UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Stabilisation des sols gonflants et leurs impacts sur les constructions. Cas des argiles gonflantes de Roi Khaled et de l'école normale supérieure

Nsengumuremyi, Antoine

2020-10
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/90

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET ENVIRONNEMENTAL

STABILISATION DES SOLS GONFLANTS ET LEURS IMPACTS SUR LES CONSTRUCTIONS.

CAS DES ARGILES GONFLANTES DE ROI KHALED ET DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE.

Par

NSENGUMUREMYI Antoine

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences de l'ingénieur
Option : Génie civil, Aménagement et Maitrise des Projets

Membres du Jury :

- Dr. Ir MIKEREGO Emmanuel : Président
- Dr. Ir MASEKANYA Jean- Pierre : Directeur
- Dr. Ir BIZINDAVYI Josias : Lecteur principal
- Dr. Ir HATUNGIMANA Daniel : Membre

Bujumbura, Octobre 2020

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

- Dr. Ir MIKEREGO Emmanuel : Président
- Dr. Ir MASEKANYA Jean- Pierre : Directeur
- Dr. Ir BIZINDAVYI Josias : Lecteur principal
- Dr. Ir HATUNGIMANA Daniel : Membre

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, ma mère qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci ma mère.

A tous mes amis sans exception.

A toute ma famille.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, louange à DIEU qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long de ce travail et m'a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait jamais pu aboutir.

Mes remerciements vont à mon promoteur Monsieur Dr- Ir. MASEKANYA Jean Pierre. J'ai eu le privilège de travailler avec vous et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.
Votre sérieux, vos compétences et votre sens du devoir m'ont énormément marqué**.** Veuillez trouver ici l'expression de ma respectueuse considération et ma profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines. Ce travail est pour nous l'occasion de vous témoigner notre profonde gratitude.

Je tiens également à remercier Messieurs le président et les autres membres du jury d'avoir accepté l'évaluation de mon mémoire.
J'adresse aussi un grand merci à toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

RESUME

Les argiles actives, sols gonflants, causent des problèmes très délicats aux ouvrages du Génie-civil. Ceci est dû à l'instabilité structurelle et volumique de leur masse suite au phénomène de retrait – gonflement déclenché par la variation de la teneur en eau. Ce phénomène a depuis longtemps fait objet de plusieurs études sur ce genre de sols et diverses techniques ont été proposées pour leur stabilisation par amélioration de leurs propriétés mécaniques.

Cette étude présente dans un premier temps les résultats expérimentaux des essais d'identification (l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg) effectués sur les argiles gonflantes des périmètres du Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge (CHUK) et de l'Ecole Normale Supérieure (ENS). Sur Quarante-huit échantillons prélevés, trois échantillons représentatifs (éch12, éch19, éch31) ayant à la fois des valeurs élevées de limite de liquidité et de l'indice de plasticité et du coefficient d'activité supérieur à 1,25 ont été retenus pour la suite de l'expérimentation. L'échantillon 19 avec un gonflement de 1,3 mm et une pression de gonflement de 55 kN/m^2 est celui sur lequel les essais de stabilisation ont été réalisés après sa reconstitution préalable visant à lui rétablir les mêmes états initiaux qu'in situ. L'échantillon reconstitué présente les valeurs de 1,53mm de gonflement et 52,5 kN/m^2pour la pression de gonflement.

La technique de stabilisation par des solutions salines du Chlorure de Sodium (NaCl), du Chlorure de Potassium (KCl) et du Chlorure d'Ammonium (NH_4Cl) à différentes concentrations sur l'échantillon compacté dans un modèle physique réduit de 12,00 cm de hauteur et 18,32 cm de diamètre permet de passer d'un couple gonflement (%)/pression de gonflement (kN/m^2) de 5,20/57,00 pour une saturation à l'eau, à 1,99/35,38; 1,72/32,30 et 1,88/33,84 pour une saturation d'une solution de 2 mol/l du NaCl, KCl et NH_4Cl respectivement. Avec une réduction de 66,99 % sur le gonflement et de 43,49 % sur la pression de gonflement, le KCl offre une meilleure stabilisation par solution saline de l'échantillon.

Mots clés : Sols gonflants, Stabilisation, Impact sur les structures

ABSTRACT

Active clays, swelling soils, cause very delicate problems to civil engineering works. This is due to the structural and volumetric instability of their mass due to the phenomenon of shrinkage - swelling triggered by the variation in water content. This phenomenon has long been the subject of several studies on this type of soil and various techniques have been suggested for their stabilization by improving their mechanic properties.

This study presents at first experimental results of identification tests (granulometric analysis and Atterberg limits) carried out on the swelling clays on the perimeters of Kamenge University Hospital center (CHUK) and Superior Normal School (ENS). From forty-eight samples taken, three representative samples (ech12, ech19, ech31) with both high values of liquidity limit and plasticity index and activity coefficient greater than 1.25 were selected for further experimentation. The sample ech19 with a swelling of 1.3 mm and a swelling pressure of 55 $kN/m^2$is the one on which stabilization tests were carried out after its prior reconstitution aimed at restoring it to same initial states as in situ. Reconstituted sample shall have values of 1.53 mm of inflation and 52.5 kN/m^2 and inflation pressure.

The technique of stabilization by saline solutions of Sodium Chloride (NaCl), Potassium Chloride (KCl) and Ammonium Chloride (NH4Cl) at different concentrations on sample compacted in a physical model 12.00 cm high and 18.32 cm in diameter allows a swelling torque (%)/swelling pressure (kN/m^2) of 5.20/57.00 for water saturation to be changed from 5.20/57.00 to 1.99/35.38; 1.72/32.30 and 1.88/33.84 for saturation of a 2 mol/l solution of NaCl, KCl and NH4Cl respectively. With a reduction of 66.99% on swelling and 43.49% on swelling pressure, KCl offers the best saline stabilization of the sample.

Key words: Swelling soils, Stabilization, Impact on structures

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i

DEDICACES ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS xiii

AVANT-PROPOS xiv

CHAPI. INTRODUCTION GENERALE 1

I.1 Introduction 1

I.2 Objectifs 2

I.2.1 Objectif général 2

I.2.2 Objectifs spécifiques 2

I.3 Méthodologie 2

I.4 Organisation de la thèse 3

CHAPII. GENERALITES SUR LES SOLSGONFLANTS ET LE PHENOMENE DE GONFLEMENT 4

II.1 Introduction 4

II.2 Les argiles 4

II.2.1 Définition 4

II.2.2 Origines des argiles 5

II.2.3 Nature et structure des sols argileux 6

II.2.4 Interaction entre l'eau et les minéraux argileux 8

II.2.5 Les différents types d'argiles 9

II.2.6 Les Caractéristiques principales des minéraux argileux 14
II.2.7 Texture des argiles 16
II.2.8 Cations échangeables 17
II.3 Gonflement du sol 17
II.3.1 Phénomène de retrait- gonflement du sol 17
II.3.2 Mécanisme de gonflement 18
II.3.3 Type de gonflement 18
II.3.4 Les causes de gonflement 20
II.3.5 Les facteurs qui influencent le gonflement d'un sol 21
II.4 Identification et classification des sols gonflants 22
II.4.1 Classification des sols gonflants selon la méthode de Skempton 22
II.4.2 Classification des sols gonflants selon la méthode de Chen 23
II.4.3 Classification des sols gonflants selon Seed (1962) et Snethen (1980) 23
II.5 Mesure du potentiel et de la pression de gonflement 26
II.5.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement 26
II.5.2 Mesure directe des paramètres de gonflement 26
II.6 Conclusion 27
CHAPIII. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SOLS ETUDIES 29
III.1 Introduction 29
III.2 Localisation de la zone d'étude 29
III.3 Identification du sol étudié 30
III.3.1 Etude géotechnique 30
III.3.2 Les essais de reconstitution du sol 42
CHAPIV. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA STABILISATION DES SOLS GONFLANTS AVEC DES SELS A L'AIDE D'UN MODELE PHYSIQUE REDUIT. 44
IV.1 Introduction 44
IV.2 But de la stabilisation 44

IV.3 Les différentes techniques de stabilisation 44
IV.3.1 Stabilisation chimique 44
IV.3.2 Stabilisation mécanique 45
IV.3.3 Stabilisation thermique 46
IV.4 Mécanisme de stabilisation avec des sels 47
IV.5 Description et fonctionnement du modèle 47
IV.6 Préparation des solutions salines 48
IV.7 Les essais de stabilisation du sol étudié par les sels 48
IV.8 Présentation et Interprétation des résultats 49
IV.8.1 Evolution du gonflement avec les solutions salines 56
IV.8.2 Evolution de la pression de gonflement avec les solutions salines 58
IV.8.3 Evolution du tassement avec les solutions salines 61
CHAPV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONSET PERSPECTIVES 66
V.1 Synthèse 66
V.2 Contribution de ce mémoire 67
V.3 Perspectives 67
V.3.1 Impacts des sels sur l'environnement 67
V.3.2 Aspect de mise en œuvre 68
V.3.3 Aspects de durabilité 68
ANNEXES : 69
Résultats des essais géotechniques 69
BIBLIOGRAPHIE 93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.2-1:Caractéristique de certaines familles d'argile 14
Tableau II.2-2:Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux, d'après..... 15
Tableau II.4-1 : Classification des sols gonflants selon la méthode de skempton 22
Tableau II.4-2 : Relation entre potentiel de gonflement et l'indice de plasticité 23
Tableau II.4-3:Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité 23
Tableau II.4-4:Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité 23
Tableau II.4-5:Potentiel de gonflement 24
Tableau III.3-1: Résultats des essais géotechniques pour le calcul du CA 33
Tableau III.3-2:Résultats pour les essais de gonflement et de la pression de gonflement..... 42
Tableau III.3-3:Comparaison des résultats obtenus sur l'échantillon intact et l'échantillon reconstitué 43
Tableau IV.3-1:Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées..... 46
Tableau IV.8-1:Réduction en pourcentage du gonflement du sol étudié face aux différents sels à différentes concentrations..... 58
Tableau IV.8-2:Réduction en pourcentage de la pression de gonflement du sol étudié face aux différents sels à différentes concentrations 61

LISTE DES FIGURES

Figure II.2-1:Exemple d'une argile..... 5
Figure II.2-2:Structure élémentaire tétraédrique 6
Figure II.2-3:Structure élémentaire octaédrique 7
Figure II.2-4:Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile 7
Figure II.2-5:Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire 8
Figure II.2-6:Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses : a) Attraction par osmose, b) Attraction dipolaire 9
Figure II.2-7:Structure de la montmorillonite 10
Figure II.2-8 : Schématisation des feuillets de montmorillonite 10
Figure II.2-9 : Feuillet de la montmorillonite 11
Figure II.2-10 : Structure de la kaolinite 11
Figure II.2-11 : Schématisation des feuillets de kaolinite 12
Figure II.2-12 : Feuillet de la kaolinite 12
Figure II.2-13 : Structure de l'illite 13
Figure II.2-14 : Schématisation des feuillets de l'illite 13
Figure II.2-15 : Feuillet de l'illite..... 14
Figure II.2-16 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles..... 17
Figure II.3-1:Phénomène de retrait-gonflement..... 18
Figure II.3-2:Type de gonflement 19
Figure II.3-3:Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation..... 20
Figure II.4-1:Classification des potentiels de gonflement de Williams et Donaldson..... 24
Figure II.4-2:Abaque d'évaluation du potentiel de gonflement 25
Figure II.4-3:Abaque de plasticité de Casagrande 25
Figure II.6-1:La carte mondiale des sols gonflants 28
Figure III.2-1:Localisation de la zone d'étude..... 29
Figure III.3-1 : Différents états de consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau ... 31
Figure III.3-2:Limite de liquidité 32
Figure III.3-3:Limite de plasticité 32
Figure III.3-4: Analyse granulométrique par tamisage et par sedimentometrie 33
Figure III.3-5: Classification du potentiel de gonflement selon Seed..... 35
Figure III.3-6: Classification du potentiel de gonflement selon Williams et Donaldson 36
Figure III.3-7: Classification du potentiel de gonflement selon Casagrande 37

Figure III.3-8: Préparation de l'échantillon pour l'essai de gonflement libre 38
Figure III.3-9:Essai de gonflement libre 39
Figure III.3-10: Courbe d'évolution du gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech12) 39
Figure III.3-11:Courbe d'évolution de gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech19) 40
Figure III.3-12:courbe d'évolution de gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech31) 40
Figure III.3-13:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 12) 41
Figure III.3-14:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 19) 41
Figure III.3-15:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 31) 42
Figure IV.5-1: Modèle physique 47
Figure IV.7-1 : Saturation des échantillons avec différents sels et lecture du gonflement (à gauche) et évaluation du tassement (à droite). 48
Figure IV.8-1 : Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de NaCl 49
Figure IV.8-2 : Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de KCl 50
Figure IV.8-3:Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de NH_4Cl 51
Figure IV.8-4:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 0,05 mol/l 52
Figure IV.8-5:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 0,5 mol/l 53
Figure IV.8-6 : Comparaison de l'effet des sels utilisés à 1 mol/l 54
Figure IV.8-7:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 2mol/l 55
Figure IV.8-8: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : NaCl 56
Figure IV.8-9: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : KCl 56
Figure IV.8-10: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : NH_4Cl 57
Figure IV.8-11: Variation du potentiel de gonflement en fonction de la concentration 57
Figure IV.8-12:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : NaCl 58
Figure IV.8-13:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : KCl 59
Figure IV.8-14:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : NH_4Cl 59

Figure IV.8-15: Variation de la pression de gonflement en fonction de la concentration 60
Figure IV.8-16 : Schéma du tassement sous une semelle 61
Figure IV.8-17: Evolution de la pente en fonction de la concentration : NaCl..... 63
Figure IV.8-18: Evolution de la pente en fonction de la concentration : KCl 64
Figure IV.8-19: Evolution de la pente en fonction de la concentration NH_4Cl 64
Figure IV.8-20:Variation de la pente en fonction de la concentration..... 65

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

C.A : Coefficient d'Activité

Al : Aluminium

CEC : Capacité d'échange cationique

CHUCK : Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge

ENS : Ecole Normale Supérieure

F^{2+} : ion fer

G (%) : gonflement en pourcentage

H_f : Hauteur finale

Hi : Hauteur initiale

Ip : Indice de plasticité

KCl : Chlorure de Potassium

Ln : logarithme népérien

M.E.B : Microscope Electronique à balayage

Mol/l : Mole par litre

NaCl : Chlorure de Sodium

NH_4Cl : Chlorure d'Ammonium

OH : ion hydroxyde

PH : potentiel d'hydrogène

S (%) : Tassement en pourcentage

Si : Silicium

W_l : Limité de liquidité

Wp : Limité de plasticité

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est rédigé dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de l'Ingénieur en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets. Il traite les problèmes liés aux phénomènes de retrait-gonflement du sol dans le périmètre de l'hôpital Roi Khaled (CHUK) et de l'Ecole Normale Supérieure (ENS) dans la marie de Bujumbura, au Burundi.

En effet, les problèmes de fissuration des bâtiments et des chaussées sont devenus une question très sérieuse dans la zone d'étude à tel enseigne que beaucoup des pathologies structurelles résiduelles au mouvement du sol sont observées sur ces ouvrages ces dernières années.

Ainsi, une investigation sur les origines du retrait-gonflement du sol étudié est menée et les techniques de leur stabilisation au moyen des solutions salines sont abordées.

Le travail procède par le calcul du coefficient d'activité du sol pour trouver le point du potentiel de gonflement le plus élevé. Les différents sels sélectionnés y sont ensuite appliqués et leur impact sur la minimisation du potentiel de gonflement, de la pression de gonflement et du tassement du sol est apprécié

CHAPI. INTRODUCTION GENERALE

I.1 Introduction

Les dangers causés par les problèmes liés à la variation de volume des sols dans les ouvrages du génie-civil ont été identifiés pour la première fois à la fin des années 1930 (Gadise T., 2016). C'est le début de la prise de conscience sur les dangers des sols gonflants dans des nombreux Pays.

Aux Etats-Unis les dégâts annuels causés par les sols gonflants dépassent ceux dus aux inondations, tremblements de terre et tornades combinés (Jones & Holtz, 1973, cité par Yu Jun Cui, 1993).

Le problème fondamental associé aux sols gonflants est le changement de volume de la masse du sol. Ce dernier est dû à l'alternance du retrait et du gonflement, résultats de la variation de la teneur en eau.

Les problèmes de fissuration des bâtiments ou des chaussées érigées sur les argiles ne sont pas souvent dus aux charges appliquées, mais plutôt aux phénomènes de retrait-gonflement du sol support quand il subit des influences extérieures de la variation de la teneur en eau. L'étude de la stabilité de ces ouvrages constitue une des problématiques majeures à laquelle l'ingénieur est confronté.

Le retrait-gonflement des argiles fait partie des causes d'instabilité des ouvrages les plus rencontrées dans le monde entier en général et au Burundi en particulier. C'est le cas des infrastructures de l'hôpital Roi Khaled (CHUK) et de l'Ecole Normale Supérieure (ENS), et dans d'autres quartiers de la mairie de Bujumbura.

Lorsque le sol est humidifié, il subit un gonflement dû d'une part, à l'absorption des molécules d'eau sur la surface extérieure des particules et d'autre part, à la pénétration des molécules d'eau entre les feuillets dont l'empilement constitue les particules d'argiles.

Plusieurs techniques de stabilisation ont été utilisées dans le domaine du Génie-civil afin de résoudre ces problèmes. L'excavation des sols gonflants et l'apport des remblais appropriés avant la construction d'un ouvrage est une méthode courante dans les zones où les matériaux de remplacement sont rencontrés en abondance. Cependant, face à la carence de remblais rigides ou en présence d'une grande épaisseur de la couche médiocre à remplacer, cette dernière ne pourrait plus être déportée et dans ce cas elle doit être rigidifiée au moyen d'une technique de stabilisation des sols gonflants.

Dans ce travail, les solutions salines en Chlorure de Sodium (NaCl), Chlorure de Potassium (KCl) et Chlorure d'Ammonium (NH_4Cl) de stabilisation ont été appliquées à un modèle réduit, construit en laboratoire, sur l'échantillon représentatif du sol du périmètre du Roi Khaled et de l'ENS et leurs impacts positifs sur le gonflement, la pression de gonflement et le tassement ont été évalués.

I.2 Objectifs

I.2.1 Objectif général

L'objectif principal de ce travail est la stabilisation des sols gonflants et leurs impacts sur les constructions.

I.2.2 Objectifs spécifiques

- Réduire le potentiel de gonflement du sol après stabilisation
- Réduire la pression de gonflement du sol après stabilisation
- Minimiser les tassements après stabilisation

I.3 Méthodologie

Dans ce travail, des méthodologies de recherche empiriques et théoriques ont été utilisées pour atteindre les objectifs de recherche.

a. L'enquête bibliographique : diverses sources universitaires comme des revues spécialisées, des documents de recherche ont été examinés afin d'obtenir des renseignements théoriques sur les sols gonflants et les techniques de stabilisation.
b. L'échantillonnage et les essais : des échantillons remaniés et intacts ont été prélevés pour les essais d'identification et ceux de reconstitution.
c. La préparation des échantillons : les échantillons pour les essais d'identification ont été séchés à l'étuve tandis que ceux des essais de reconstitution ont été séchés à l'aire libre. La classification de sol a été faite en effectuant des tests de distribution de tailles des grains et des tests de limite d'Atterberg.
d. Les essais de stabilisation : Des essais de stabilisation successifs au Chlorure de Sodium (NaCl), au Chlorure de Potassium (KCl), et au Chlorure d'Ammonium (NH_4Cl) et sous différentes concentrations, ont été réalisés sur des échantillons reconstitués et montés en modèles réduits des dimensions de 12,00 cm de hauteur et 18,32 cm de diamètre construits au laboratoire.

e. L’analyse et la discussion des résultats des tests : en tenant compte des antécédents théoriques et des résultats des tests au laboratoire, les résultats obtenus ont été analysés et discutés profondément.
f. La conclusion et les recommandations sont déduites sur base des résultats obtenus.

I.4 Organisation de la thèse

Cette recherche est menée par les chapitres suivants :

- Le premier chapitre donne une brève description du contexte de ce travail, de ses objectifs et la méthodologie employée.
- Le deuxième chapitre est une recherche bibliographique. Autrement dit ce chapitre présente une revue de la littérature sur les sols gonflants (leur minéralogie, leur microstructure et leur texture).
- Le troisième chapitre traite la zone d’étude.
- Le quatrième chapitre comprend les résultats des tests obtenus, l’analyse des résultats et discussions.
- Le cinquième chapitre présente une conclusion générale qui résume les intérêts de la recherche et les recommandations essentielles tirées.

CHAPII. GENERALITES SUR LES SOLSGONFLANTS ET LE PHENOMENE DE GONFLEMENT

II.1 Introduction

Les sols gonflants se trouvent dans de nombreuses régions du monde où les conditions climatiques, topographiques et géologiques ont favorisé leur formation. Dans son étude, Chen (1988) détecte les formations des argiles gonflantes dans plusieurs pays (Australie, Chine, Afrique du sud, etc..). Mais en réalité elles sont rencontrées presque partout.

Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence des minéraux argileux dont l'hydratation produit un gonflement lorsque la teneur en eau augmente et un retrait lorsqu'elle diminue.

Le gonflement des sols argileux qui est généralement accompagné d'un changement des caractéristiques mécaniques constitue un phénomène naturel très préoccupant dans le domaine de la géotechnique car il est à l'origine des désordres d'instabilité avec des conséquences nombreuses dépendant du type d'ouvrage.

Ce phénomène est lié à la composition minéralogique et à la variation hydrique du matériau, son ampleur dépend de nombreux facteurs tels que l'état initial, l'état de chargement ou l'amplitude de la variation de la teneur en eau.

L'importance de ce chapitre est de mettre en évidence les argiles gonflantes et le phénomène de gonflement.

II.2 Les argiles

II.2.1 Définition

Les argiles sont un effet de la décomposition des roches sédimentaires. Elles contiennent des particules fines de diamètre inférieur à 2µm composées des minéraux chargés négativement (Nardjes D. et Fadela N., 2016).

La présence de ces minéraux augmente la sensibilité de l'argile aux molécules polaires d'eau ; laquelle sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.

Les minéraux argileux sont des ciments qui participent à la constitution des micro-agrégats. Les forces mise en jeu agissent (i) entre les feuillets des minéraux argileux où la cohésion est déterminée par des interactions électrostatiques entre le réseau cristallin, les ions absorbés et

les molécules d'eau et (ii) dans les assemblages entre les minéraux argileux et les particules de sable et de limon reliés par des forces de Van der Waals (Mohamed A., 2006).



Figure II.2-1:Exemple d'une argile

On distingue deux grandes catégories d'argiles :

- **Les argiles plastiques :** Elles sont très déformables.
- **Les argiles raides :** Elles ont un comportement aussi fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité et cela, à cause de la présence du quartz et du carbonate (Nardjes D. et Fadela N. ,2016).

II.2.2 Origines des argiles

II.2.2.1 Formation des Minéraux argileux

La formation des sols argileux se fait par un processus lent d'altération physique (désagrégation des minéraux primaires) ou d'altération chimique (par transformation des minéraux) sous l'action du climat, suivi des phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation. La grande majorité (90%) des minéraux argileux sont d'origine détritique (Djoudi A. et al.)**.**

II.2.2.1.1 Héritage et altération

L'altération physique des roches est l'une des origines des minéraux argileux. Ceux qui en résultent sont différents en fonction du climat et de la nature des roches mères**.**

En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents à celle de la roche mère (formation de l'illite). En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et de la montmorillonite en milieu confiné (ZeynebB., 2104).

II.2.2.1.2 Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux par dégradation (soustraction d'ions) ou par aggradation (fixation des ions supplémentaires) pendant l'altération, la sédimentation et la diagenèse, consiste en une modification du minéral argileux avec conservation de sa structure (Millot, 1964, cité par Zeyneb B., 2104).

II.2.3 Nature et structure des sols argileux

Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42% du volume de l'écorce terrestre (Wakim, 2005, cité par Zeyneb B., 2014). Lorsqu'elles sont gonflantes, elles peuvent être l'origine des désordres dans des constructions.

Avant de commencer l'analyse du phénomène naturel de gonflement, il est nécessaire de rappeler certaines notions de la minéralogie des argiles relatives aux interactions entre l'eau et les particules argileuses.

II.2.3.1 Structure élémentaire des minéraux argileux

Ce sont les assemblages d'eau (H_20), de silice sous forme de silicates (s_i0_3) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al_20_3) qui composent les minéraux argileux. Leur structure élémentaire appelée feuillet est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicate et alumine. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillet. (Massinissa K, 2017)**.**

Les couches des feuillets sont regroupées en deux types à savoir (Freeah, 2006, cité par Benmessoud A., 2017) :

- La couche tétraédrique formée par la combinaison des tétraèdres des silicesS_iO_4.

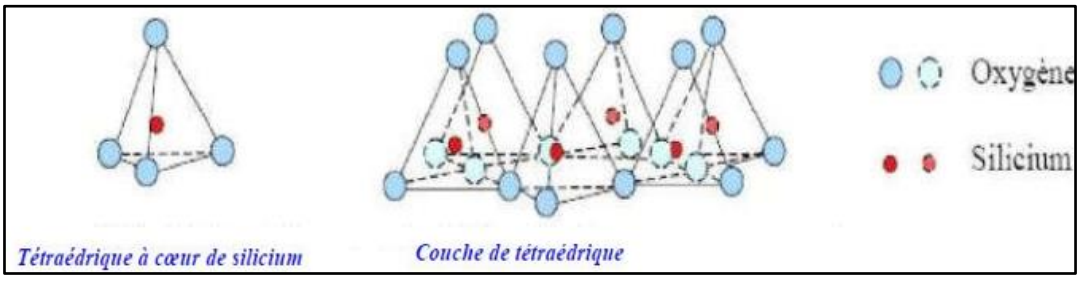


Figure II.2-2:Structure élémentaire tétraédrique (Benmessoud A., 2017)

- La couche octaédrique formée par la combinaison des octaèdres d'aluminium $Al_2(0H)_6$ou de magnésium$Mg_3(0H)_6$.

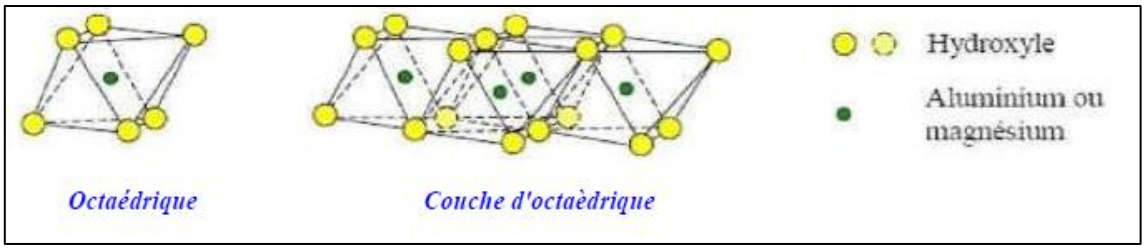


Figure II.2-3:Structure élémentaire octaédrique (Benmessoud A., 2017)

L'organigramme ci-dessous nous montre la représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

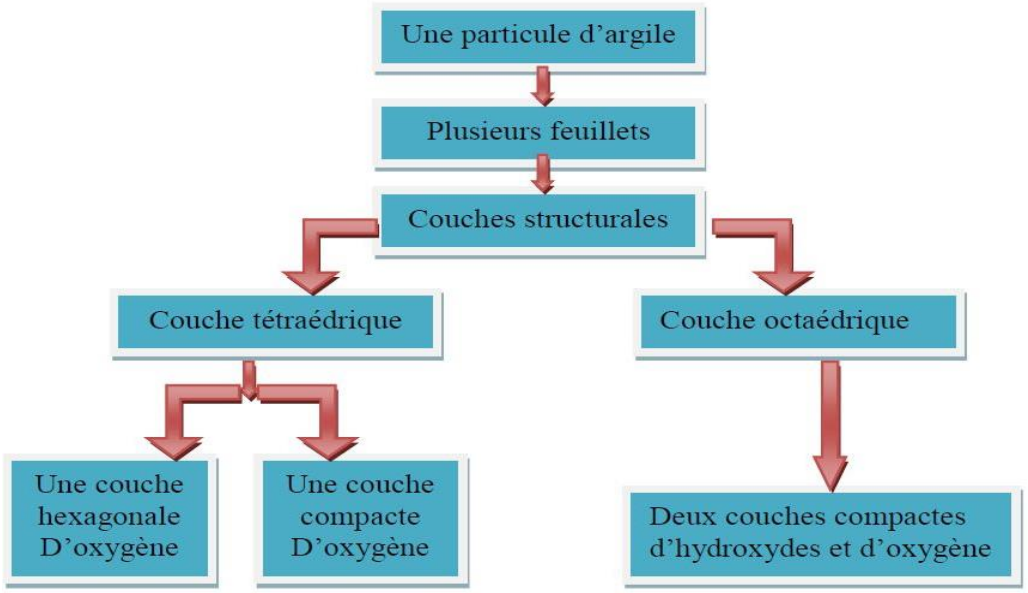


Figure II.2-4:Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile (Harrat M.2007, cité par benmessoud A., 2017)

II.2.3.2 Structure moléculaire microscopique des argiles

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liaisons ioniques assurent la rigidité de la structure du feuillet élémentaire.

Les forces de liaisons entre feuillet sont principalement (benmessoud A., 2017) :

- ❖ Les forces d'attractions moléculaires de Van der Walls qui sont des liaisons faibles permettant la pénétration des molécules d'eau qui engendre un gonflement.
- ❖ Les liaisons d'hydrogène qui apparaissent avec des atomes fortement électronégatifs, comme l'oxygène dans le cas des argiles.
- ❖ Les substitutions isomorphes qui ont comme rôle le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence. Ce dernier phénomène crée des déficits de charge qui affaiblissent des forces ioniques de liaisons entre les feuillets.

II.2.4 Interaction entre l'eau et les minéraux argileux

L'eau a une très grande influence sur les sols argileux. Au sein d'une couche ou entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons interatomiques sont des liaisons de valence atomiques très fortes. Généralement, entre deux feuillets successifs, ces liaisons sont 10 à 100fois moins fortes que les précédentes en raison des cations adsorbés. En effet, entre les feuillets chargés négativement et l'eau, les mécanismes d'interaction vont pouvoir s'établir dans l'espace inter-foliaire.

Ces mécanismes sont :

- ❖ Les liaisons Hydrogène entre les molécules d'eau et les oxygènes ou hydroxyles se trouvant à la surface du feuillet. En effet, les atomes d'oxygène sont susceptibles d'attirer les pôles positifs de la molécule d'eau et de la même manière, le groupement hydroxyles attire le pôle négatif de l'eau.
- ❖ Les forces d'attraction de Van der Waals : par le fait de la charge négative diffuse du feuillet, des liaisons électrostatiques du type Van der Waals (attractives)peuvent s'établir entre l'eau et les sites où les charges négatives manifestent leur action attractive.
- ❖ L'hydratation des actions échangeables : les cations se trouvant dans l'espace inter foliaire deviennent des lieux privilégiés sur lesquels viennent se fixer les molécules d'eau, l'ensemble forme un polyèdre de coordination (Fripait& Gatineau, 1984 cité par **Mohamad** M., 2005).

La Figure II.2-5montre Schématiquement ces trois modes de liaisons possibles de l'eau inter-foliaire.

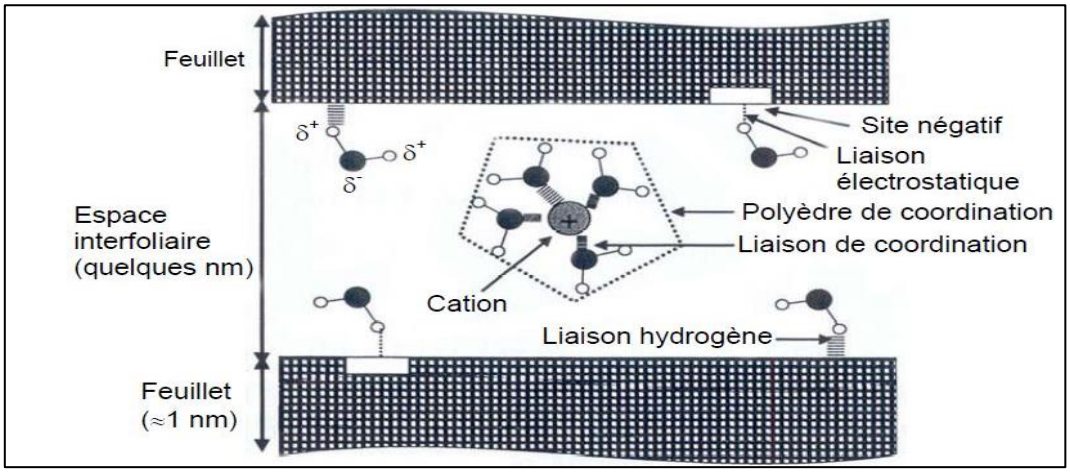
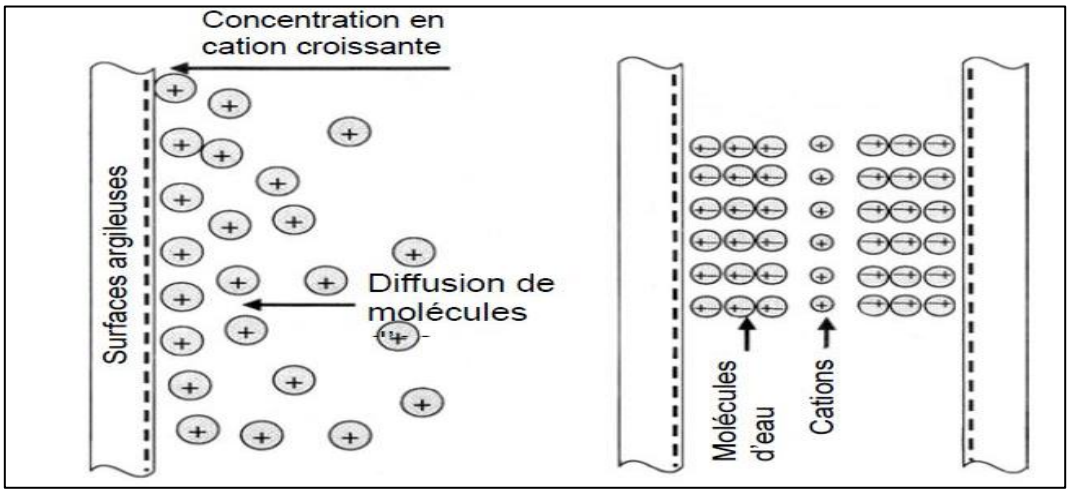


Figure II.2-5:Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996, cité par Mohamad M., 2005)

- ❖ L'attraction par osmose : plus on se rapproche de la surface chargée négativement du feuillet, plus la concentration des cations augmente. Afin d'annihiler ce gradient de concentration, les molécules d'eau ont tendance à se diffuser vers la surface (Figure II.2-6, a.)
- ❖ L'analogie avec un condensateur : les surfaces argileuses peuvent être considérées comme le pôle négatif d'un condensateur. Les molécules d'eau orientent alors leurs pôles positifs en direction des surfaces négatives ; au milieu de l'espace, les cations compensateurs vont s'interposer afin d'éviter d'avoir des pôles négatifs de l'eau adjacents (Figure II.2-6.b)



a) **b)**

Figure II.2-6:Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses : a) Attraction par osmose, b) Attraction dipolaire (Mitchell, 1993 ; cité par Mohamad M, 2005)

II.2.5 Les différents types d'argiles

Les argiles les plus fréquemment rencontrées sont : la montmorillonite, la kaolinite et l'illite. Nous les décrivons dans la suite.

