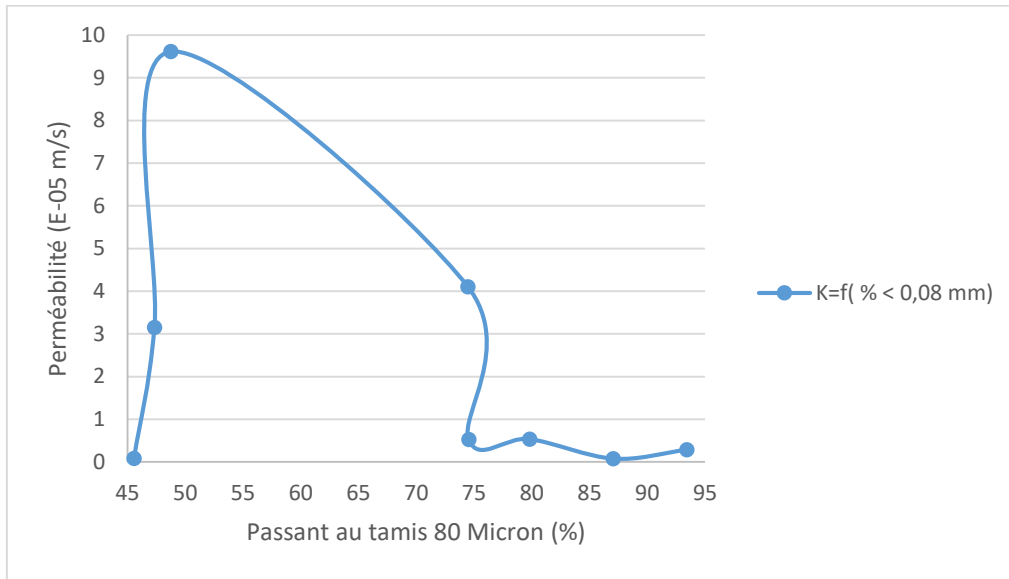
❖ **Perméabilité et indice de plasticité**



Graph VI.9 : valeur de la perméabilité en fonction de l'indice de plasticité

La courbe VI.9 montre la variation de la perméabilité en fonction de l'indice de plasticité. Il ressort de l'analyse que plus l'indice de plasticité d'un sol argileux est élevé moins il est perméable.

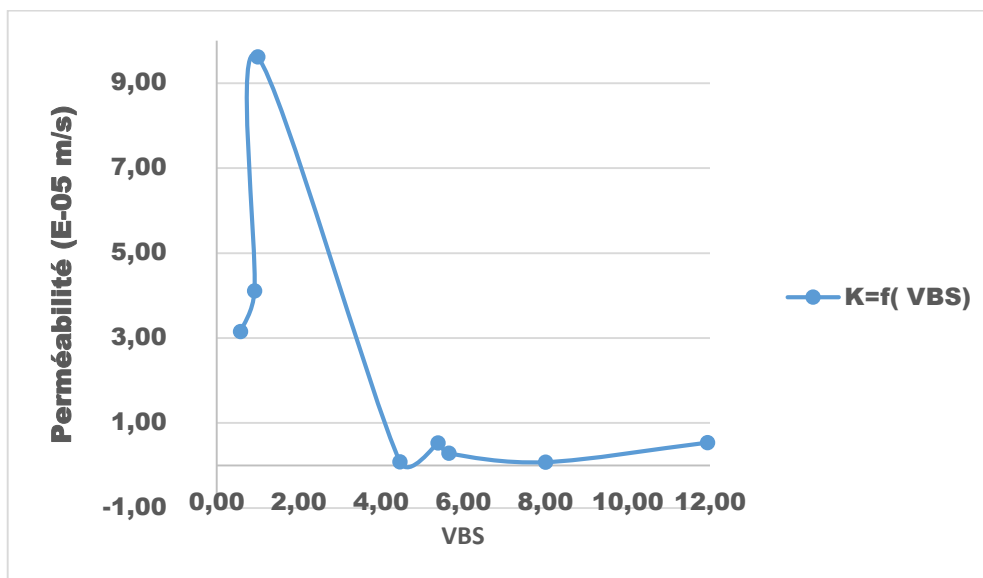
Perméabilité et passant au tamis de 80 micron (%)



Graphe VI.10 : relation passant au tamis de 80 micron et perméabilité

La courbe VI.10 montre la relation entre les pourcentages de passant au tamis de 80 micron et la perméabilité. Il ressort de l'analyse que les sols fins argileux sont peu perméables à cause de la discontinuité des vides dans leurs microstructures.

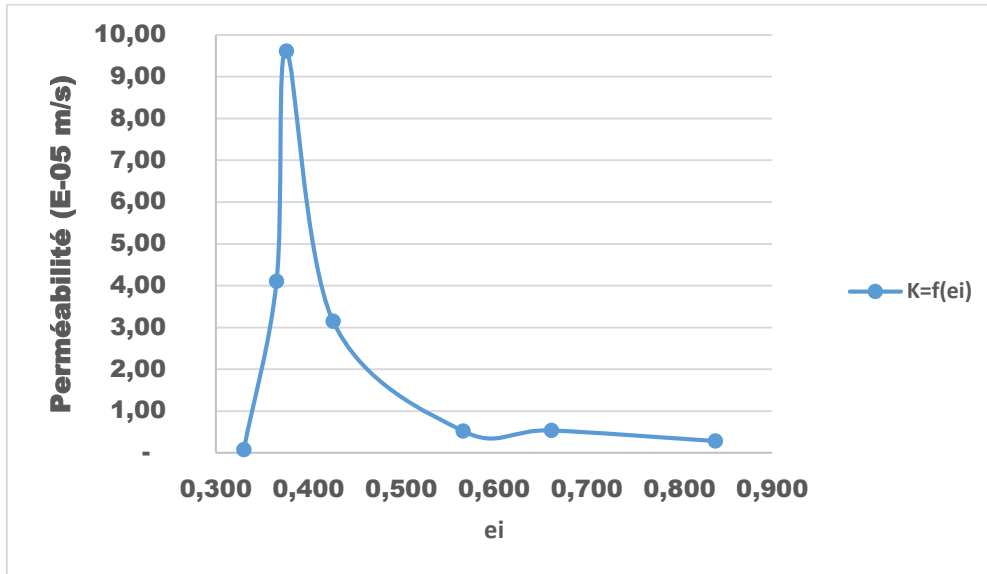
❖ Perméabilité et VBS



Grphe VI.11 : relation VBS et perméabilité

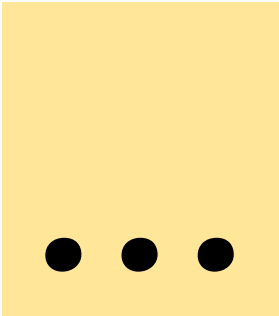
La courbe VI.11 montre la relation entre le VBS et la perméabilité. Il ressort de l'analyse que les sols fins argileux sont peu perméables.

❖ **Perméabilité et l'indice de vide initial**



Graph VI.12 : relation Indice de vide initial et perméabilité

- Les sols de Salahoué, Hounga-houégbé, et Zongo ont un grand indice de vide ( $e_0$ ) mais peu perméable. On conclut que ces sols sont poreux mais les vides sont discontinus et l'eau est emprisonnée dans les pores.
- Les sols de Sèwakomey et Sohomé ont une grande perméabilité avec un indice de vide moyen. On en déduit que ces sols ont une continuité des vides qui favorise leur perméabilité.



**CONCLUSION GENERALE ET  
PERSPECTIVES**

Le phénomène naturel qu'est le retrait-gonflement du sol conduit à des désastres dans les infrastructures voire leur ruine. Il s'observe notamment sur les sols argileux dont ceux du Bénin qui se situent surtout au sud dans la dépression de la Lama. Afin de pallier ces désastres orchestrés, nous avons effectué l'étude physico-mécanique des sols argileux de la commune de HOUEYOGBE qui est située dans cette dépression afin de déterminer certains paramètres qui serviront à la conception et la réalisation des infrastructures. A cet effet, nous avons réalisé sur les différents prélèvements effectués dans cette commune, des essais d'identification et des essais mécaniques. De ces différents essais, nous avons obtenu des résultats qui ont été analysés et interprétés. Ainsi nous avons :

### ✚ Essais d'identification

- ❖ seul les sols provenant de la localité de SEWAKOMEY, de SOHOUNME, de TOHONOU 01, de TOKPA et de ZONGO ne sont pas des argiles mais qu'ils contiennent une infime quantité d'argile et sont néanmoins des sols argileux ;
- ❖ le sol de SALAHOUÉ est le plus plastique et possède le potentiel de gonflement le plus élevé ;
- ❖ tous les sols argileux de cette commune sont peu actifs en dehors de ceux provenant de la localité de DOTA et de SOHOUNME.

### ✚ Essais mécaniques

- ❖ le sol le plus lâche est celui de SEWAKOMEY tandis que le plus cohésif est celui de TOKPA.
- ❖ d'après  $\sigma'_{vo}$  et  $\sigma'_p$  tous les sols argileux provenant de ces localités sont surconsolidés ;
- ❖ d'après  $C_s$  que le sol de HOUNGA-HOUEGBE est le plus gonflant;
- ❖ d'après  $C_v$  que le sol de DOTA est le plus compressible ;
- ❖ d'après  $E_s$  et  $K_v$  que plus le sol est perméable moins il est gonflant.

Nous récapitulons en notifiant que tous les sols argileux de la commune de HOUEYOGBE présentent des caractéristiques physico-mécaniques différents. De même la perméabilité est un paramètre qui influence le gonflement des sols argileux

Afin de compléter au mieux notre recherche dans la commune de HOUEYOGBE, nous suggérons de faire une étude :

- ✚ des différentes lois de comportement des sols argileux ;
- ✚ des perméabilités in situ en occurrence par l'essai de Murtz ;
- ✚ de nouvelles méthodes de construction propice aux sols argileux de ladite commune.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. **ADJATI Mètonwanou Albert (1986)**, « Etablissement des critères constructifs de l'argile de la Lama : Contribution à l'étude de gonflement ». Thèse d'agrégation de l'enseignement Supérieur de l'université libre de Bruxelles.
2. **AGBELELE Koffi Judicaël (2016)** «Caractérisation physico-mécanique des sols argileux de la dépression d'Issaba au Sud-Est du Bénin » Afrique science, volume 12,N°2.
3. **assagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménilliet F., Ducreux G.H. (1996)**. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM/RR-39218-FR, 74 pages
4. **Bigot Gérard and Zerhouni Moulay (2000)**. Retrait, gonflement et tassements des sols fins, Bull. labo.P.et Ch., 229, pp. 105-114
5. **Brigitte C. (2011)**: Guide pour la construction de bâtiments à vocation agricole hors zones à bâtir. Département de l'environnement et de l'équipement Service de l'aménagement du territoire République et Canton du Jura., 24 p
6. **Bultel F. (2001)**. Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels, thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
7. **Chardard P., Gandille D. (2008)**. Traitement en place en terrassements, Journée Valorisation des sols médiocres, Paris.
8. **Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménilliet F., Ducreux G.H. (1996)**. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM/RR-39218-FR, 74 pages
9. **Chen F. H., (1988)**. *Foundations on expansive soils*. Elsevier Publisher B.V.
10. **Chretien Marie (2010)**. Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux :approche sur site

expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux.

11. **Cisse Ibrahima Khalil,(1985)**. Caractérisation et méthodes de construction sur sols gonflants : application aux marnes de Rufisque (Sénégal). Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. ENSG de Nancy (France).
12. **El Faleh El Mâti, Taibi M'hamed, Elamane Mohamed, Mahdoudi Moulay Lahsen (2002)**. Etude physico-chimique de la palygorskite du moyen-atlas. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 27 (4).
13. **Fediex (2009)** - Traitement des sols et recyclage de terres à la chaux.
14. **Igué M., Weller U. (2000)** Géologie et géomorphologie du sud Bénin.
15. **Iltis M. (1979)**. Contribution à l'étude des argiles gonflantes en cours de forage. Thèse de Docteur Ingénieur à l'I.N.S.A. de Lyon n° .I.D.I. 179-11 (1979)
16. **Yvette Sedjro Tankpinou Kiki(2016)**. Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique des sols \_ns en technique routière. Autre. Université de Bordeaux.
17. **SLANSKY M, (1950)** « étude stratigraphiques synthétique détaillée de l'ensemble du bassin sédimentaire côtier du Togo et du Dahomey »

#### **NORMES UTILISEES**

18. **NF P94-056 (1996)**, «Sols : reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols Méthode par tamisage».
19. **NF P94-057 (1992)** «Sols : reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par sédimentation».
20. **NF P94-051 (1993)** « Sols : reconnaissance et essais Détermination des Limites d'ATTERBERG».
21. **NF P 94-068 (1998)** « Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux».