- ❖ **La montmorillonite $(OH)_4\ Si_8\ (Al^{+3}_{10/3}, Mg_{2/3})\ O_{20}, n\ H_2O$:** C'est le minéral argileux composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine. Les sols contenant ce minéral gonflent lorsque la teneur en eau augmente et leurs pressions de gonflement peuvent facilement endommagés les ouvrages y érigés. (Fouad A. & Mohamed M., 2015)

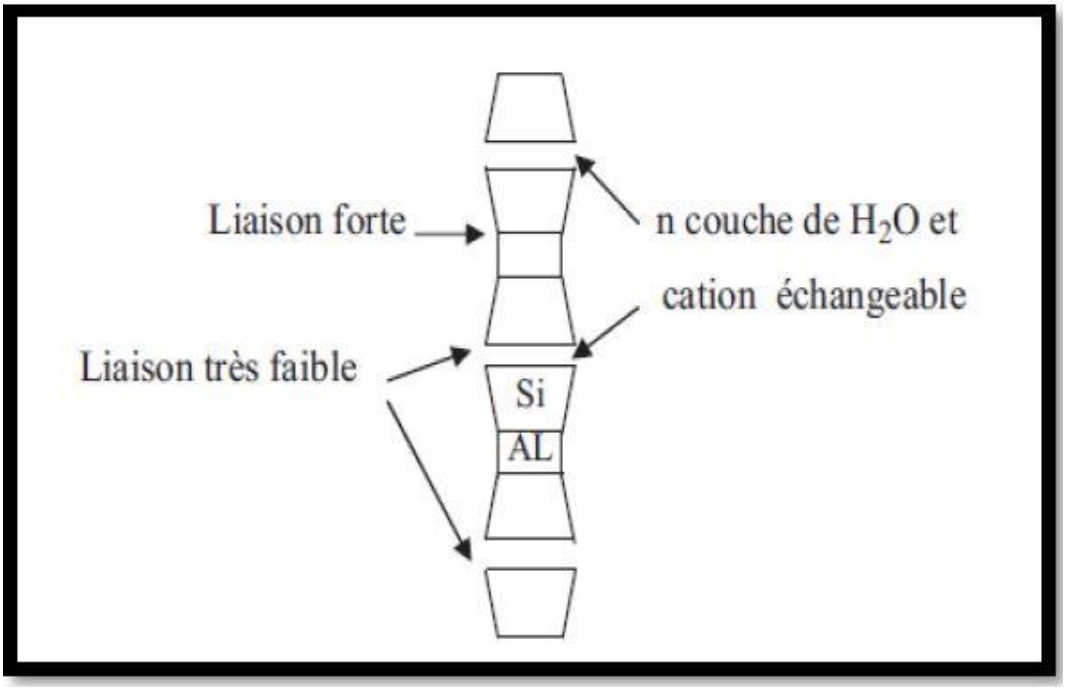


Figure II.2-7:Structure de la montmorillonite (Lambe, 1953, cité par Douakha H. et Mohamedatni H.,2018)

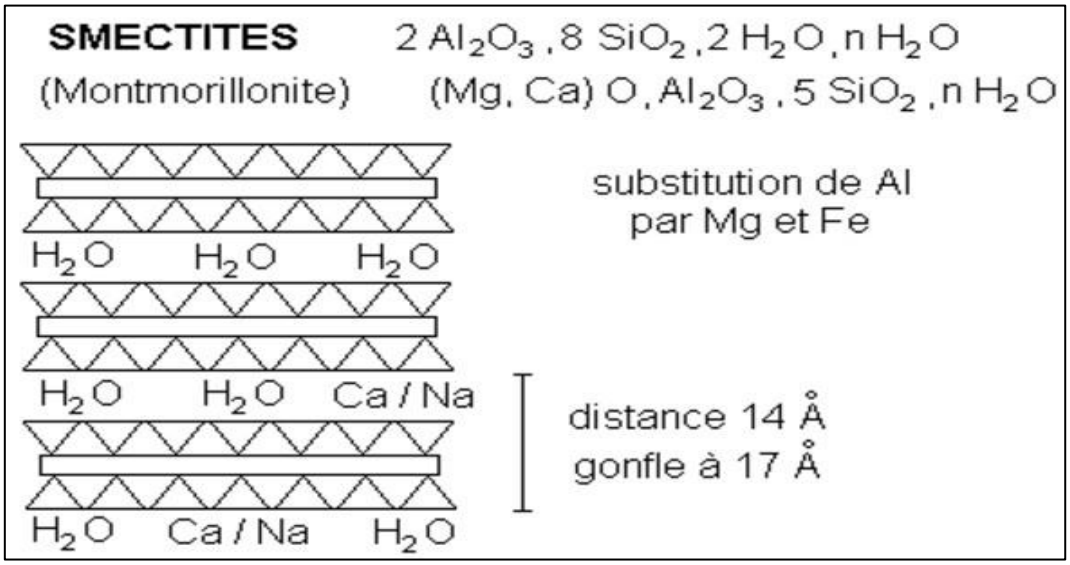


Figure II.2-8 : Schématisation des feuillets de montmorillonite (Morel R.1996, cité par Massinissa K., 2017)

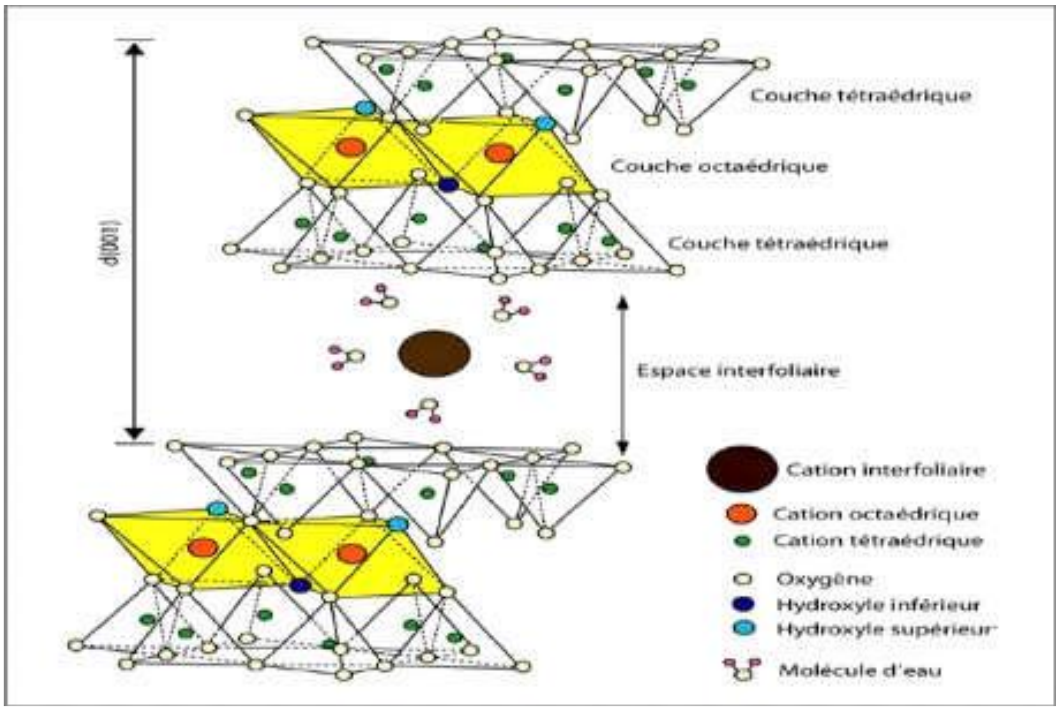


Figure II.2-9 : Feuillet de la montmorillonite (EL HACHMI A., 2013, cité par BENMESSOUD A., 2017)

❖ **La kaolinite (Si_4O_{10}) Al_4 $(OH)_8$** : Elle est constituée par une alternance de la succession des feuillets en tétraédriques (silice) et de feuillets en octaédriques (alumine). Ces deux feuillets sont liés de façon que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaédrique ne forment qu'une seule et même couche (Fouad A. et Mohamed M. ,2015)

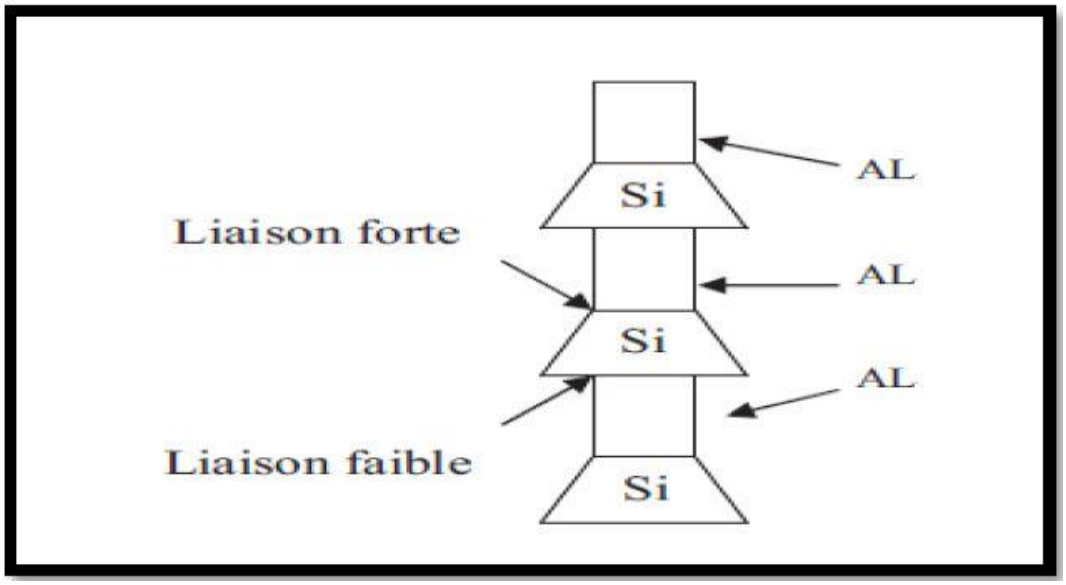


Figure II.2-10 : Structure de la kaolinite (Lambe, 1953, cité par Douakha H.&Mohamedatni H.,2018)

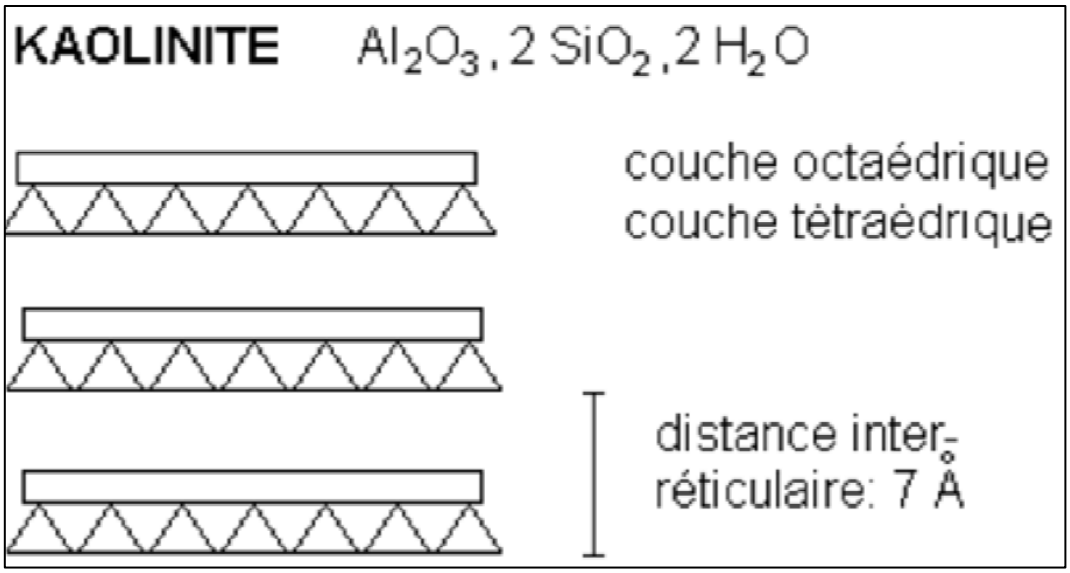


Figure II.2-11 : Schématisation des feuillets de kaolinite (Morel R.1996) cité par Massinissa K.,2017)

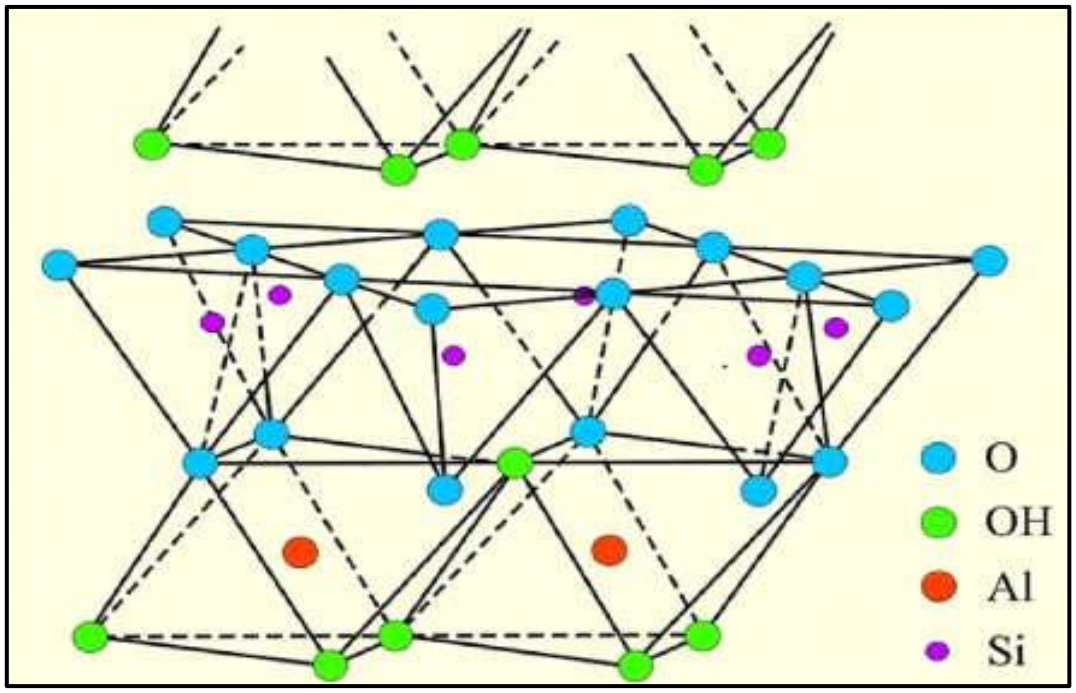


Figure II.2-12 : Feuillet de la kaolinite (EL HACHMI A.,2013, cité par BENMESSOUD A.,2017)

❖ **L'illite $(K, H_2O)_2Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$:** Elle a une structure similaire à celle de la montmorillonite sauf que pour l'illite, on y trouve des ions potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. C'est grâce à ces ions que la liaison est forte et les molécules d'eau ne peuvent plus s'intercaler entre les feuillets.

Aux extrémités de la particule argileuse, il y a un déséquilibre électrique et adsorption des actions échangeables dont le rôle est très important dans le comportement des argiles (Fouad A. &Mohamed M., 2015).

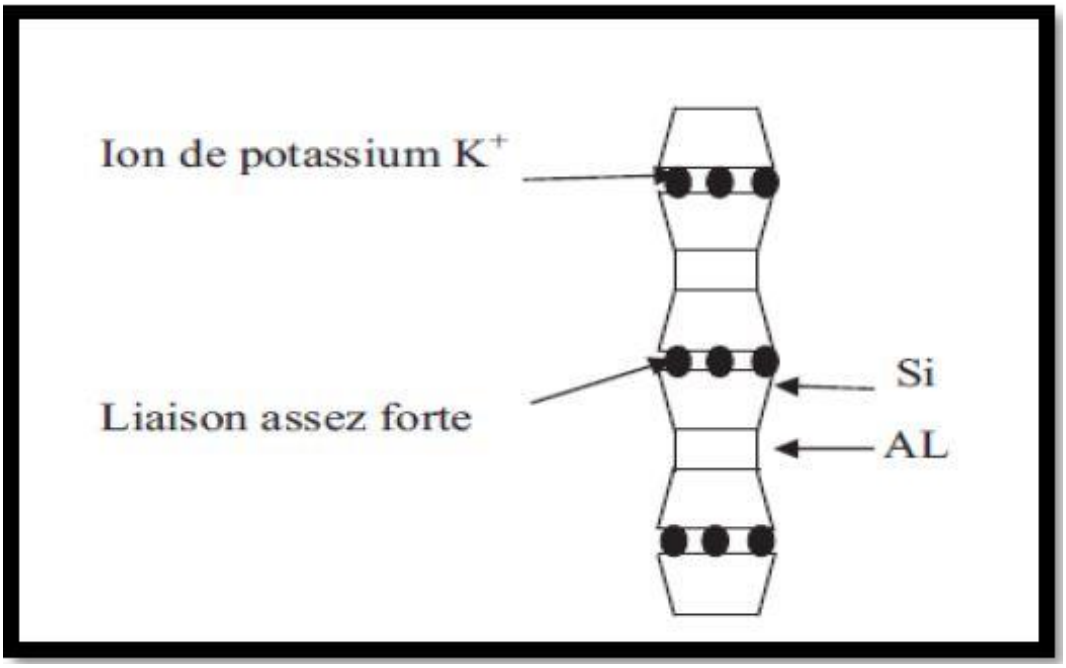


Figure II.2-13 : Structure de l'illite (Lambe.1953, cité par Douakha H & Mohamedatni Ha.,2018)

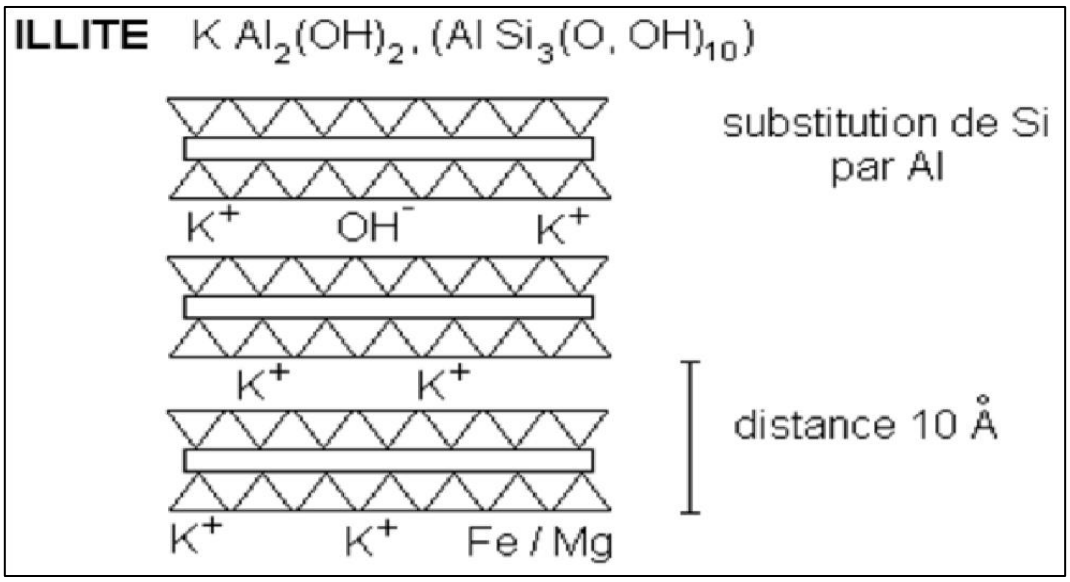


Figure II.2-14 : Schématisation des feuillets de l'illite (Morel R.1996, cité par Massinissa K.,2017)

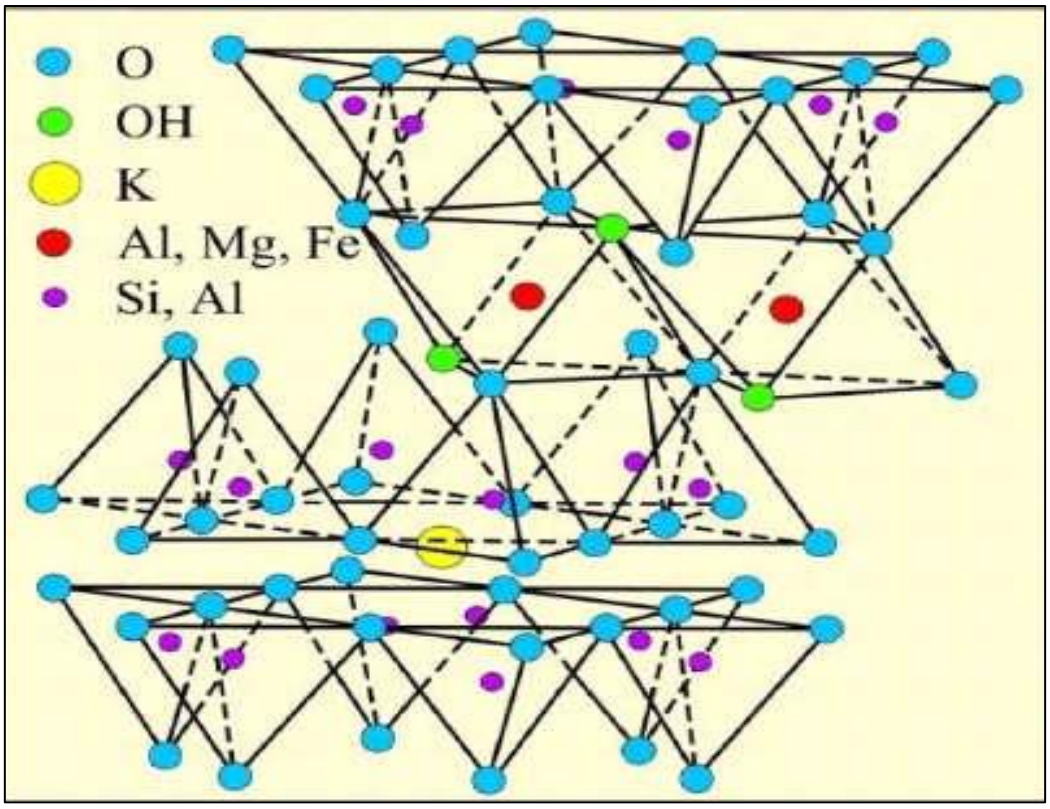


Figure II.2-15 : Feuillet de l'illite (EL HACHMI A.,2013, cité par BENMESSOUD A., 2017)

Tableau II.2-1:Caractéristique de certaines familles d'argile (Morel R.1996, cité par Oudni S., 2018)

Nom	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique m^2/g
Kaolinite	100-200	0.1-4	1-10	10-20
Illite	1-10	0.1-1	0.003-0.01	65-100
Montmorillonite	1	0.1	0.001	700-840

II.2.6 Les Caractéristiques principales des minéraux argileux

Les caractéristiques principales des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes.

II.2.6.1 La densité de charge spécifique

La densité de la charge spécifique σ est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique et la surface spécifique s de la particule argileuse.

$$\sigma = \frac{CEC}{s}\left(meq/m^2\right) \qquad \text{(II.2.1)}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux

- Une charge structurelle ou permanente liée aux substitutions ioniques (Al_{3+}pour Si_{4+} dans la couche tétraédrique,Mg_{2+} ouFe_{2+} pourAl_{3+} dans la couche octaédrique),
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

L'importance de la densité de charge spécifique est qu'il nous renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux.

L'augmentation de la densité de charge spécifique engendre la réduction du gonflement et la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraine l'attraction des ions, ce qui provoque une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. Aussi plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée induisant ainsi une diminution du gonflement.

II.2.6.2 La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100grammes d'argiles.

La capacité d'échange cationique est dans le même sens que la densité de charge spécifique, donc, les sols argileux dont la valeur de la capacité d'échange cationique est élevée ont tendance à peu gonfler.

II.2.6.3 La surface spécifique des argiles

Les argiles sont composées de la surface interne correspondant à l'espace inter-foliaire et de la surface externe comprise entre les particules. Quand la surface spécifique augmente, on aura un gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

Les principales caractéristiques des trois types d'argiles sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.2-2:Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002, cité par Zeyneb B., 2014)

Minéraux	Surface interne (m^2/g)	Surface externe (m^2/g)	Surface totale (m^2/g)	CEC (Milliéquivalent/100 g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150

II.2.7 Texture des argiles

C'est du mode de sédimentation et de l'état de consolidation que dépend la texture des minéraux argileux. Par exemple une roche qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et dont la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés par des minéraux argileux au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux argileux se superpose sur les organisations des autres minéraux non argileux. C'est cette hétérogénéité qui rend la structure et la texture extrêmement complexe surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonates.

C'est à l'aide du microscope électronique à balayage (M.E.B) ou de la tomographie à rayons X qu'on peut observer l'évolution de la micro texture en fonction d'hydratation.
La Figure II.2-16 ci-dessous montre les images des argiles prises au microscope électronique à balayage.

Les observations au microscope électronique à balayage permettant d'analyser l'évolution de la texture au cours du gonflement montrent que, pour la kaolinite, le gonflement est uniquement du type inter-agrégats, au niveau des pores interstitiels lorsque pour les montmorillonites, le gonflement est de type intra-agrégats c'est-à dire entre les feuillets (Zeyneb B., 2014). Ces observations au microscope confirment une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés.

Globalement, d'une part le pourcentage en minéraux gonflants, les minéraux non gonflants les carbonates et d'autre part la nature de la consolidation, présentent une influence notable sur le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.

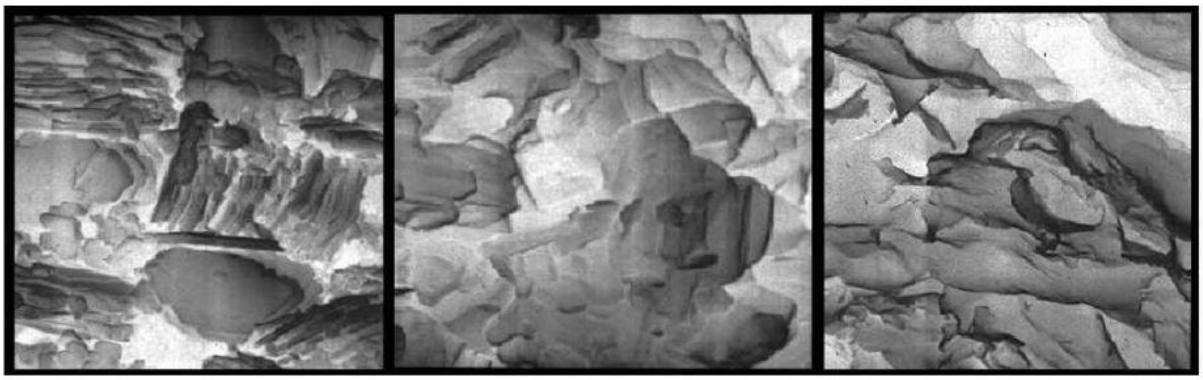


Figure II.2-16 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976, cité par Massinissa K.,2017)

II.2.8 Cations échangeables

A la surface des feuillets, la substitution isomorphe deAl_{3+}parMg_{2+} entrainent un excès de charge négative. Ce déficit de charge est compensé par des cations Ca_{2+}ouN_{a+} pour assurer l'électron neutralité. Les montmorillonites composées par desCa_{2+} sont appelées des montmorillonites calciques. Lorsqu'elles sont composées par des cations N_{a+}, elles sont appelées des montmorillonites sodiques. Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodiumN_{a+} est plus faible que celles des cations de calciumCa_{2+}, c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique aura la plus grande surface spécifique ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets.

II.3 Gonflement du sol

Le phénomène de gonflement dépend de la nature de la solution d'hydratation et de la minéralogie du matériau.

II.3.1 Phénomène de retrait- gonflement du sol

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux induisent des tassements différentiels à cause de la variation hydrique du sol qui se manifeste par des désordres affectant principalement le bâti individuel (Ahmed B., 2017), (Figure II.3-1).

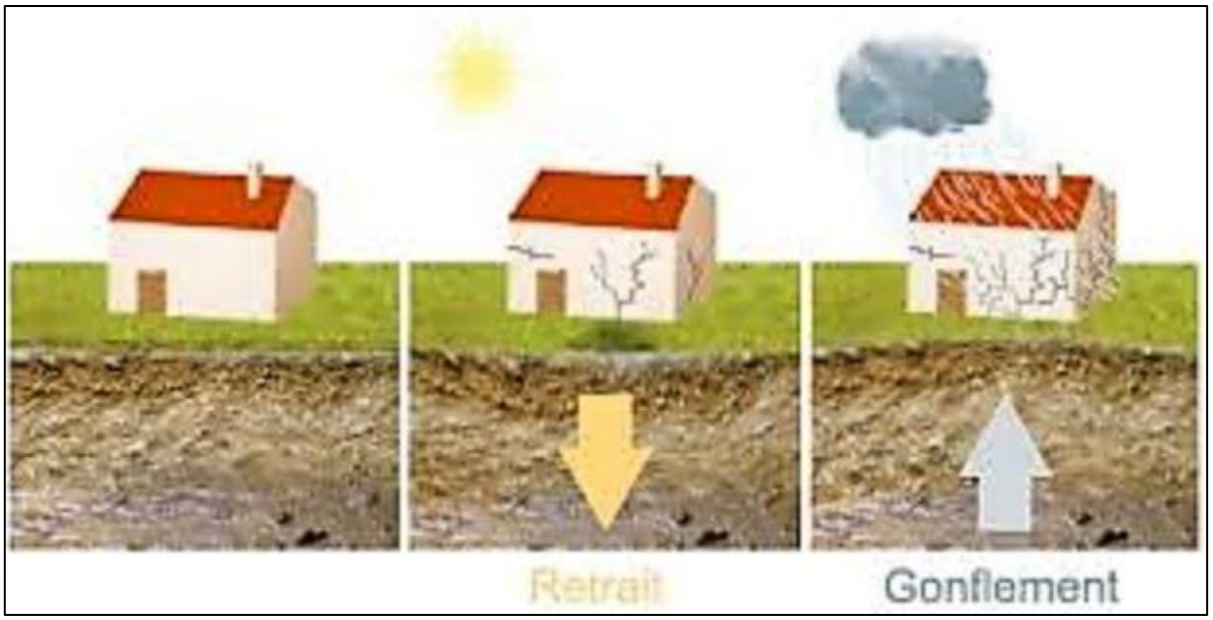


Figure II.3-1:Phénomène de retrait-gonflement

II.3.2 Mécanisme de gonflement

Le processus de gonflement des sols argileux représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les caractéristiques principales régissant le gonflement des argiles peuvent être classées en deux catégories :

- ❖ Les facteurs mécaniques,
- ❖ Les facteurs physico-chimiques (Seed et al.1961 Mitchell, 1973, cité par (BENMESSAOUD A., 2017).

II.3.3 Type de gonflement

D'après Mouroux et al (1988), au sein des matériaux argileux deux types de gonflement peuvent se produire (Figure II.3-2) :

- ❖ Le gonflement intra particulaire ou inter-foliaire,
- ❖ Le gonflement inter particulaire.

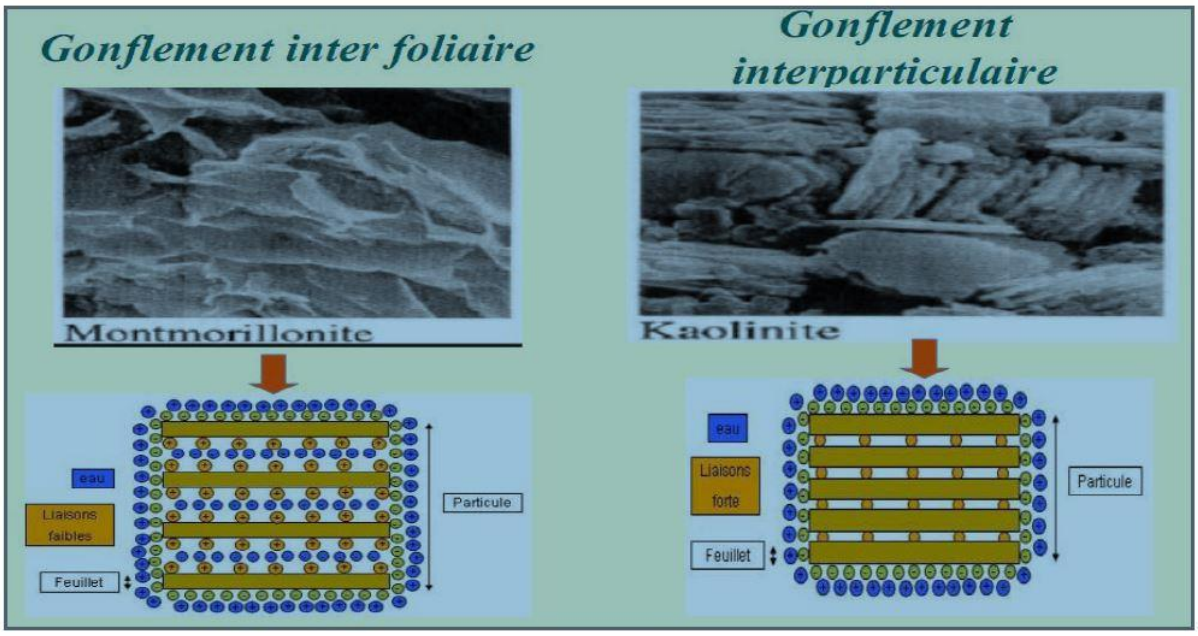


Figure II.3-2:Type de gonflement

L'amplitude du gonflement des sols argileux dépend de sa structure minéralogique et de la nature de la solution hydratante.

II.3.3.1 Gonflement inter foliaire

Pour les montmorillonites, leur structure minéralogique permet l'admission des molécules d'eau entre les feuillets. Leur distance inter-foliaire est suffisamment grande pour permettre l'inclusion des molécules d'eaux. Selon (Didier, 1972, cité par AhmedB,2017), l'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches mono-moléculaires. D'où la naissance d'un gonflement inter-foliaire qui, bien qu'intervenant à une plus petite échelle de la particule argileuse, peut présenter une ampleur très importante.

II.3.3.2 Gonflement inter particulaire

Ce type de gonflement a une ampleur assez limitée mais affecte toutes les familles d'argiles, ce qui est le cas contraire pour le gonflement inter-foliaire. Dans le cas d'un gonflement inter-particules l'eau ne pénètre pas à l'intérieur de la particule c'est -à- dire lorsque les dipôles d'eau se fixent sur l'ensemble des feuillets le gonflement se manifeste.



Figure II.3-3:Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation (Harrat Mohamed, 2007) cité par (BENAISSA Mohamed, 2011)

II.3.4 Les causes de gonflement

Principales causes du gonflement sont :

- Hydratation par adsorption,
- Transformation chimique.

II.3.4.1 Hydratation par adsorption

Les argiles sont caractérisées principalement par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cation dans la structure octaédrique des feuillets. A cause des forces électrostatiques (forces d'attractions, forces de répulsion), il y a alors la formation de la double couche diffuse due à la fixation des actions échangeables qui s'installent à la surface des feuillets.

Les forces d'attraction sont généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins tandis que les forces de répulsion sont des forces ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux deux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs). Ces deux forces décroissent rapidement avec l'augmentation de la distance inter particulaire (Wakim, 2005, cité par Mohamed B., 2011).

II.3.4.2 Transformation chimique

On distingue trois types principaux de transformation chimique (Fréderic B., 2001) à savoir :

❖ La transformation par l'anhydrite en gypse

Cette transformation de l'anhydrite (C_aSO_4) en gypse ($C_aSO_4, 2H_2O$) se produit sous certaines conditions de température, de pression et de teneur en eau et s'accompagne d'une variation de volume spécifique.

❖ L'oxydation de la pyrite

L'oxydation de la pyrite est un processus très important de décomposition chimique des roches sédimentaires dont la granulométrie est fine. Cette oxydation conduit à la formation de l'acide sulfurique. Ce dernier réagit à son tour avec les carbonates de calcium. Cette réaction conduit à la formation du sulfate et peut produire du gypse dont la cristallisation provoque l'éclatement du matériau argileux (Wakim, 2005, cité par Mohamed B., 2011). L'oxydation de la pyrite peut créer des réseaux de microfissures se traduisant par un risque de rupture et également des chemins préférentiels d'écoulement.

❖ La dissolution des carbonates dans l'eau.

Elle rend l'argile de plus en plus sensible à la variation de la teneur en eau. La dissolution des carbonates dans l'eau rend à long terme les matériaux argileux de plus en plus ductiles (Wakim, 2005cité par Mohamed B., 2011).

II.3.5 Les facteurs qui influencent le gonflement d'un sol

Selon les résultats de nombreuses études, l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs (Zeyneb B., 2014) : les facteurs intrinsèques et les facteurs externes.

II.3.5.1 Les facteurs intrinsèques

- La composition minéralogique,
- L'influence du type de cation compensateur,
- La capacité d'échange cationique (CEC),
- La surface spécifique d'une particule argileuse,
- L'activité des argiles,
- La structure du sol.

II.3.5.2 Les facteurs externes extrinsèques

Les paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante ont une influence très importante sur le gonflement. On peut citer :

- La teneur en eau initiale,
- La densité sèche,
- Mode et énergie de compactage,
- L'influence du poids volumique initial sec,
- L'influence du flottement latéral,
- L'influence des cycles de retrait-gonflement,
- L'influence de la durée des essais.

II.4 Identification et classification des sols gonflants

Pour éviter les sinistres causés par les sols gonflants, il est nécessaire de reconnaitre ce type de sol. De nombreux modèles visant à estimer le potentiel de gonflement sont formulés à partir des limites d'Atterberg et des paramètres qui en découlent.

II.4.1 Classification des sols gonflants selon la méthode de Skempton

Cette méthode mise au point par Skempton (1953) permet de classer les argiles selon leurs coefficients d'activités issus de la combinaison des limites d'Atterberg et des teneurs en argile (pourcentage en poids plus fin que$2\mu_m$). Skempton classe les argiles en trois classes en fonction de leur activité comme l'indique le tableau ci-dessous. L'activité est définie comme suit :

$$A = \frac{I_p}{\% \leq 2\mu m} \qquad \text{(II.4.2)}$$

Tableau II.4-1: Classification des sols gonflants selon la méthode de Skempton

Potentiel de gonflement	Activité
Faible/inactif	A<0,75
Moyen/Normal	0,75<A<1,25
Élevé/actif	A>1,25

Selon cette classification, l'argile montmorillonitque (argiles gonflantes) est définie comme active, l'argile illitique comme normale et l'argile kaolinique comme inactive.

II.4.2 Classification des sols gonflants selon la méthode de Chen

Chen (1975) a présenté une méthode d'identification des sols gonflants en utilisant uniquement l'indice de plasticité. Il a ainsi proposé quatre classes d'argile selon leur indice de plasticité comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau II.4-2 : Relation entre potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Chen, 1975)

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité
Bas	0-15
Moyen	10-35
Haut	20-55
Très élevé	35 et plus

II.4.3 Classification des sols gonflants selon Seed (1962) et Snethen (1980)

Seed et al (1962) et Snethen (1980) ont présenté une méthode d'identification des sols gonflants en utilisant seulement l'indice de plasticité. Seed a proposé trois classes d'argile selon leur indice de plasticité tandis que Snethen a proposé quatre classes d'argiles comme le montre les tableaux ci-dessous :

a. Classification selon Seed

Tableau II.4-3 : Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Seed et al, 1962) cite par (Hossein N, 2007)

I_P	0-10	10-20	20-35
Taux de gonflement	Faible	Moyen	Élevé

b. b. Classification selon Snethen (1980)

Tableau II.4-4 : Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (SNETHEN ,1980 cité par Zeyneb B., 2014)

I_P	>35	22-48	22-32	<18
Potentiel de gonflement	Très fort	Fort	Moyen	Faible

Le gonflement d'un sol peut aussi être estimé à partir de deux paramètres simultanément : le pourcentage en particules inférieure à $74\mu_m$ et la limite de liquidité (Ghen, 1988 cité par Hossein N., 2007).

Tableau II.4-5:Potentiel de gonflement (Ghen, 1988)

%<74μ_m	W_L	Potentiel de gonflement
>90	>60	Très fort
60-95	40-60	Fort
30-60	30-40	Modéré
<30	<30	Faible

Seed et al (1962), williams et Donaldson ont proposé des abaques permettant d'évaluer le potentiel de gonflement à partir du coefficient d'activité et du pourcentage des particules fines (pourcentage des grains inférieurà2μ_m).

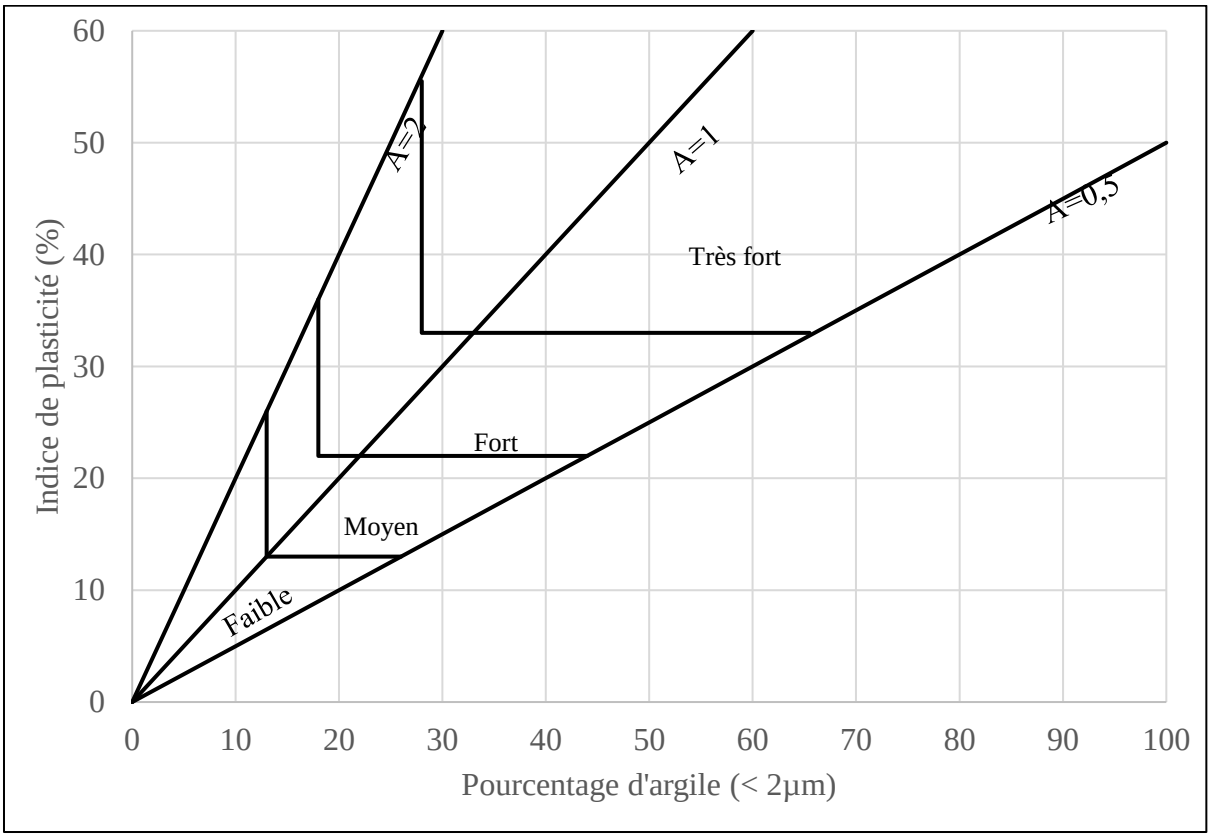


Figure II.4-1:Classification des potentiels de gonflement de Williams et Donaldson (1980)

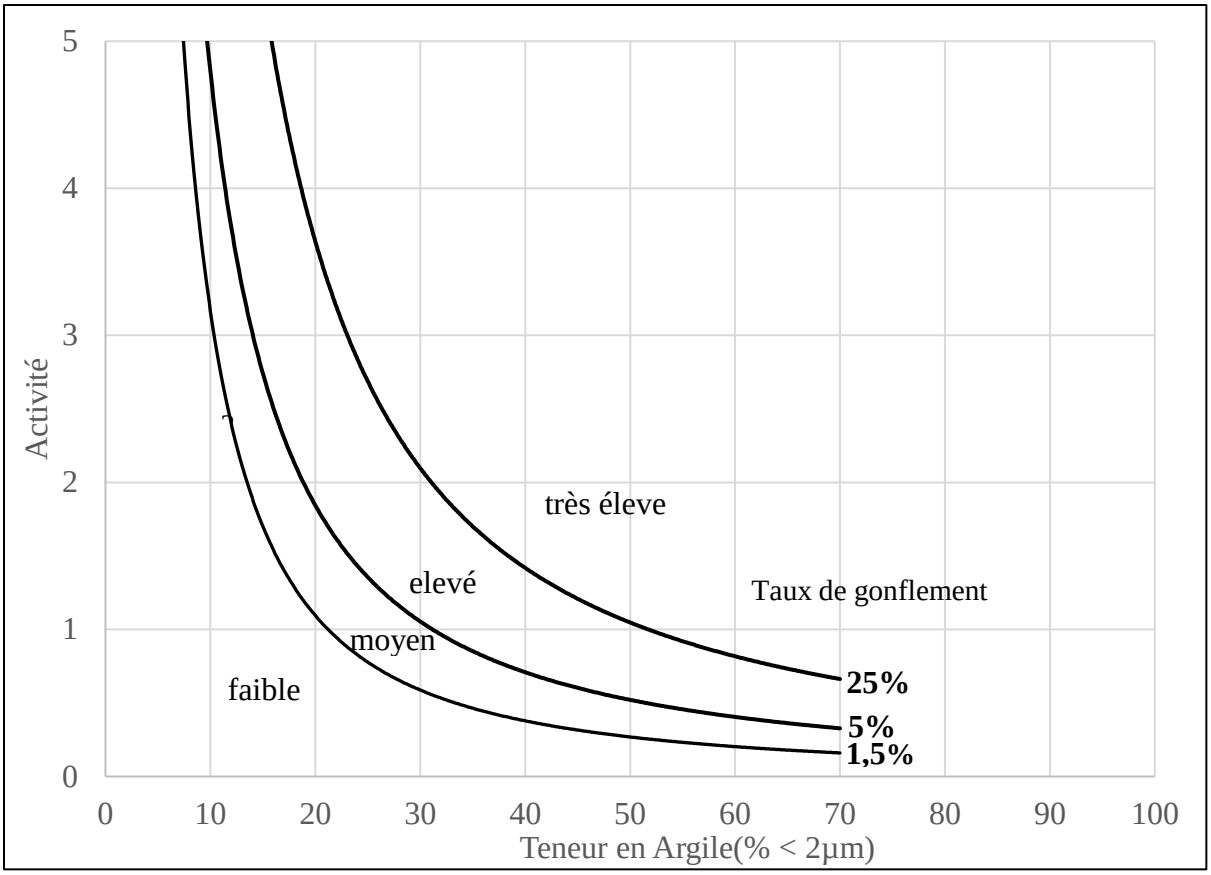


Figure II.4-2:Abaque d'évaluation du potentiel de gonflement (Seed,1962)

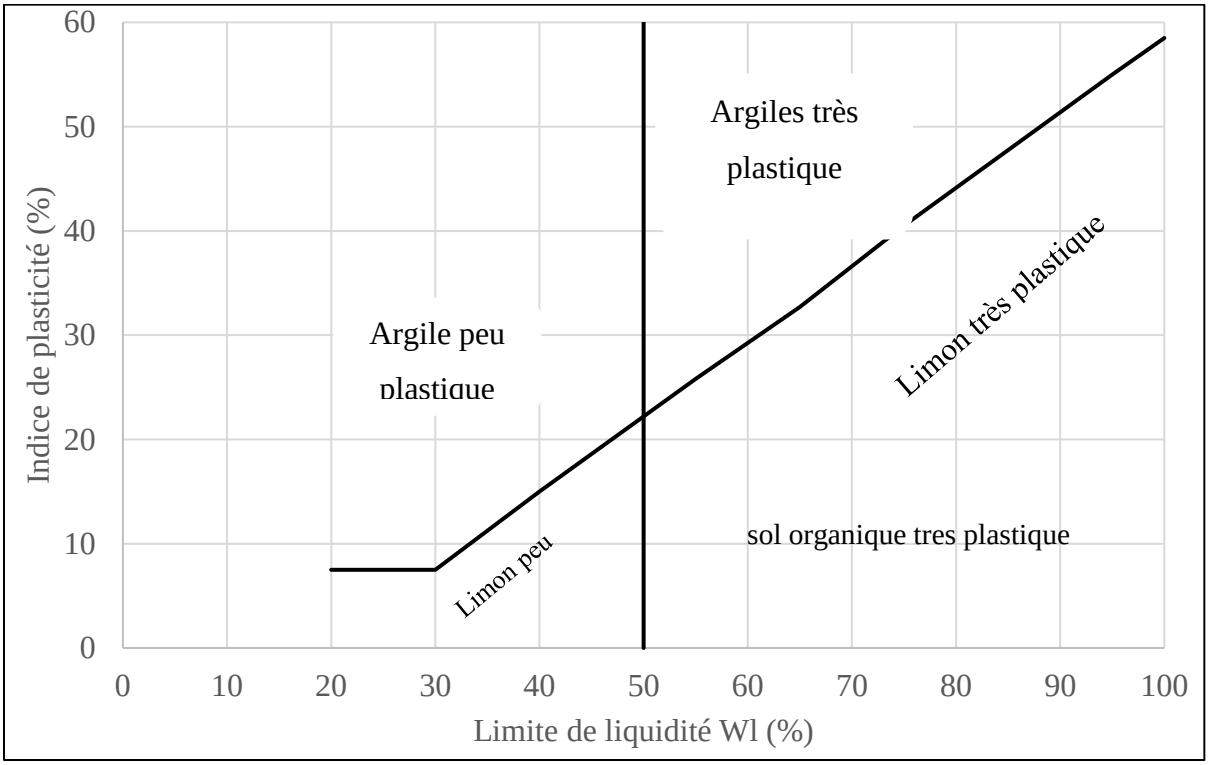


Figure II.4-3:Abaque de plasticité de Casagrande

II.5 Mesure du potentiel et de la pression de gonflement

II.5.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement

En général, c'est à partir des paramètres physico-chimiques qu'on peut identifier le potentiel de gonflement. Cependant, vu que plusieurs auteurs ont proposé des approches qui ne se basent pas sur les mêmes paramètres, cette identification devient compliquée. Les exemples ci-haut nous montrent comment certains auteurs ont proposé certains critères d'identification du potentiel de gonflement.

II.5.2 Mesure directe des paramètres de gonflement

II.5.2.1 Mesure de gonflement libre

On parle du gonflement libre d'un échantillon lorsque celui-ci, toujours soumis à des variations de son état hydrique, est libre de se déformer.

Les essais de gonflement s'effectuent en utilisant l'œdomètre ou en utilisant un moule. Ces essais consistent à la détermination de l'amplitude du mouvement définie par le rapport de la variation de la hauteur de l'échantillon à sa valeur initiale ΔH/H.

L'échantillon saturé est soumis au seul poids du piston. La variation de la hauteur du piston est mesurée en fonction du temps jusqu'à ce qu'elle se stabilise. La valeur finale permet de calculer la variation relative du volume de l'échantillon notée G et exprimée en pourcentage.

$$G = \frac{H_f - H_i}{H_i} * 100 \quad (\%) \qquad \text{(II.5.3)}$$

II.5.2.2 Mesure de la pression de gonflement

La pression de gonflement est définie de plusieurs façons dont notamment (i) la pression nécessaire pour maintenir un échantillon du sol à un volume constant lorsque celui-ci est soumis à une humidification ou (ii) la pression nécessaire pour ramener un échantillon du sol, soumis à l'humidification et ayant complètement gonflé, à son volume initial.

II.5.2.2.1 Le gonflement contrôlé manuellement

L'essai est réalisé dans un bâti œdométrique où on mesure la pression de gonflement en fonction du temps. La déformation de l'échantillon étant maintenue constante au cours de cet essai, et en imposant une déformation, en principe nulle, on mesure la pression nécessaire pour maintenir cette valeur de déformation lors de la saturation en eau.

Pendant l'essai, le technicien doit avoir une attention particulière : il doit donc, observer régulièrement le gonflement pour que si tôt que celui-ci atteint quelques micros, l'opérateur

ajoute un poids sur le plateau porte-poids afin de ramener le gonflement à sa valeur initiale. La contrainte appliquée est donc celle capable de s'opposer au gonflement.

II.5.2.2.2 Le gonflement contrôlé automatiquement

Cet essai consiste à mesurer la pression de gonflement en fonction du temps, la déformation de l'échantillon étant maintenue constante. Au cours de cet essai, on impose une déformation (en principe nulle). En pratique, le bâti de l'œdomètre est maintenu fixe (rigide). La pression de gonflement se mesure à l'aide d'un capteur de force qui se situe entre la plaque de répartition et le bâti fixe.

II.5.2.2.3 Détermination de la pression de gonflement avec méthode de gonflement libre

Dans l'essai de gonflement libre, l'échantillon soumis à une faible pression correspondant au poids du piston et de la pierre poreuse, est laissé en contact avec de l'eau. Une fois le phénomène de gonflement est stabilisé, l'échantillon quasi-saturé suit un chemin de chargement par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge nécessaire à appliquer pour ramener le volume de l'échantillon à sa valeur initiale.

II.6 Conclusion

Les matériaux argileux sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. La maitrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur différents ouvrages construits sur les sols argileux.

Ce chapitre a été consacré généralement sur la description des argiles et particulièrement celles qui présentent des caractères gonflants. Ensuite nous avons présenté les différents types d'argiles, leurs formations minéralogiques ainsi que leurs liaisons de structures et enfin, nous avons présenté le phénomène de gonflement et comment on peut l'identifier par des essais au laboratoire.

Dans le chapitre suivant, on parlera de la caractérisation et de l'identification au laboratoire du sol argileux provenant dans les zones d'étude.

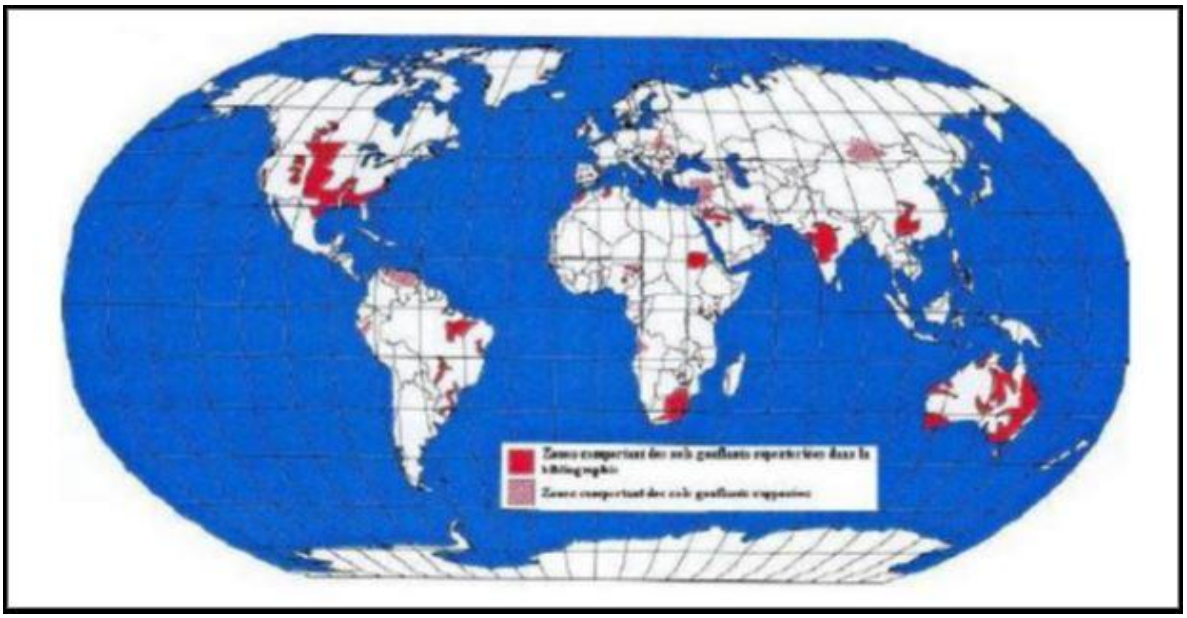


Figure II.6-1:La carte mondiale des sols gonflants (P. REIFFESTECK, 1999, cité par Nardjes D.&NEBATI F.,2016)

CHAPIII. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SOLS ETUDIES

III.1 Introduction

Pour tous les travaux de construction des ouvrages de Génie-civil, l'identification du sol est indispensable avant tout pour avoir une bonne connaissance sur ses caractéristiques mais aussi une appréciation des dégâts éventuels associés au comportement du sol. Elle permet également de déterminer le type d'agent de traitement à utiliser et ça donne une orientation sur la méthode de stabilisation à adopter.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents essais que nous avons effectués au laboratoire.

Pour la chronologie de ces essais, on a établi un ordre qui prend en compte les différents paramètres à traiter.

III.2 Localisation de la zone d'étude

L'étude a été effectuée sur des échantillons provenant de deux zones se trouvent dans la commune urbaine de NTAHANGWA plus précisément au Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge (CHUK) et à l'Ecole Normale Supérieure (E.N.S) dans des zones actives du point de vu gonflement (*Figure III.2-1*).



Figure III.2-1:Localisation de la zone d'étude

III.3 Identification du sol étudié

Des essais d'identification ont été effectués sur des échantillons remaniés et intacts prélevés à 1.5m de profondeur.

Nous avons procédé comme suit :

a. Les essais géotechniques

Ces essais sont nécessaires pour la classification du sol. Ils déterminent les propriétés des argiles sachant qu'elles ont un impact sur le comportement mécanique.

- ❖ Les essais de limite d'Atterberg permettant de connaitre les états de consistance des argiles
- ❖ Les essais d'analyse granulométrique permettant de connaitre la distribution granulométrique.

b. Les essais œdométriques pour déterminer les paramètres de gonflement (potentiel de gonflement et pression de gonflement) et de compressibilité.

III.3.1 Etude géotechnique

Cette partie décrit les essais géotechniques cités en haut, leurs modes opératoires et ses résultats escomptés.

III.3.1.1 Limites d'Atterberg

Elle consiste à déterminer la teneur en eau du sol dans ses trois états dans lequel il se présente (état solide, état plastique, état liquide). (Figure III.3-1)

a. Les définitions

- ❖ La limite de liquidité W_l : c'est la limite entre l'état liquide et l'état plastique du sol. Autrement dit c'est la teneur en eau auquel un sol cesse de présenter un comportement plastique pour devenir liquide si on y ajoute de l'eau.

$$W_L = W\left(\frac{N}{25}\right)^{0,121} \qquad \text{(III.3.4)}$$

- ❖ La limite de plasticitéW_P : c'est la limite entre l'état plastique et l'état semi- solide du sol. Donc c'est la teneur en eau auquel un sol cesse de présenter un comportement plastique pour devenir semi-solide.

❖ Indice de plasticité I_P : c'est la différence entre la limite de liquide et la limite de plasticité.

$$I_P = W_L - W_P \qquad \text{(III.3.5)}$$

Il précise les risques de déformation des matériaux car plus l'indice de plasticité est très élevé plus les matériaux sont sensibles aux effets climatiques et dans ce cas le phénomène de retrait-gonflement est élevé.

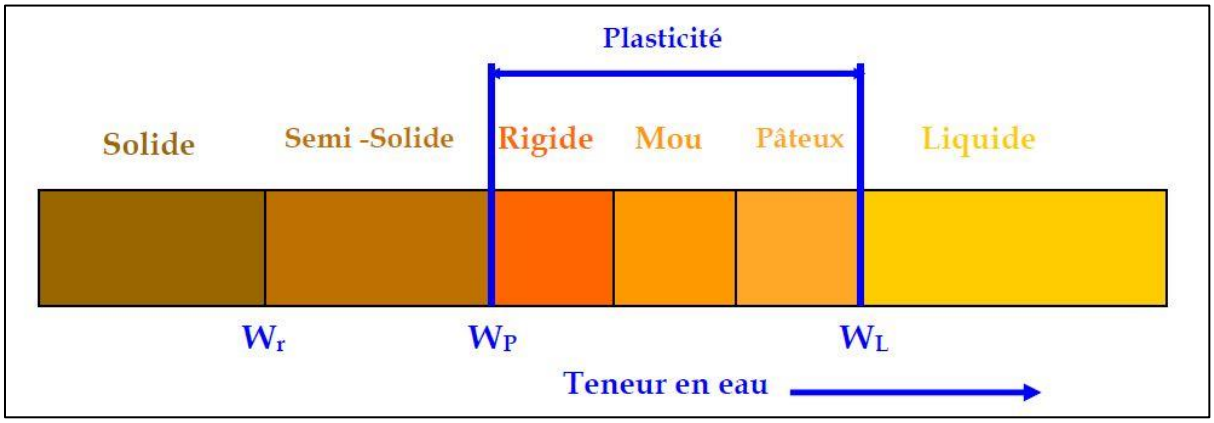


Figure III.3-1 : Différents états de consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau

Mode opératoire

Limite de liquidité : l'essai s'effectue sur un mortier du sol constitué par des fractions inférieures à 400μ_m.A partir de la coupelle de Casagrande, on place du matériau dans celle-ci, on creuse une rigole avec l'outil de Casagrande. Puis on compte le nombre de coup pour que les lèvres de cette rigole se referment sur 10mm. On réalise sur différents séchages des matériaux de sorte que le nombre de coups soit compris entre 15 et 35 coups, (Figure III.3-2). La limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à 25 coups.

Limite de plasticité : on prélève un peu l'échantillon mouillé, en faire des faisceaux boudins, on va étirer cette dernière sous la paume de main afin de réaliser un cylindre de 3mm de diamètre et une longueur de 100mm. L'amincissement de ce rouleau se fait par des aller- retours faits par le plat de la main. La limite de plasticité est la teneur en eau en pourcentage du rouleau qui se brise en soulevant en son milieu, (Figure III.3-3).



Figure III.3-2:Limite de liquidité



Figure III.3-3:Limite de plasticité

III.3.1.2 La granulométrie

L'analyse granulométrique des éléments constitutifs des échantillons a été premièrement effectuée par tamisage qui donne la répartition des grains dont le diamètre est supérieur à 125$\mu_m$et puis complété par la sedimentometrie pour les particules des dimensions inferieures à 125μ_m. Cet essai permet de mettre en valeur la distribution granulométrique des échantillons.



Figure III.3-4: Analyse granulométrique par tamisage et par sedimentometrie

Les courbes des résultats des essais géotechniques d'identification sont en annexe ; les résultats pour le calcul du C.A sont regroupés dans le Tableau III.3-1 ci-dessous.

Tableau III.3-1: Résultats des essais géotechniques pour le calcul du C.A

Numéro de l'Echantillon	Limite de Liquidité	Limite de Plasticité	Indice de Plasticité	%≤2μ_m	C.A
1	55,0	26,1	28,9	23,0	1,3
2	57,5	26,8	30,7	20,2	1,5
3	51,9	20,5	31,4	22,9	1,4
4	40,6	25,0	15,6	12,1	1,3
5	36,9	23,6	13,3	10,2	1,3
6	45,5	37,5	8,0	<7	-
7	32,0	25,0	7,0	<7	-
8	45,0	28,6	16,4	<7	-
9	38,8	23,6	15,2	<7	-
10	41,5	25,2	16,3	<7	-
11	38,1	13,4	24,7	<7	-

12	58,8	34,8	24,0	8,2	2,9
13	42,2	21,5	20,7	<7	-
14	51,0	33,8	17,2	12,0	1,4
15	51,1	23,6	27,5	<7	-
16	39,8	20,0	19,8	<7	-
17	50,2	27,3	22,9	12,4	1,8
18	42,2	32,5	9,7	9,0	1,1
19	62,5	18,2	44,3	27,1	1,6
20	50,3	25,0	25,3	17,8	1,4
21	53,2	26,1	27,1	<7	-
22	46,8	28,6	18,2	15,7	1,2
23	51,6	31,3	20,3	7,5	2,7
24	55,2	25,0	30,2	16,7	1,8
25	45,0	25,0	20,0	10,9	1,8
26	49,9	33,8	16,1	11,9	1,4
27	61,8	33,8	28,0	21,1	1,3
28	49,1	33,8	15,4	12,1	1,3
29	49,1	29,2	19,9	7,7	2,6
30	63,2	33,8	29,4	14,7	2,0
31	57,9	21,4	36,5	16,0	2,3
32	56,5	33,9	22,6	19,5	1,2
33	54,5	28,6	25,9	9,8	2,6
34	56,8	29,2	27,6	11,4	2,4
35	39,7	18,3	21,4	<7	-
36	38,6	21,5	17,1	<7	-
37	36,1	23,1	13,0	7,9	1,6
38	23,2	16,2	7,0	<7	-
39	38,1	11,1	27,0	<7	-
40	36,2	19,1	17,1	8,6	2,0
41	47,9	16,8	31,1	13,7	2,3
42	38,2	23,6	14,6	<7	-
43	42,2	19,4	22,8	9,7	2,3
44	41,5	24,0	17,5	<7	-

45	39,1	26,5	12,6	7,8	1,6
46	33,7	26,1	7,6	<7	-
47	45,0	32,4	12,6	9,1	1,4
48	46,9	19,8	27,1	<7	-

III.3.1.3 Classification du potentiel de gonflement du sol étudié

III.3.1.3.1 Classification selon seed, 1962

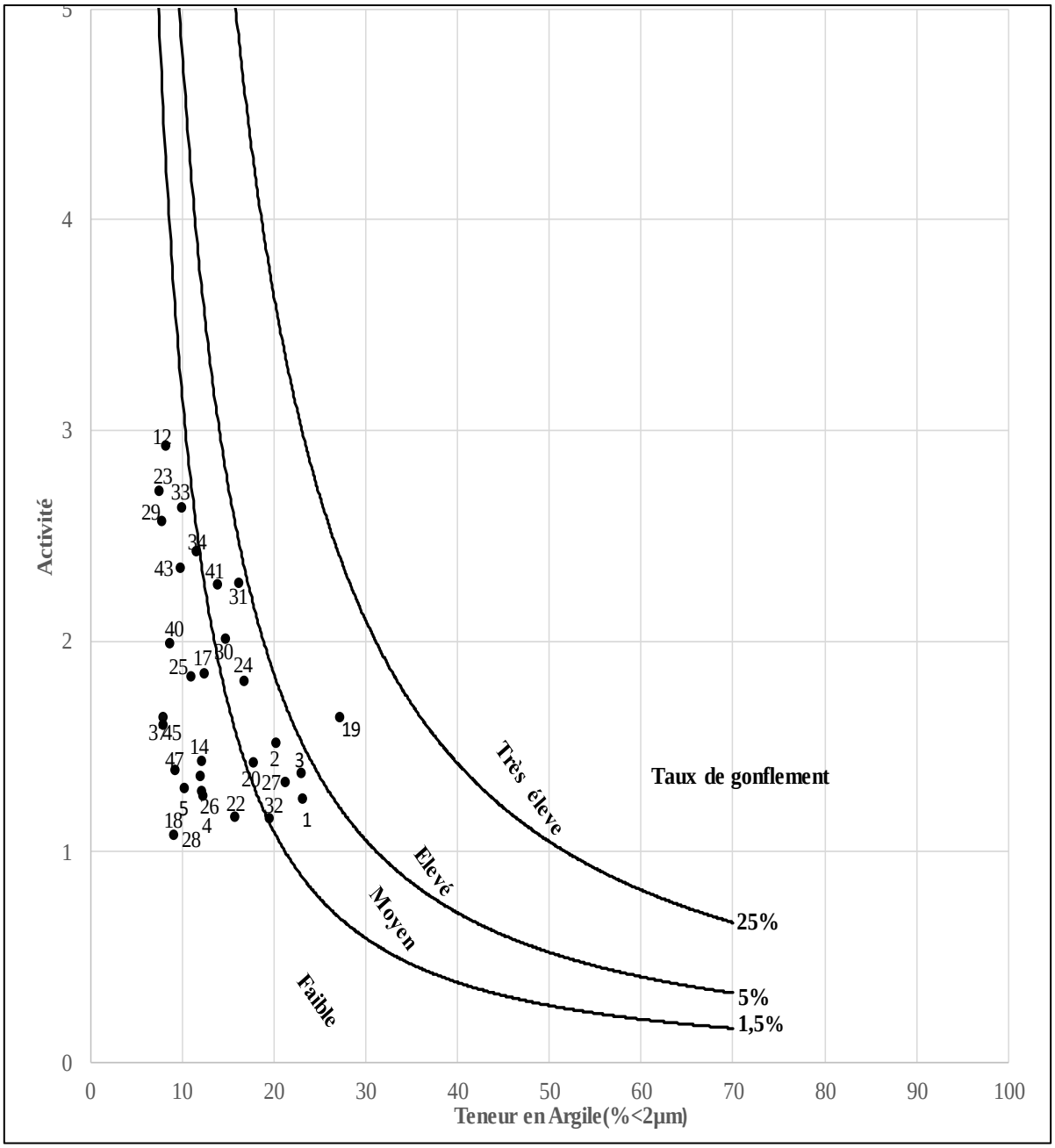


Figure III.3-5: Classification du potentiel de gonflement selon Seed, 1962

III.3.1.3.2 Classification selon williams et Donaldson (1980)

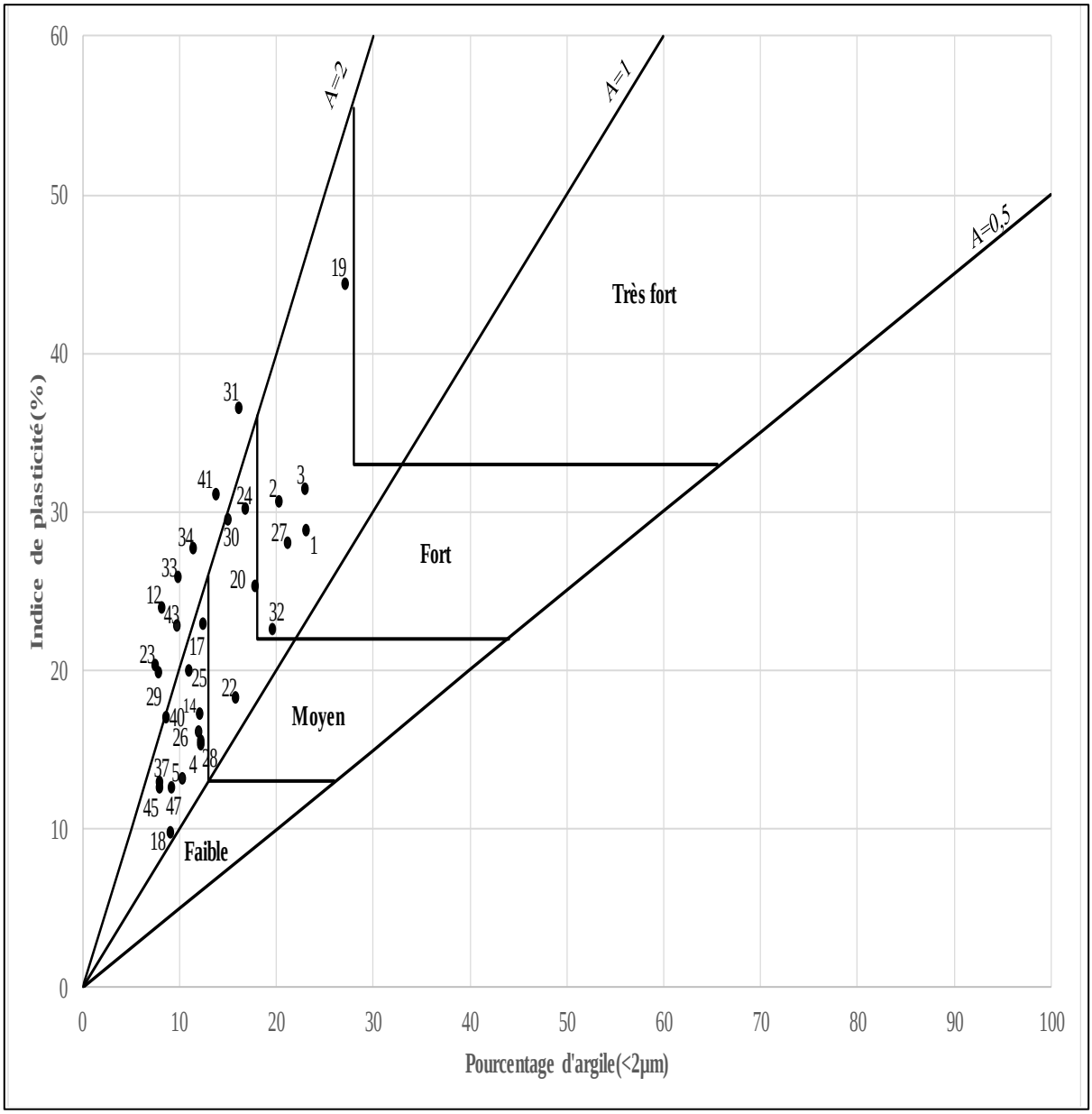


Figure III.3-6: Classification du potentiel de gonflement selon Williams et Donaldson (1980)

III.3.1.3.3 Classification selon Casagrande

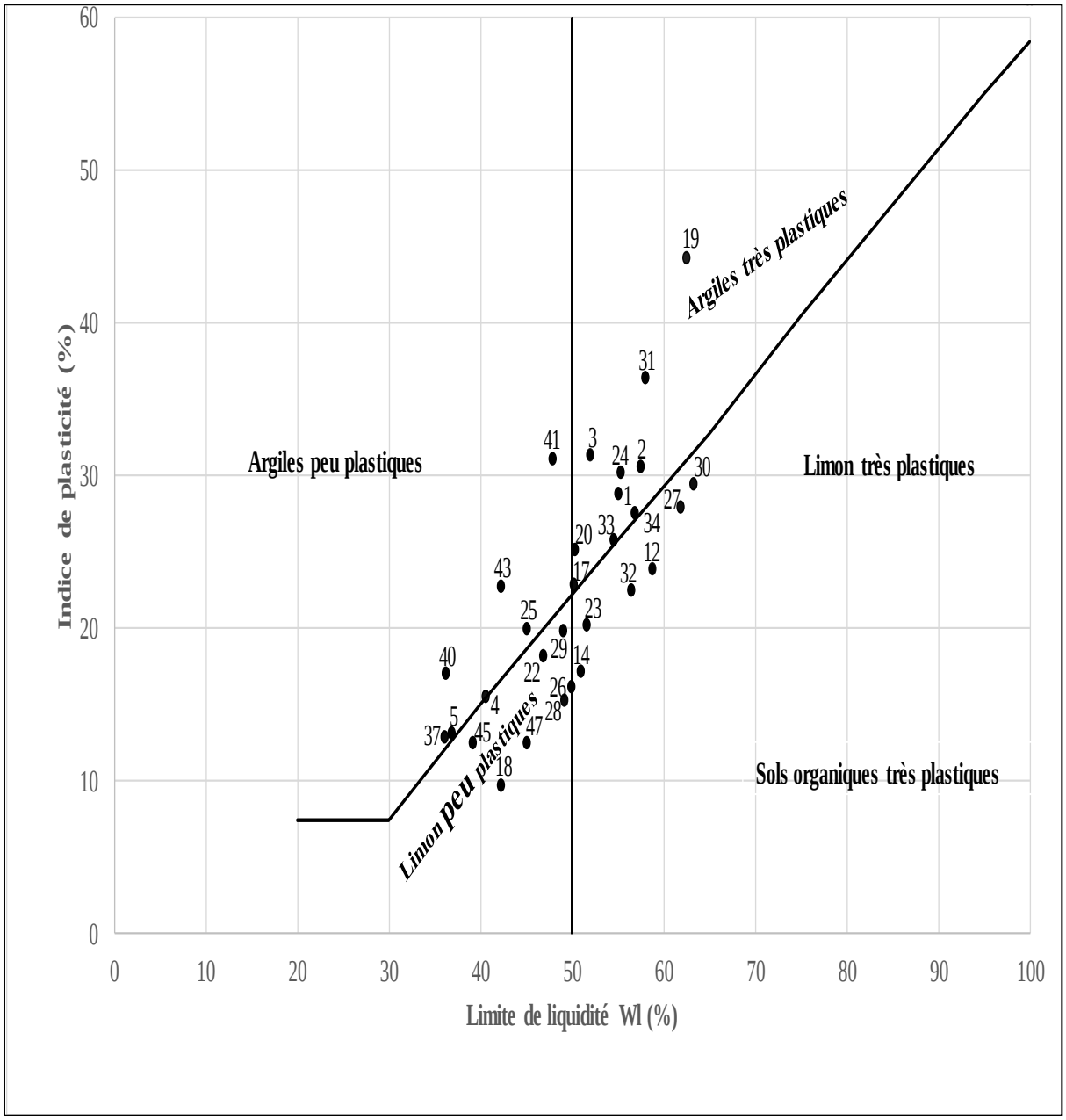


Figure III.3-7: Classification du potentiel de gonflement selon Casagrande

Conclusion : Sur base des classifications ci-haut trois échantillons représentatifs (éch12, éch19, éch31) ayant à la fois des valeurs élevées de limite de liquidité et de l'indice de plasticité et du coefficient d'activité supérieur à 1,25 ont été retenus pour la suite de l'expérimentation.

III.3.1.4 Essais de gonflement libre et mesure de la pression de gonflement

Les essais de gonflement libre ont été réalisés sur trois échantillons choisis comme des échantillons représentatifs pour les 48sondages.

a. Détermination de gonflement par l'essai de gonflement libre

On parle de gonflement libre d'un échantillon lorsque celui-ci, toujours soumis à des variations de son état hydrique, est libre de se déformer.

❖ **Description de l'essai**

L'essai de gonflement consiste à la détermination de l'amplitude du mouvement défini par le rapport de la variation de la hauteur de l'échantillon à sa valeur initiale ΔL/L.

❖ **Principe de l'essai en utilisant la méthode à l'œdomètre**

- Mesurer le poids de la bague,
- Mesurer les dimensions internes (hauteur et diamètre),
- Tailler l'éprouvette du sol à partir de la bague œdométrique,
- Mesurer le poids de l'ensemble bague – sol,
- Placer la bague dans un œdomètre,
- Saturer l'échantillon,
- Suivre le comportement.



Figure III.3-8: Préparation de l'échantillon pour l'essai de gonflement libre



Figure III.3-9:Essai de gonflement libre

Résultats :

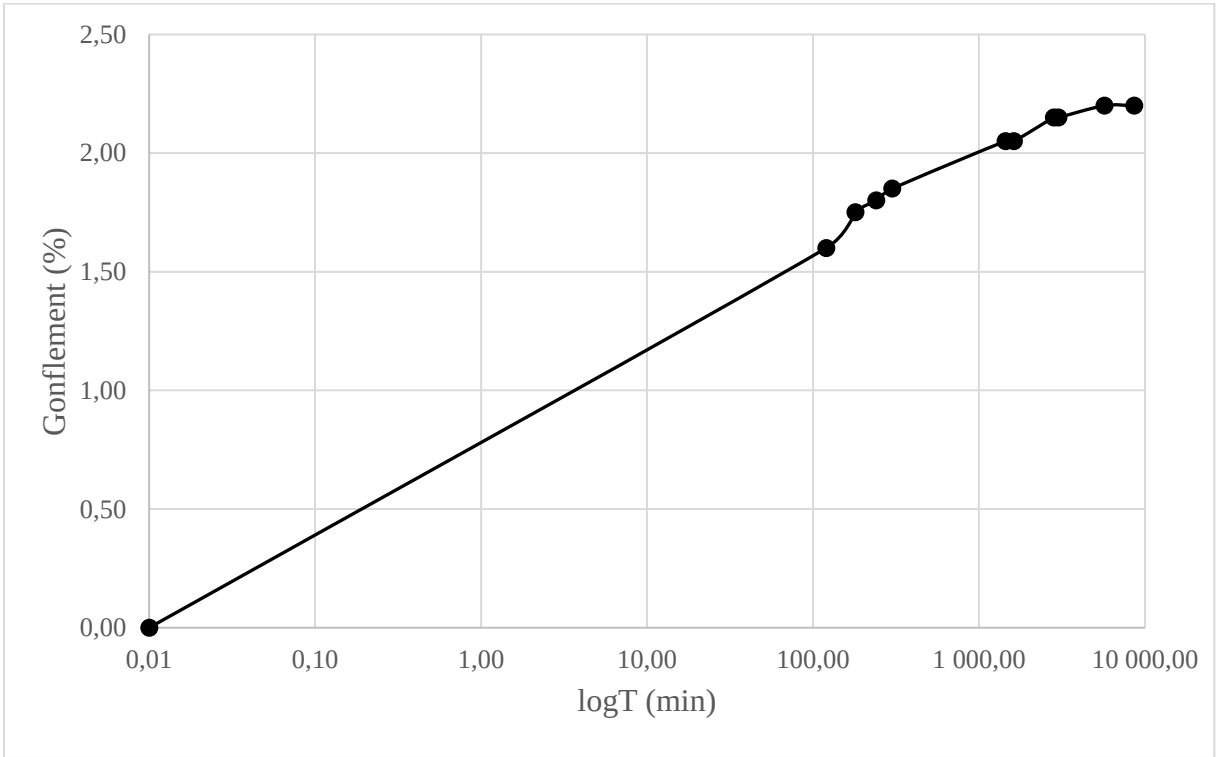


Figure III.3-10: Courbe d'évolution du gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech12)

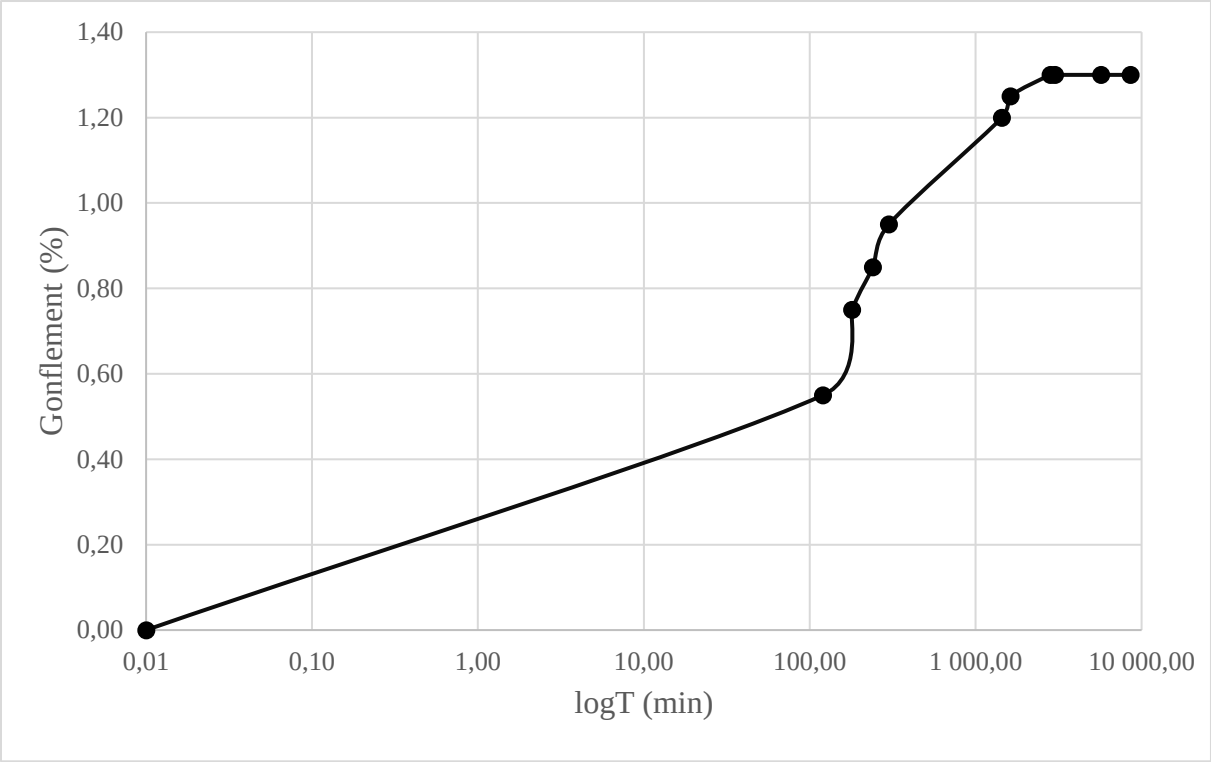


Figure III.3-11:Courbe d'évolution de gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech19)

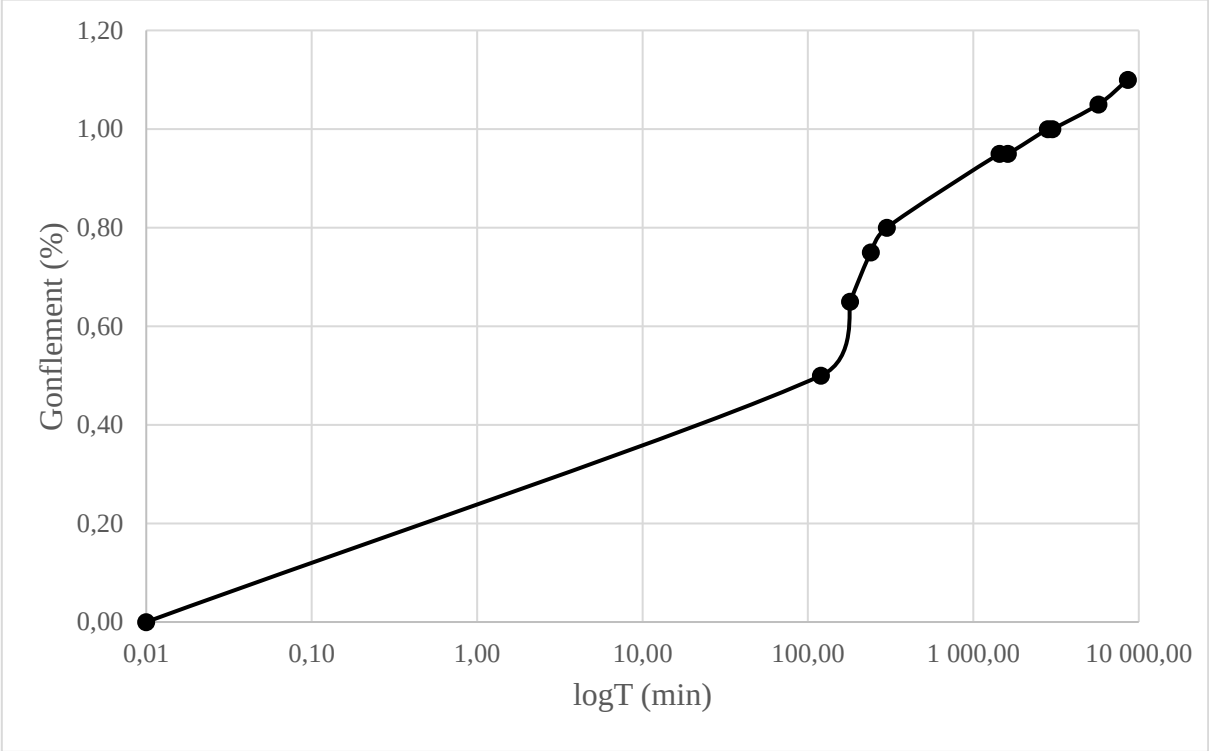


Figure III.3-12:courbe d'évolution de gonflement du sol face à l'eau en fonction du temps (Ech31)

b. **Détermination de la pression de gonflement avec méthode de gonflement libre**

Cette pression a été déterminée de manière décrite dans le précédent chapitre.