22. **XP P 94-055 (1996)** «Détermination de la teneur en matière organique».
23. **NF P 94-054 (1991)** «Détermination de la masse volumique des particules solides des sols».
24. **Highway Research Board (1992)**, « Classification américaine des sols ».

**TABLE DE MATIERES**

DEDICACES.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME .....	vi
ABSTRACT .....	vi
SOMMAIRES .....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTES DES TABLEAUX.....	xi
LISTES DES PHOTOGRAPHIES .....	xii
LISTES DES GRAPHERS .....	xiii
LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	xiv
LISTE DES NOTATIONS .....	xv
LISTES DES ANNEXES .....	xvii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
PARTIE 1 : Revue bibliographique.....	5
CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux.....	17
I.SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	18
II.Définition des argiles .....	19
III.Formation des argiles .....	20
III.1 Origine des argiles .....	20
III.2 Formation .....	22
III.3 Répartition climatologique de l'altération des roches en argiles ....	24
IV.Structure des minéraux argileux .....	25
IV.1 Terminologie .....	25
IV.2 Éléments structuraux .....	26
V.Classification des argiles .....	29
V.1 Critères de classification .....	29
V.2 Feuilletés de type 1/1 .....	31
V.3 Feuilletés de type 2/1 .....	32
V.4 Feuilletés de type 2/1/1 .....	34
V.5 Minéraux interstratifiés.....	34
VI.Différents types d'argiles .....	34
VI.1 Minéral de type 1/1 .....	34

VI.2	Minéral de type 2/1 .....	36
VI.3	Minéral de type 2/1/1 : la chlorite .....	39
VI.4	Minéraux interstratifiés.....	40
VI.5	Autres minéraux argileux.....	40
VII.	Localisation des sols argileux au Bénin [3].....	41
CHAPITRE 2 : Généralités sur le gonflement et la perméabilité .....		44
I. Gonflement.....		45
I.1 Gonflement au sens physico-chimique .....		45
I.1.1 Gonflement interfoliaire.....		45
I.1.2 Gonflement interparticulaire .....		46
I.1.3 Facteurs de gonflement .....		47
I.2 Gonflement au sens mécanique .....		48
I.2.1 Contraintes dans un sol.....		48
I.2.2 Gonflement dû à une modification de l'état de contraintes.....		50
I.2.3 Cinétique du gonflement .....		51
I.2.4 Propriétés de l'environnement .....		53
I.2.5 Facteurs d'influence.....		55
II. Méthodes de mesure de la perméabilité saturée .....		56
II.1 Mesures en régime permanent .....		56
II.1.1 Essai à charge constante.....		56
II.1.2 Essai à charge variable.....		56
II.1.3 Mesure de la perméabilité dans le l'œdoperméamètre .....		57
II.2 Mesures en régime non permanent .....		58
II.2.1 Essai de choc impulsif dit pulse test .....		58
II.2.2 Essai harmonique .....		59
II.3 Méthodes de mesure de la perméabilité non saturée.....		59
II.3.1 Mesures en régime permanent.....		59
II.3.2 Mesures en régime non permanent.....		59
PARTIE 2 : Matériaux, matériels et méthodologie de recherche .....		62
CHAPITRE 3 : Milieu d'étude .....		63
I. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....		64
II. POPULATION ET STRUCTURE ADMINISTRATIVE.....		65
III. CLIMAT .....		67

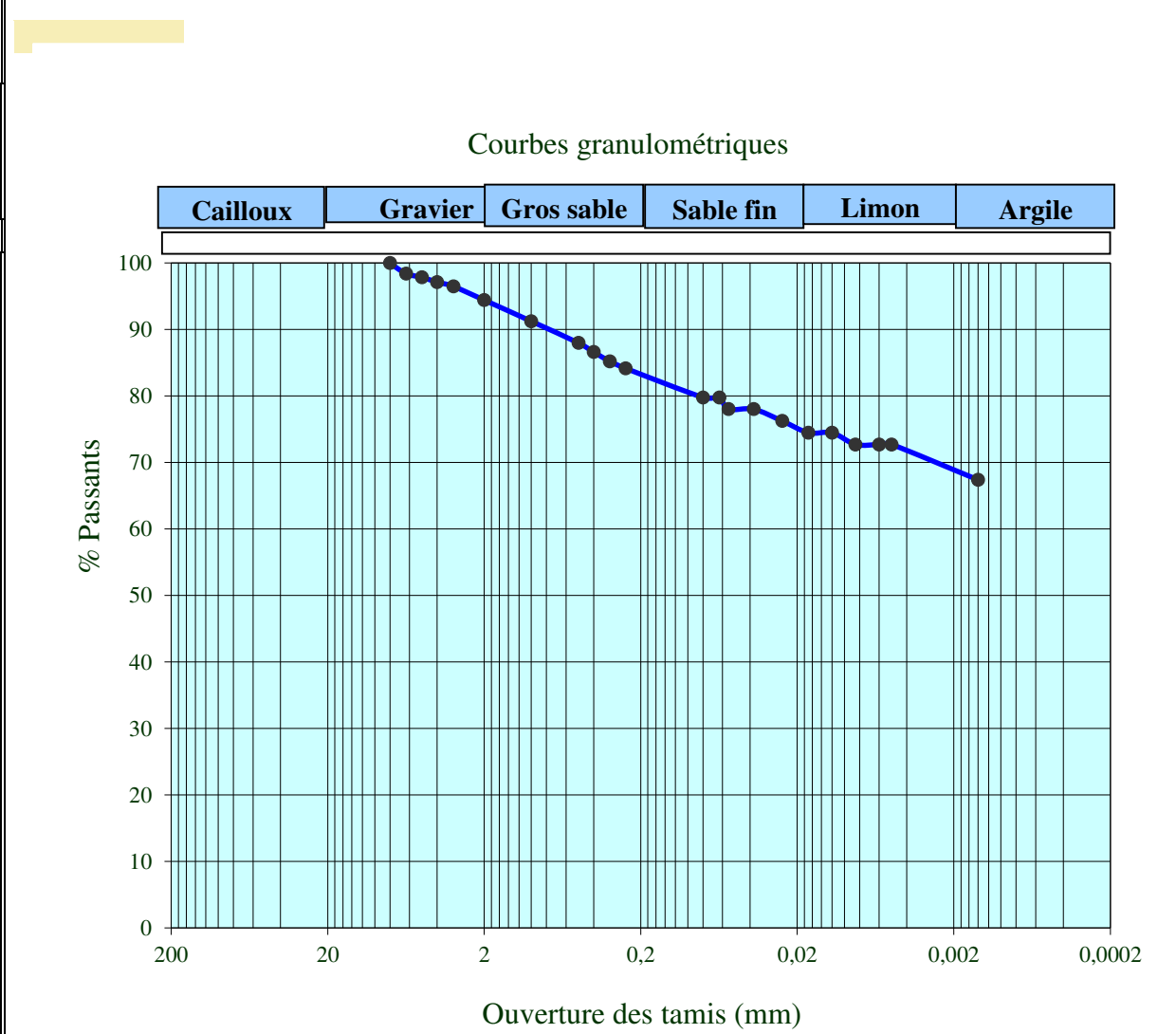
IV.RELIEF ET SOLS .....	68
V.PRESENTATION DES SITES DE PRELEVEMENT .....	69
CHAPITRE 4 : Méthodologie de recherche .....	71
I.RECHERCHE ET LOCALISATION DE SITE .....	72
II.PRELEVEMENTS .....	73
III.DESCRPTION DES ESSAIS.....	74
III.1 Essais d'identification .....	74
III.1.1 Essai de détermination de la teneur en eau pondérale (NFP 94-050) .....	74
III.1.2 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) .....	75
III.1.3 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057) ....	75
III.1.4 Essai de détermination de la teneur en matière organique (XP P 94-055) ...	75
III.1.5 Détermination du Poids spécifique des grains solides (NF P 94-054).....	75
III.1.6 Limites d'Atterberg (NF P 94-051) .....	75
III.1.7 Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).....	75
III.2 Essais mécaniques .....	76
III.2.1 Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1).....	76
III.2.2 Essai œdométrique (XP P 94-090-1) .....	76
III.2.3 Essais de gonflement libre à l'œdomètre .....	76
III.2.4 Essais de perméabilité à l'œdomètre .....	77
PARTIE 3 : Analyse et interprétation des résultats.....	78
CHAPITRE 5 : Les essais d'identification.....	79
I.RESULTATS ET INTERPRETATIONS GLOBAL DES ESSAIS .....	80
II.INTERPRETATION SPECIFIQUE DE CERTAINS PARAMETRES .....	83
II.1 Teneur en eau in situ.....	83
II.2 Passant au tamis 80 µm .....	83
II.3 Passant au tamis 2 µm .....	84
II.4 Indice de plasticité.....	85
II.5 Activité de l'argile.....	87
CHAPITRE 6 : Les essais mécaniques .....	89
I.ESSAI DE CISAILLEMENT.....	90
II.ESSAI OEDOMETRIQUE.....	90

III.ESSAIS DE GONFLEMENT LIBRE ET DE PERMEABILITE A L'EODOMETRE .....	92
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	101
TABLES DES MATIERES .....	104
ANNEXES.....	108