Résultats :

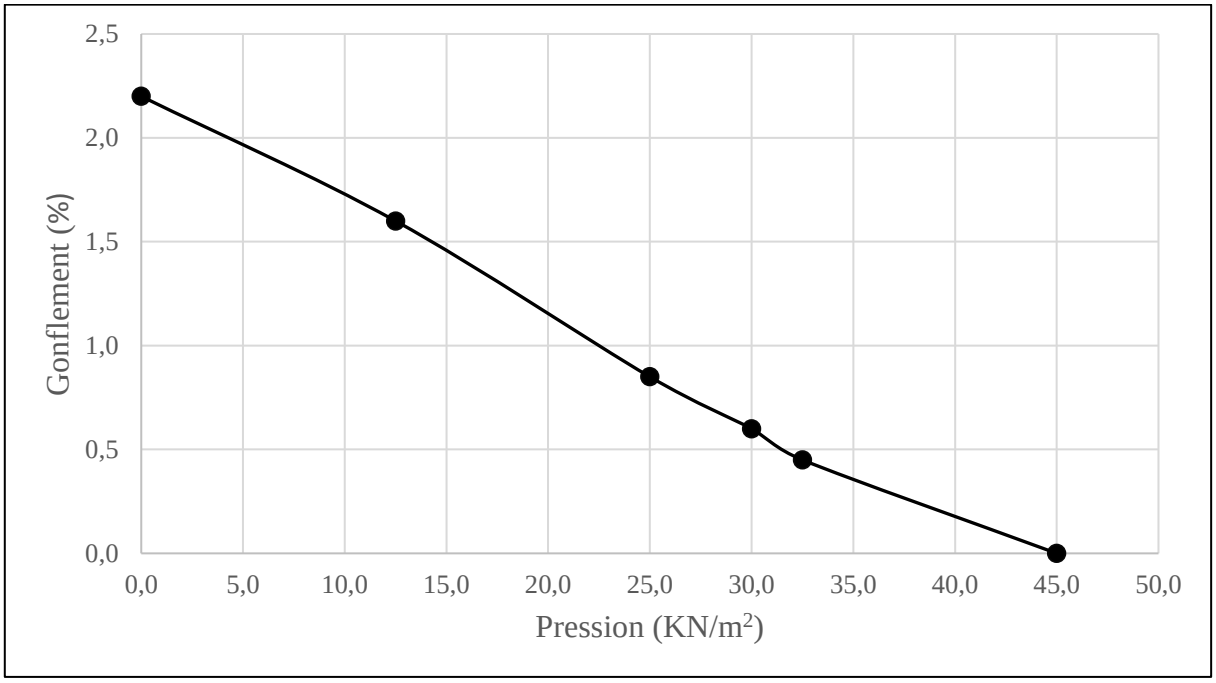


Figure III.3-13:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 12)

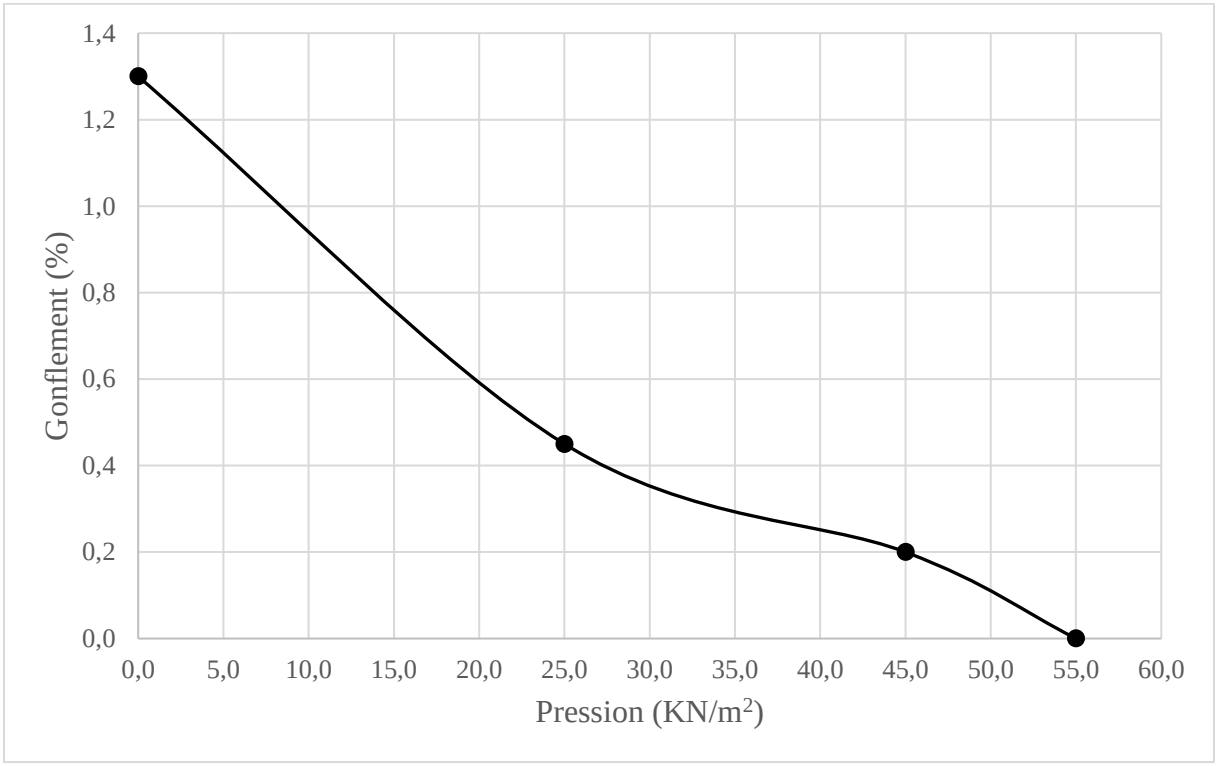


Figure III.3-14:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 19)

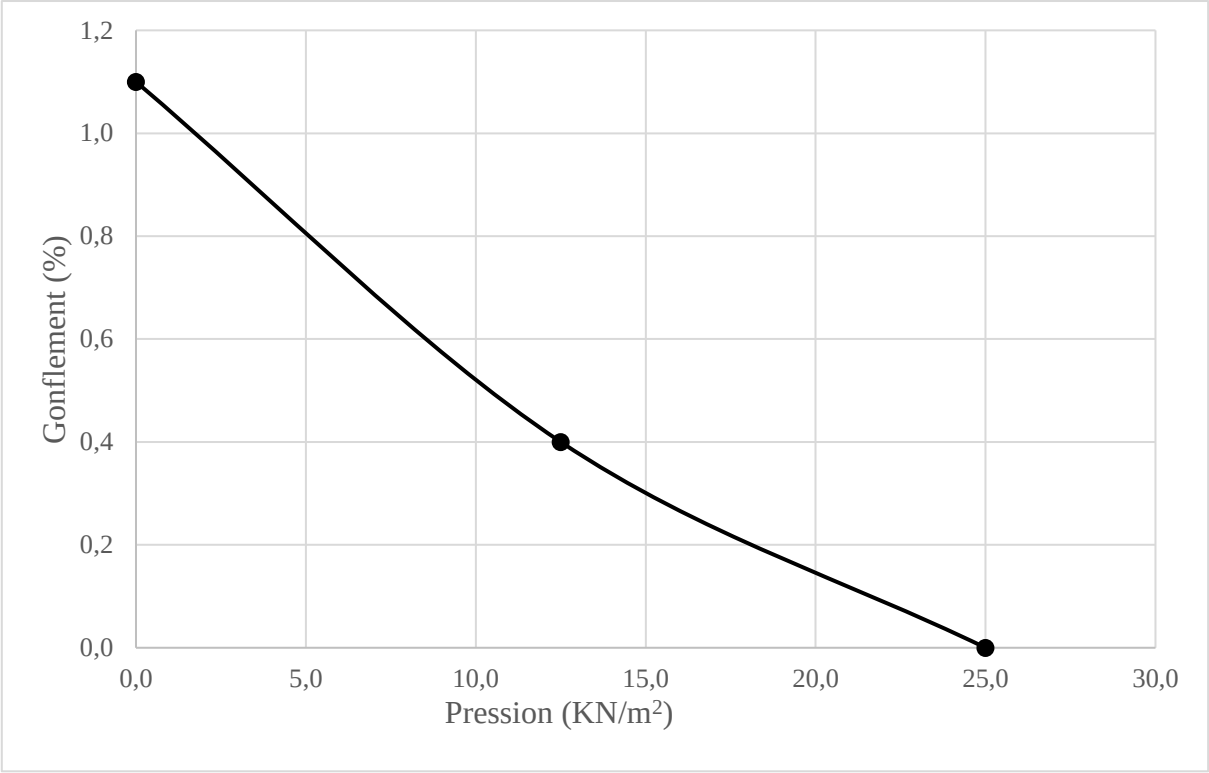


Figure III.3-15:Courbe montrant la pression de gonflement du sol face à l'eau (Ech 31)

Les résultats pour le gonflement libre et pour la pression de gonflement sont synthétisés dans le *Tableau III.3-2*

Tableau III.3-2:Résultats pour les essais de gonflement et de la pression de gonflement

Numéro de l'échantillon	Gonflement (%)	Pression de gonflement($KN/_{m^2}$)
12	2,2	45,0
19	1,3	55,0
31	1,1	25,0

En analysant les résultats du *Tableau III.3-2*, le constant est que l'échantillon 19 est plus défavorable par rapport aux phénomènes de retrait-gonflement. Donc les essais de stabilisation se font sur des échantillons provenant au point 19.

III.3.2 Les essais de reconstitution du sol

Des résultats expérimentaux sur la stabilisation des sols gonflants trouvés dans les littératures, la plupart ont été obtenus à partir des tests sur des échantillons non-remaniés, ce qui est un cas contraire du présent travail où les tests de stabilisation sont appliqués sur des échantillons remaniés.

Ces échantillons remaniés ont été préalablement reconstitués en tenant compte de la densité et de la teneur en eau à l'état intact.

Pour la préparation du sol soumis à l'essai, l'échantillon remanié a été séché à l'aire libre afin d'éviter que les caractéristiques de gonflement ne soient pas altérées par le passage à l'étuve. Ensuite les échantillons ont été broyés et on a déterminé la teneur en eau résiduelle de cette poudre. Après on a déterminé la quantité d'eau à rajouter à la poudre. Un mélange bien soigné a été fait et on l'a conservé dans des sceaux bien fermés pour attendre quelques jours afin qu'il soit homogénéisé. Après l'homogénéisation, on compacte l'échantillon dans un moule et on détermine sa densité humide et sèche pour voir que c'est proche à celle de l'échantillon intact au moment du prélèvement. Après on a passé aux essais de gonflement libre et à la détermination de la pression de gonflement. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux de l'échantillon non-remanié comme l'illustre le *Tableau III.3-3*.

Tableau III.3-3:Comparaison des résultats obtenus sur l'échantillon intact et l'échantillon reconstitué

Type de l'Echantillon	Densité humide (kN/m^3)	Densité sèche(kN/m^3)	Teneur en eau (%)	Gonflement (%)	Pression de gonflement (kN/m^2)
Echantillon non-remanié	19,97	16,67	19,79	1,3	55,00
Echantillon reconstitué	19,80	16,60	19,24	1,53	52,50

Conclusion :

Les résultats obtenus à partir des essais présentés ci-haut permettent de vérifier le comportement mécanique des argiles utilisées. A partir de ces résultats, on peut conclure que ces argiles sont gonflantes. Des essais de reconstitution ont été effectués pour se rassurer que dans le modèle on aura des échantillons dont les états initiaux sont proches que ceux in situ.

Dans le chapitre qui suit, on procédera à la stabilisation des sols à l'aide d'un modèle physique réduit en utilisant les solutions salines (sels).

CHAPIV. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA STABILISATION DES SOLS GONFLANTS AVEC DES SELS A L'AIDE D'UN MODELE PHYSIQUE REDUIT.

IV.1 Introduction

La stabilisation avec des sels est une technique qui permet d'améliorer la portance et le comportement à l'eau d'un sol moyennant l'ajout des sels. Elle a pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur structure minéralogique et leur environnement chimique.

Comme les sels résultent de l'action d'acide sur une base, dans le domaine du génie civile, on les utilise pour la réduction du phénomène de retrait-gonflement.

Dans les littératures, plusieurs chercheurs ont proposé la technique de stabilisation des argiles gonflantes par des sels et leurs résultants ont notamment montré la réduction du gonflement et de la pression de gonflement. L'objectif principal de ce chapitre est de chercher l'effet des différents sels à différentes concentrations sur les paramètres de gonflement et sur le tassement à l'aide d'un modèle physique réduit, (*Figure IV.5-1*).

IV.2 But de la stabilisation

- Limiter la variation de la teneur en eau,
- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité)
- Colmater les vides que l'on peut supprimer,
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules (résistances mécanique),
- Stabiliser les sols expansifs (réduire les paramètres de gonflement).

IV.3 Les différentes techniques de stabilisation

Les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées sont (BELABBACI, 2014) :

- La stabilisation chimique ;
- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation thermique.

IV.3.1 Stabilisation chimique

IV.3.1.1 Stabilisation par solutions salines

Des travaux de recherche ont montré que la stabilisation des sols gonflants par ajout des solutions salines peut réduire considérablement le potentiel de gonflement des argiles.

PEELE, 1937, cité par (BELABBACI, 2014) a constaté que le carbonate de calcium augmente le potentiel floculé des argiles ce qui donne la résistance du sol à l'érosion.

WALLER et LAWLER ; 1976 cité par (BELABBACI, 2014) ont travaillé sur un échantillon reconstitué et ont trouvé des meilleurs résultats à l'aide des solutions qui associent le KCl avec un polymère.

ILTIS, 1979(BELABBACI, 2014) a testé plusieurs types de gonflement en présence de plusieurs solutions salines et a constaté que le KCl peut réduire les paramètres de gonflement.

HACHICHI et FLEUREAU, 1999cité par (BELABBACI, 2014) ont effectué des tests sur des échantillons intacts en présence des sels (le chlorure de potassium, le chlorure de calcium, le chlorure de sodium, le chlorure d'ammonium). Ils ont remarqué que le chlorure de calcium et le chlorure de potassium donnent une réduction importante du gonflement.

ABOUBEKR et AISSA MAMOUNE, 2004cité par (BELABBACI, 2014) ont étudié le gonflement libre des argiles en présence des solutions salines pour voir son influence sur l'amplitude de gonflement. Ils ont constaté qu'il y a une réduction importante de l'amplitude de gonflement due à la présence du chlorure de potassium.

IV.3.1.2 Stabilisation avec chaux

Cette technique de stabilisation par ajout de la chaux est utilisée dans le cas de traitement des sols de faible portance. Elle permet de modifier les propriétés du sol en réduisant la plasticité avec l'augmentation de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité.

IV.3.2 Stabilisation mécanique

Parmi les techniques de la stabilisation mécanique on distingue :

- Le compactage

Cette technique de compactage est très importante dans la stabilisation des sols car elle permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné.

- Le drainage

Pour Cette technique, on peut utiliser des drains de sable verticaux ou des trachées drainantes.

- L'application des fortes pressions

Cette technique consiste à appliquer une pression égale à la pression limite minimale nécessaire pour empêcher le gonflement des sols. Sur terrain, cette pression peut être appliquée en utilisant des remblais de sols non gonflants.

- La pré-humidification

Pour cette méthode, on crée un gonflement du sol avant la construction d'ouvrage et il faut que le volume reste constant. Pratiquement on peut créer des bassins au-dessus des sols gonflants.

IV.3.3 Stabilisation thermique

Elle consiste à augmenter la température pour améliorer la résistance des sols gonflants en réduisant la répulsion électrique entre les particules.

Tableau IV.3-1:Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (BEKKOUCHE et al, 2001) cité par (BELABBACI, 2014)

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation mécanique	Compactage	- Le compactage est le plus économique - Réduire le potentiel expansif	Il faut une grande quantité d'eau
	Pré-humidification		- Distribution uniforme - Temps de l'opération
Stabilisation chimique	Les sels	- Augmenter la concentration ionique de l'eau libre - Réduire le phénomène d'échange	Le choix du type de dosage et la méthode d'addition d'un produit
	Ciment	- Augmenter la résistance - Diminuer la plasticité - Réduire le potentiel de variation de volume	Utilisation d'un dosage important
	Chaux	- Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression de gonflement	Carbonatation de la chaux
Stabilisation thermique	Réduire la répulsion électrique entre les particules		Très couteuses

Beaucoup de chercheurs ont effectué des études sur la stabilisation des sols argileux pour connaitre l'influence de l'efficacité d'un produit ou d'une solution sur la réduction du phénomène de gonflement.

Le choix de la technique de stabilisation à utiliser dépend :

- Du type de sol à traiter,

- De la considération économique,
- Des conditions environnementales,
- De la disponibilité des matériaux.

Dans ce chapitre, une étude de la stabilisation des sols gonflants provenant au centre hospitalo-universitaire de Kamenge a été effectuée au laboratoire en utilisant les différents sels avec différentes concentrations.

IV.4 Mécanisme de stabilisation avec des sels

Quand on sature l'échantillon par des solutions salines, cette dernière par hydratation engendre des ions chargés positivement et négativement. Les ions positifs s'accrochent dans les particules argileuses chargées négativement et par contre il y a compensation de la charge, ce qui explique le phénomène de la stabilisation avec des sels.

IV.5 Description et fonctionnement du modèle

Le modèle est fabriqué dans des tôles. Il a un accessoire (comparateur) qui permet d'effectuer des lectures liées à la déformation de l'échantillon. Il a des dimensions de 19,32cm de diamètre et de 12,00 cm de hauteur. Des échantillons de sol remanié ont été compactés dans ce modèle en tenant compte de la densité et de la teneur en eau à l'état in situ, et après le compactage, nous avons passé aux essais de stabilisation.



Figure IV.5-1: Modèle physique

IV.6 Préparation des solutions salines

Pour la préparation des solutions salines, on commence d'abord parle calcul de la quantité des sels en grammes nécessaires pour faire une telle concentration et puis on prépare une quantité d'eau distillée correspondant à la concentration voulue, on les mélange et on attend jusqu'à ce que les sels se dissolvent dans l'eau. C'est cette solution obtenue qu'il faut utiliser pour la saturation des échantillons.

IV.7 Les essais de stabilisation du sol étudié par les sels

Un programme des essais a été fait pour évaluer l'effet des solutions chimiques sur les paramètres de gonflement et sur le tassement.

Les sels utilisés sont :

- Chlorure de potassium (KCl),
- Chlorure d'ammonium (NH_4Cl),
- Chlorure de sodium (NaCl).

Les concentrations des solutions salines sont de 0,05mol/l ; 0,50mol/l ; 1,00mol/l ; 2,00mol/l



Figure IV.7-1 : Saturation des échantillons avec différents sels et lecture du gonflement (à gauche) et évaluation du tassement (à droite).

IV.8 Présentation et Interprétation des résultats

La mesure du potentiel de gonflement a été effectuée à l'aide d'un modèle physique réduit (Figure IV.7-1). Les résultats des essais de gonflement libre sur des échantillons reconstitués dans un modèle physique réduit et avec différentes concentrations en sels sont illustrés sur les figures ci-dessous.

NaCl :

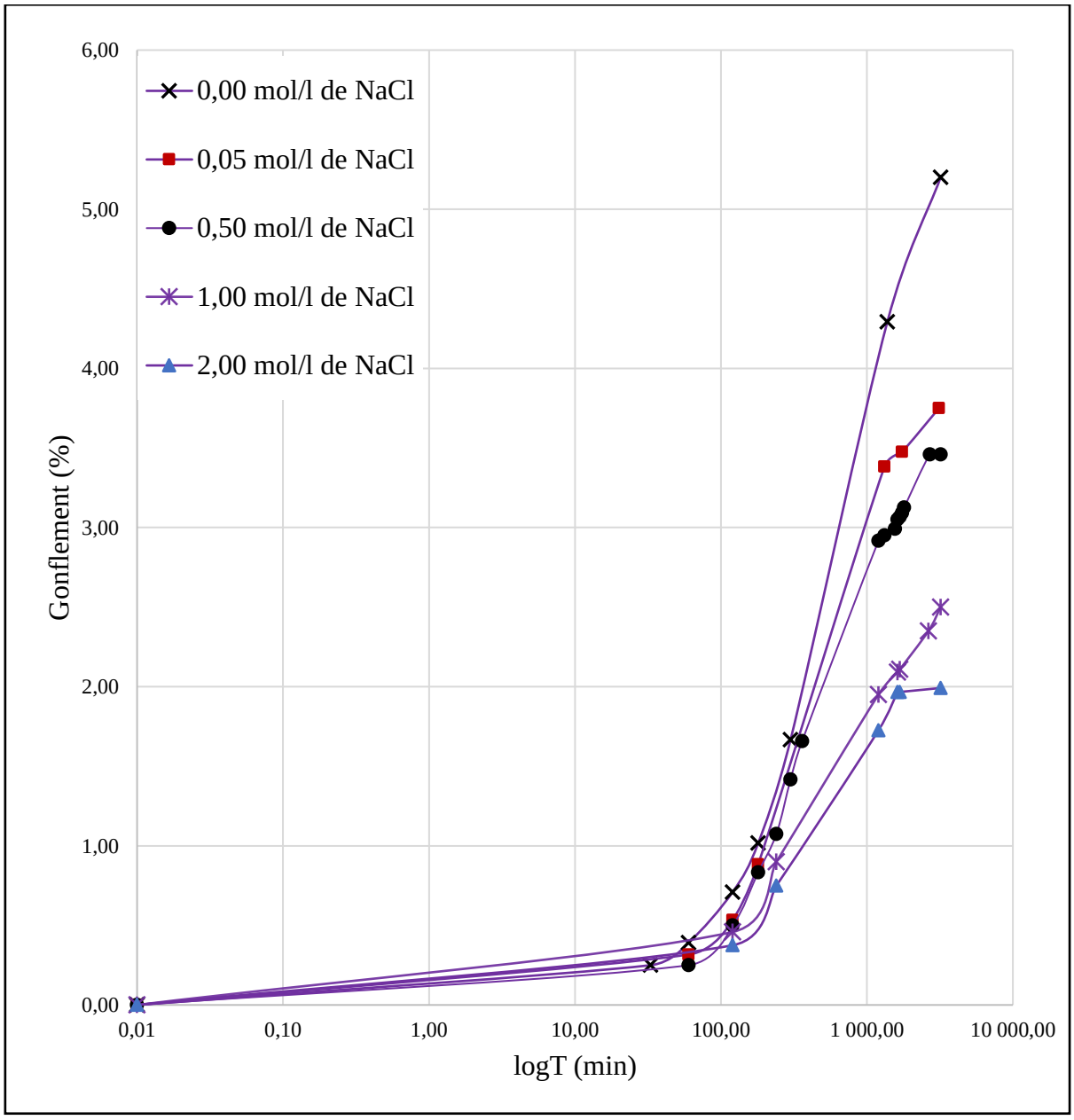


Figure IV.8-1 : Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de NaCl

L'application de la solution saline en NaCl, le gonflement est réduit de 27, 88% ; 33,49% ; 51,92% ; 61,70% respectivement pour 0,05mol/l ; 0,5 mol/l ; 1,00mol/l ; 2,00 mol/l.

KCl :

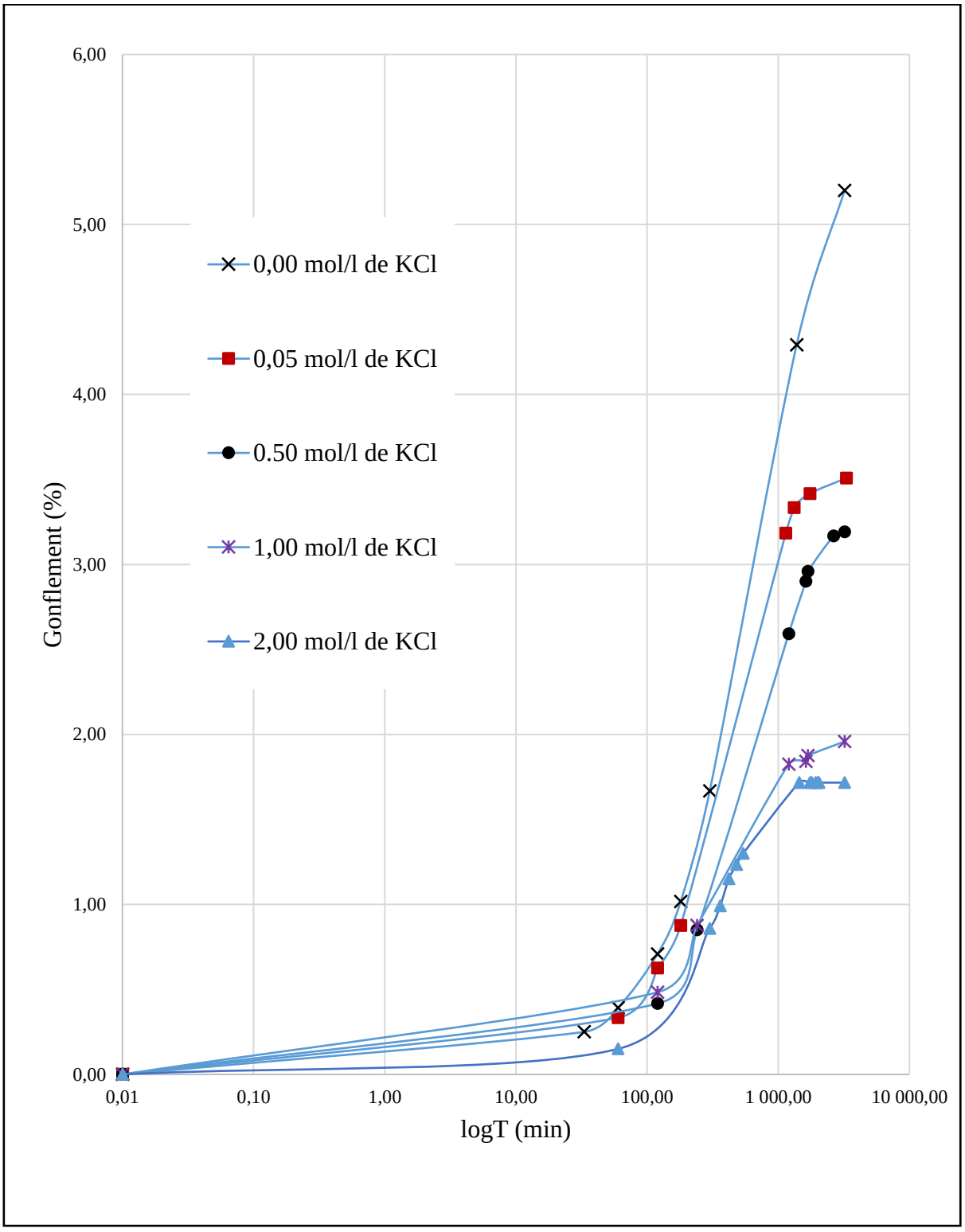


Figure IV.8-2 : Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de KCl

L'application de la solution saline en KCl, le gonflement est réduit de 31,09% ; 35,90% ; 62.34% ; 66.99% respectivement pour 0,05mol/l ; 0,5 mol/l ; 1,00mol/l ; 2,00 mol/l.

NH_4Cl :

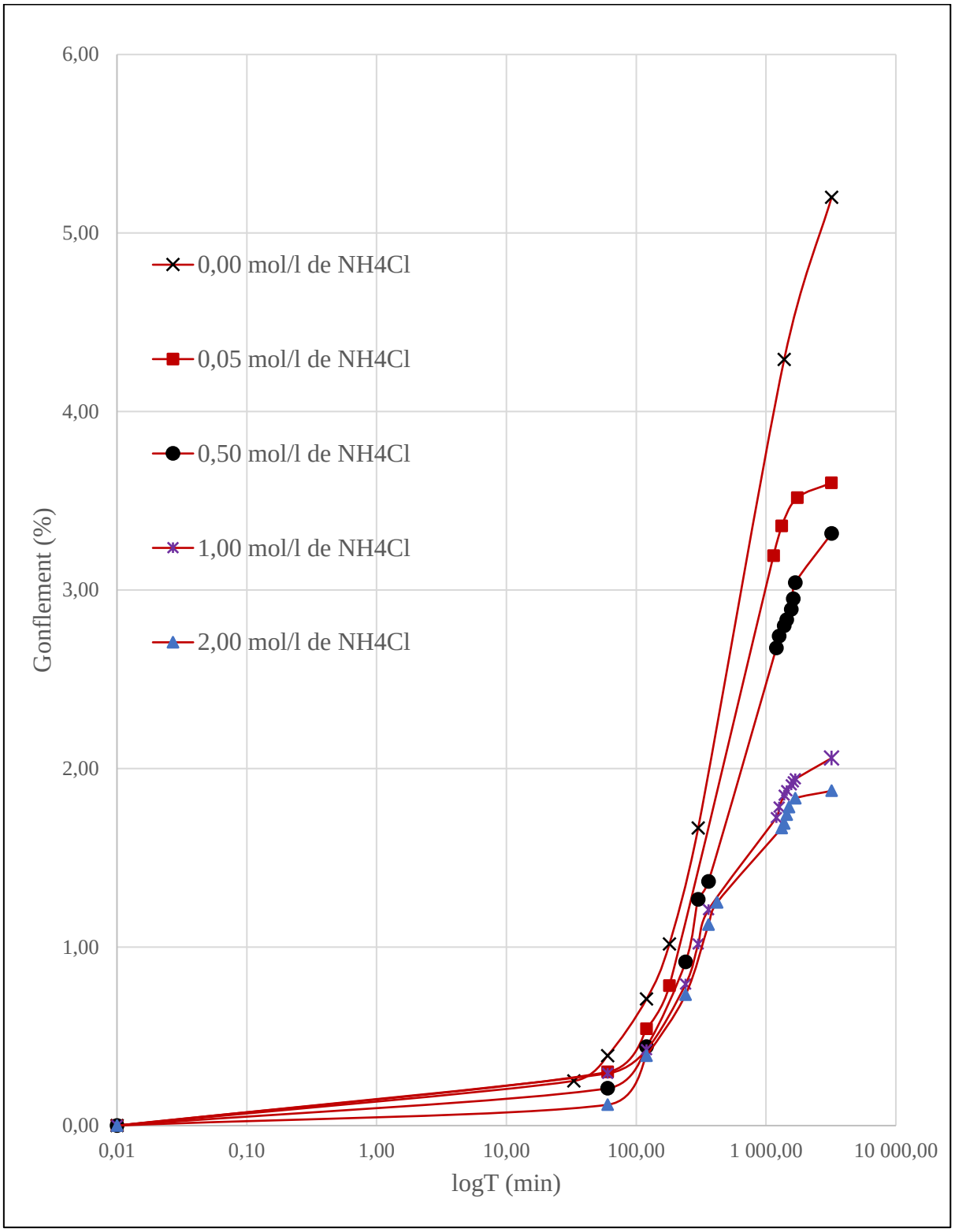


Figure IV.8-3:Evolution du gonflement en fonction du temps face aux différentes concentrations de NH_4Cl

L'application de la solution saline en NH4Cl, le gonflement est réduit de 28,85% ; 34,29% ; 60,42% ; 63,94% respectivement pour 0,05mol/l ; 0,5 mol/l ; 1,00mol/l ; 2,00 mol/l.

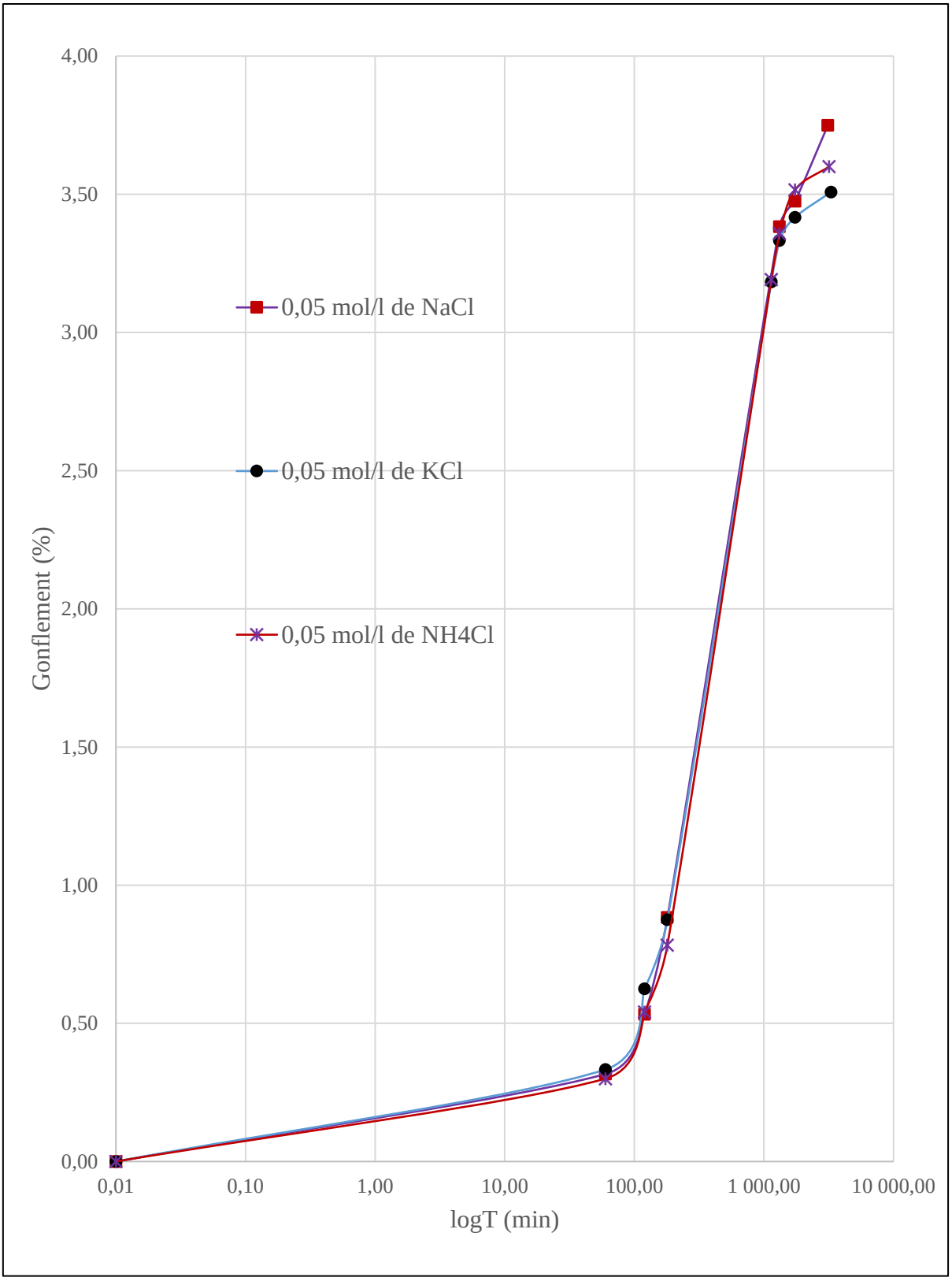


Figure IV.8-4:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 0,05 mol/l

Ce graphique nous montre qu'à une concentration de 0,05 mol/l, le chlorure de potassium donne une meilleure stabilisation par rapport aux deux autres sels : Gonflement de 3,58% pour le KCl contre 3,75% pour le NaCl et 3,70% pour le NH4Cl.

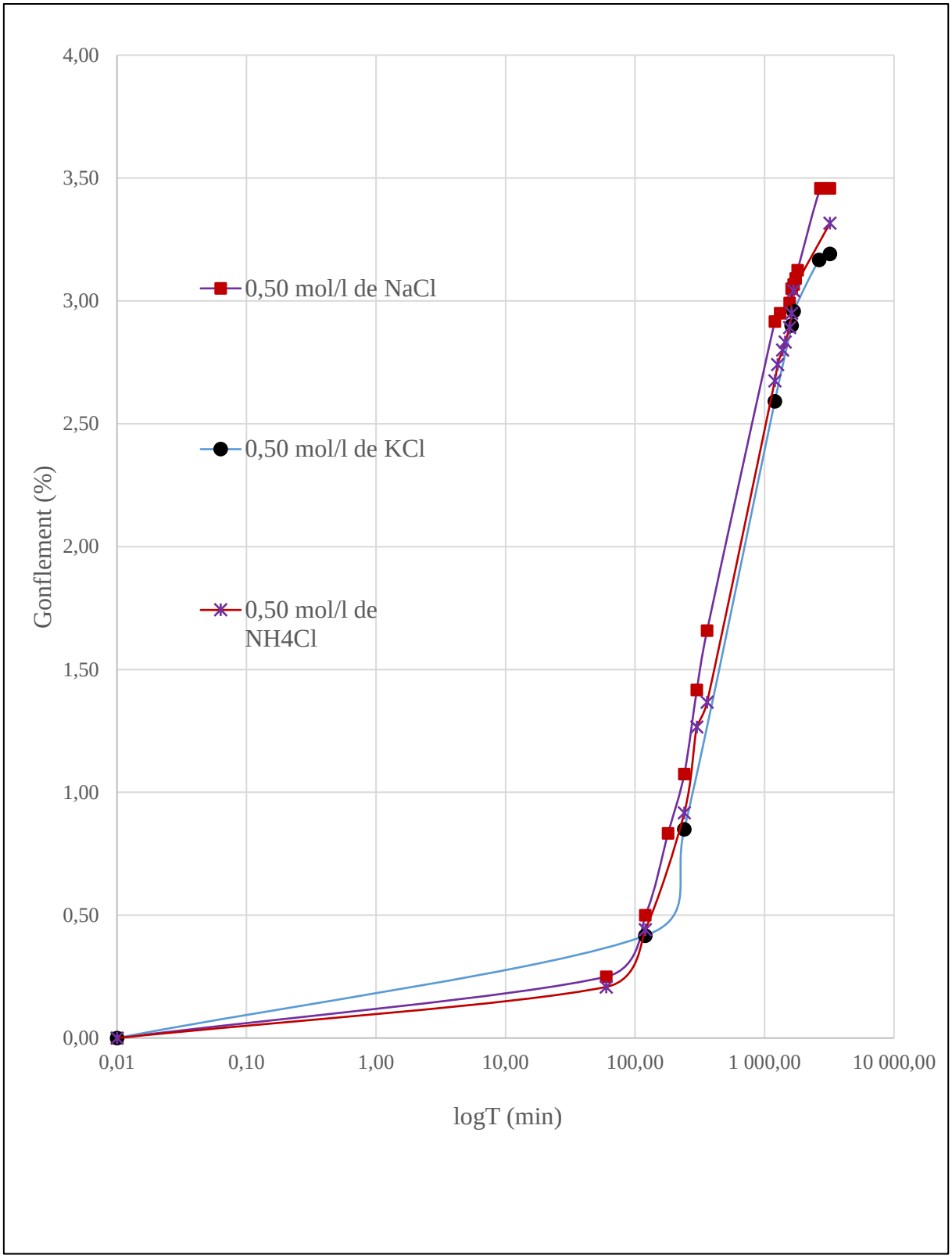


Figure IV.8-5:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 0,5 mol/l

Ce graphique nous montre qu'à une concentration de 0,50 mol/l, le chlorure de potassium donne une meilleure stabilisation par rapport aux deux autres sels : Gonflement de 3,33% pour le KCl contre 3,46% pour le NaCl et 3,42% pour le NH4Cl.

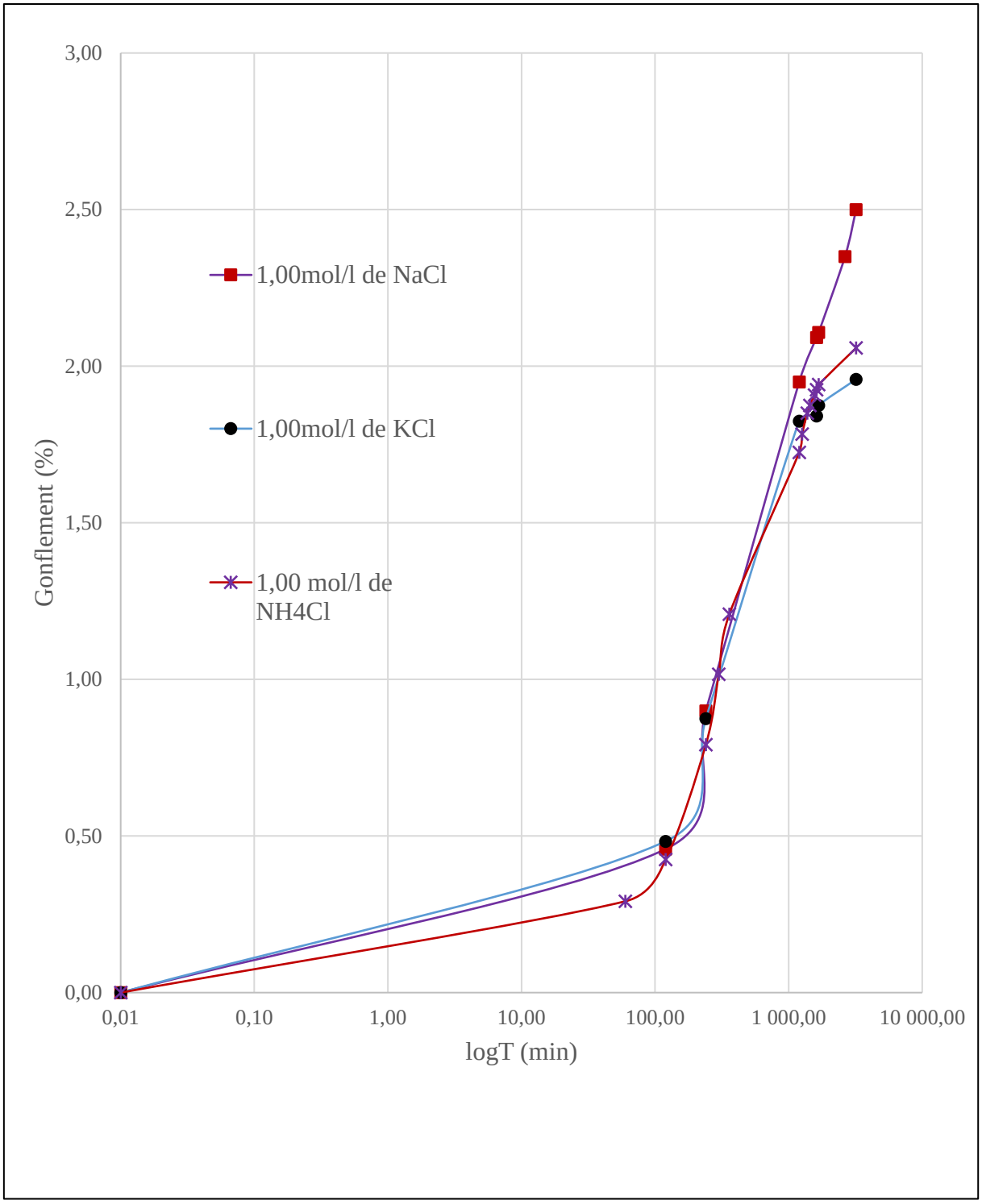


Figure IV.8-6 : Comparaison de l'effet des sels utilisés à 1 mol/l

Ce graphique nous montre qu'à une concentration de 1,00 mol/l, le chlorure de potassium donne une meilleure stabilisation par rapport aux deux autres sels : Gonflement de 1,96% pour le KCl contre 2,50% pour le NaCl et 2,06% pour le NH4Cl.