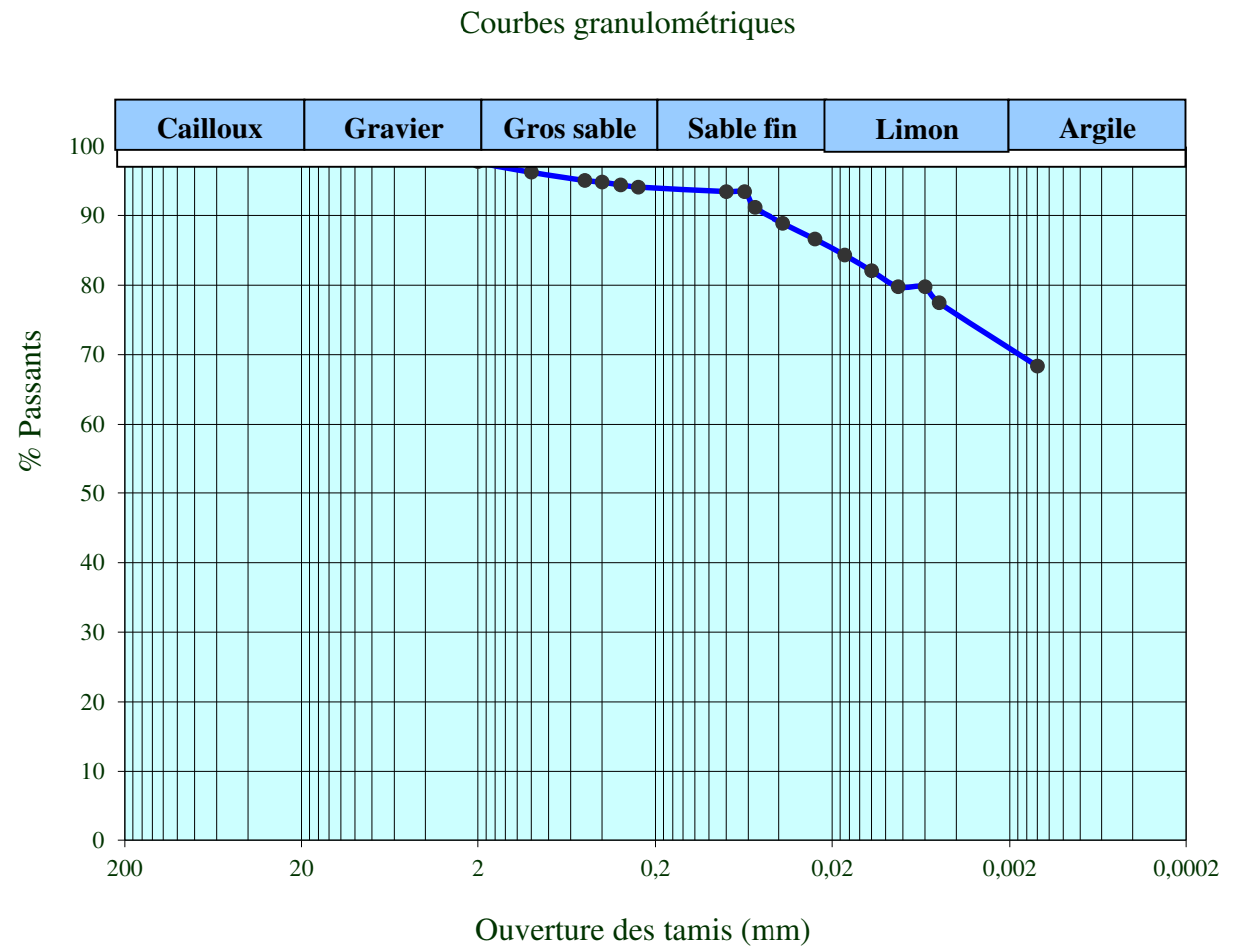
## **ANNEXES**



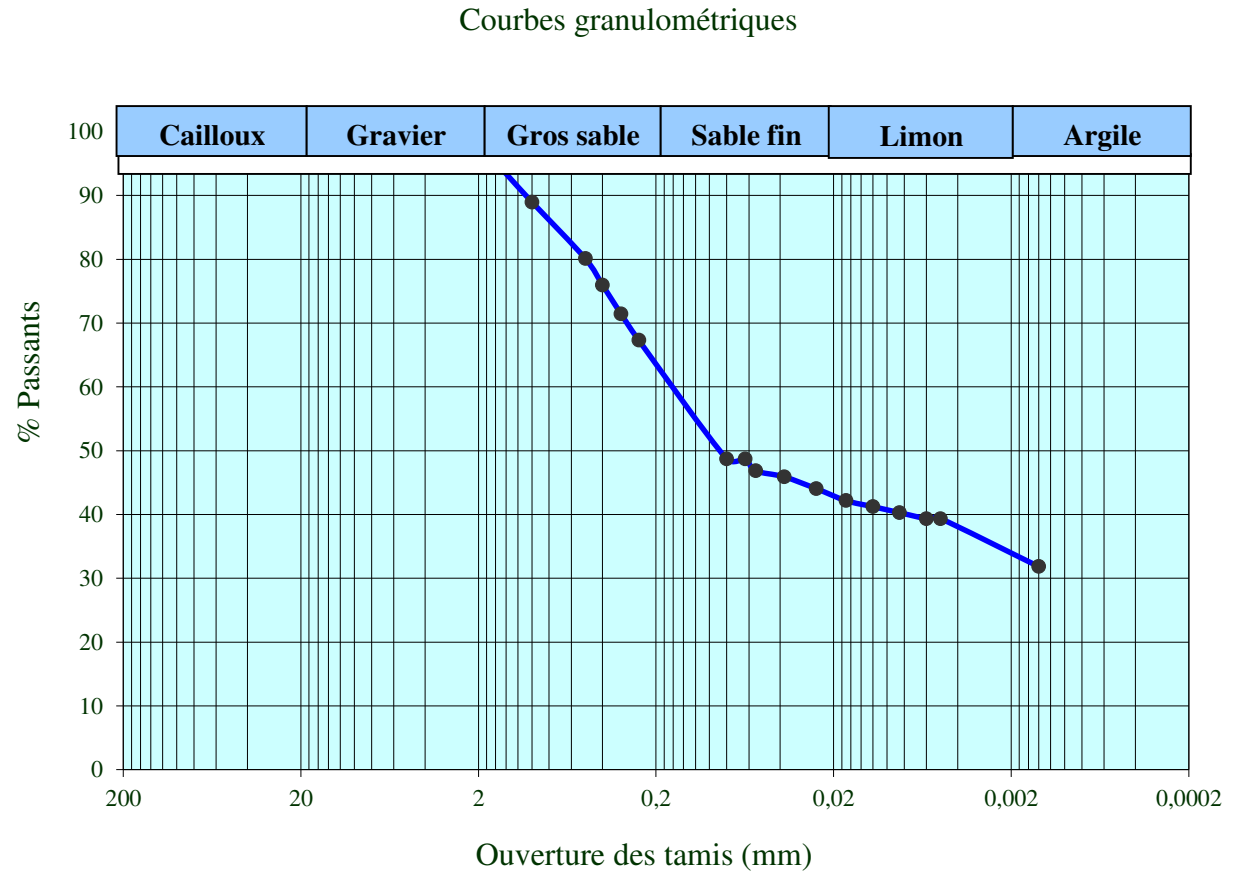
ECHANTILLONS TESTES		Hounga-Houégbé profondeur 1,50 m	RESULTATS		Valeur de Bleu de Méthylène (VBS) 11,94		Nature du sol : Remanié
			Inf 0,315	85,21	Matière Organique MO (%)	0,581	
CARACTERISTIQUES			Inf à 80µm	79,80	Poids Spécifique (T/m³)	2,21	
			WL	90	Indice de Plasticité	41	Sol plastique
			WP	49	Activité Ac	0,60	Sol peu actif
			CLASSE HRB	A7-5	CLASSE GTR		A4
Analyse granulométrique (Tamis)	% ≤ 40 mm						
	% ≤ 31,5 mm						
	% ≤ 25 mm						
	% ≤ 20 mm						
	% ≤ 16 mm						
	% ≤ 14 mm						
	% ≤ 12,5 mm						
	% ≤ 10 mm						
	% ≤ 8 mm			100,00			
	% ≤ 6,3 mm			98,41			
	% ≤ 5 mm			97,86			
	% ≤ 4 mm			97,14			
	% ≤ 3,15 mm			96,50			
	% ≤ 2 mm			94,44			
	% ≤ 1 mm			91,25			
	% ≤ 0,50 mm			87,99			
% ≤ 0,4 mm			86,64				
% ≤ 0,315 mm			85,21				
% ≤ 0,25 mm			84,17				
% ≤ 0,08 mm			79,80				
% ≤ 0,063 mm			79,80				
% ≤ 0,055 mm			78,03				
Analyse granulométrique (Sédimentation)	% ≤ 0,038 mm		78,03				
	% ≤ 0,025 mm		76,26				
	% ≤ 0,017 mm		74,49				
	% ≤ 0,012 mm		74,49				
	% ≤ 0,0085 mm		72,72				
	% ≤ 0,006 mm		72,72				
	% ≤ 0,005 mm		72,72				
% ≤ 0,0014 mm			67,40				



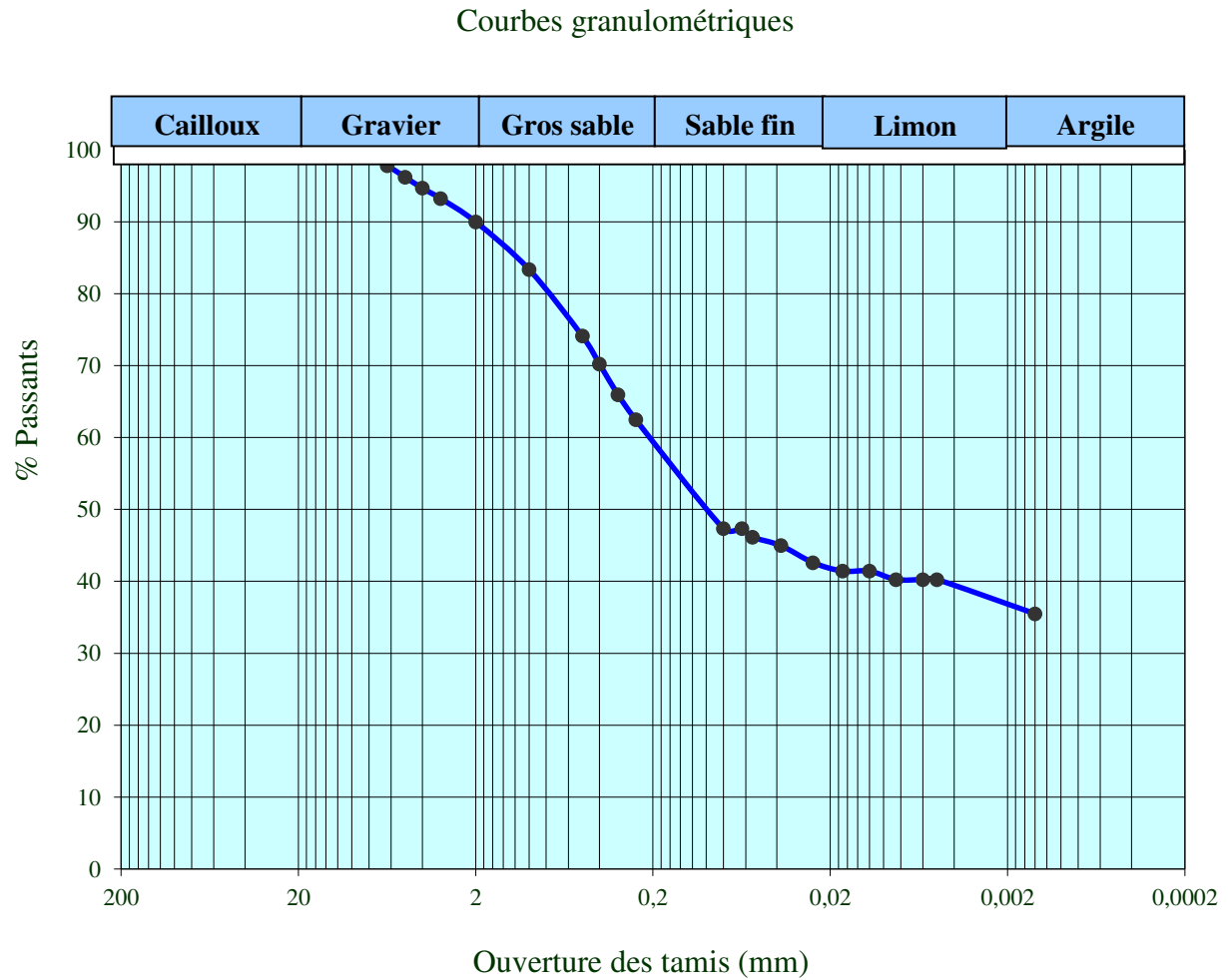
ECHANTILLONS TESTES		Salahoué profondeur 1,85 m	RESULTATS		Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)	Nature du sol : Remanié
			Inf 0,315	94,38	Matière Organique MO (%)	
CARACTERISTIQUES			Inf à 80µm	93,43	Poids Spécifique (T/m³)	2,23
			WL	94	Indice de Plasticité	44
			WP	50	Activité Ac	0,63
			CLASSE HRB	A7-5	CLASSE GTR	A2
Analyse granulométrique (Tamis)	% < 40 mm					
	% < 31,5 mm					
	% < 25 mm					
	% < 20 mm					
	% < 16 mm					
	% < 14 mm					
	% < 12,5 mm					
	% < 10 mm					
	% < 8 mm					
	% < 6,3 mm					
	% < 5 mm					
	% < 4 mm					
	% < 3,15 mm		100,00			
	% < 2 mm		97,71			
	% < 1 mm		96,20			
Analyse granulométrique (Sédimentation)	% < 0,50 mm		95,02			
	% < 0,4 mm		94,78			
	% < 0,315 mm		94,38			
	% < 0,25 mm		94,07			
	% < 0,08 mm		93,43			
	% < 0,063 mm		93,43			
	% < 0,055 mm		91,15			
	% < 0,038 mm		88,87			
	% < 0,025 mm		86,59			
	% < 0,017 mm		84,31			
	% < 0,012 mm		82,03			
	% < 0,0085 mm		79,75			
% < 0,006 mm		79,75				
% < 0,005 mm		77,47				
% < 0,0014 mm		68,36				