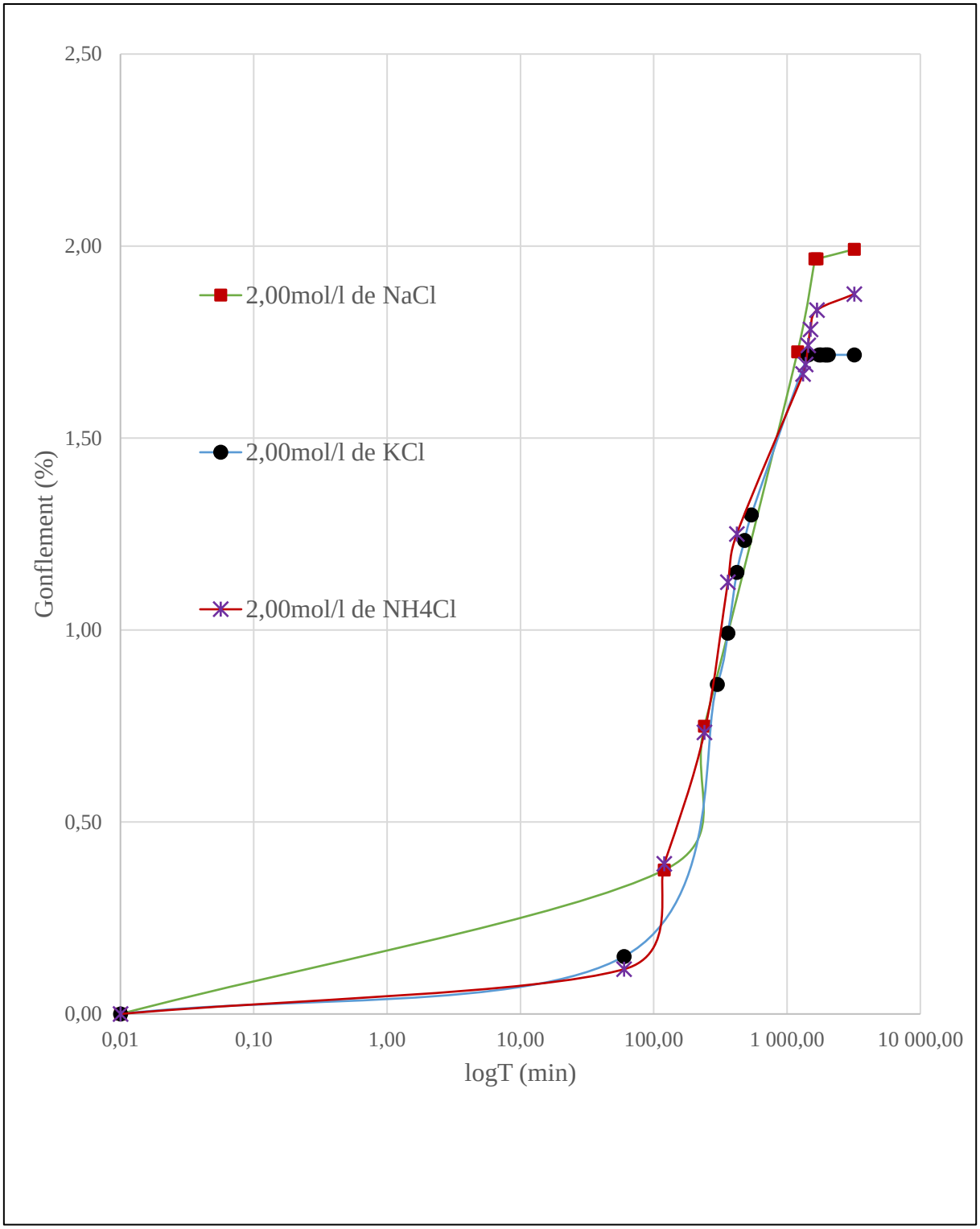


Figure IV.8-7:Comparaison de l'effet des sels utilisés à 2mol/l

Ce graphique nous montre qu'à une concentration de 2,00 mol/l, le chlorure de potassium donne une meilleure stabilisation par rapport aux deux autres sels : Gonflement de 1,72% pour le KCl contre 1,99% pour le NaCl et1,88% pour le NH4Cl.

IV.8.1 Evolution du gonflement avec les solutions salines

NaCl :

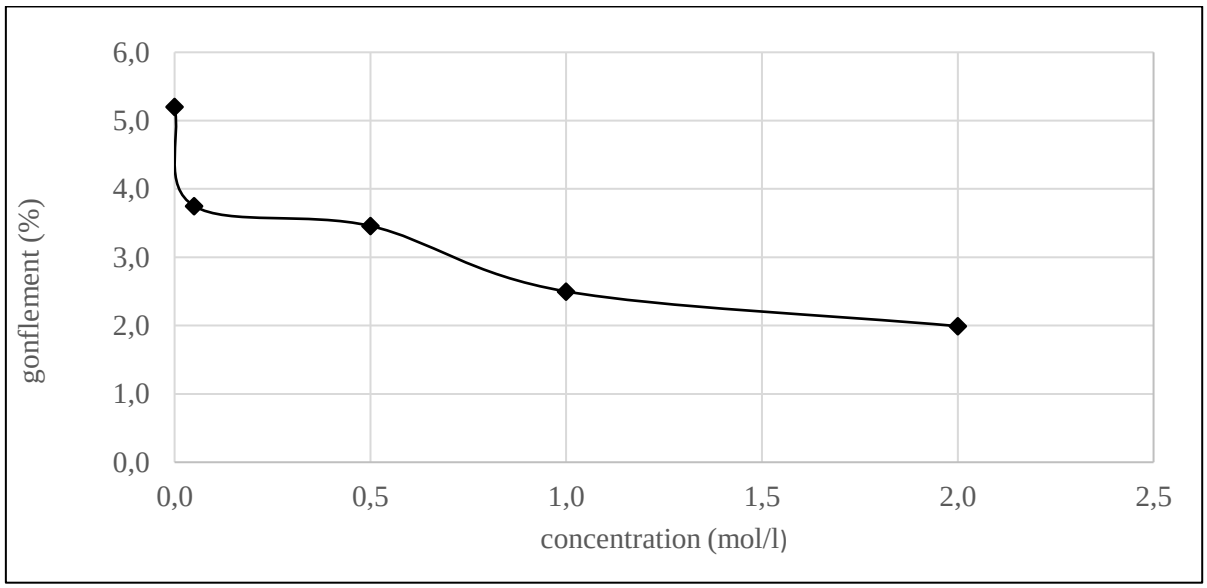


Figure IV.8-8: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : NaCl

Ce graphique montre que le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation de la concentration en solution saline

KCl :

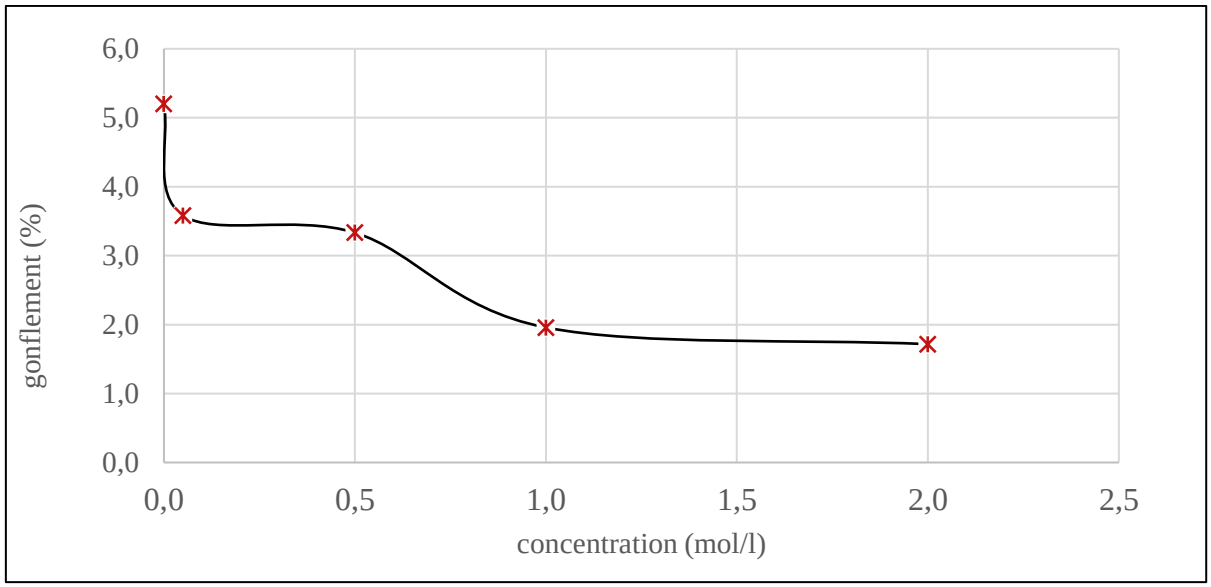


Figure IV.8-9: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : KCl

NH_4Cl :

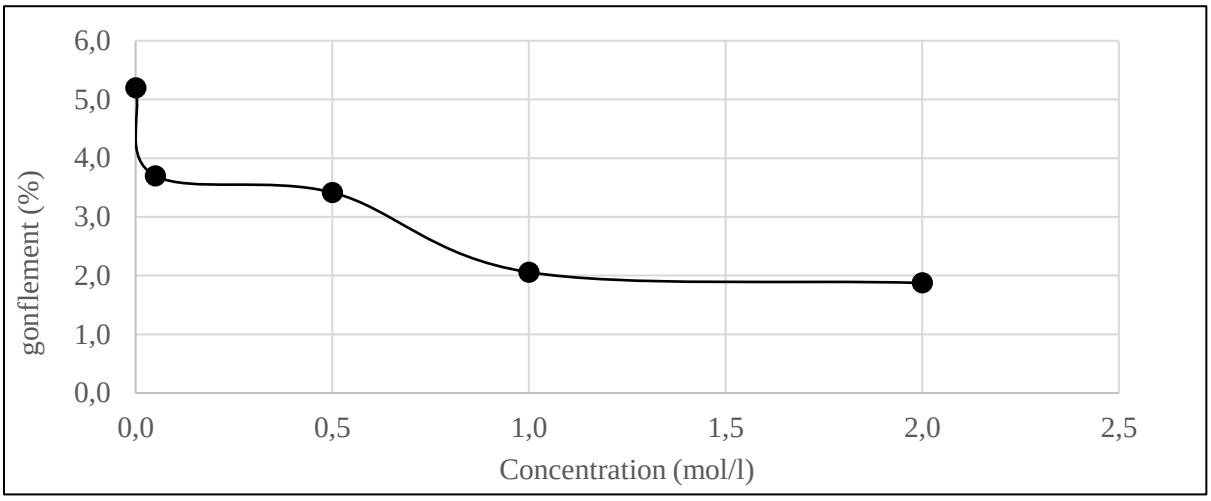


Figure IV.8-10: Evolution du gonflement en fonction de la concentration : NH_4Cl

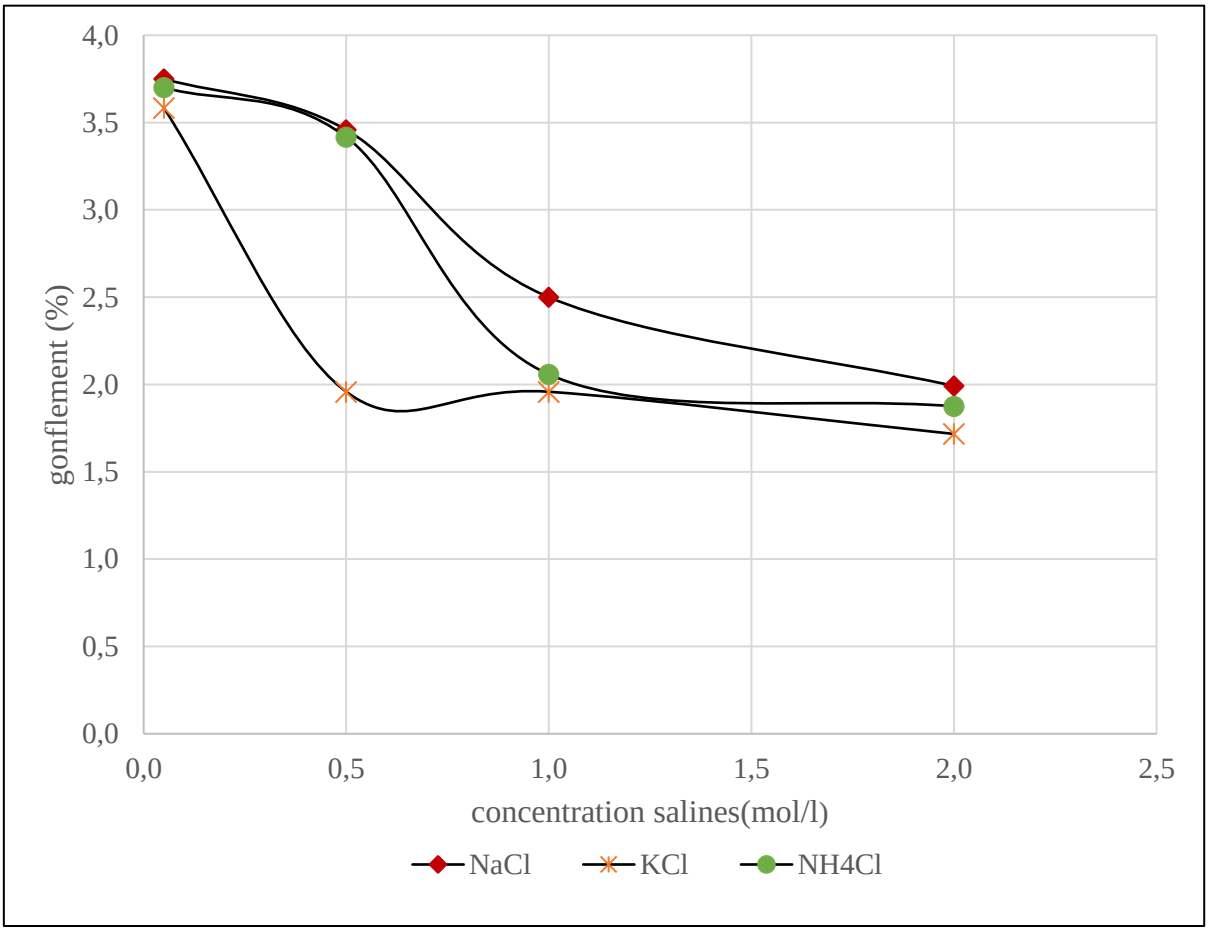


Figure IV.8-11: Variation du potentiel de gonflement en fonction de la concentration

Les résultats sur les graphiques ci-dessus nous montrent que plus la concentration en solution saline augmente plus le potentiel de gonflement diminue.

Le chlorure de potassium donne une meilleure réduction du potentiel de gonflement

Tableau IV.8-1:Réduction en pourcentage du gonflement du sol étudié face aux différents sels à différentes concentrations

	H_2O	NaCl				KCl				NH4Cl			
mol/l	0,00	0,05	0,50	1,00	2,00	0,05	0,50	1,00	2,00	0,05	0,50	1,00	2,00
G (%)	5,20	3,75	3,46	2,50	1,99	3,58	3,33	1,96	1,72	3,70	3,42	2,06	1,88
Réd	0,00	1,45	1,74	2,70	3,21	1,62	1,87	3,24	3,48	1,50	1,78	3,14	3,33
Réd (%)	0,00	27,88	33,49	51,92	61,70	31,09	35,90	62,34	66,99	28,85	34,29	60,42	63,94

Réd : Réduction

On peut conclure que :

- Le potentiel de gonflement diminue quand la concentration en solution saline augmente
- Cette diminution est plus remarquable pour une concentration de 2 mol/l du Chlorure de Potassium (KCl) qui réduit le potentiel de gonflement jusqu'à 66,99%

IV.8.2 Evolution de la pression de gonflement avec les solutions salines

Après avoir évalué les effets des sels sur le potentiel de gonflement, on passe directement à la détermination de la pression de gonflement, (Figure IV.7-1.b).

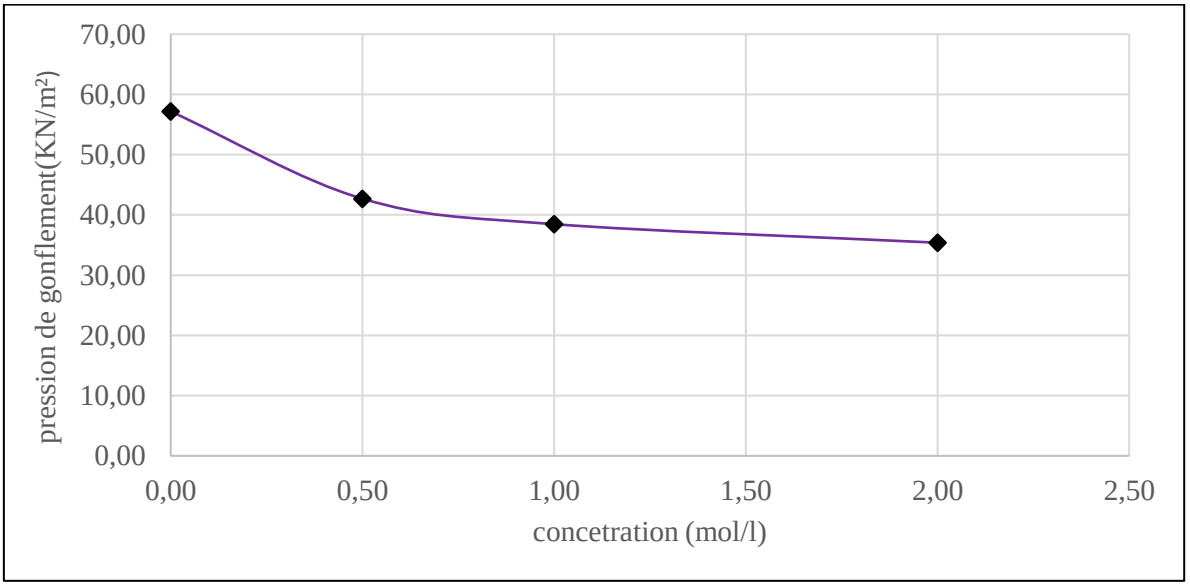


Figure IV.8-12:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : NaCl

Ce graphique montre que la pression de gonflement diminue avec l'augmentation de la concentration en solution saline

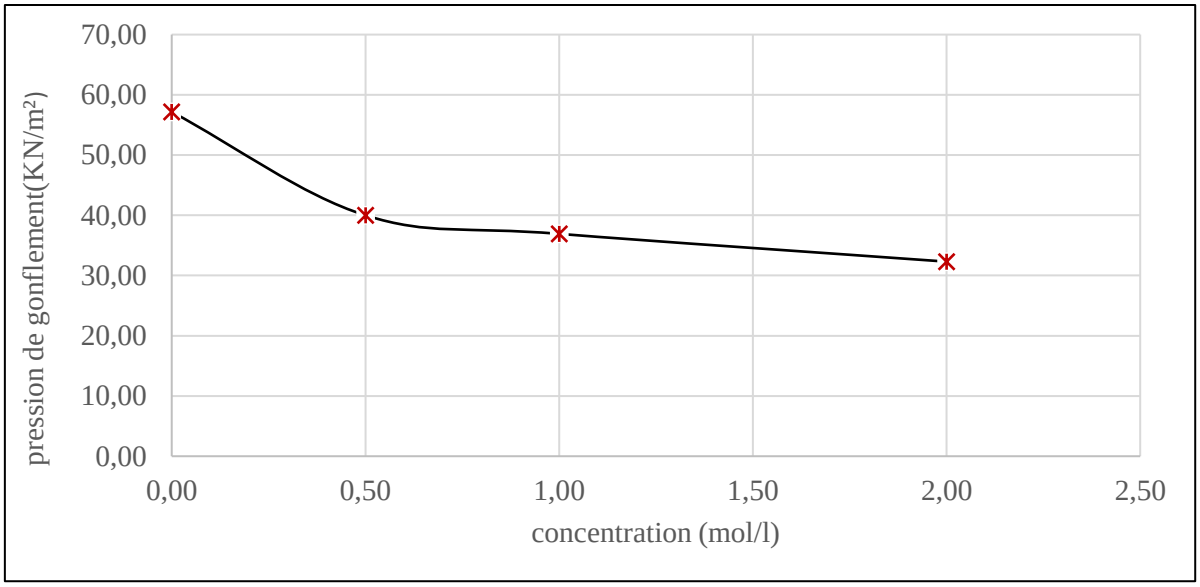


Figure IV.8-13:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : KCl

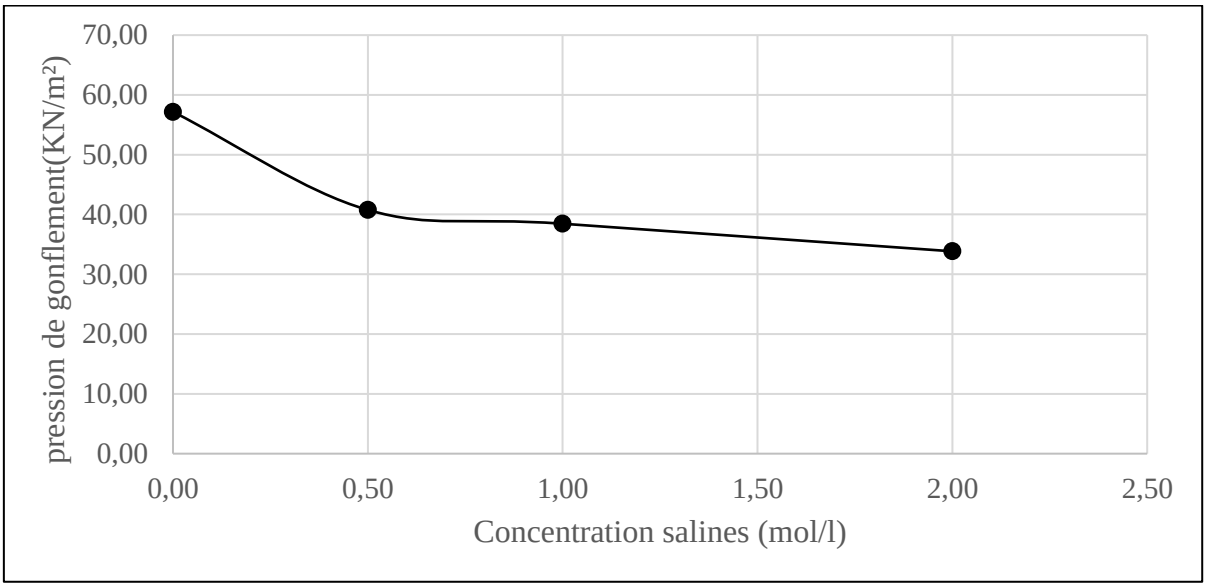


Figure IV.8-14:Evolution de la pression de gonflement en fonction de la concentration : NH_4Cl

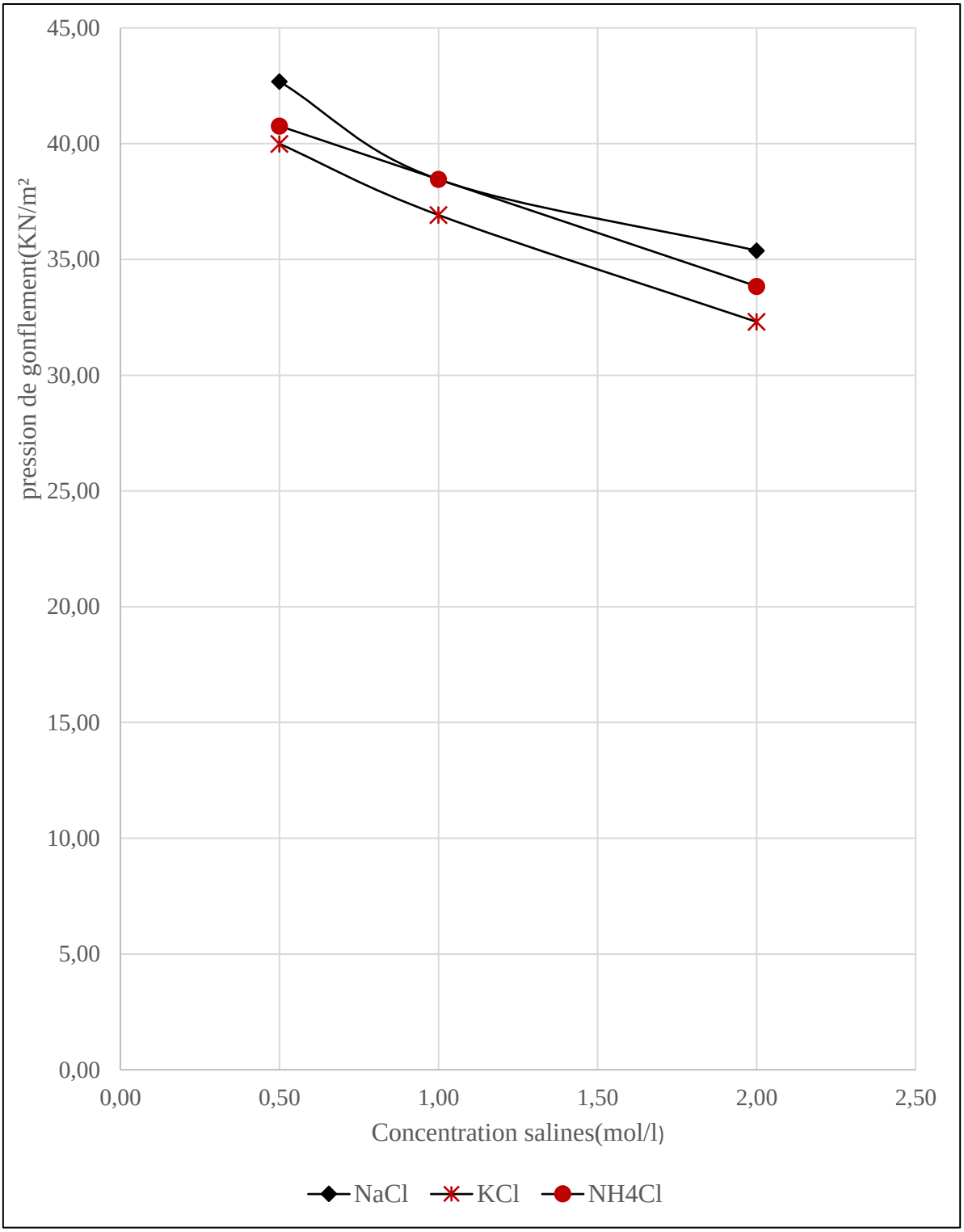


Figure IV.8-15: Variation de la pression de gonflement en fonction de la concentration

Les résultats sur les graphiques ci-dessus nous montrent que plus la concentration en solution saline augmente plus la pression de gonflement diminue.

Le chlorure de potassium offre une meilleure réduction de la pression de gonflement

Tableau IV.8-2:Réduction en pourcentage de la pression de gonflement du sol étudié face aux différents sels à différentes concentrations

	H_20	NaCl			KCl			NH_4Cl		
Concentration (mol/l)	0,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00
Pression de gonflement	57,17	42,69	38,46	35,38	40,00	36,92	32,30	40,77	38,46	33,84
Réduction	0,00	14,48	18,71	21,79	17,17	20,25	24,87	16,40	18,71	23,33
Réduction (%)	0,00	25,33	32,73	38,11	30,04	35,42	43,49	28,69	32,73	40,80

Sur base des résultats du tableau ci-haut, on peut conclure que plus la concentration en solutions salines augmente, plus la pression de gonflement diminue et c'est le chlorure de potassium (KCl) qui a un effet plus remarquable parce qu'il réduit la pression de gonflement jusqu'à 43,49%

IV.8.3 Evolution du tassement avec les solutions salines

L'effet d'un sel sur le tassement peut être évalué par la valeur de la pente de la courbe du tassement en fonction de la charge appliquée. En effet, comme illustré dans la formule ci-dessous, le tassement est proportionnel à la pente de la courbe œdométrique.

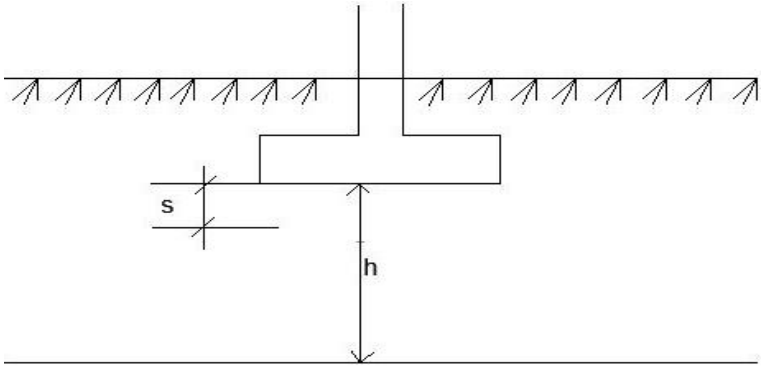


Figure IV.8-16 : Schéma du tassement sous une semelle

$$S = \frac{h}{A \quad ou \quad C} \ln \frac{\sigma_i^{'} + \Delta\sigma}{\sigma_i^{'}} \qquad \text{(IV.8.6)}$$

Avec S : Tassement

h : Hauteur de la couche du sol compressible

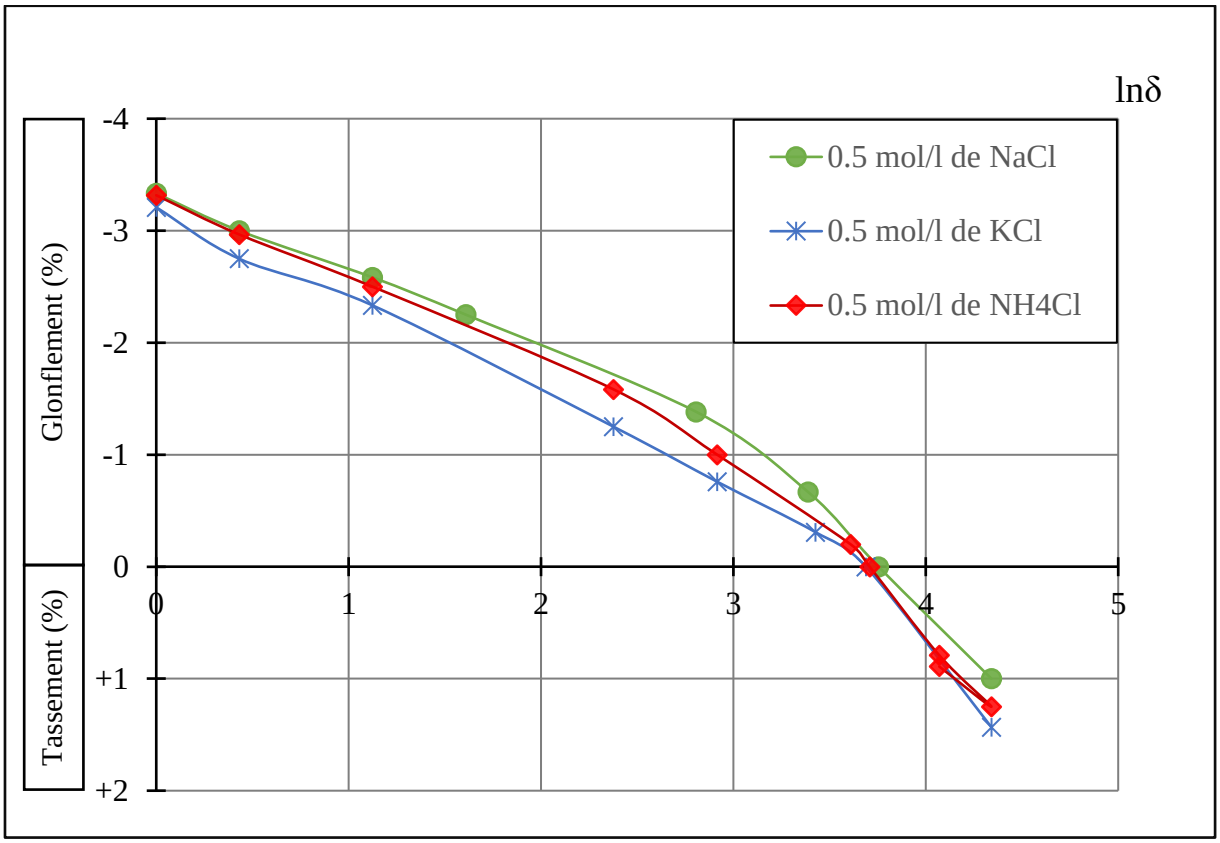
1/A : Pente élastique

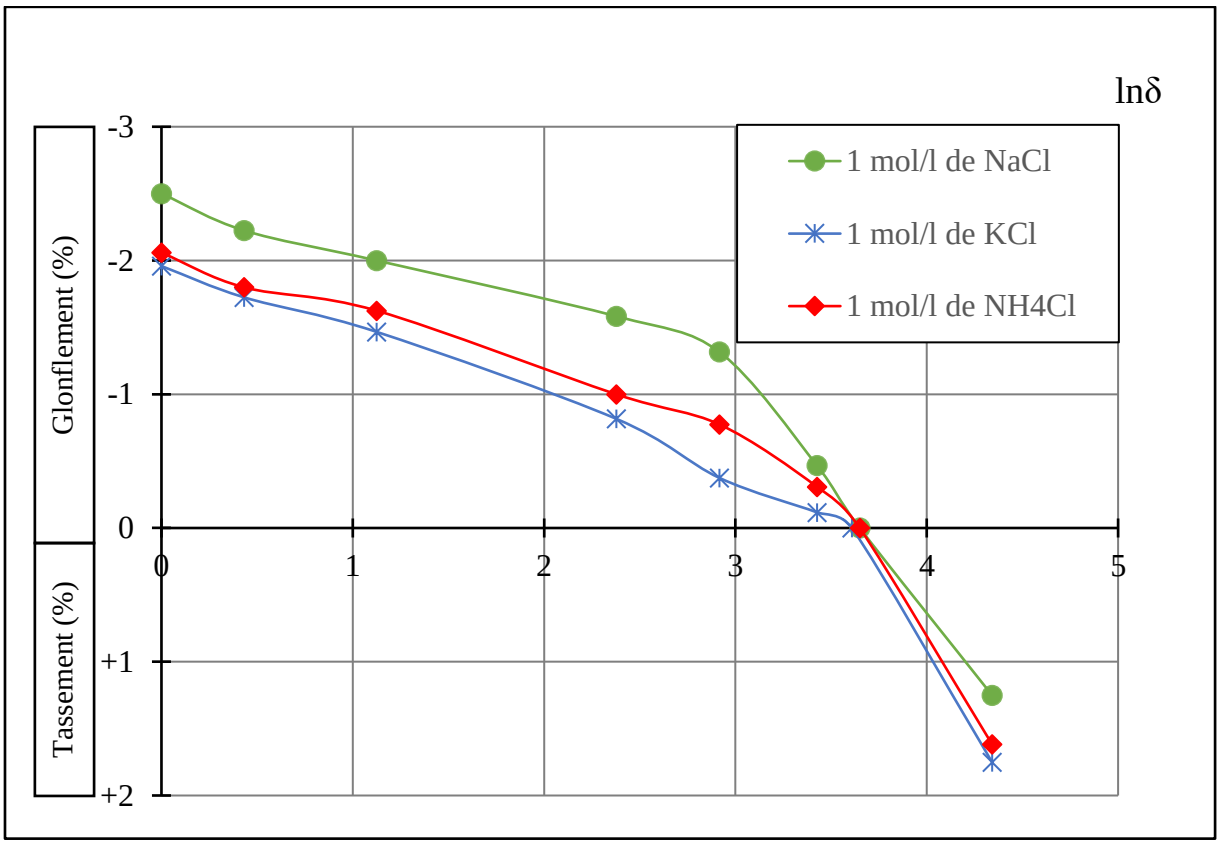
1/C : pente plastique

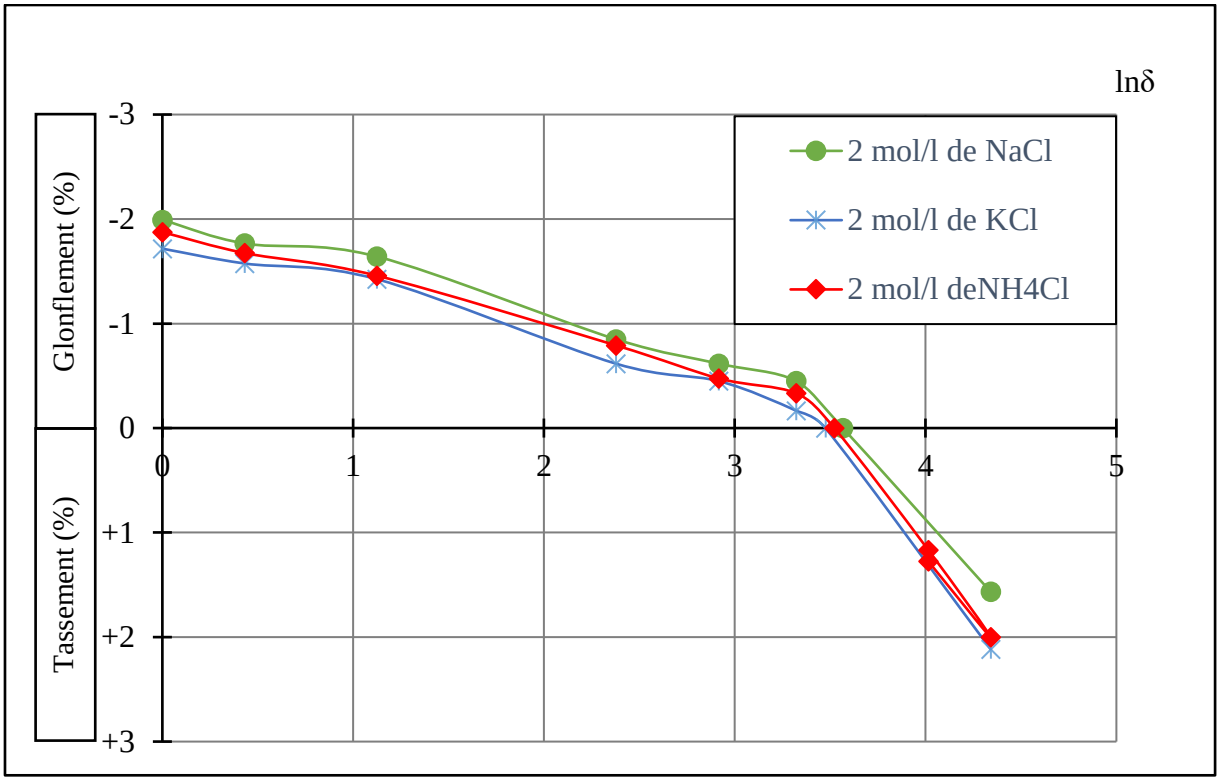
$\sigma_i^{'}$: Contrainte effectif initiale

$\Delta\sigma$: Accroissement des contraintes

a) **Courbes œdométrique** (ε (%), lnσ)







Les graphiques ci-dessus nous indiquent que les essais de tassement ont été réalisés dans la partie élastique. L'équation (IV.8.6) s'écrit alors (pour une pente élastique) par :

$$S = \frac{h}{A} \ln \frac{\sigma_i^{'} + \Delta\sigma}{\sigma_i^{'}} \qquad \text{(IV.8.7)}$$

Les graphiques ci-dessous montrent la diminution de la pente élastique en fonction de variation de la concentration en solution saline.

b) **Evolution de la pente élastique en fonction de la concentration**

- NaCl :