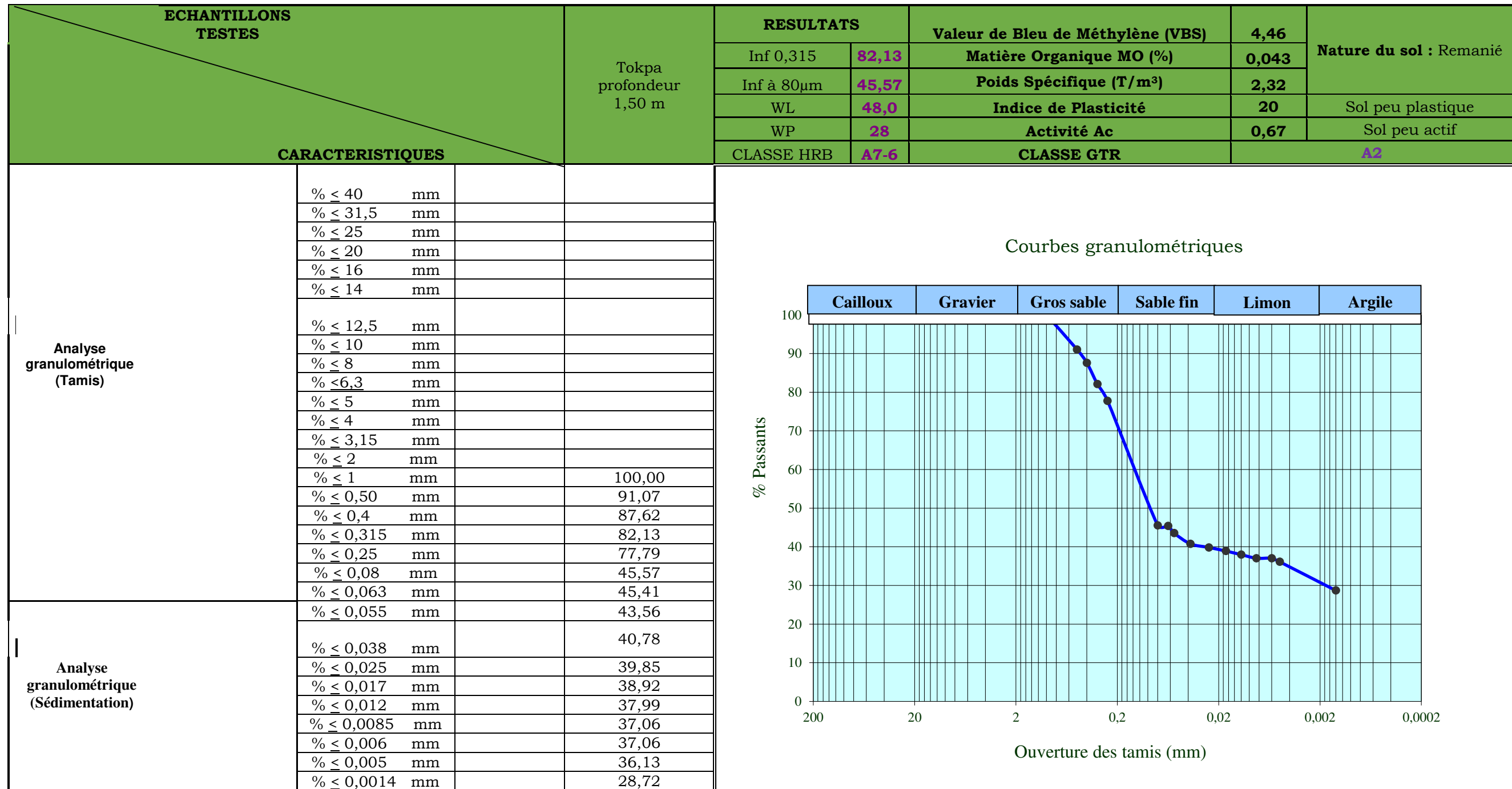
ECHANTILLONS TESTES			Sèwakomey profondeur 1,50 m	RESULTATS		Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)		Nature du sol : Remanié
				Inf 0,315	71,46	Matière Organique MO (%)	0,081	
CARACTERISTIQUES					Inf à 80µm	48,74	Poids Spécifique (T/m³)	2,18
					WL	45	Indice de Plasticité	20
					WP	25	Activité Ac	0,60
					CLASSE HRB	A7-6	CLASSE GTR	A1
Analyse granulométrique (Tamis)	% ≤ 40	mm						
	% ≤ 31,5	mm						
	% ≤ 25	mm						
	% ≤ 20	mm						
	% ≤ 16	mm						
	% ≤ 14	mm						
	% ≤ 12,5	mm						
	% ≤ 10	mm						
	% ≤ 8	mm						
	% ≤ 6,3	mm						
	% ≤ 5	mm			100,00			
	% ≤ 4	mm			99,69			
	% ≤ 3,15	mm			99,47			
	% ≤ 2	mm			97,71			
	% ≤ 1	mm			88,98			
	% ≤ 0,50	mm			80,11			
	% ≤ 0,4	mm			75,98			
% ≤ 0,315	mm			71,46				
% ≤ 0,25	mm			67,33				
% ≤ 0,08	mm			48,74				
% ≤ 0,063	mm			48,74				
Analyse granulométrique (Sédimentation)	% ≤ 0,055	mm		46,87				
	% ≤ 0,038	mm		45,93				
	% ≤ 0,025	mm		44,06				
	% ≤ 0,017	mm		42,19				
	% ≤ 0,012	mm		41,25				
	% ≤ 0,0085	mm		40,31				
	% ≤ 0,006	mm		39,37				
% ≤ 0,005	mm		39,37					
% ≤ 0,0014	mm		31,87					



ECHANTILLONS TESTES		Sohounmè profondeur 1,50 m	RESULTATS		Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)	Nature du sol : Remanié
			Inf 0,315	65,97	Matière Organique MO (%)	
CARACTERISTIQUES			Inf à 80µm	47,34	Poids Spécifique (T/m³)	2,58
			WL	35	Indice de Plasticité	12
			WP	23	Activité Ac	0,33
			CLASSE HRB	A6	CLASSE GTR	A1
Analyse granulométrique (Tamis)	% ≤ 40 mm					
	% ≤ 31,5 mm					
	% ≤ 25 mm					
	% ≤ 20 mm					
	% ≤ 16 mm					
	% ≤ 14 mm					
	% ≤ 12,5 mm					
	% ≤ 10 mm		100,00			
	% ≤ 8 mm		99,28			
	% ≤ 6,3 mm		97,82			
	% ≤ 5 mm		96,21			
	% ≤ 4 mm		94,68			
	% ≤ 3,15 mm		93,23			
	% ≤ 2 mm		90,00			
	% ≤ 1 mm		83,39			
	% ≤ 0,50 mm		74,11			
	% ≤ 0,4 mm		70,24			
% ≤ 0,315 mm		65,97				
% ≤ 0,25 mm		62,50				
% ≤ 0,08 mm		47,34				
% ≤ 0,063 mm		47,34				
Analyse granulométrique (Sédimentation)	% ≤ 0,055 mm		46,16			
	% ≤ 0,038 mm		44,98			
	% ≤ 0,025 mm		42,61			
	% ≤ 0,017 mm		41,43			
	% ≤ 0,012 mm		41,43			
	% ≤ 0,0085 mm		40,25			
	% ≤ 0,006 mm		40,25			
% ≤ 0,005 mm		40,25				
% ≤ 0,0014 mm		35,51				







ECHANTILLONS TESTES		Zongo Profondeur 1.50 m	RESULTATS		Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)	Nature du sol : Remanié	
			Inf 0,315	84,26	Matière Organique MO (%)		0,693
CARACTERISTIQUES			Inf à 80µm	74,54	Poids Spécifique (T/m³)	2,25	
			WL	74,0	Indice de Plasticité	34	Sol plastique
			WP	40	Activité Ac	0,58	Sol peu actif
			CLASSE HRB	A7-5	CLASSE GTR	A2	

Analyse granulométrique (Tamis)	mm	%
	< 40	mm
< 31,5	mm	
< 25	mm	
< 20	mm	
< 16	mm	
< 14	mm	
< 12,5	mm	100,00
< 10	mm	97,03
< 8	mm	96,50
< 6,3	mm	95,54
< 5	mm	95,19
< 4	mm	93,96
< 3,15	mm	93,18
< 2	mm	91,69
< 1	mm	88,80
< 0,50	mm	86,01
< 0,4	mm	85,13
< 0,315	mm	84,26
< 0,25	mm	83,47
< 0,08	mm	74,54
< 0,063	mm	74,37
< 0,055	mm	69,72
< 0,038	mm	69,72
< 0,025	mm	68,17
< 0,017	mm	66,62
< 0,012	mm	65,07
< 0,0085	mm	65,07
< 0,006	mm	63,52
< 0,005	mm	63,52
< 0,0014	mm	57,32