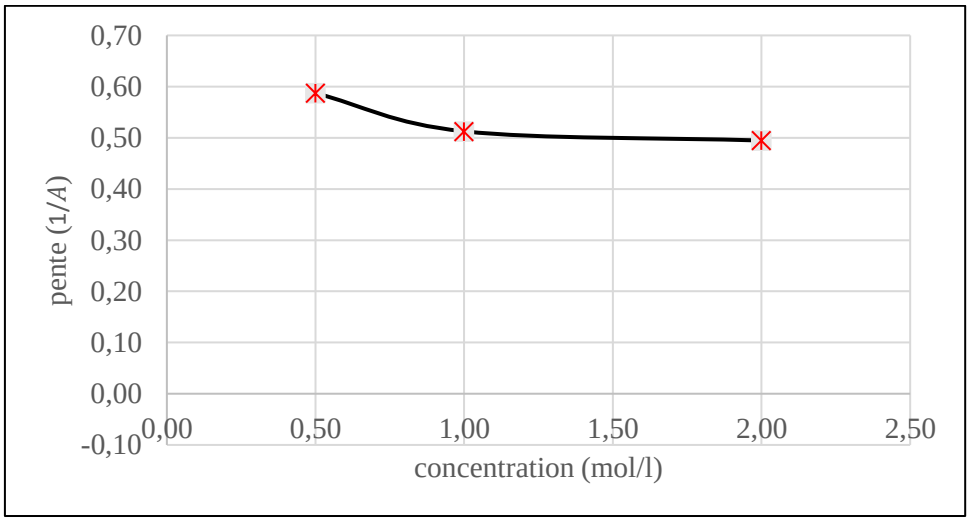


Figure IV.8-17: Evolution de la pente en fonction de la concentration : NaCl

- KCl :

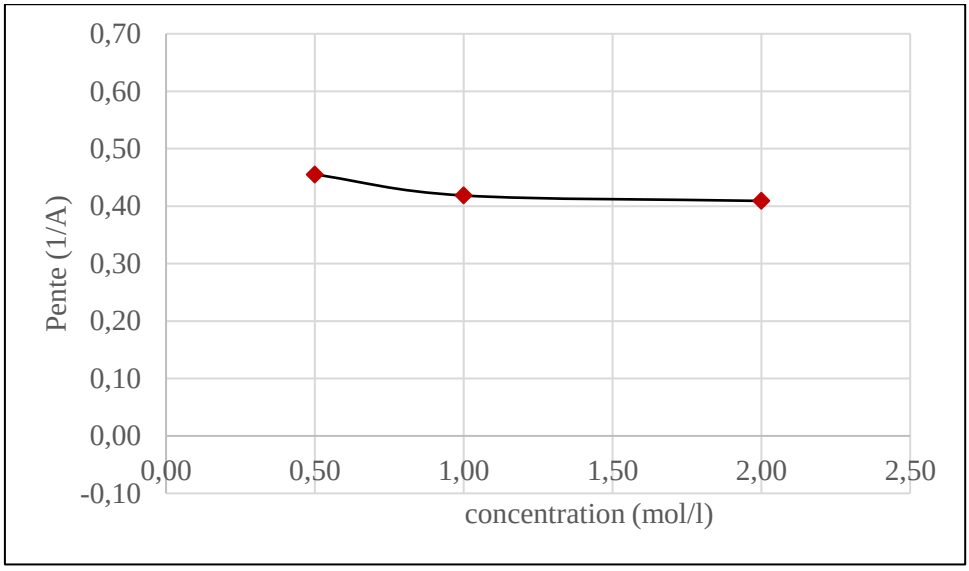


Figure IV.8-18: Evolution de la pente en fonction de la concentration : KCl

- NH_4Cl :

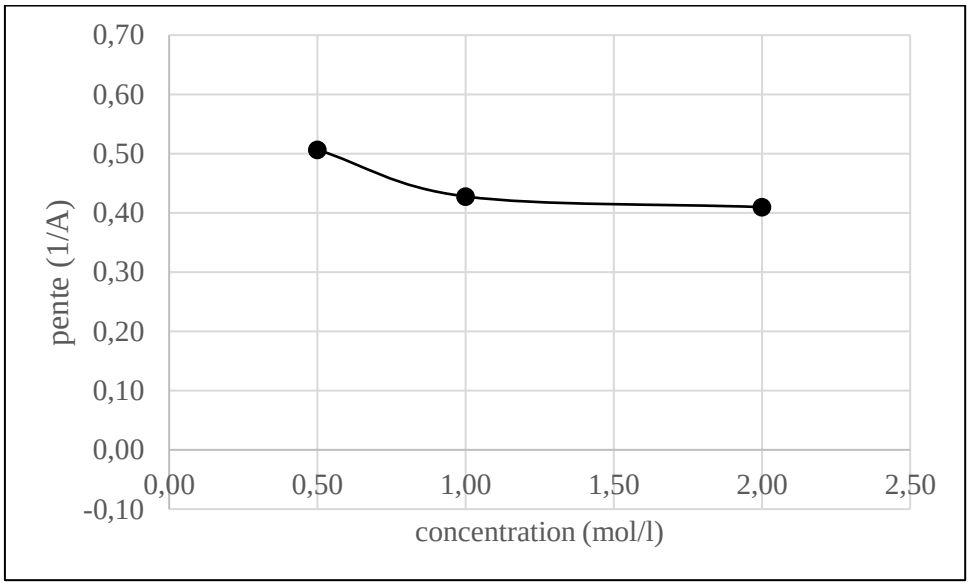


Figure IV.8-19: Evolution de la pente en fonction de la concentration NH_4Cl

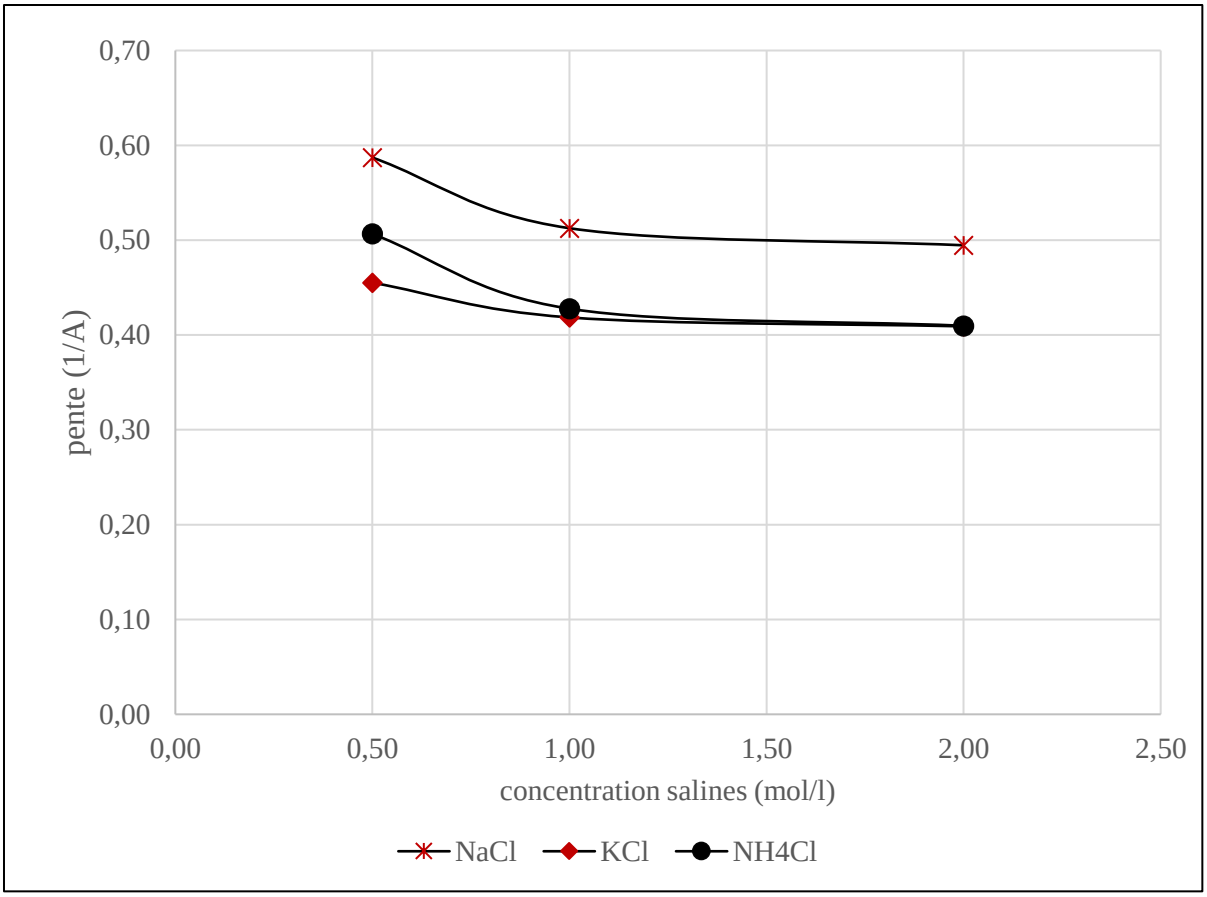


Figure IV.8-20:Variation de la pente en fonction de la concentration

Nous constatons que la pente élastique (1/A) diminue quand la concentration en solution saline augmente. Autrement dit, plus la concentration augmente plus la pente diminue et plus le tassement diminue (voir la formule IV.8.7).

Conclusion : En se basant sur les résultats obtenus des différents tests effectués sur les argiles utilisées, nous retenons que :

- Les paramètres de gonflement diminuent avec l'augmentation de la concentration en solution saline.
- Pour ce qui est du tassement, l'insuffisance des charges supplémentaires à appliquer à l'échantillon ne permet pas d'apprécier l'impact des concentrations salines sur la réduction du tassement. L'effet inverse, l'augmentation du tassement avec la concentration saline, est d'ailleurs observé pour les faibles premières charges appliquées à cet effet. Cependant, pour une même solution saline, l'observation des pentes des courbes œdométriques des différentes concentrations dénote la tendance logique de la réduction du tassement pour une augmentation de la concentration du sel. En effet, plus la concentration augmente plus la pente élastique (1/A) diminue et plus le tassement (S) diminue.

CHAPV. CONCLUSION, RECOMMANDATIONSET PERSPECTIVES

V.1 Synthèse

Ce travail avait comme objectif principal la stabilisation des sols gonflants du Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge (CHUK) et de l'Ecole Normale Supérieure (ENS) en minimisant le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et les tassements.

La synthèse bibliographique faite a mis en relief les conséquences du gonflement sur la stabilité et sur le comportement des ouvrages fondés sur les sols gonflants. Dans cette partie, les différents tâches et procédés d'identification des argiles gonflantes ainsi que les techniques de stabilisation prescrites dans la littérature ont été brièvement présentés.

Les essais d'identification sur 48 échantillons prélevés sur terrain ont permis de détecter le point de sondage dont les échantillons, classés dans le groupe des montmorillonites, présentant la susceptibilité au gonflement la plus élevée, ont été retenus pour l'application des essais de stabilisation.

La stabilisation successive au Chlorure de Sodium (NaCl), au Chlorure de Potassium (KCl), et au Chlorure d'Ammonium (NH_4Cl) en laboratoire sous différentes concentrations, a été réalisée sur l'argile retenue et montée en modèle réduit de dimension de 12,00 cm de hauteur et 18,32 cm de diamètre.

Les résultats expérimentaux obtenus des différents essais réalisés permettent de dégager les conclusions générales suivantes :

- Les essais d'identification ont montré que les argiles du CHUK ont un comportement au gonflement plus important que celles de l'ENS.
- L'application des solutions salines à différentes concentrations a permis :
  - Une diminution du gonflement
  - Une diminution de la pression de gonflement

Bref, Le constat le plus important dressé dans ce travail est que plus la concentration en solution saline augmente plus les paramètres de gonflement diminuent.

La meilleure stabilisation a été obtenue avec le KCl qui a réduit le gonflement jusqu'à66,99%et la pression de gonflement jusqu'à 43,49%.

V.2 Contribution de ce mémoire

La contribution de ce mémoire porte sur des aspects expérimentaux.

- Le protocole d'identification des échantillons et les essais sur les échantillons reconstitués portés par ce travail constituent certainement un enrichissement des connaissances théoriques pour les sols gonflants du Burundi.
- Nous avons développé un modèle physique réduit pour suivre l'interaction sol-structure qui pourrait être utilisé dans les travaux futurs de même finalité au laboratoire de la Mécanique des Sols de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur.

V.3 Perspectives

Comme perspectives de recherche, les points qui suivent méritent d'être approfondis

V.3.1 Impacts des sels sur l'environnement

Nous avons effectué des essais de stabilisation en utilisant les solutions salines (sels). Il serait intéressant d'étudier les impacts qu'auraient ces sels sur l'environnement des sols traités.

a. Impacts sur le sol

La présence des sels dans le sol modifie sa structure en le rendant plus compacte. Les sels augmentent le potentiel osmotique d'un sol en rendant difficile l'absorption de l'eau par les plantes. Ce stress osmotique entraine une perte graduelle de la végétation de surface et de la matière organique du sol. Ceci a pour effet de réduire la perméabilité du sol. Ce stress osmotique influence négativement la communauté biologique du sol ou le cycle des éléments (carbone, azote, soufre, etc.) qui le constituent.

b. Impacts sur la végétation

L'impact sur la végétation diffère selon les espèces de plantes. Les plantes ont besoin d'une certaine quantité des sels solubles. Cependant l'excès des sels dans les zones racinaires réduit la croissance des plantes en modifiant l'absorption de l'eau. Lorsque la teneur en sel de l'eau du sol est supérieure à celle de l'eau à l'intérieur de la cellule végétale, les racines des plantes ne peuvent plus absorber l'eau du sol.

c. Impacts sur l'eau souterraine

La présence prolongée des sels dans le sol peut impacter la qualité des eaux souterraines.

d. Impacts sur les animaux

Les sels peuvent avoir des effets toxiques aigus et une toxicité chronique à de plus faibles concentrations sur les organismes aquatiques. Certaines concentrations plus faibles encore

peuvent avoir un effet sur la structure des populations et des communautés d'algues (Santé Canada, 2001).

V.3.2 Aspect de mise en œuvre

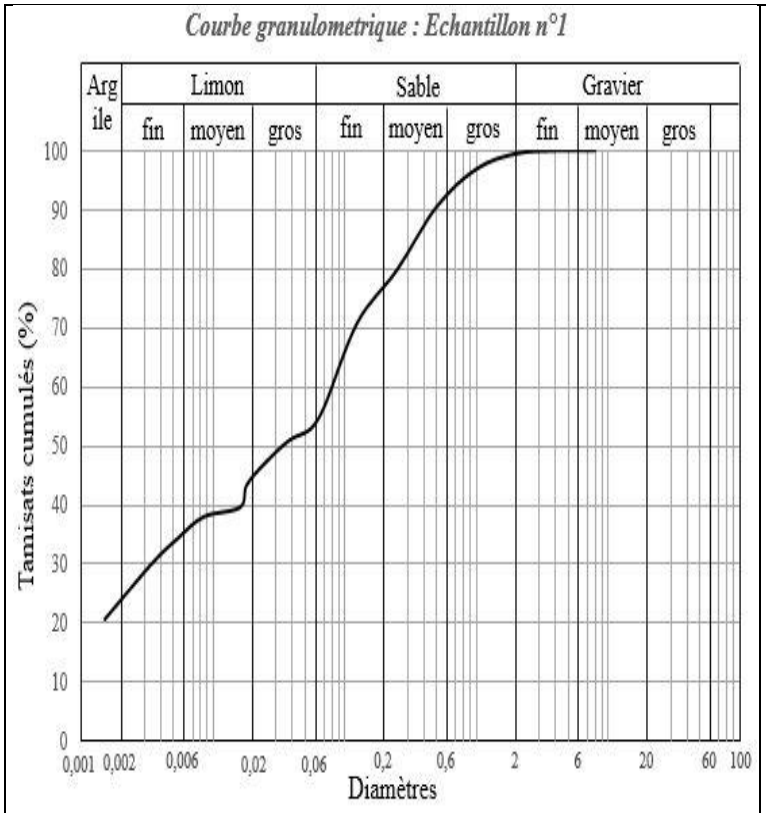
La technique de mise en œuvre faite par injection sous pression des solutions salines dans le sol devra être privilégiée avant l'exploitation des terrains contenant les argiles gonflantes. Par cette note, un appel est lancé pour des études futures sur l'application sur terrain du chlorure de potassium sur les sols gonflants du site étudié en particulier et du Burundi en général.

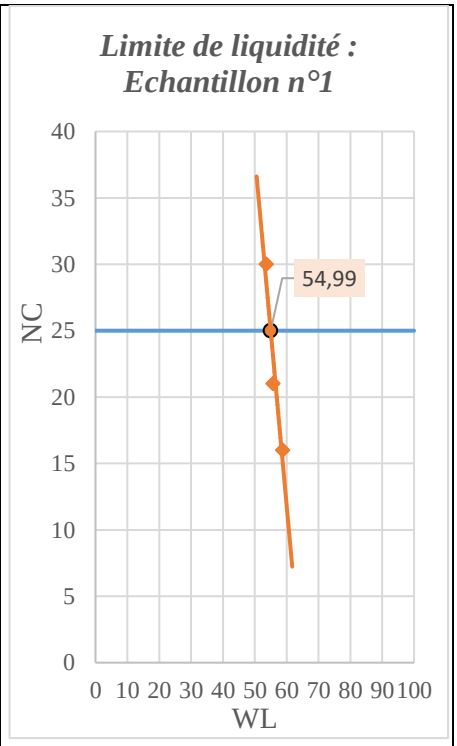
V.3.3 Aspects de durabilité

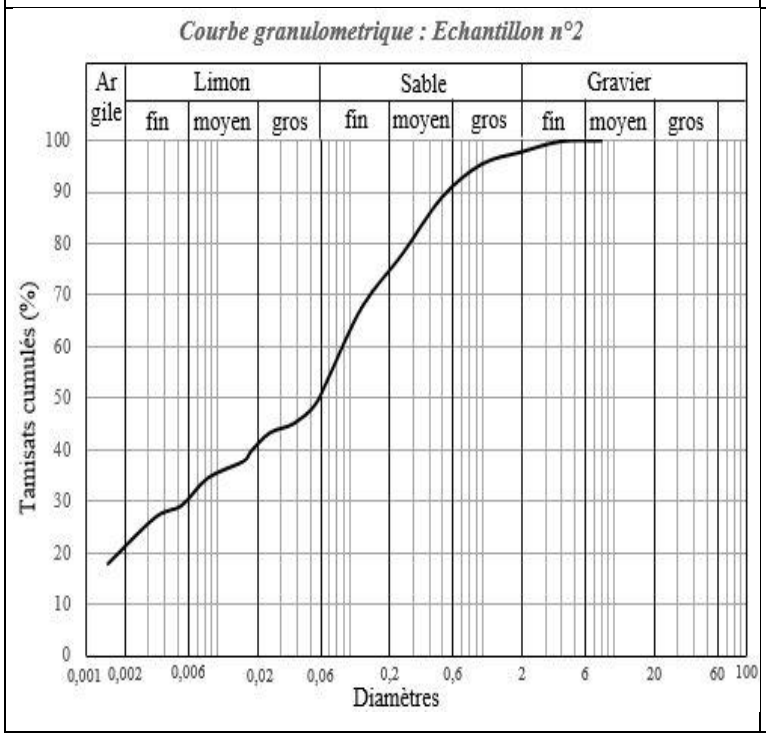
Le traitement des sols avec des solutions salines apporte des améliorations significatives sur son comportement hydromécanique. Ces améliorations dépendent de divers paramètres (nature du produit de traitement, concentration etc…) dont la maitrise permet d'atteindre les critères de performances requis. Mais, au-delà de ces améliorations à court terme, il est primordial aussi de vérifier le comportement à long terme du sol traité et soumis aux sollicitations d'origine hydrique (lavage des sels en rapport avec la pluviométrie). L'application de cette technique à des ouvrages réels doit être envisagée avec prudence. Il n'est pas impossible que le gonflement des matériaux traités puisse rejoindre celui des matériaux non traités à l'échelle de la vie d'un ouvrage. Par ailleurs, la possibilité de lixiviation des sels à long terme par les eaux de pluie ne peut pas être écarté. Ainsi, il faudrait mener des études sur l'évolution des caractéristiques du sol traité à long terme et si possible dans les conditions du site.

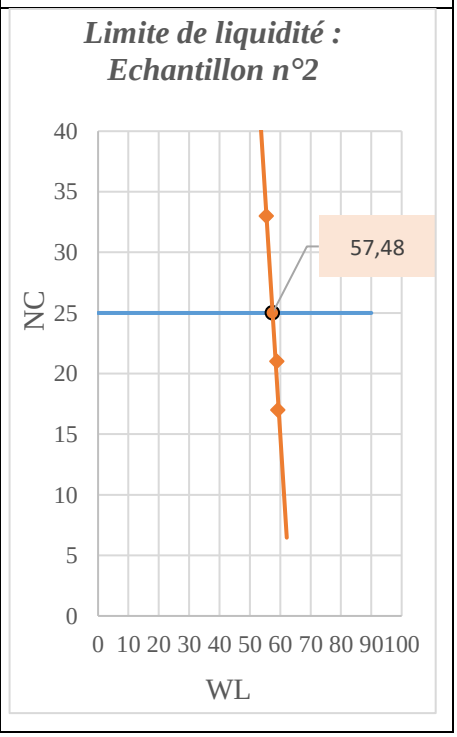
ANNEXES :

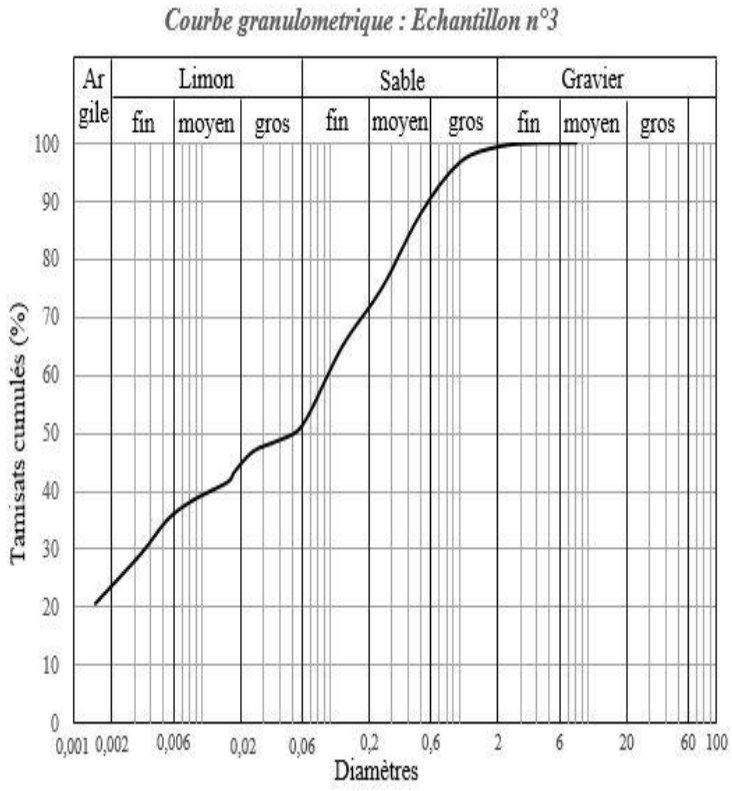
Résultats des essais géotechniques

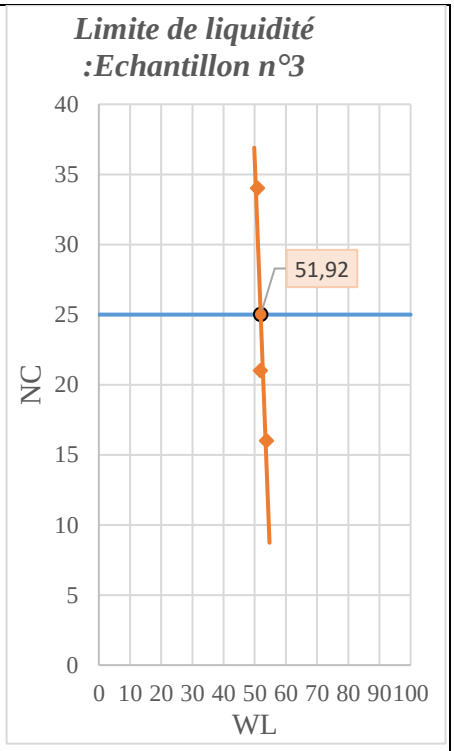


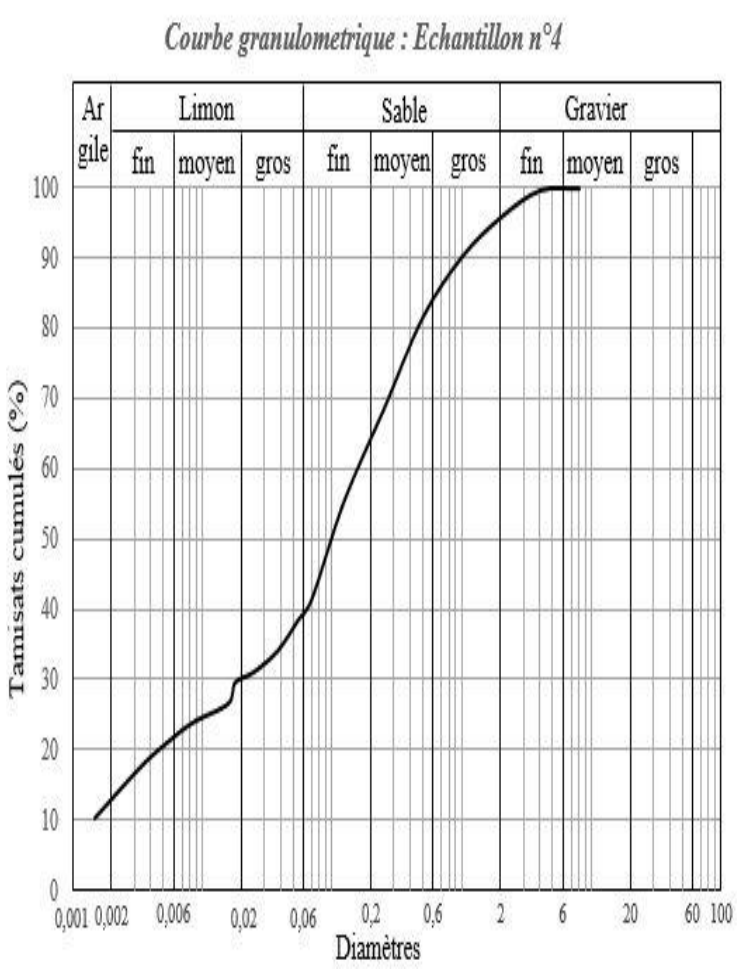


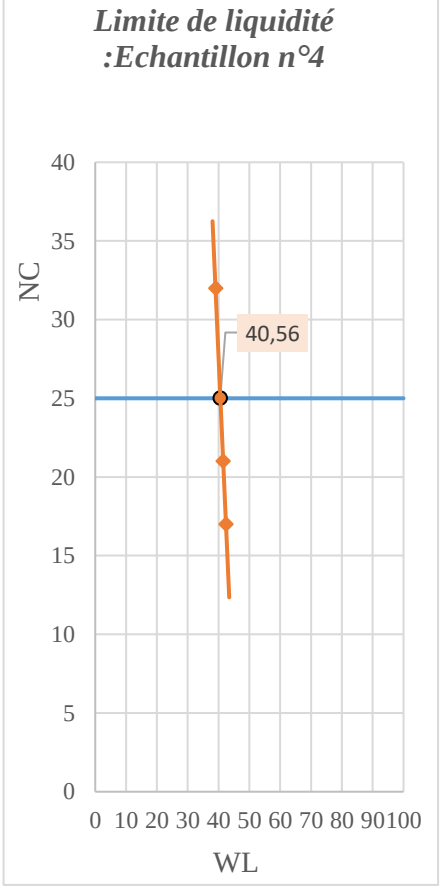




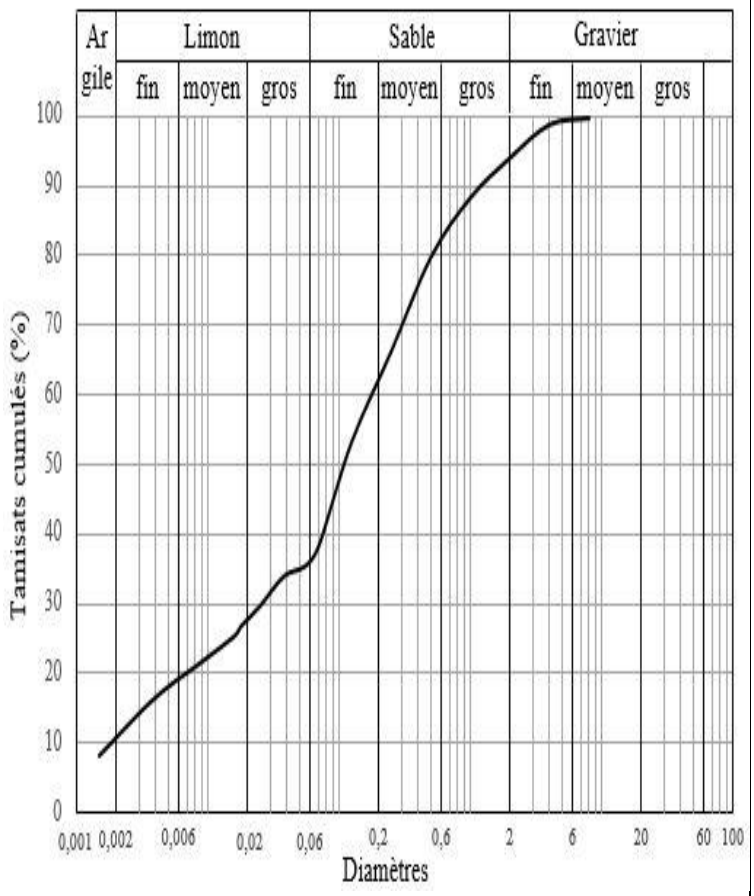

Courbe granulometrique : Echantillon n°3
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité :Echantillon n°3
NC
WL
51,92
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

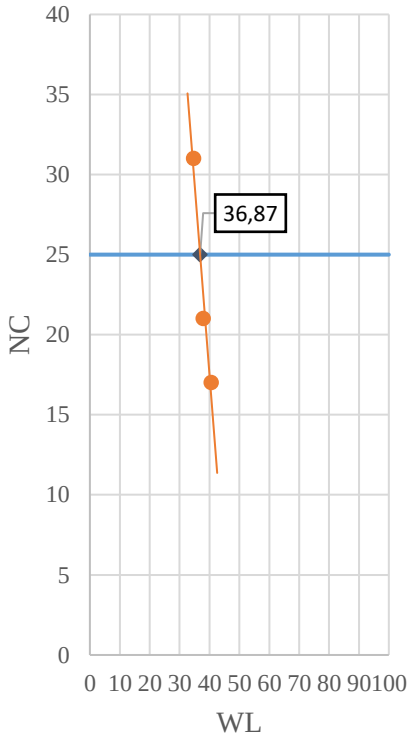

Courbe granulometrique : Echantillon n°4
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité :Echantillon n°4
NC
WL
40,56
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

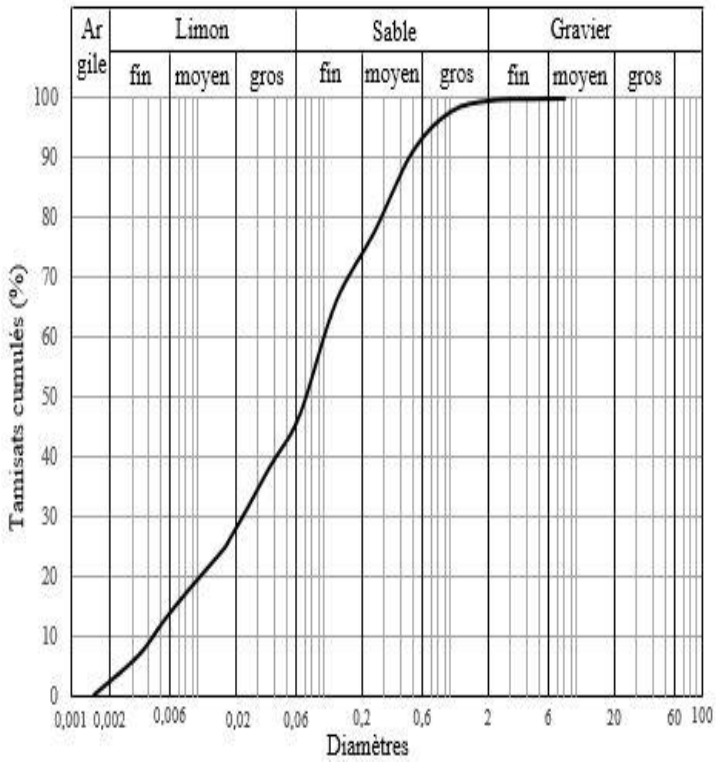
Courbe granulometrique : Echantillon n°5



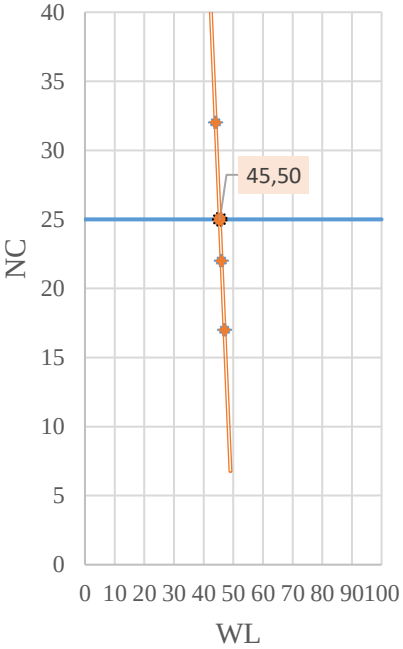
Limite de liquidité :Echantillon n°5



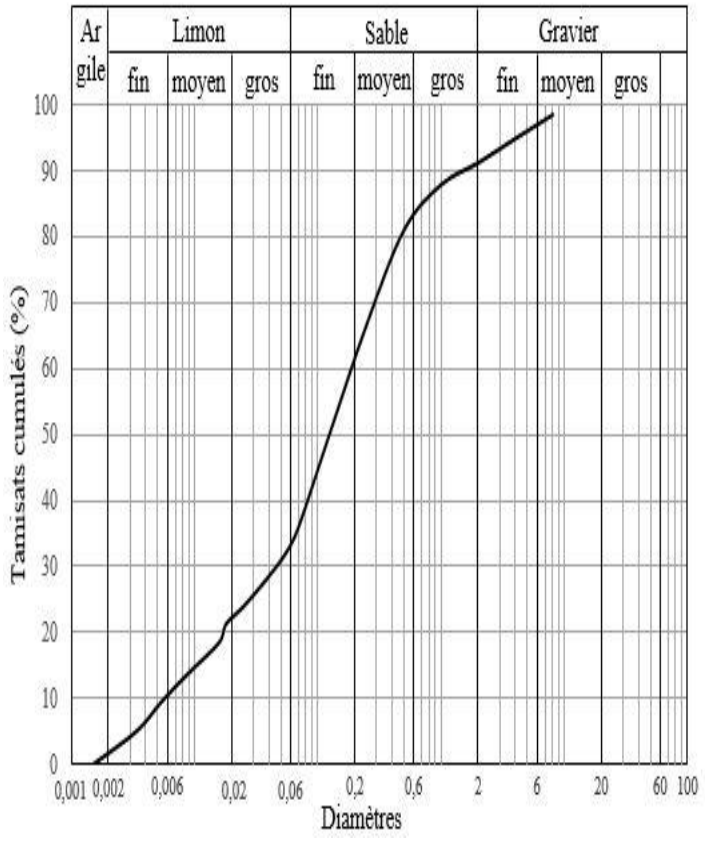
Courbe granulometrique : Echantillon n°6



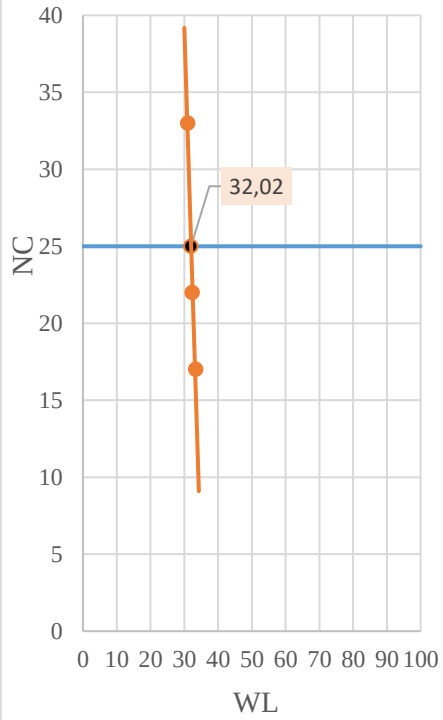
Limite de liquidité : Ehantillon n°6



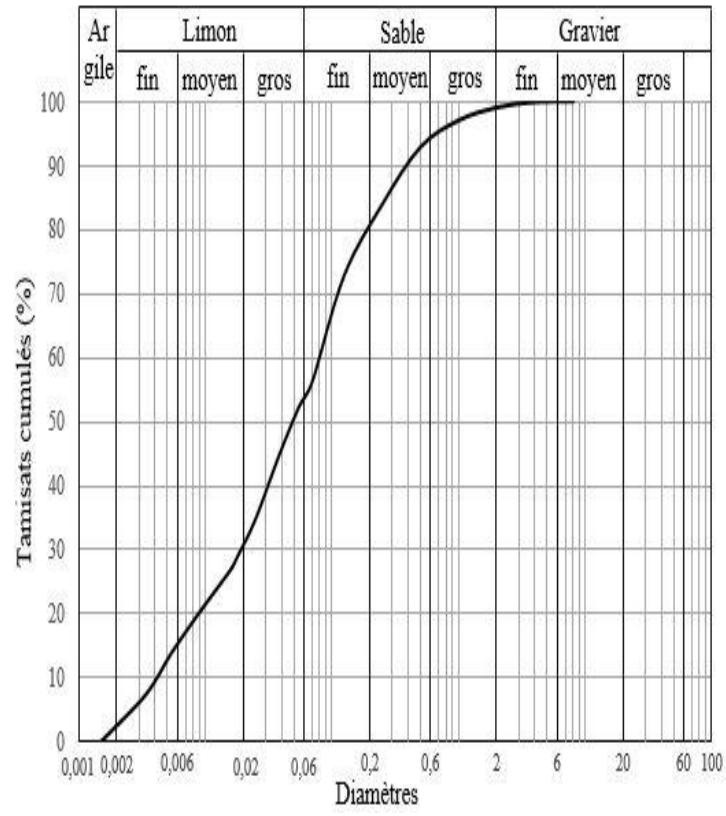
Courbe granulometrique : Echantillon n°7



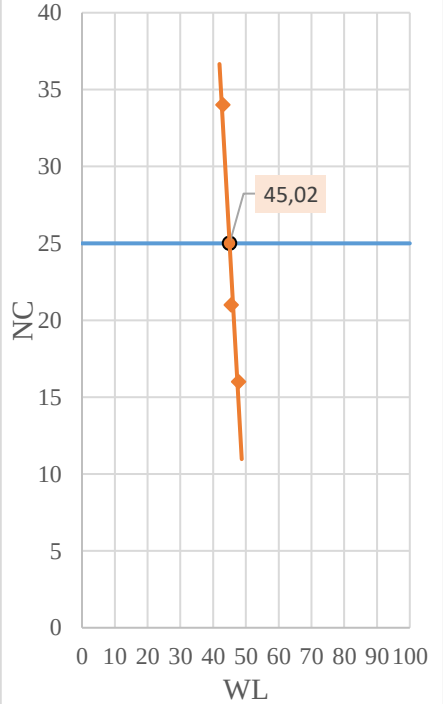
Limite de liquidité : Echantillon n°7

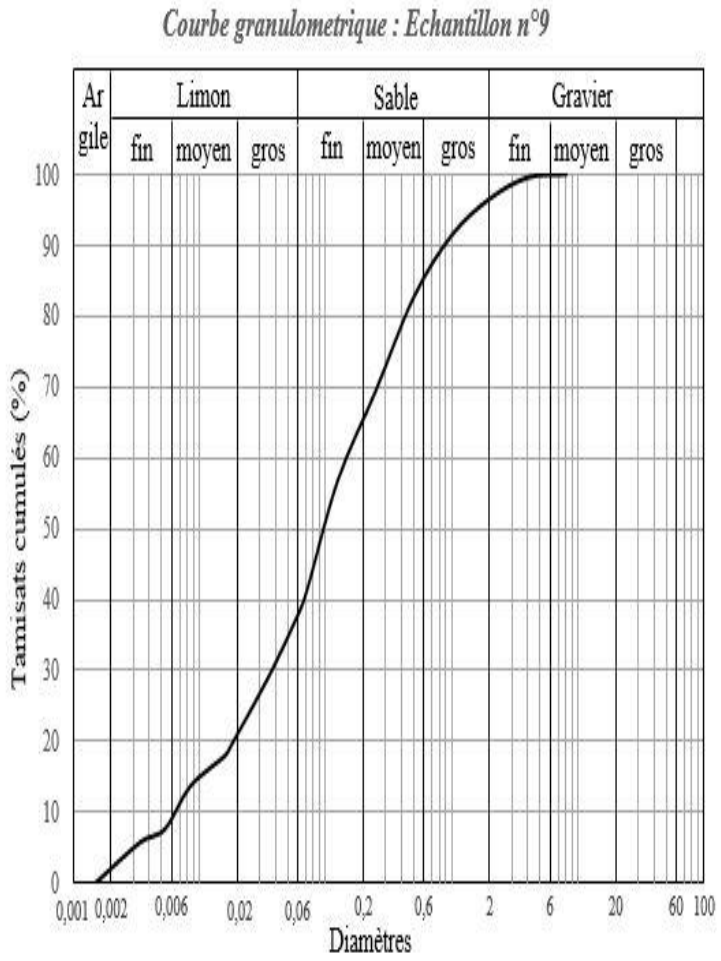


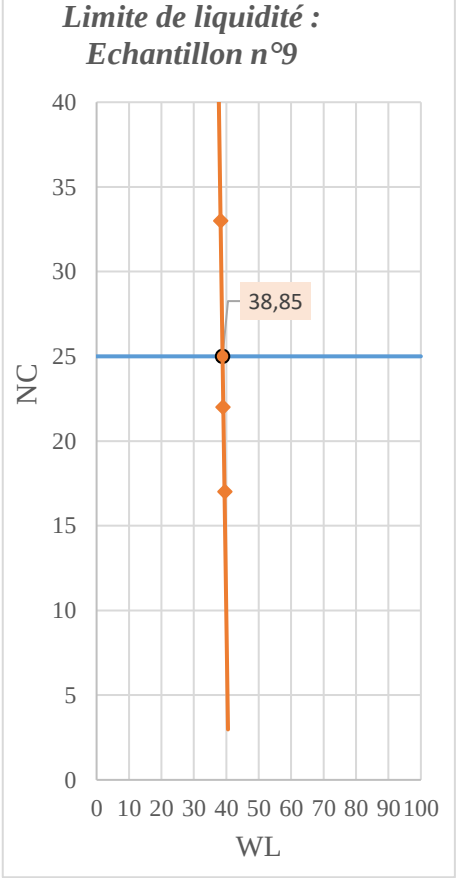
Courbe granulometrique : Echantillon n°8