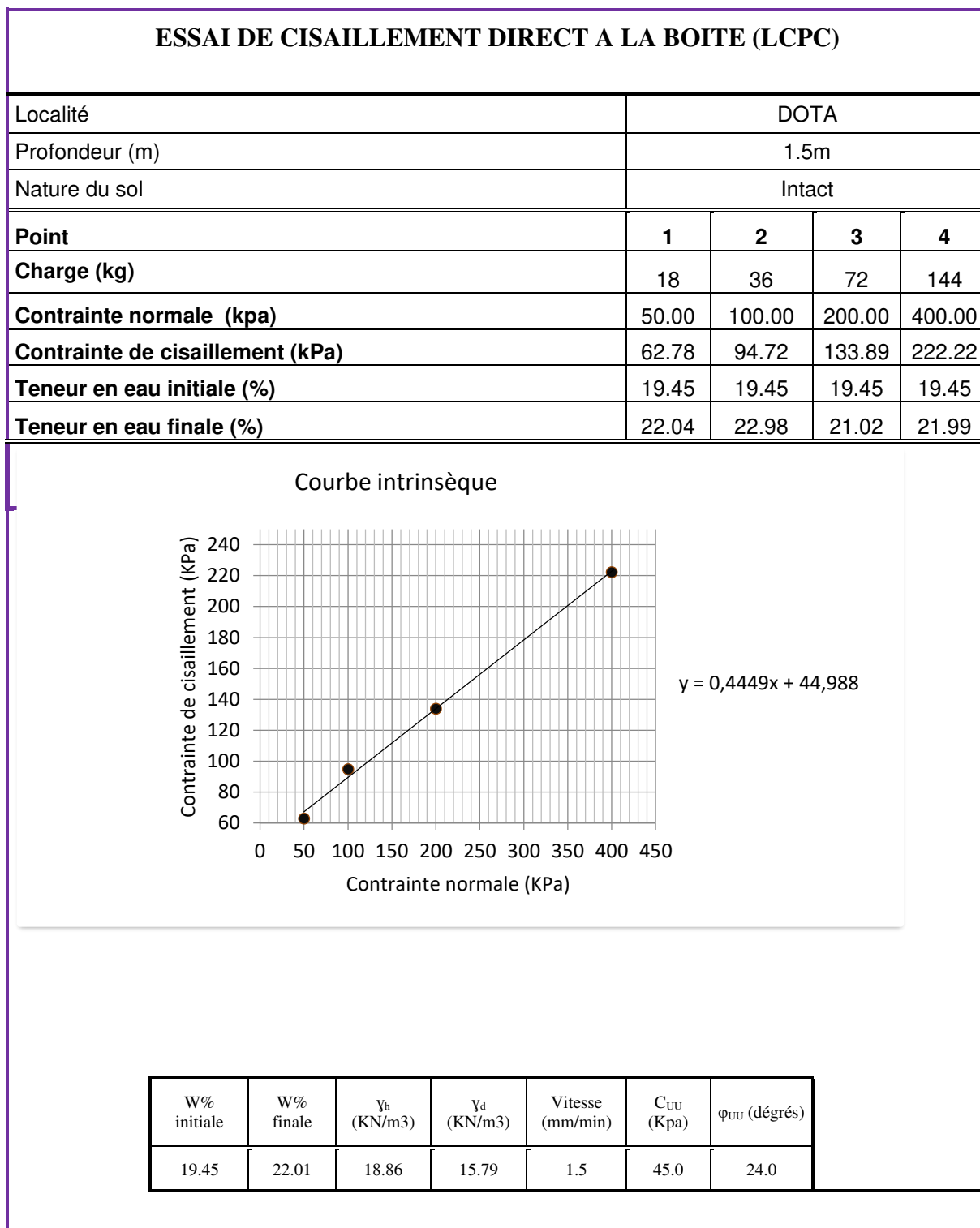
  

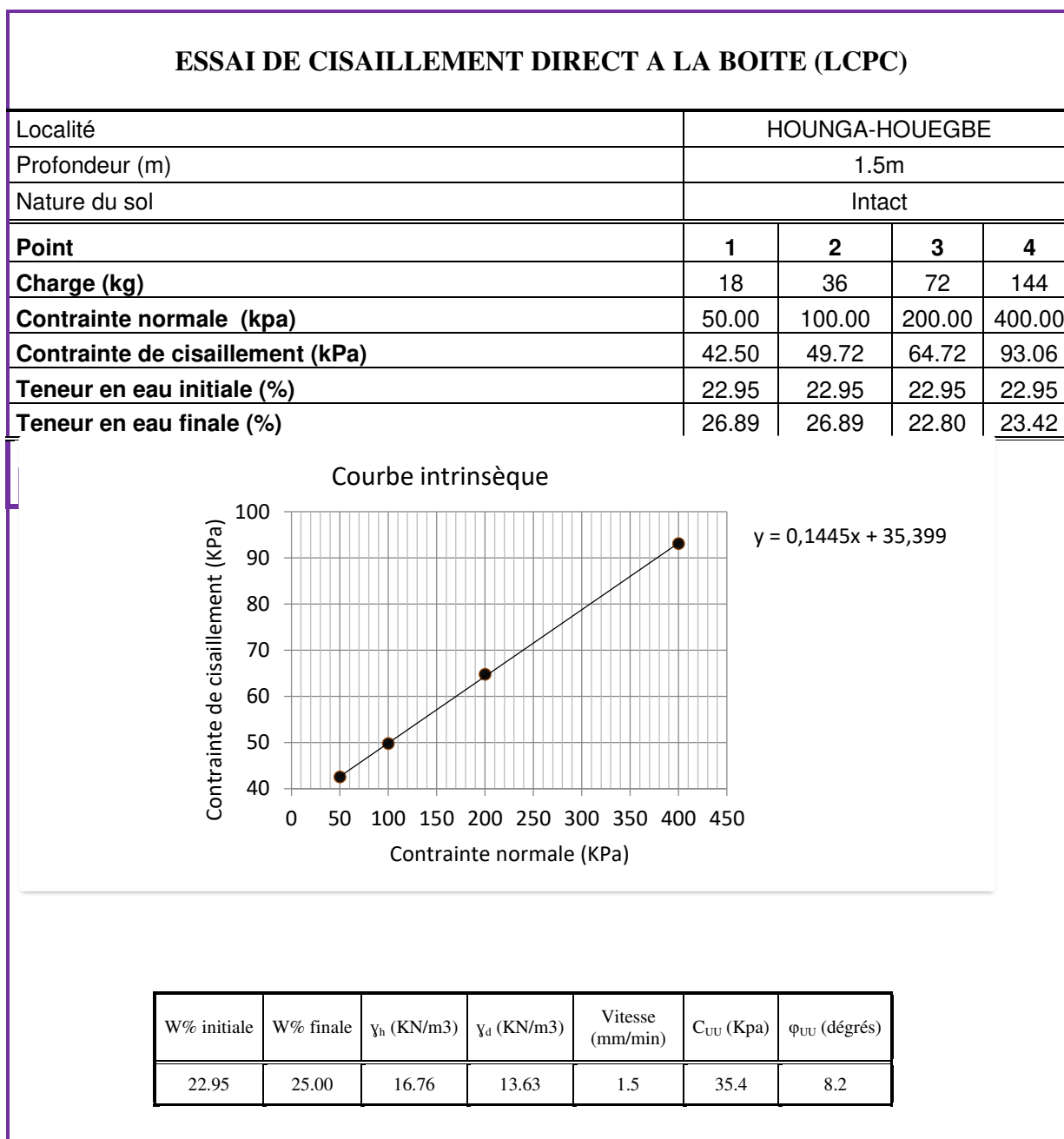
Courbes granulométriques

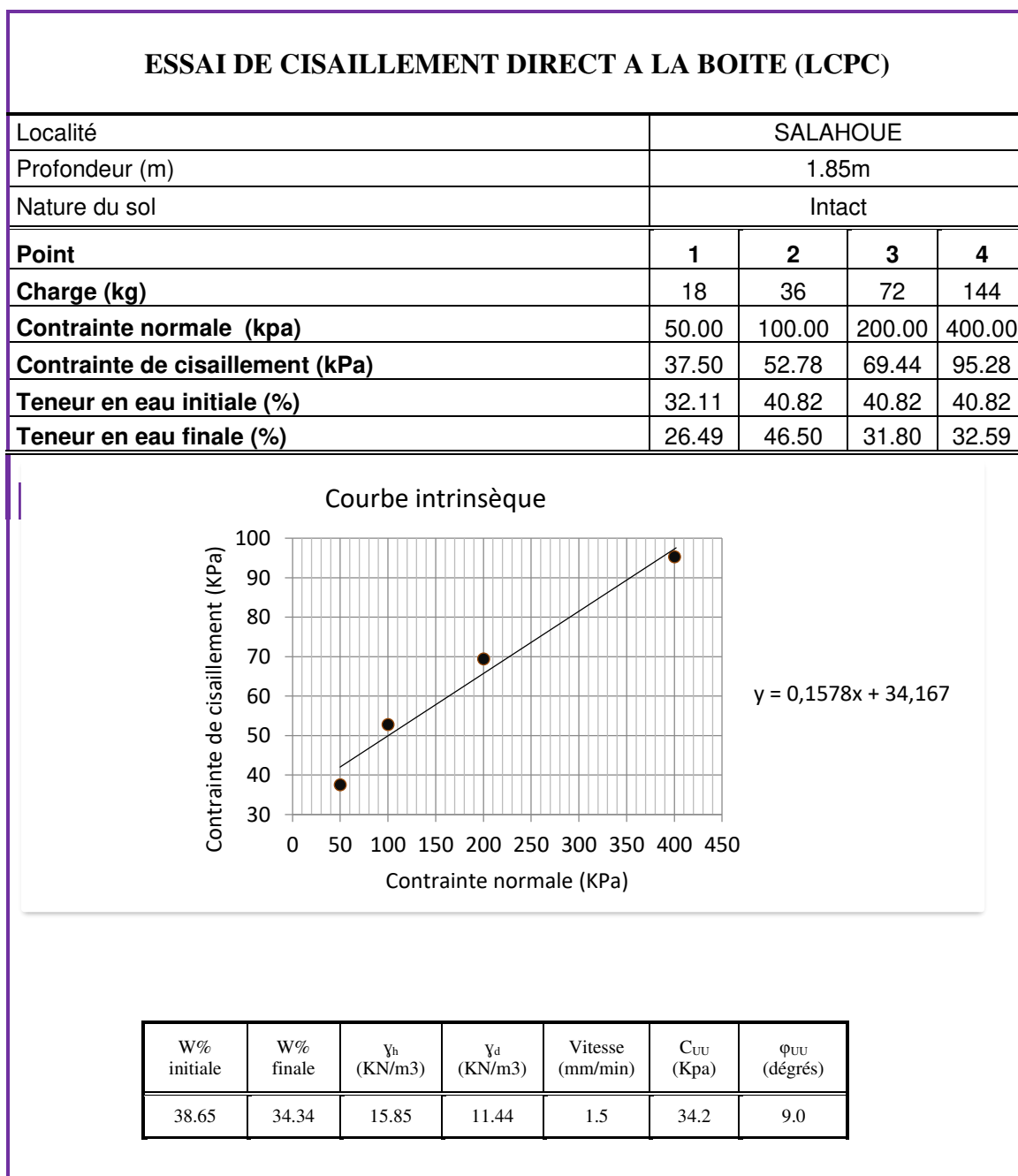
Cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Limon	Argile
----------	---------	------------	-----------	-------	--------



**Annexe 2 : Essais de cisaillement**



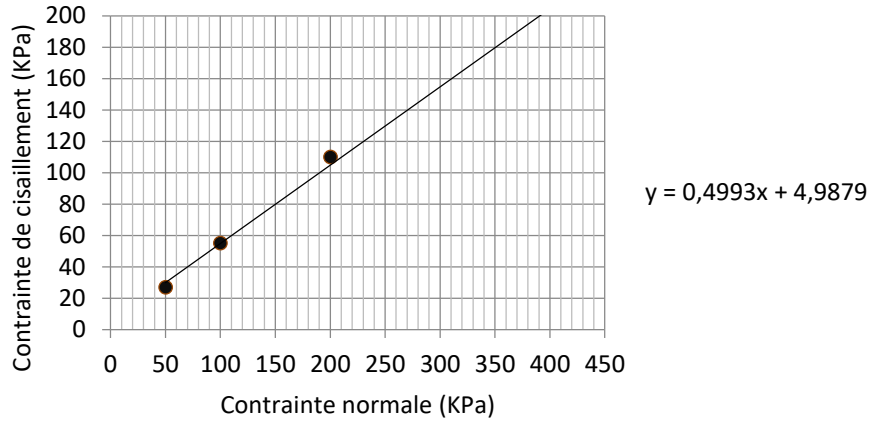




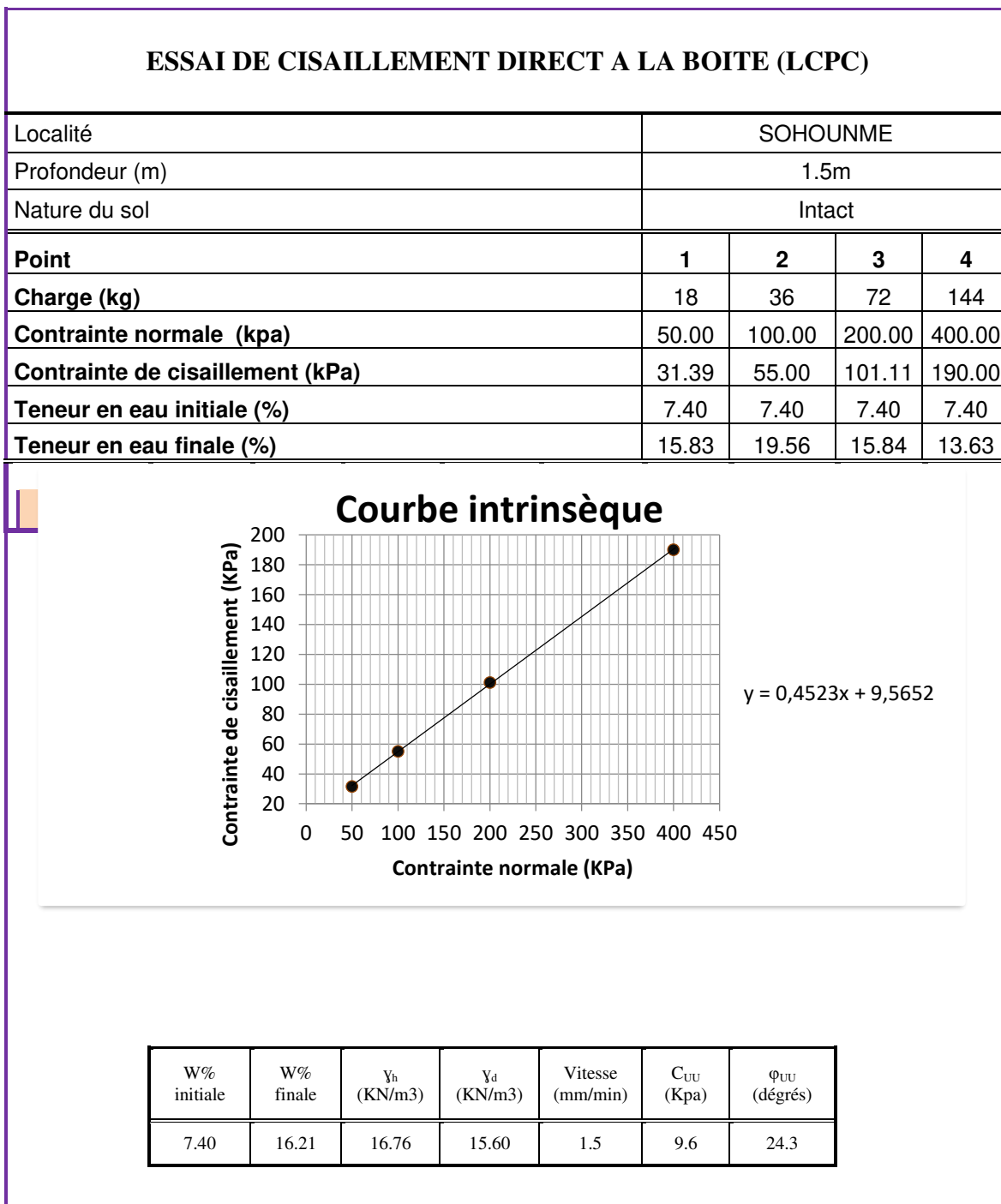
**ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)**

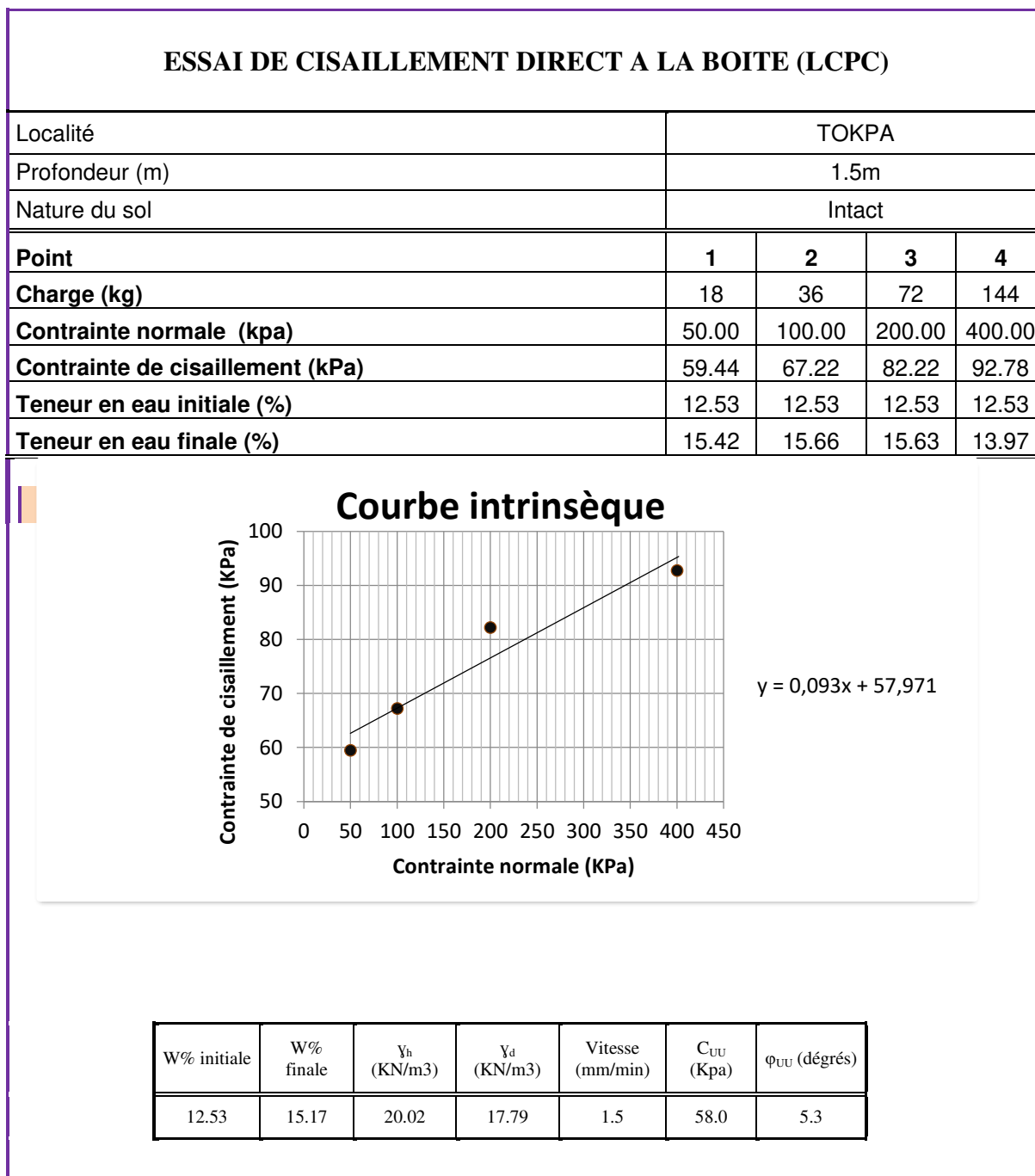
Localité	SEWAKOMEY			
Profondeur (m)	1.5m			
Nature du sol	Intact			
<b>Point</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Charge (kg)</b>	18	36	72	144
<b>Contrainte normale (kpa)</b>	50.00	100.00	200.00	400.00
<b>Contrainte de cisaillement (kPa)</b>	26.94	55.00	110.00	202.50
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	10.04	10.04	10.04	10.04
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	17.51	17.51	13.70	13.25

Courbe intrinsèque



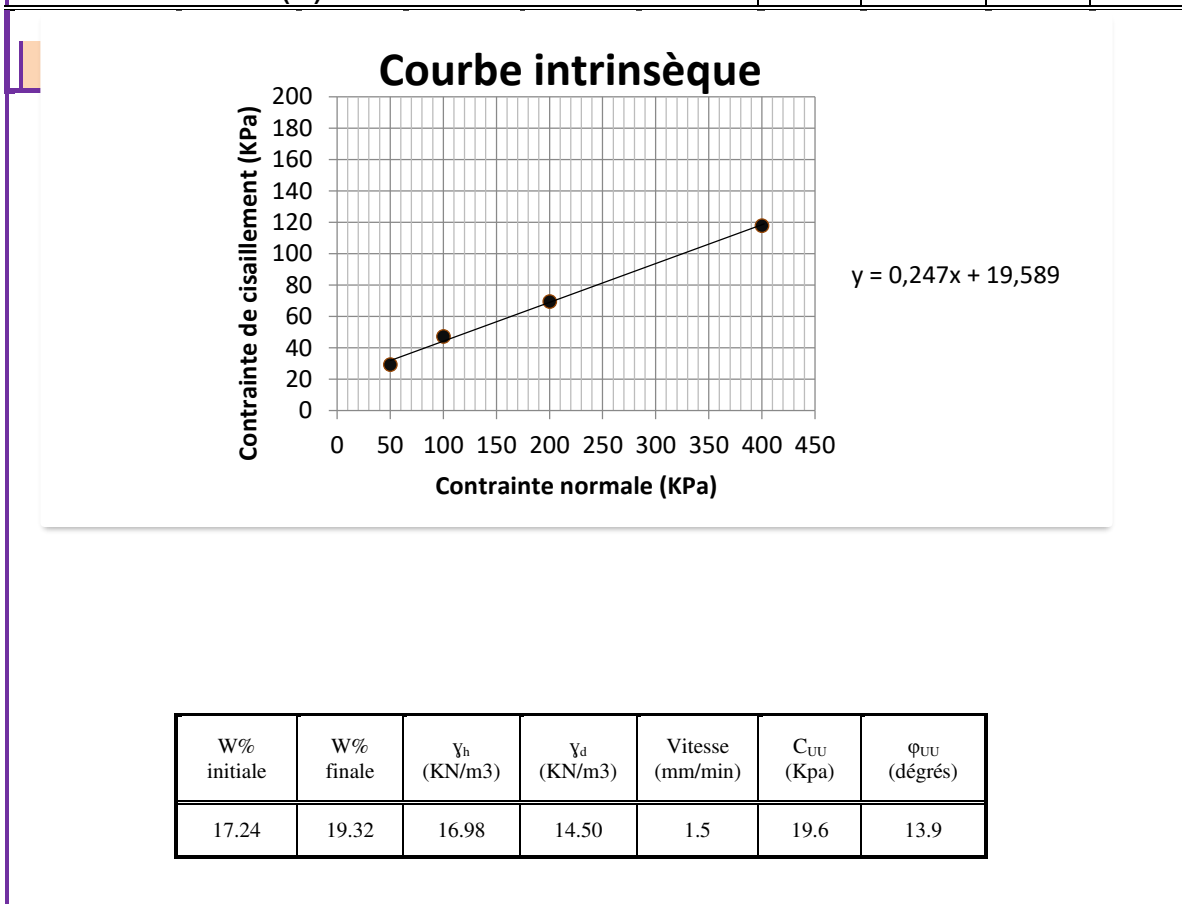
W% initiale	W% finale	$\gamma_h$ (KN/m3)	$\gamma_d$ (KN/m3)	Vitesse (mm/min)	$C_{UU}$ (Kpa)	$\phi_{UU}$ (dégrés)
10.04	15.49	16.76	15.23	1.5	5.0	26.5