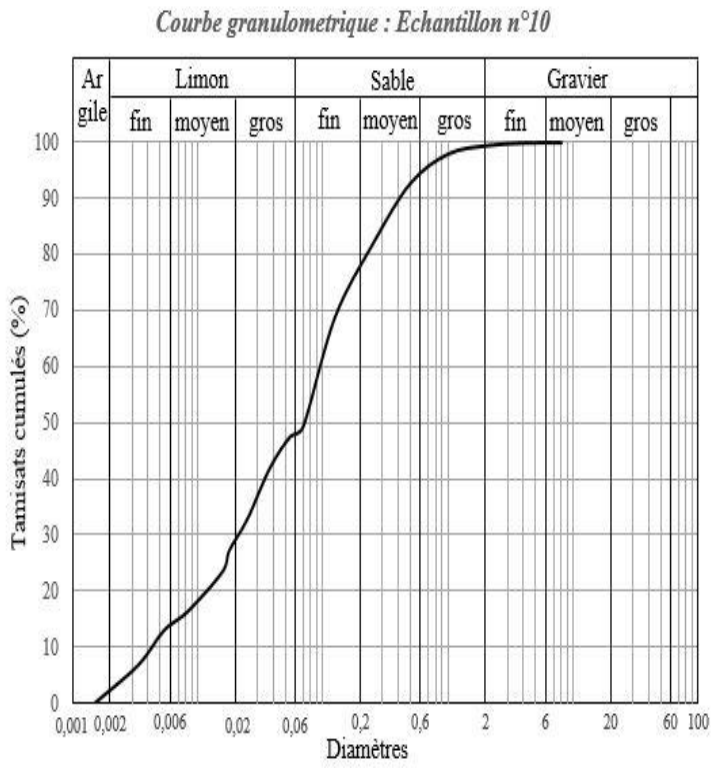


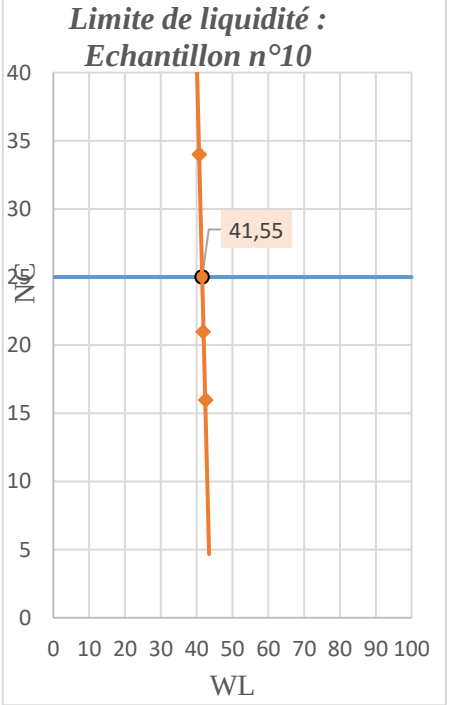
Limite de liquidité : Echantillon n°8

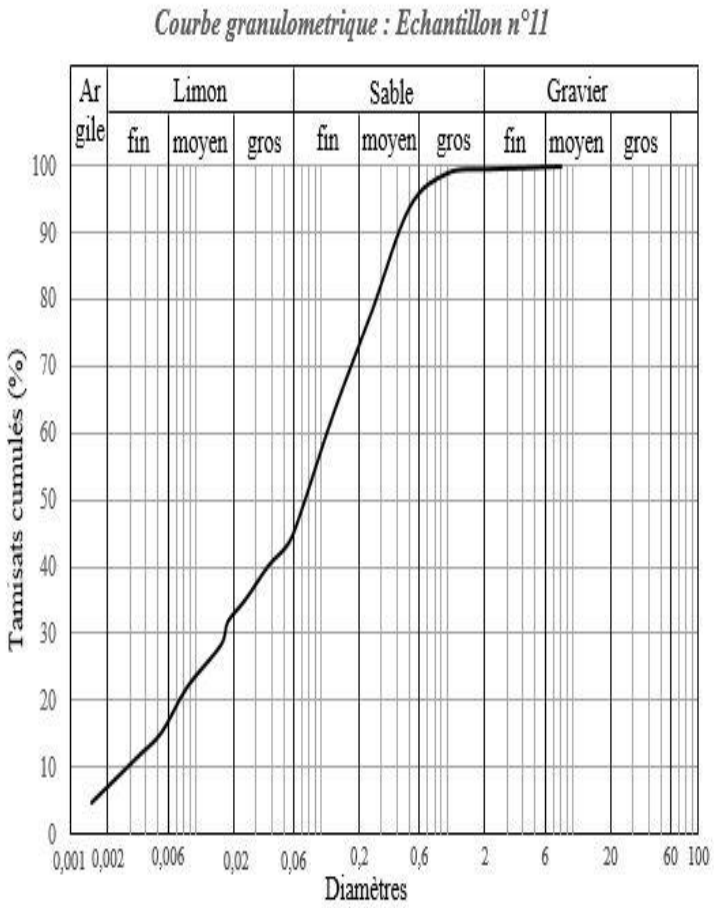


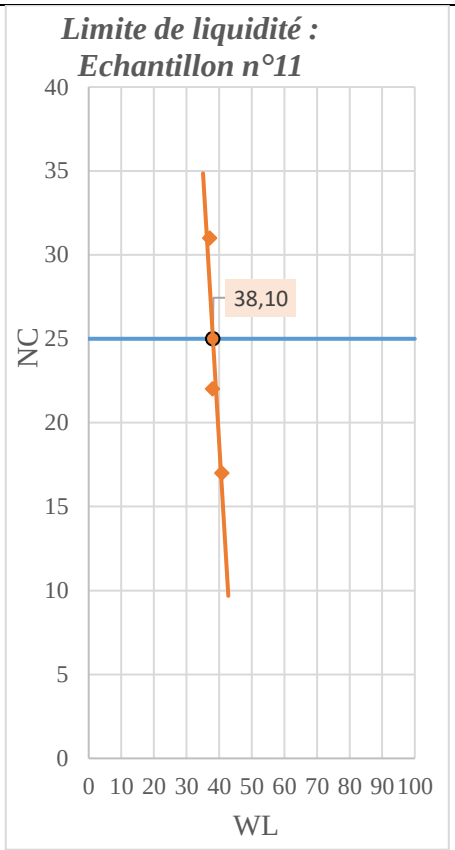

Courbe granulometrique : Echantillon n°9
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100

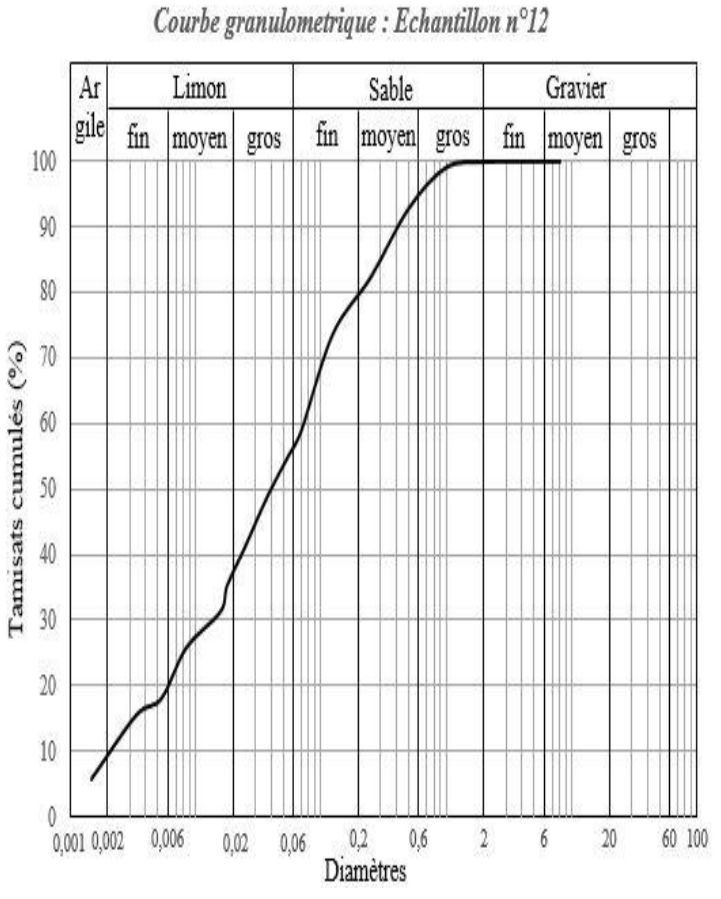

Limite de liquidité : Echantillon n°9
38,85
NC
WL

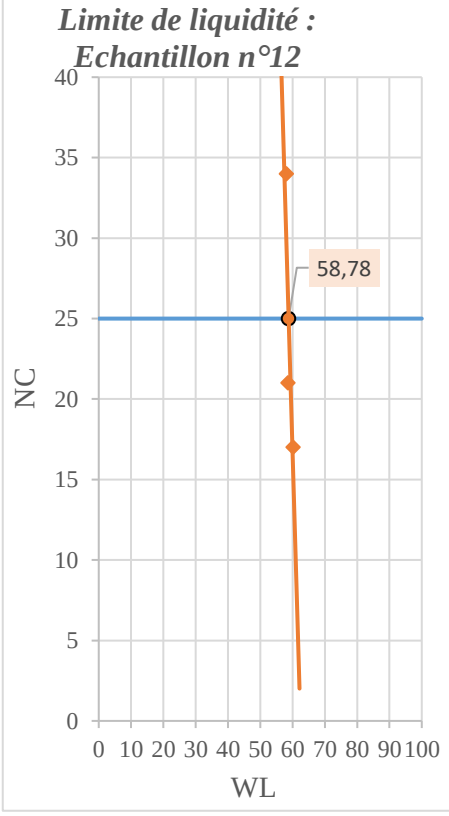

Courbe granulometrique : Echantillon n°10
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100

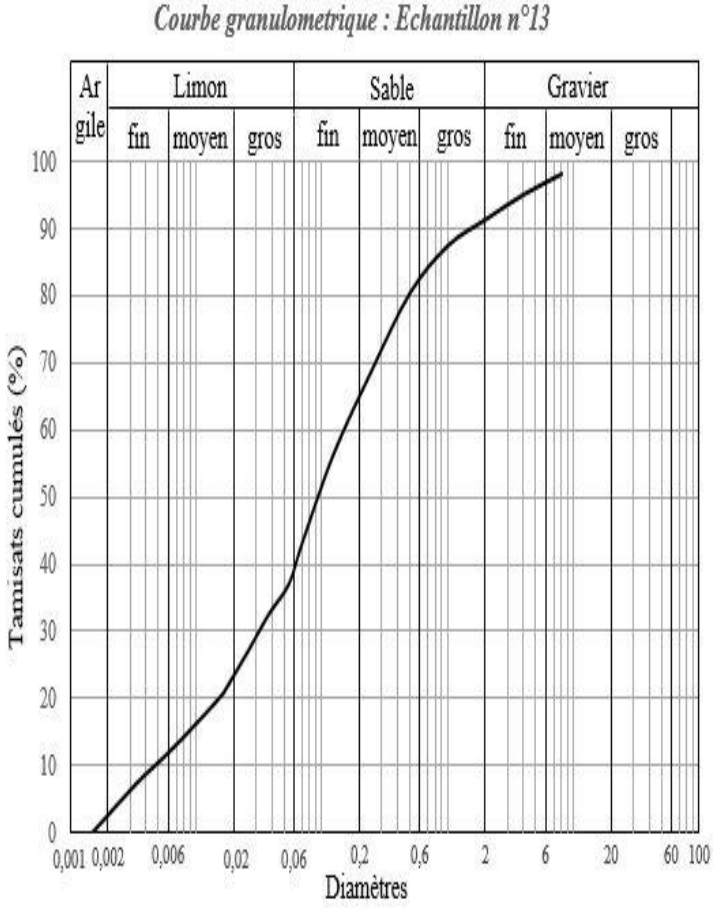

Limite de liquidité : Echantillon n°10
41,55
NC
WL

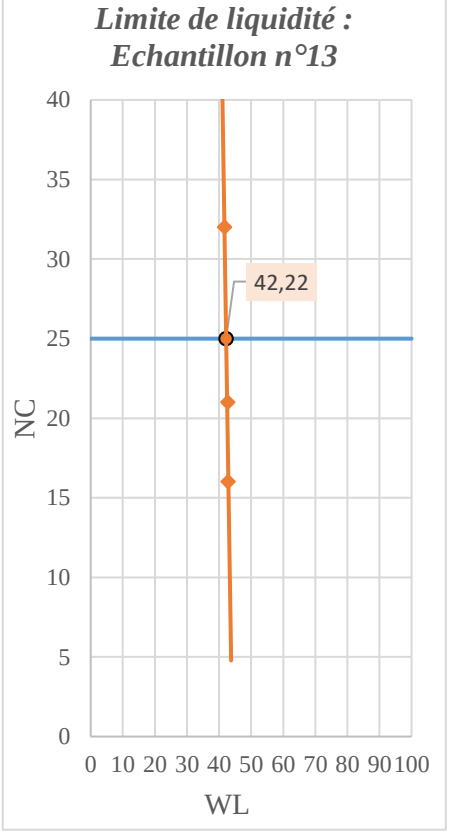

Courbe granulometrique : Echantillon n°11
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100

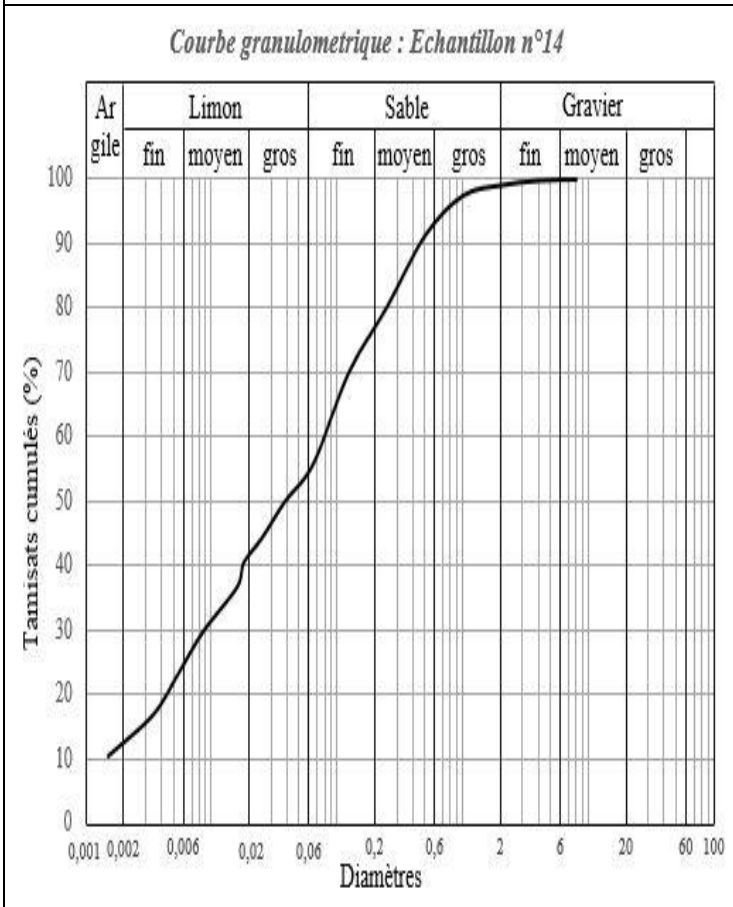

Limite de liquidité : Echantillon n°11
38,10
NC
WL

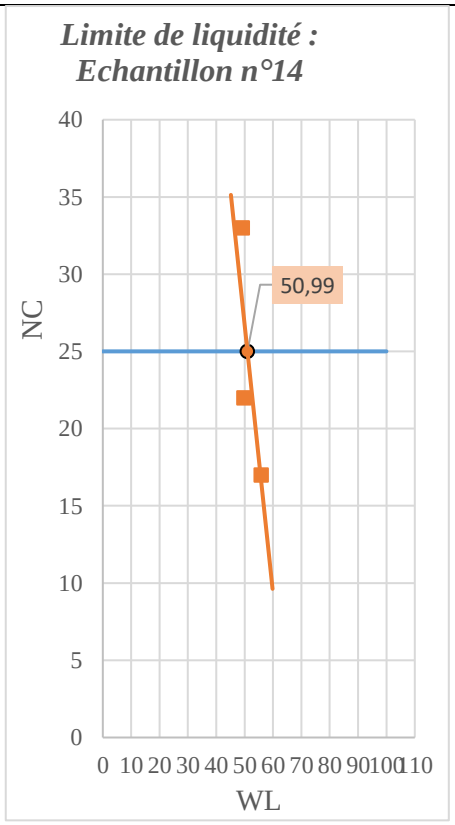

Courbe granulometrique : Echantillon n°12
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°12
58,78
NC
WL

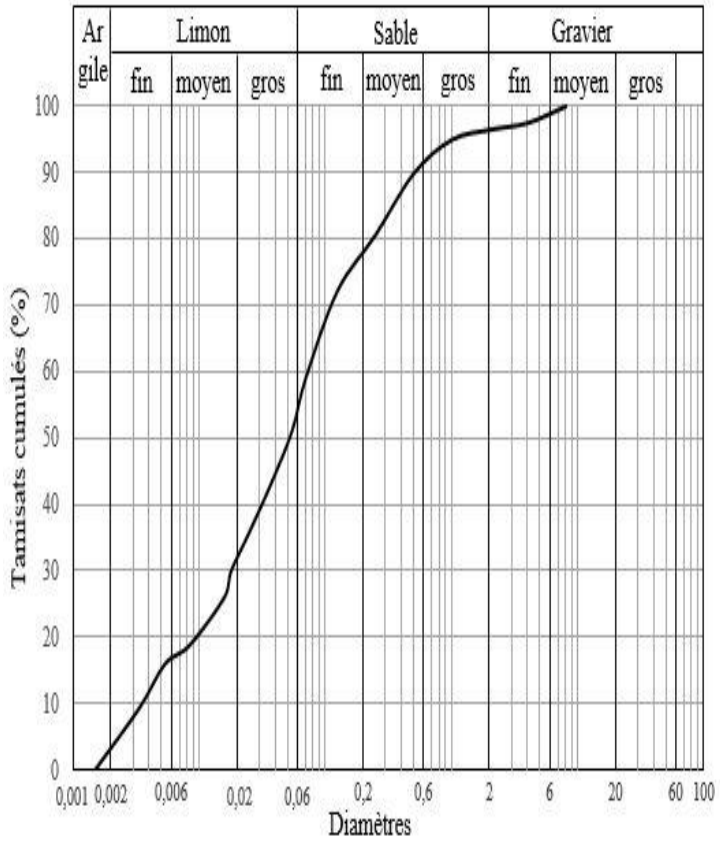

Courbe granulometrique : Echantillon n°13
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°13
42,22
NC
WL

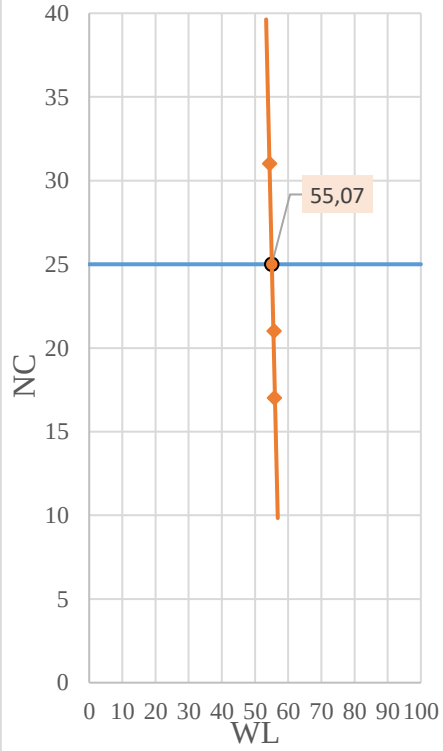

Courbe granulometrique : Echantillon n°14
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°14
50,99
NC
WL

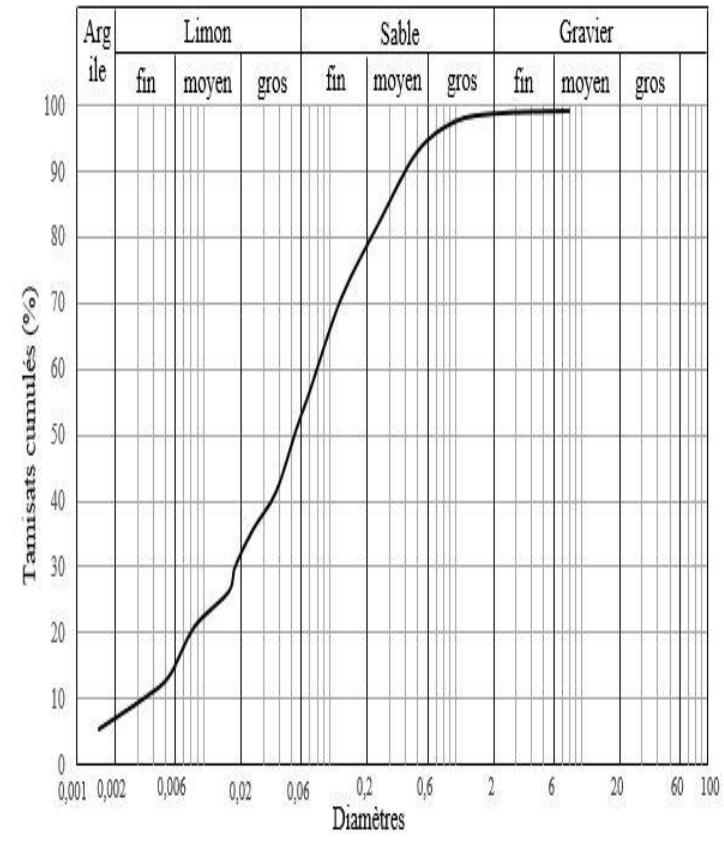
Courbe granulometrique : Echantillon n°15



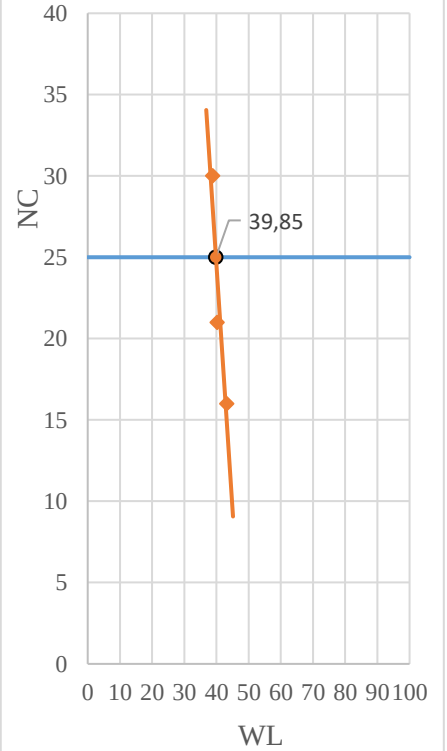
Limite de liquidité : Echantillon n°15

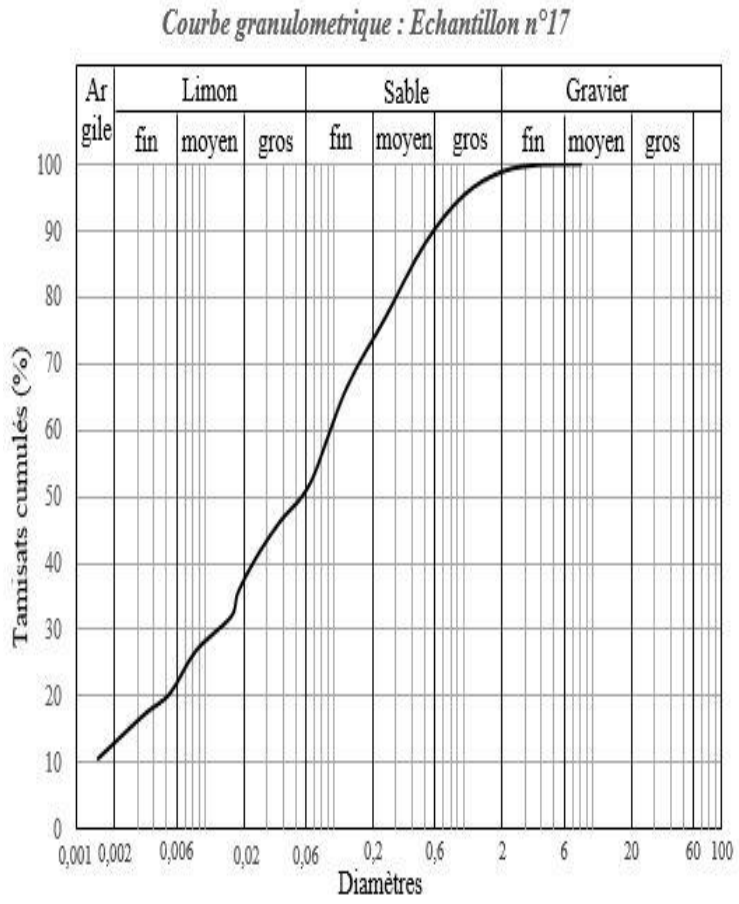


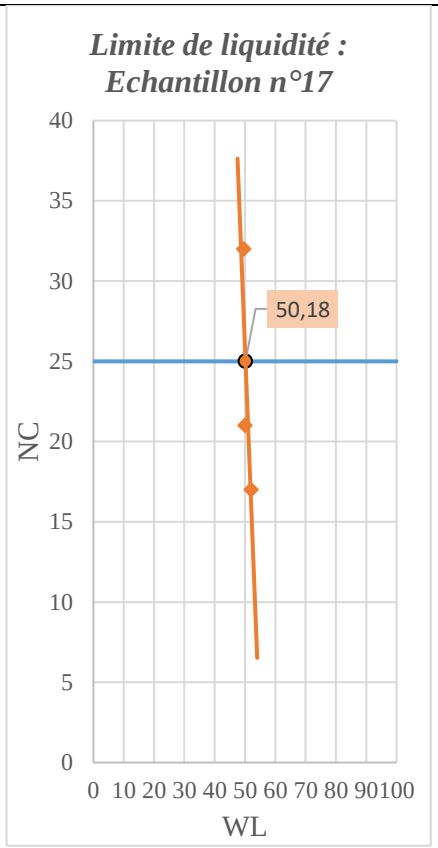
Courbe granulometrique : Echantillon n°16

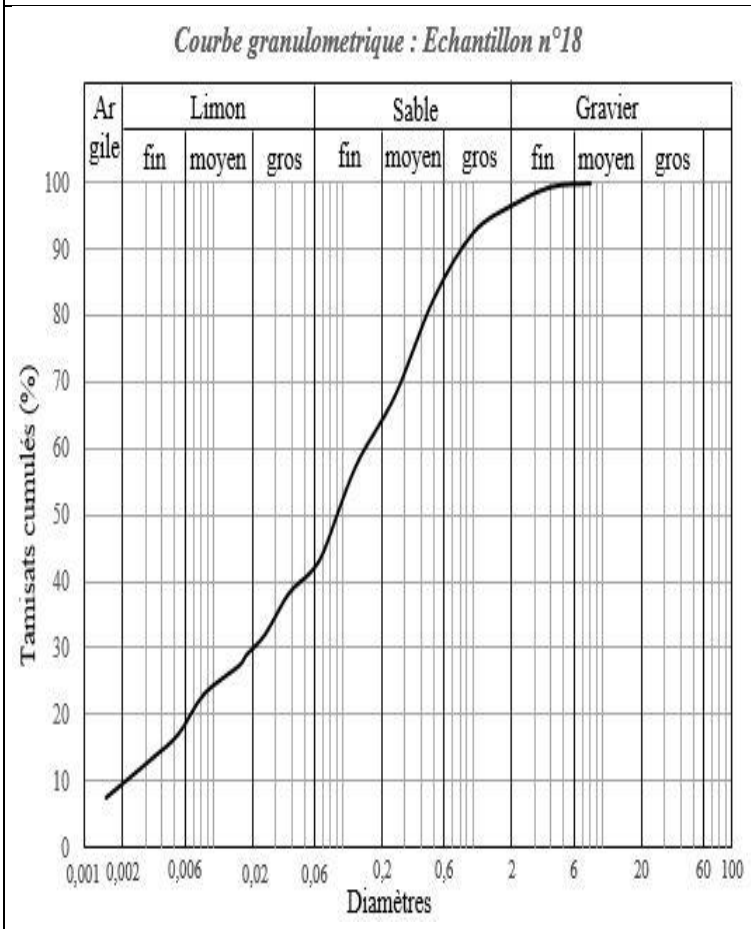


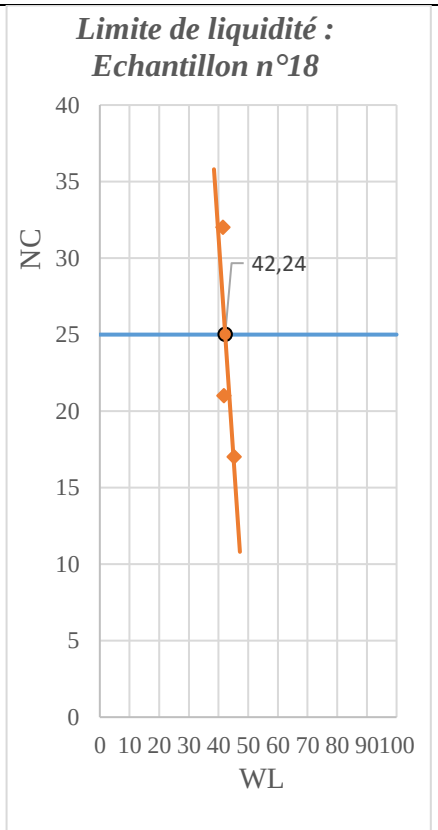
Limite de liquidité : Echantillon n°16



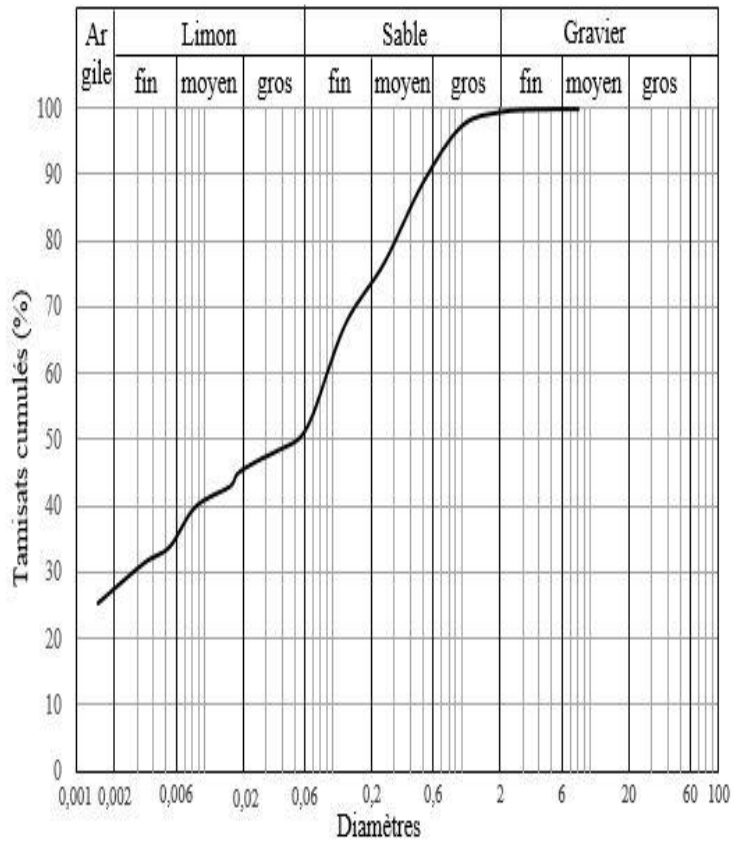

Courbe granulometrique : Echantillon n°17
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°17
NC
WL
50,18

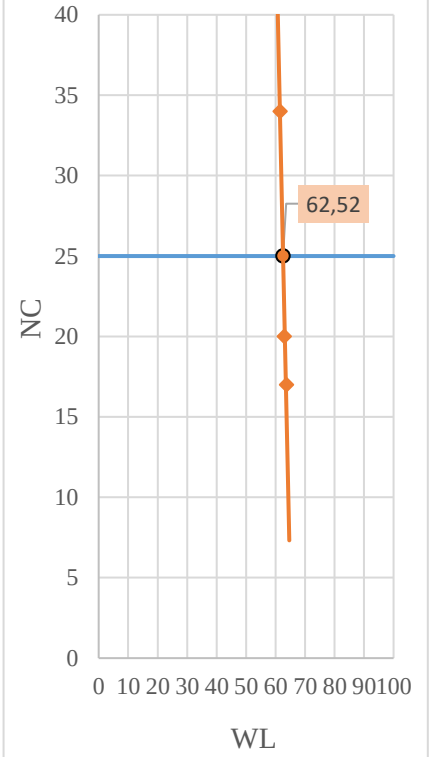

Courbe granulometrique : Echantillon n°18
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°18
NC
WL
42,24

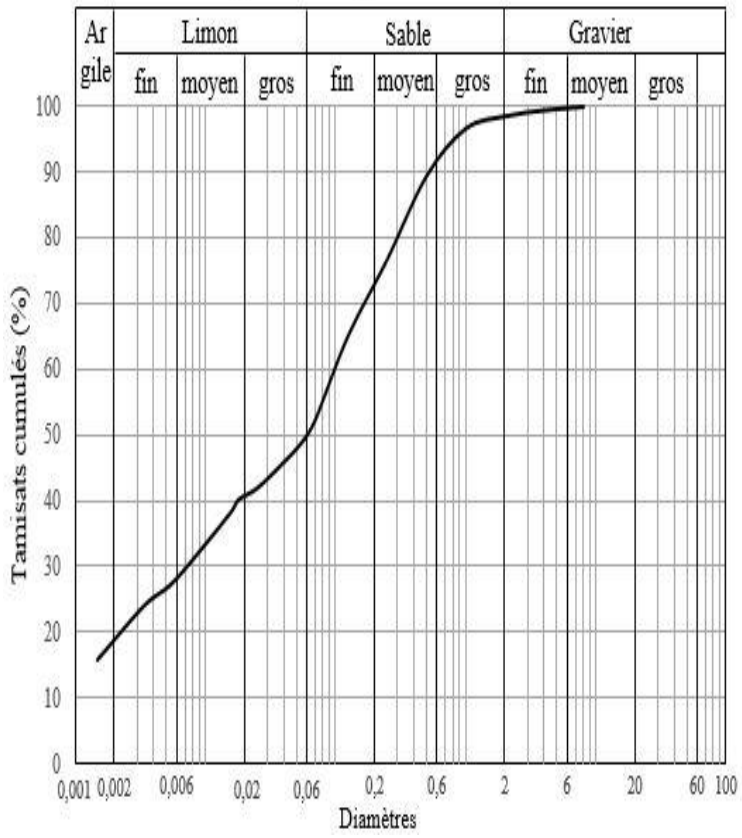
Courbe granulometrique : Echantillon n°19



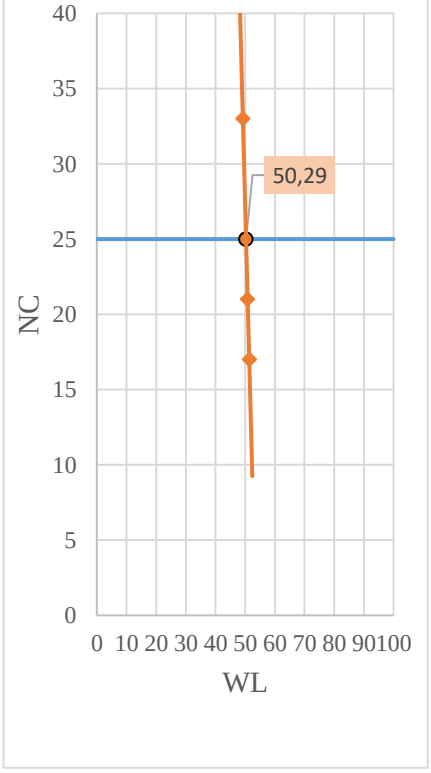
Limite de liquidité : Echantillon n°19



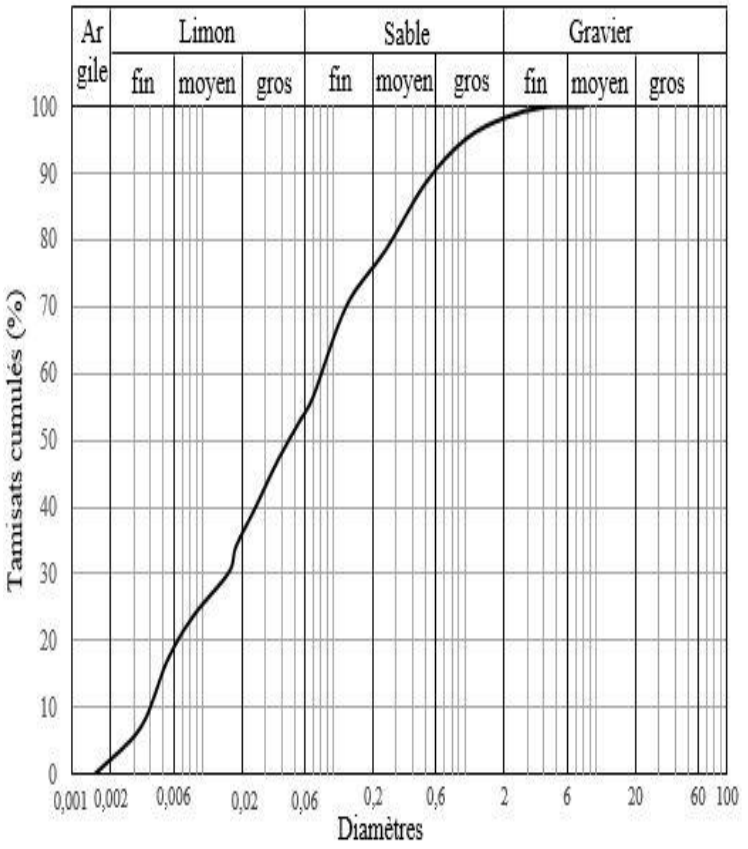
Courbe granulometrique : Echantillon n°20