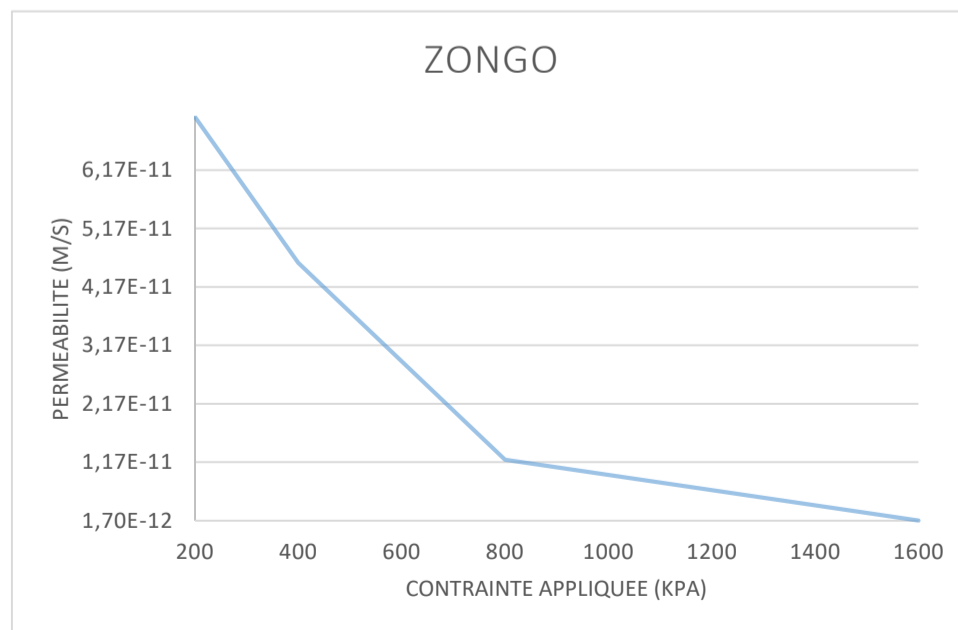
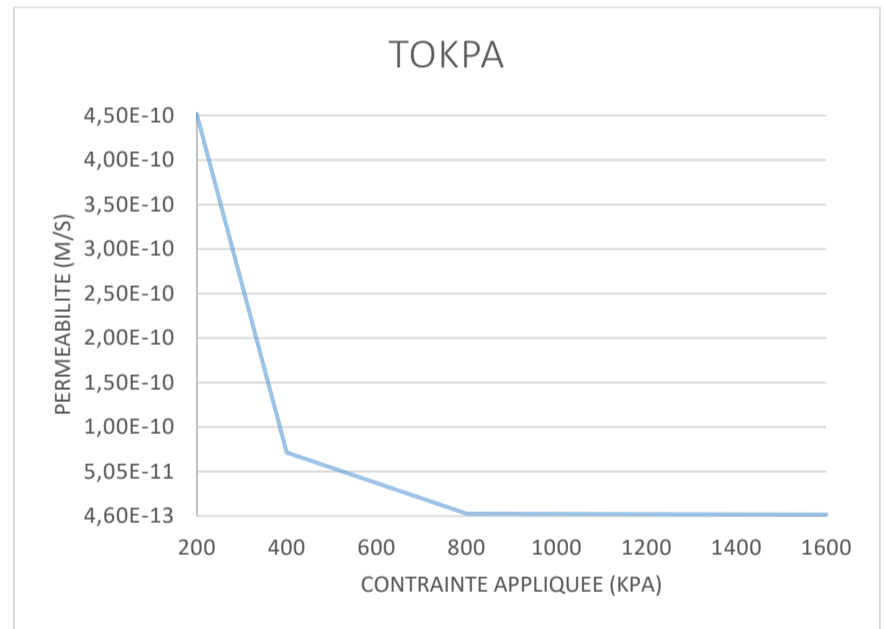
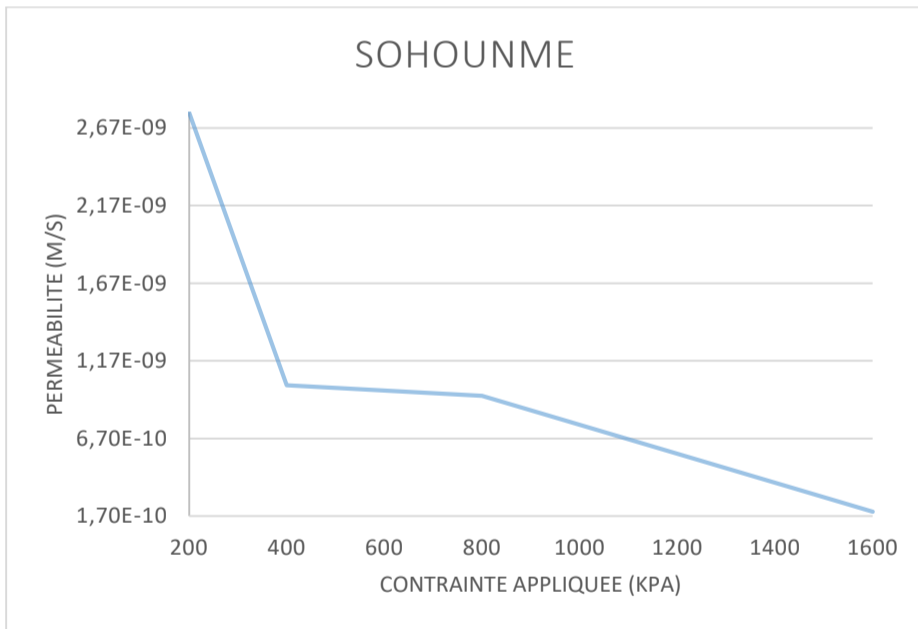
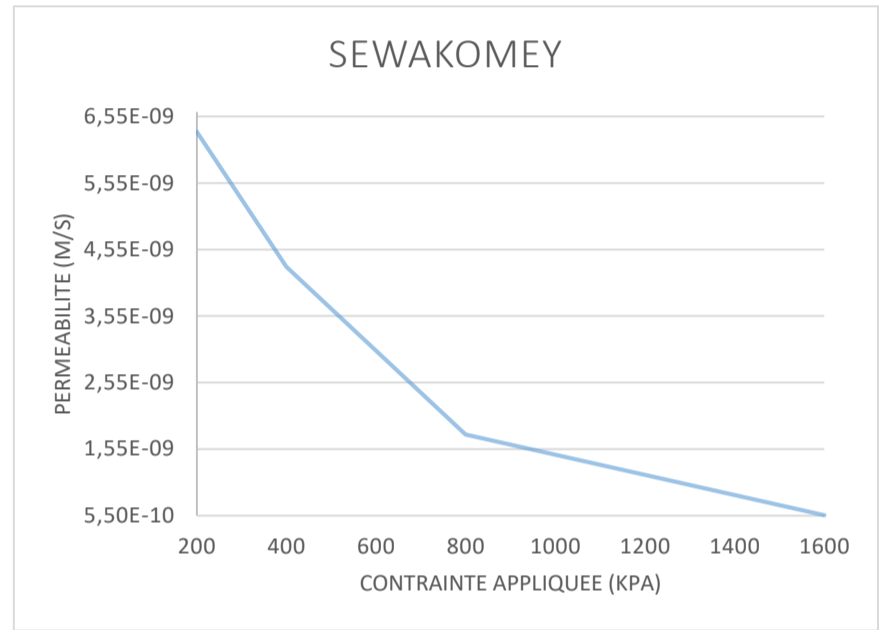
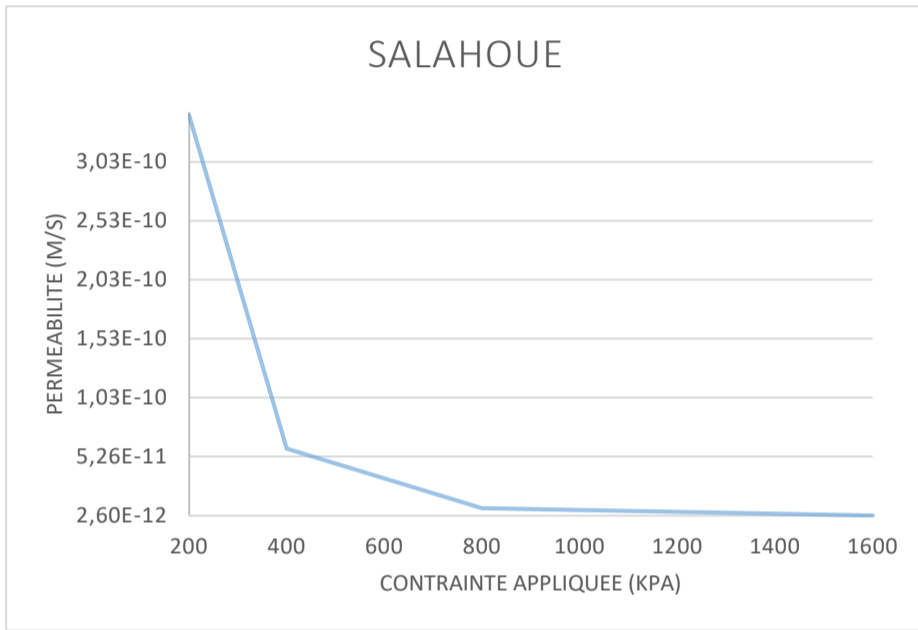
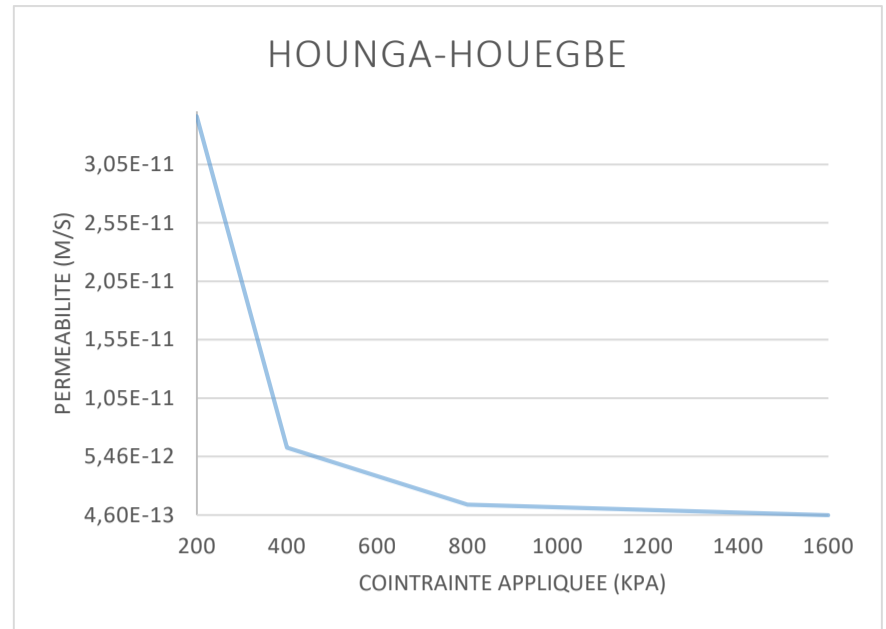
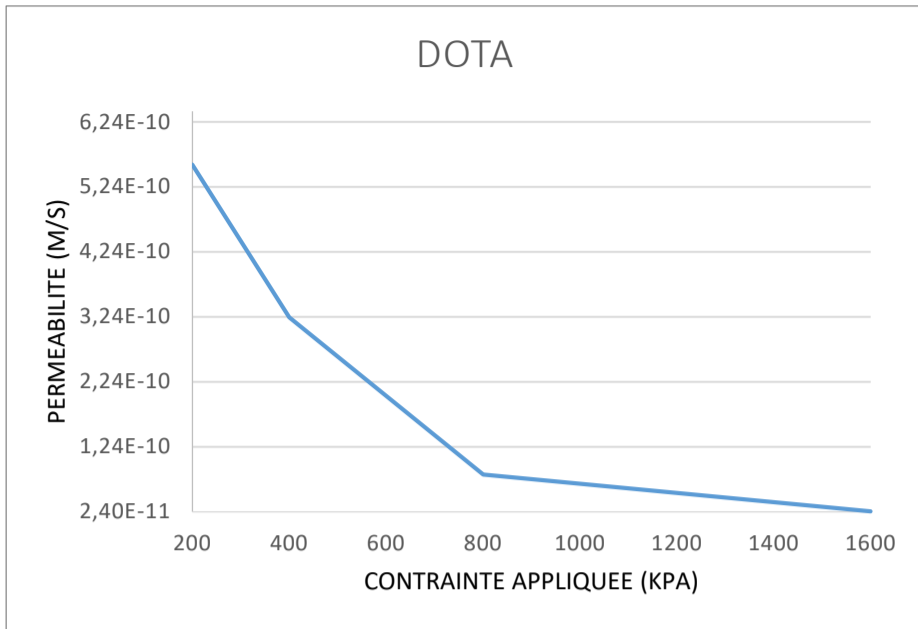


**ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE (LCPC)**

Localité	ZONGO			
Profondeur (m)	1.5m			
Nature du sol	Intact			
<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>	29.17	47.22	69.44	117.78
<b>Teneur en eau initiale (%)</b>	14.49	25.50	14.49	14.49
<b>Teneur en eau finale (%)</b>	14.07	32.09	14.10	17.00

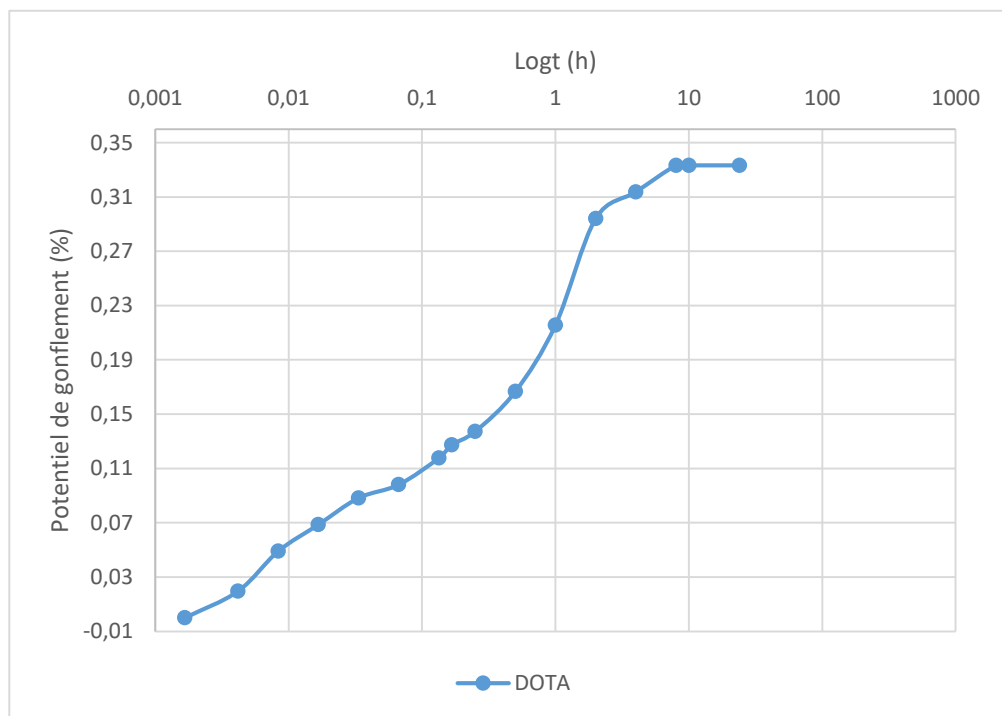


Annexe 3 : Essais œdométriques

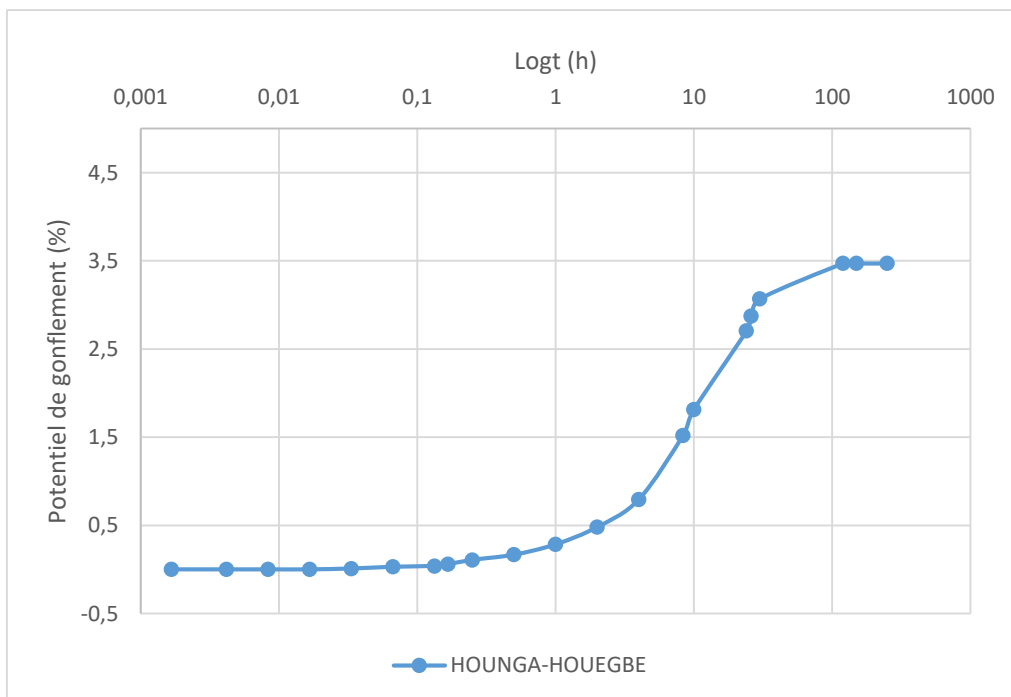


Annexe 4 : Essais de gonflement libre

🚩 Courbe de gonflement libre de DOTA

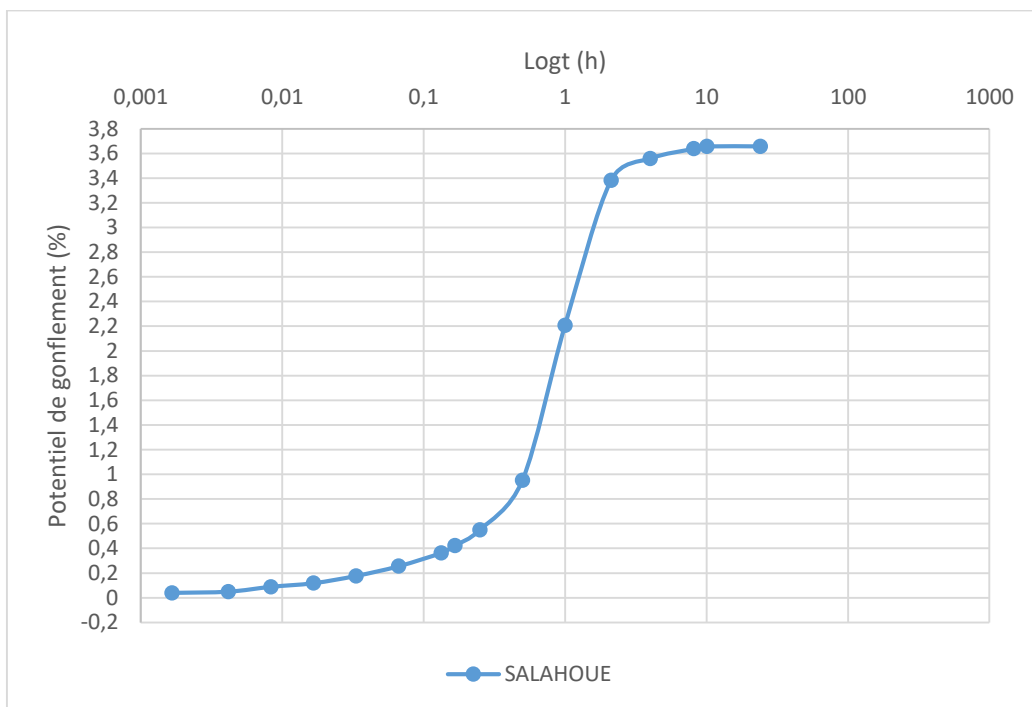


🚩 Courbe de gonflement libre de HOUNGA-HOUEGBE

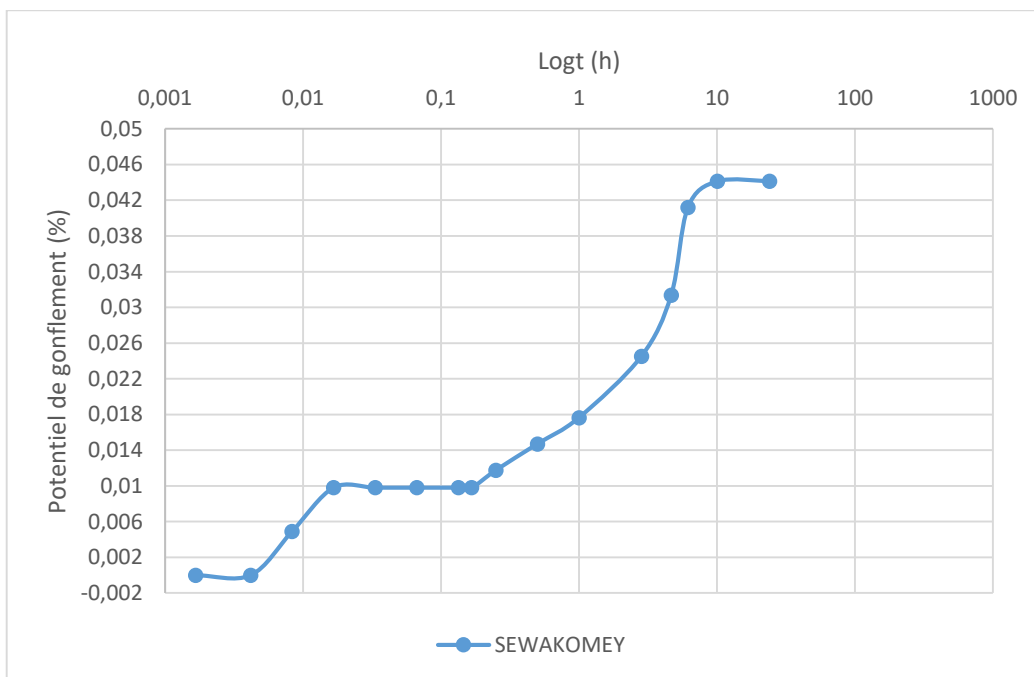


## Annexe 4 : Essais de gonflement libre

— Courbe de gonflement libre de SALAHOUE

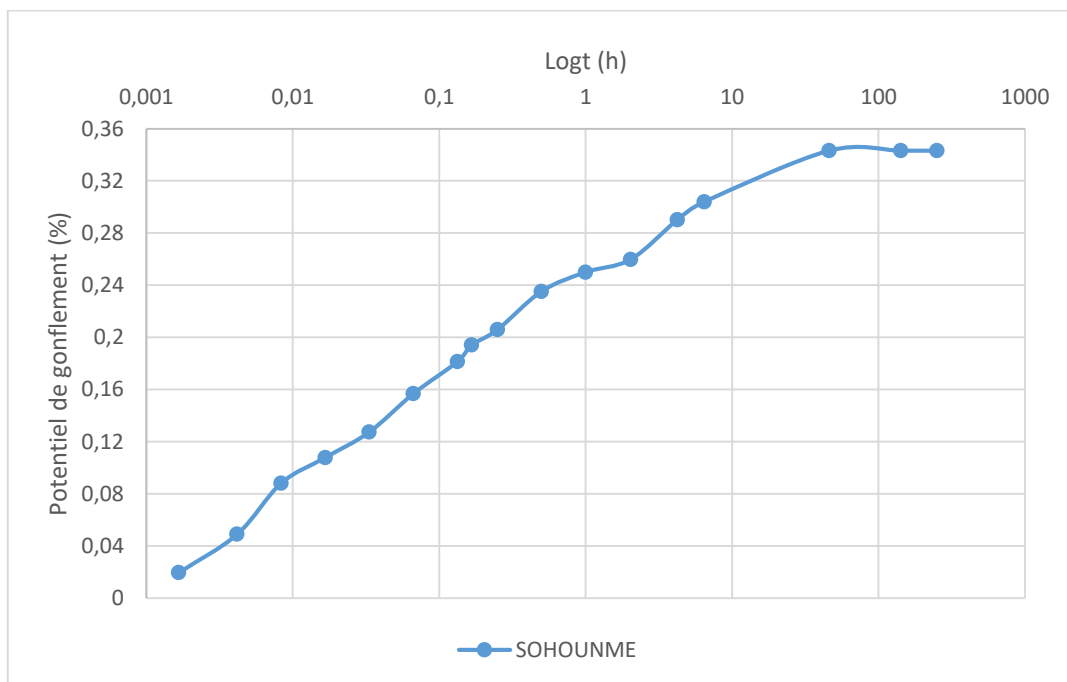


— Courbe de gonflement libre de SEWAKOMEY

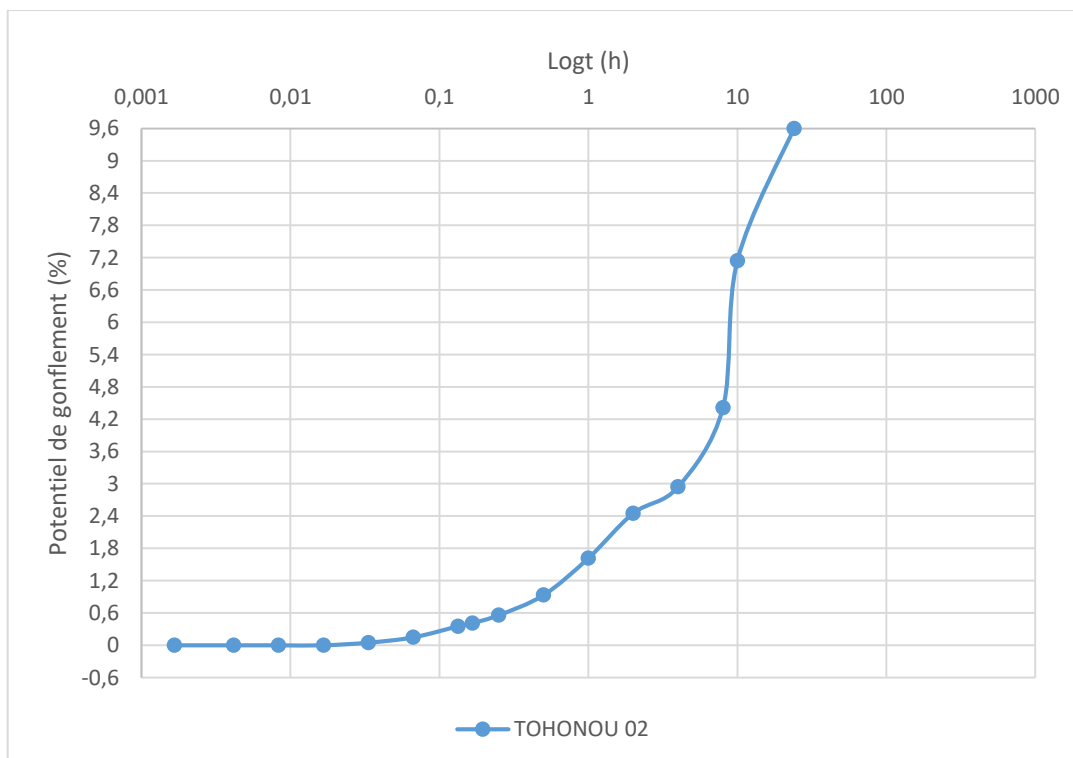


## Annexe 4 : Essais de gonflement libre

— Courbe de gonflement libre de SOHOUNME

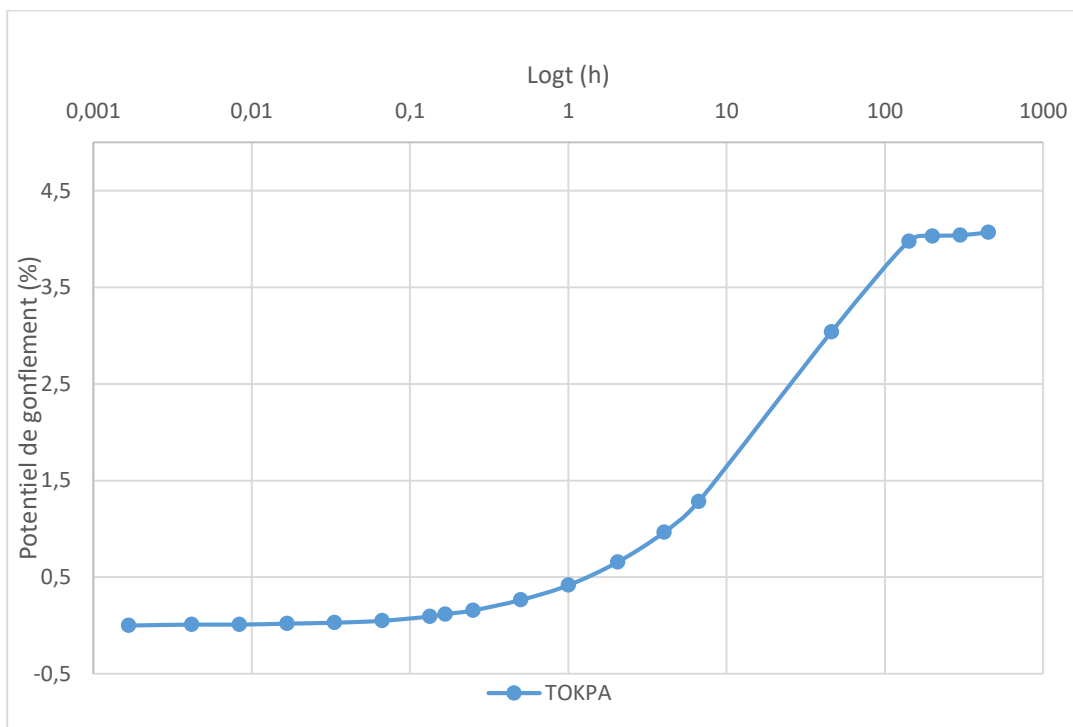


— Courbe de gonflement libre de TOHONOU 02



## Annexe 4 : Essais de gonflement libre

🚧 Courbe de gonflement libre de TOKPA



🚧 Courbe de gonflement libre de ZONGO