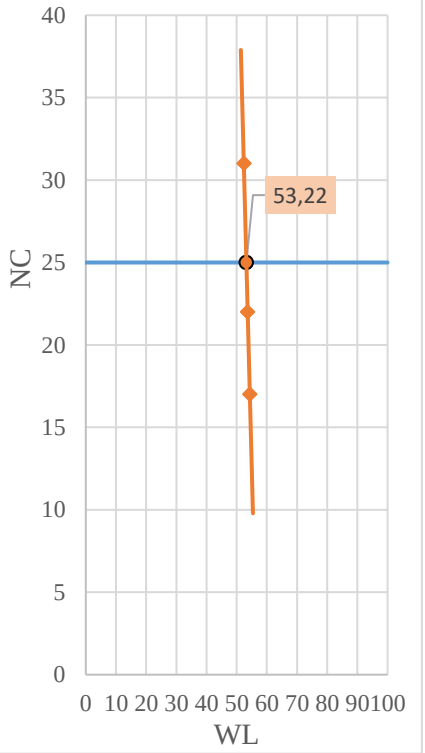
Limite de liquidité : Echantillon n°20



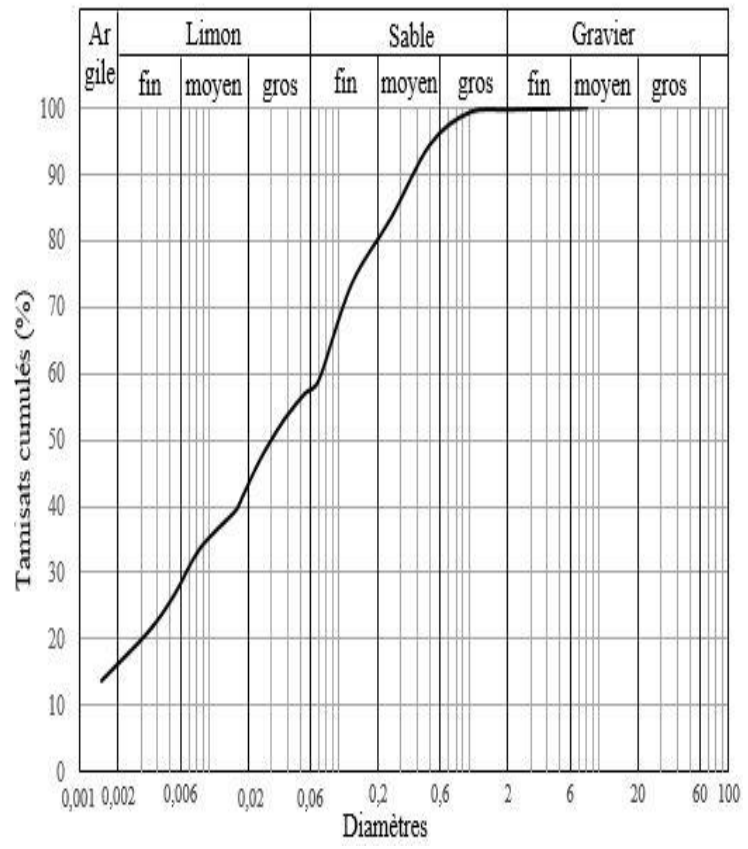
Courbe granulometrique : Echantillon n°21



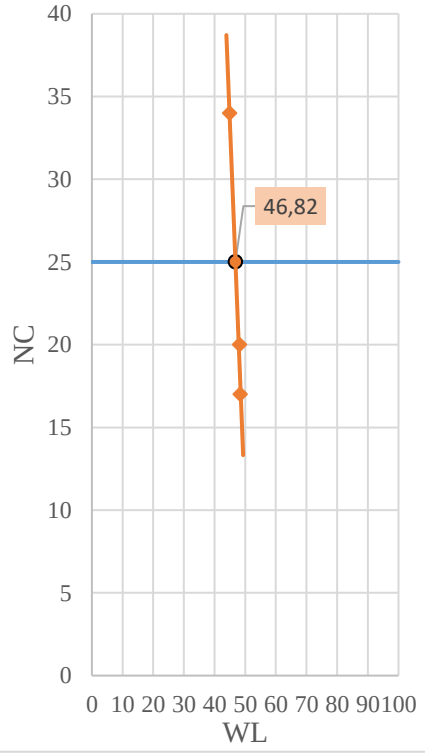
Limite de liquidité : Echantillon n°21



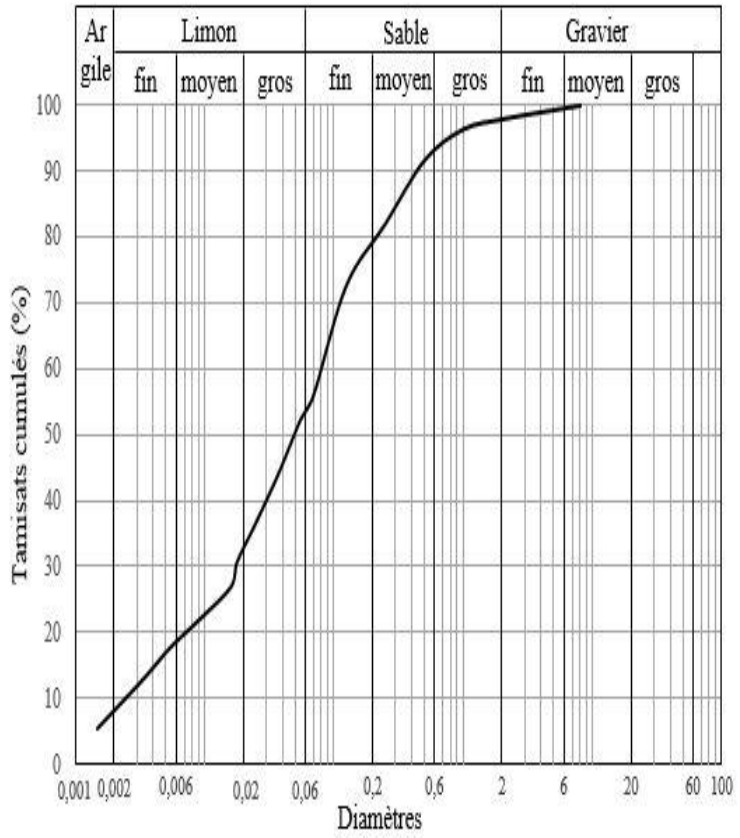
Courbe granulometrique : Echantillon n°22



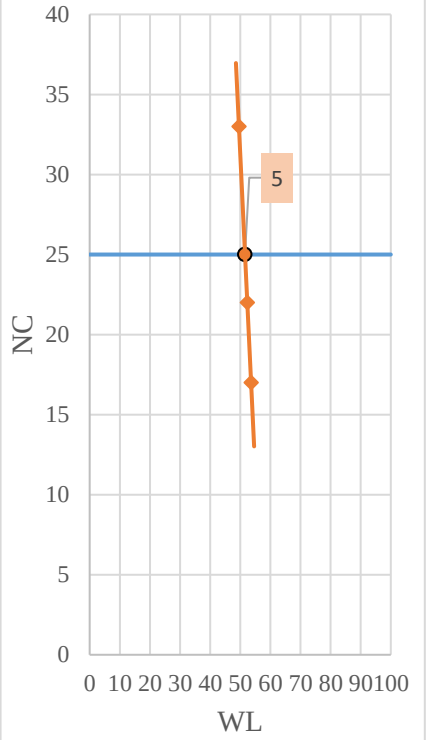
Limite de liquidité : Echantillon n°22



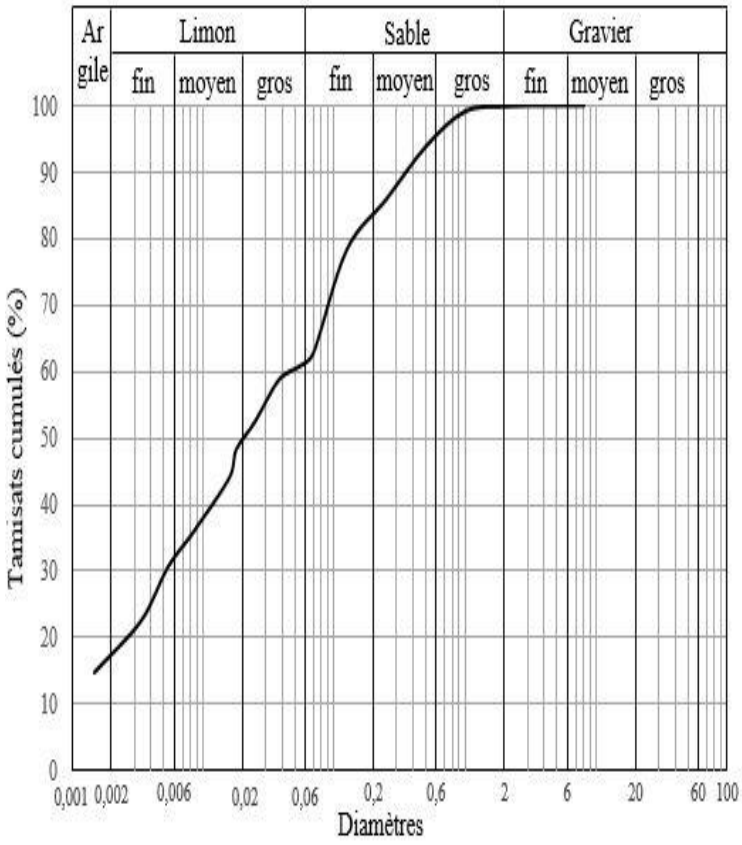
Courbe granulometrique : Echantillon n°23



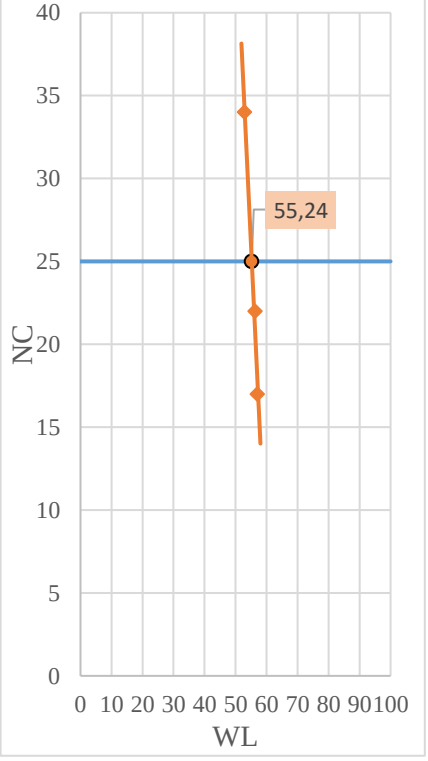
Limite de liquidité : Echantillon n°23



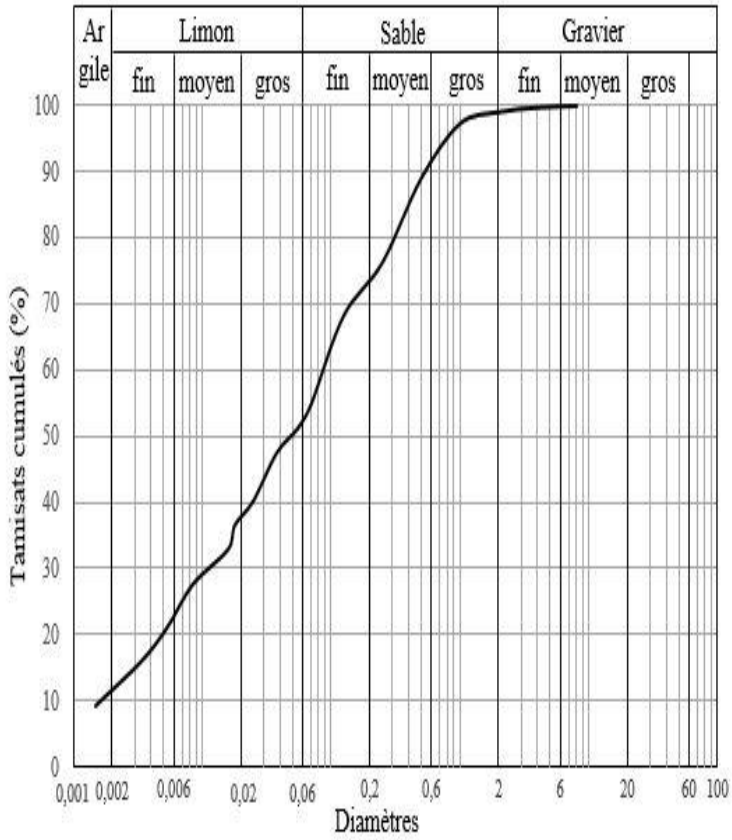
Courbe granulometrique : Echantillon n°24



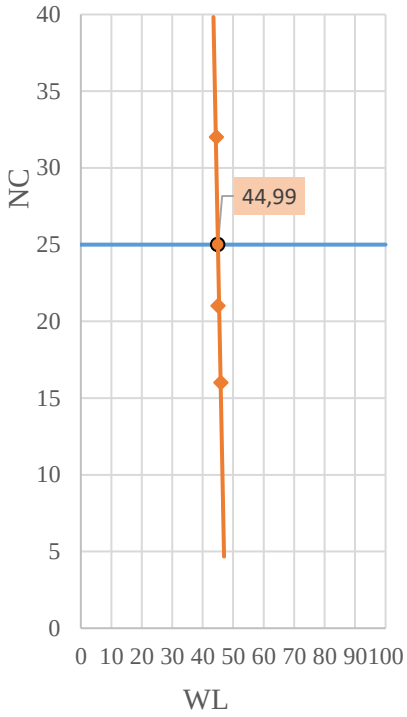
Limite de liquidité : Echantillon n°24



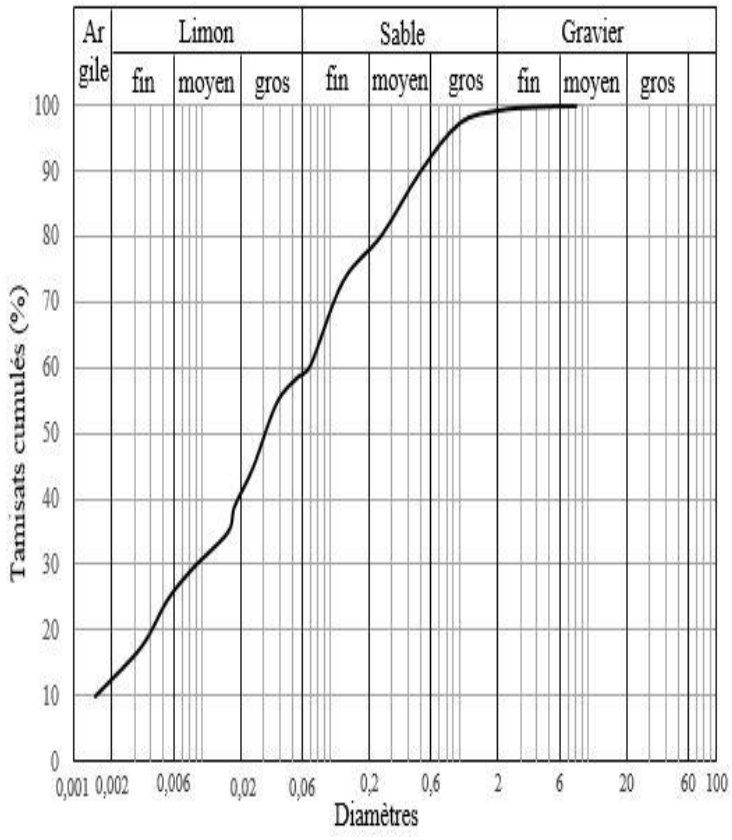
Courbe granulometrique : Echantillon n°25



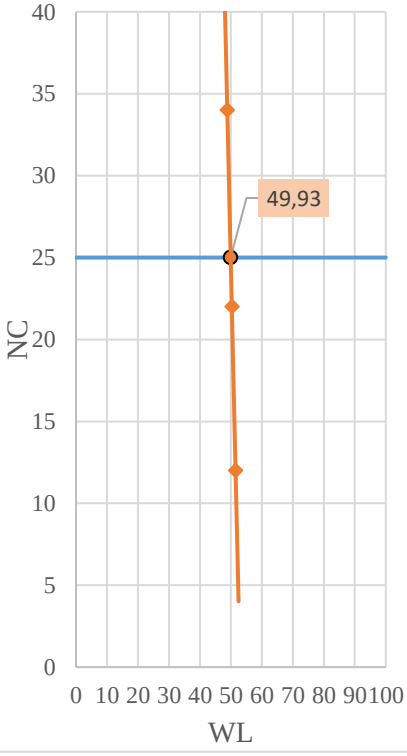
Limite de liquidité : Echantillon n°25

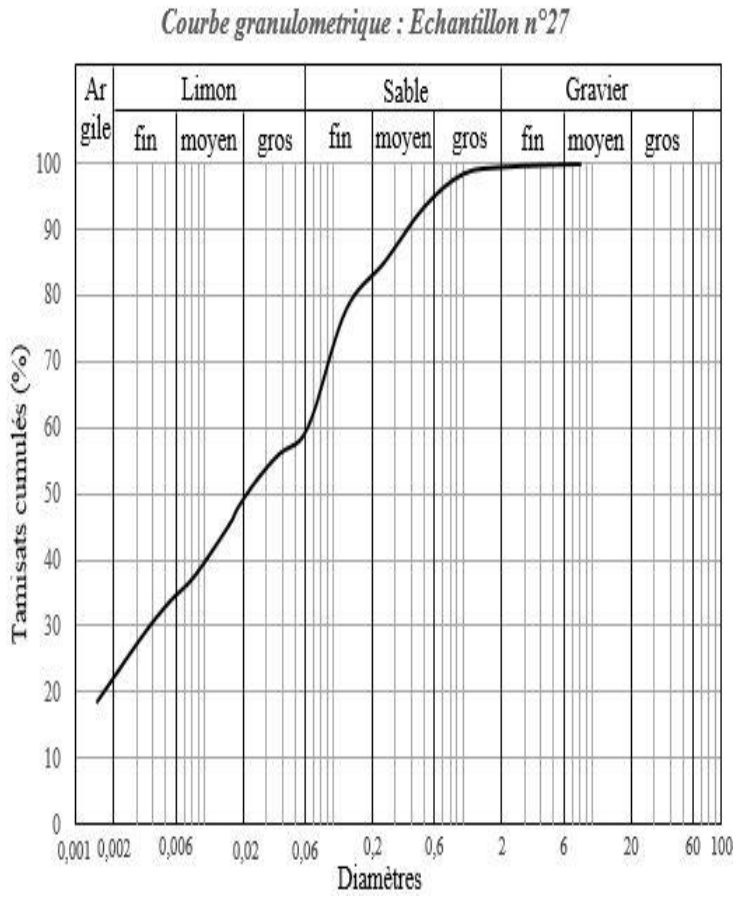


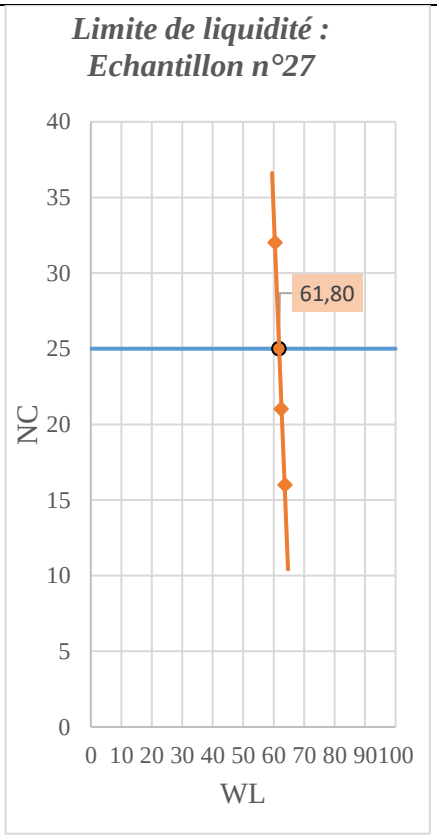
Courbe granulometrique : Echantillon n°26

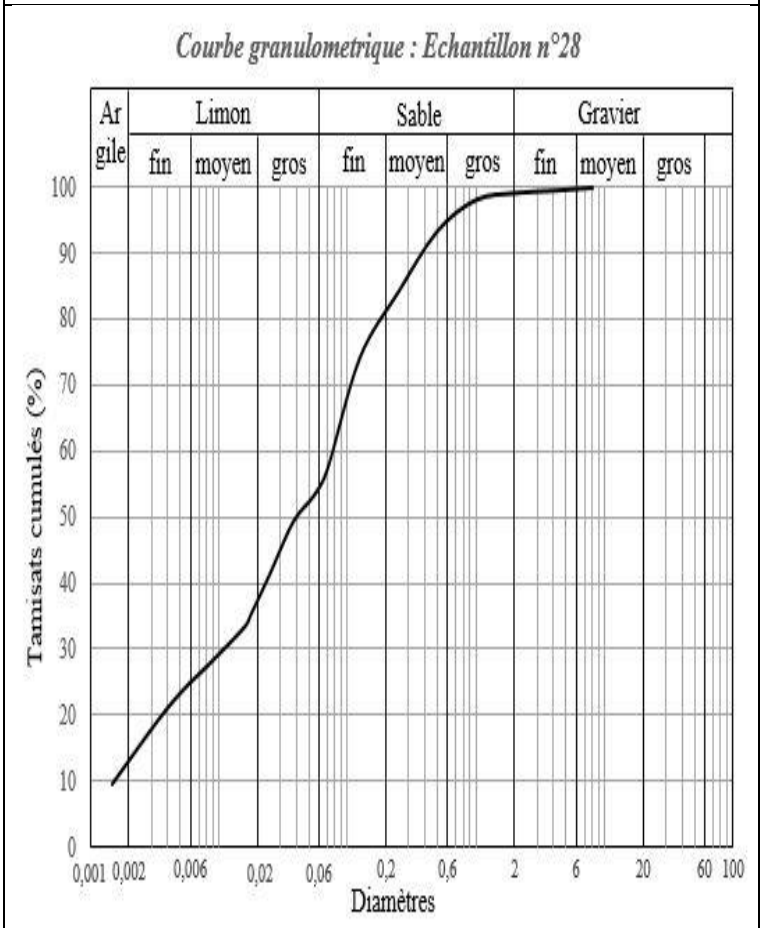


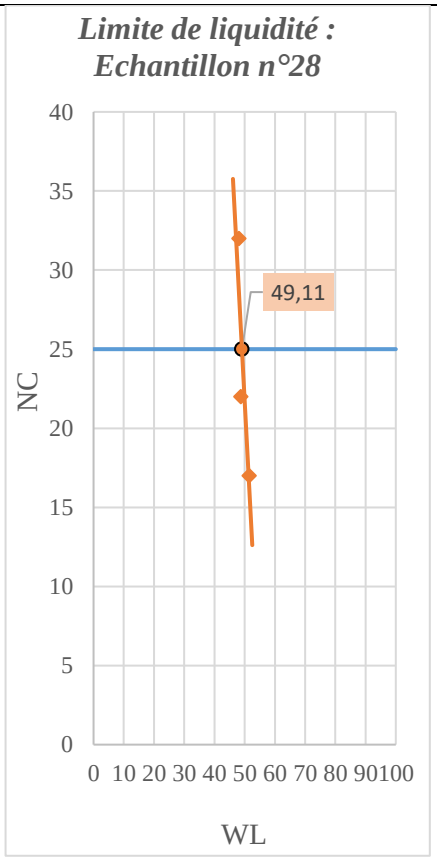
Limite de liquidité : Echantillon n°26



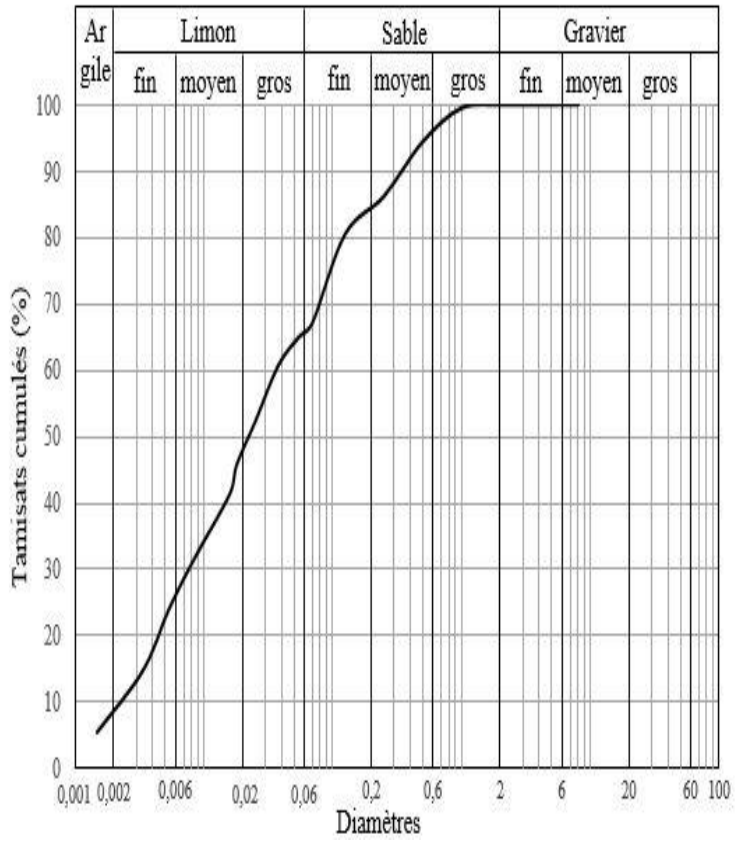

Courbe granulometrique : Echantillon n°27
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°27
NC
WL
61,80
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

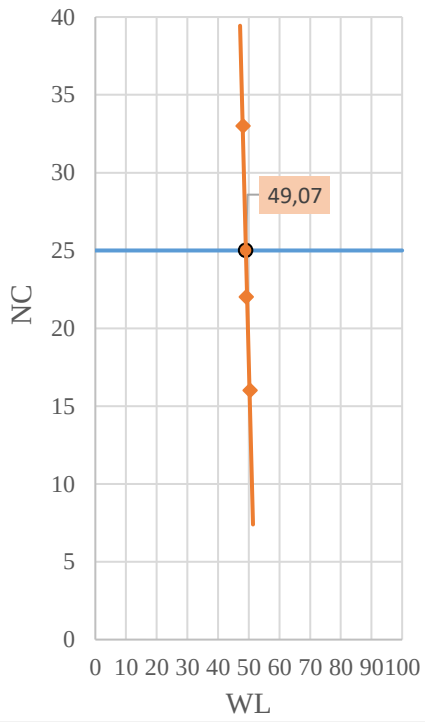

Courbe granulometrique : Echantillon n°28
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°28
NC
WL
49,11
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

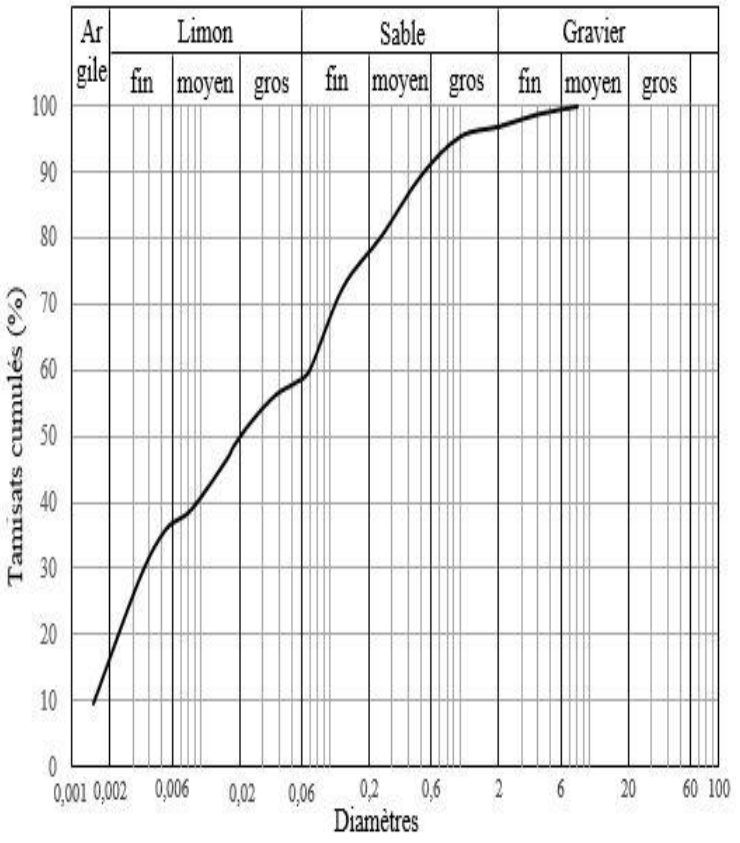
Courbe granulometrique : Echantillon n°29



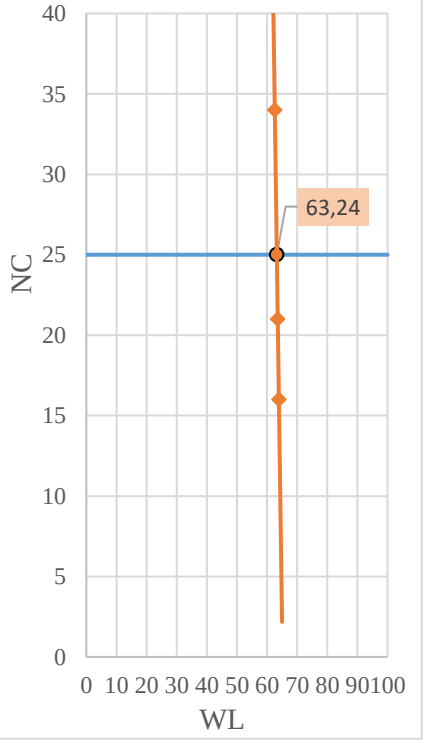
Limite de liquidité : Echantillon n°29



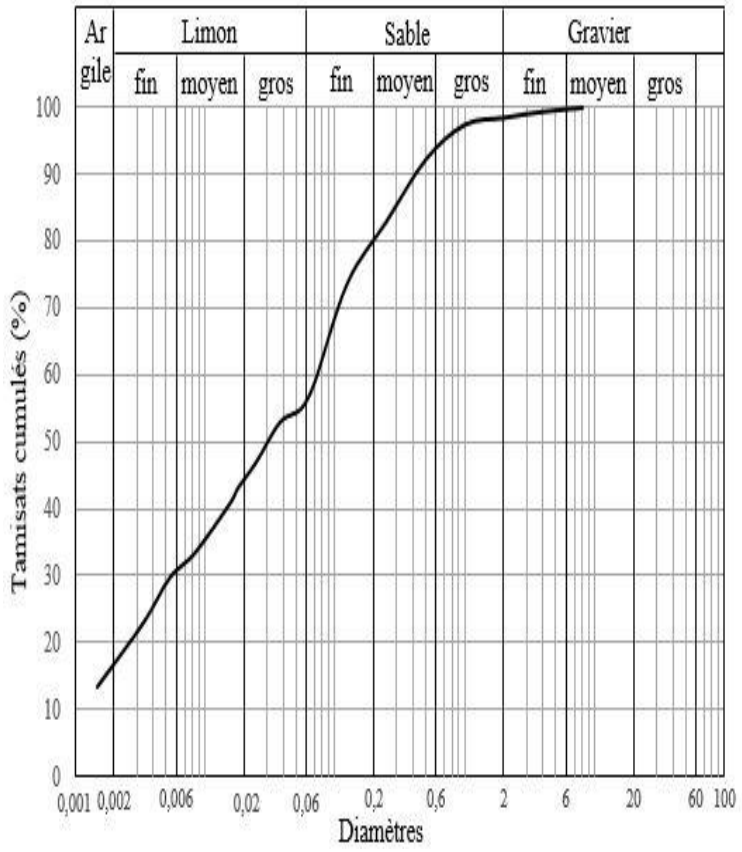
Courbe granulometrique : Echantillon n°30



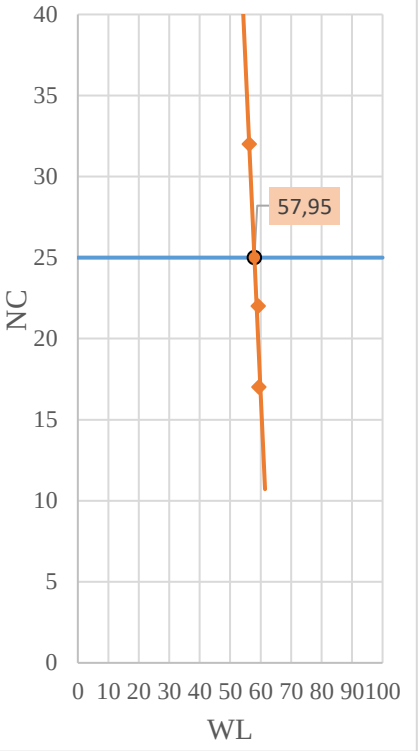
Limite de liquidité : Echantillon n°30



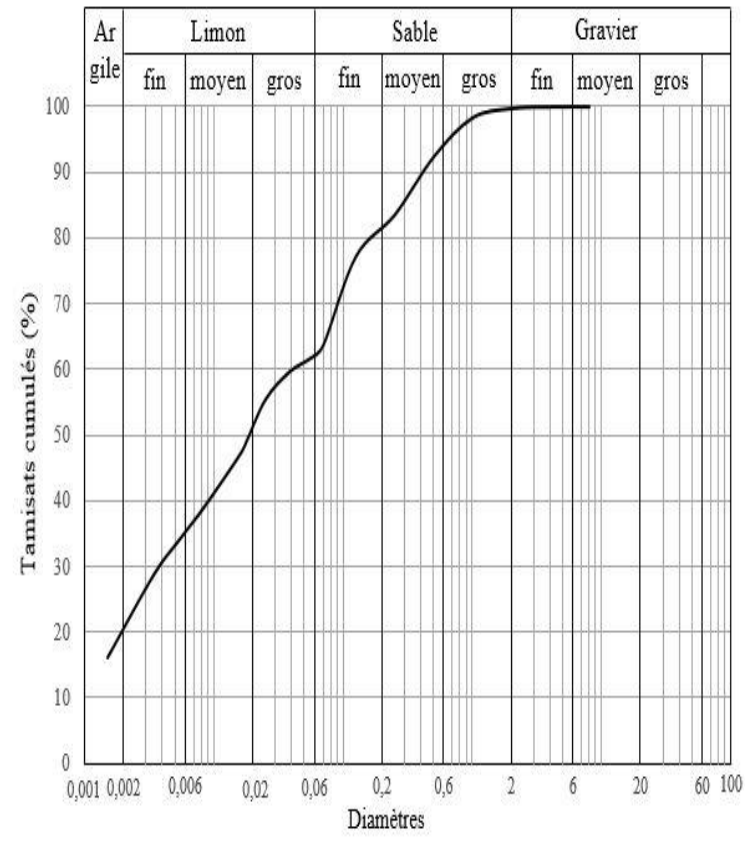
Courbe granulometrique : Echantillon n°31



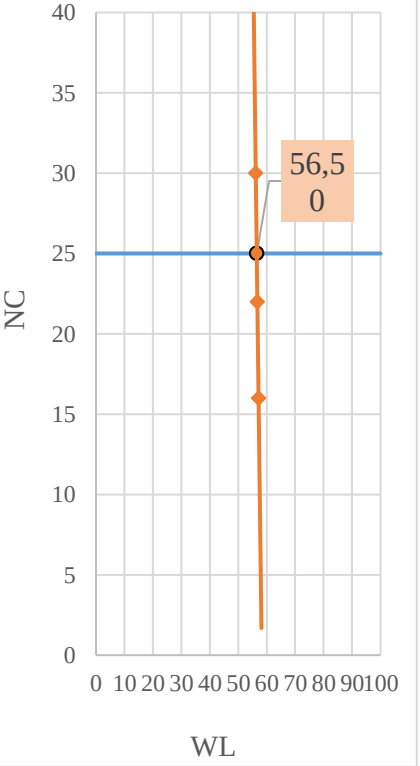
Limite de liquidité : Echantillon n°31

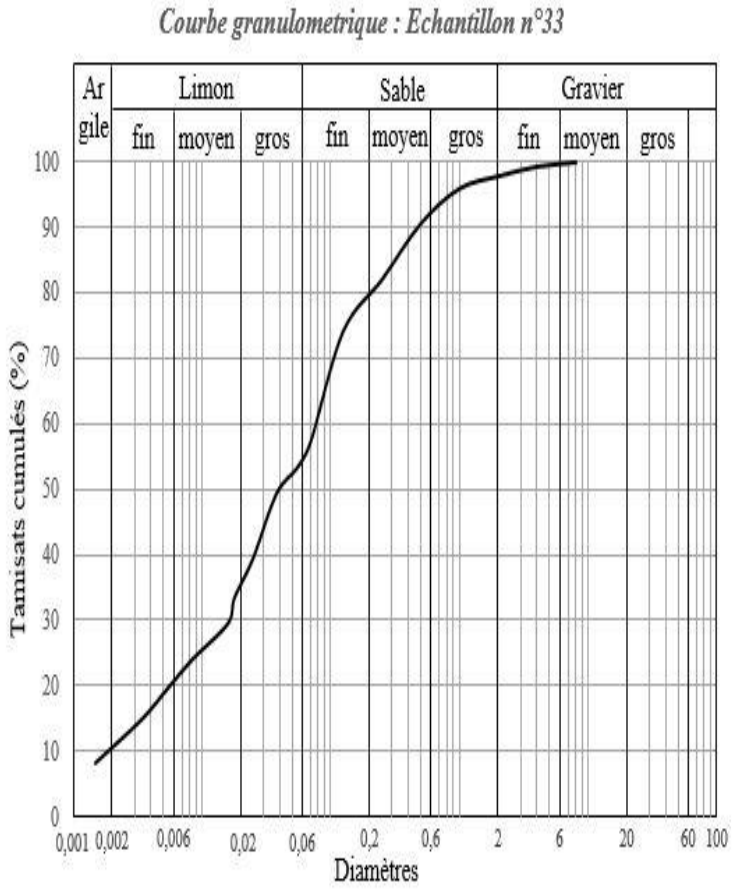


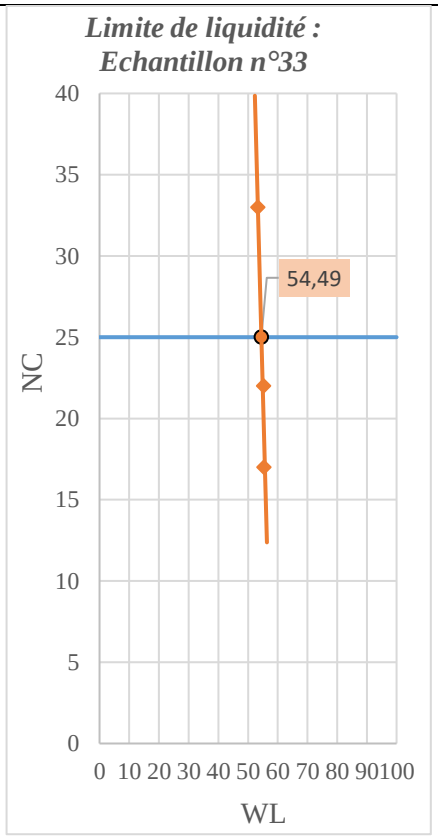
Courbe granulometrique : Echantillon n°32

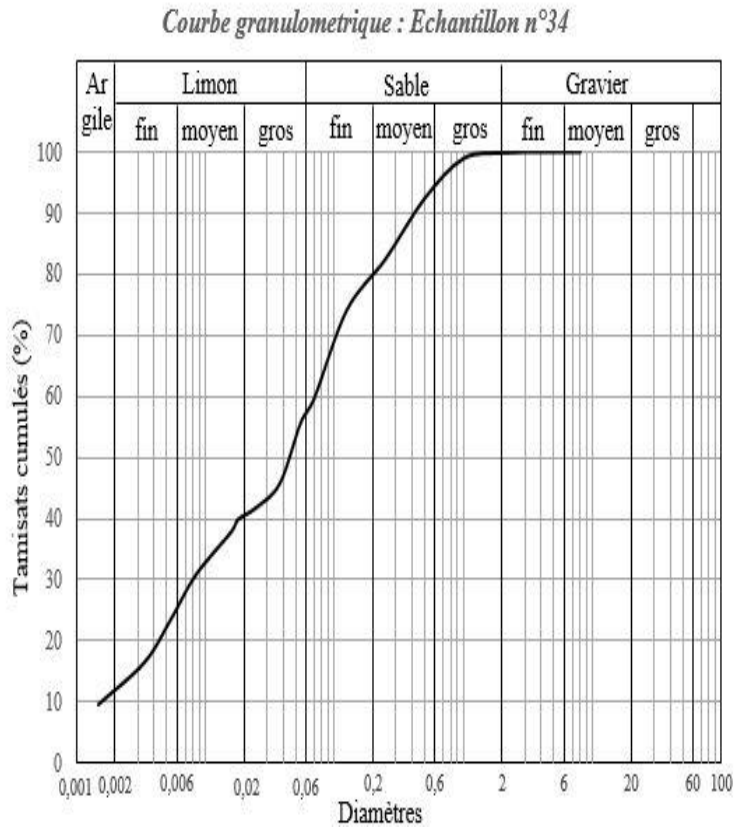


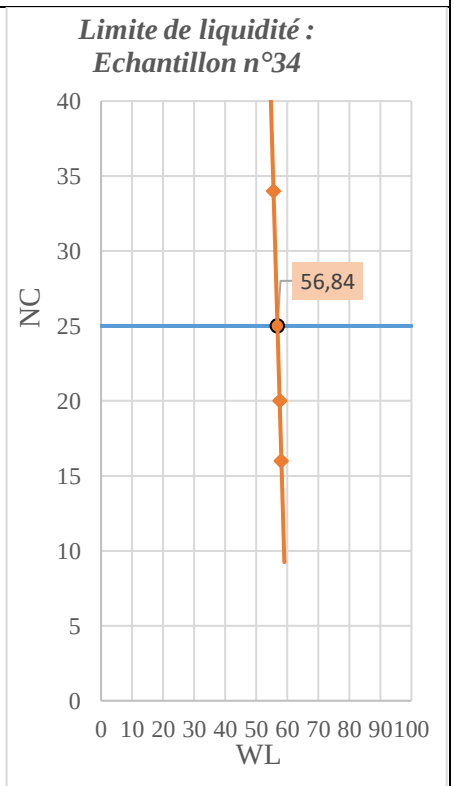
Limite de liquidité : Echantillon n°32



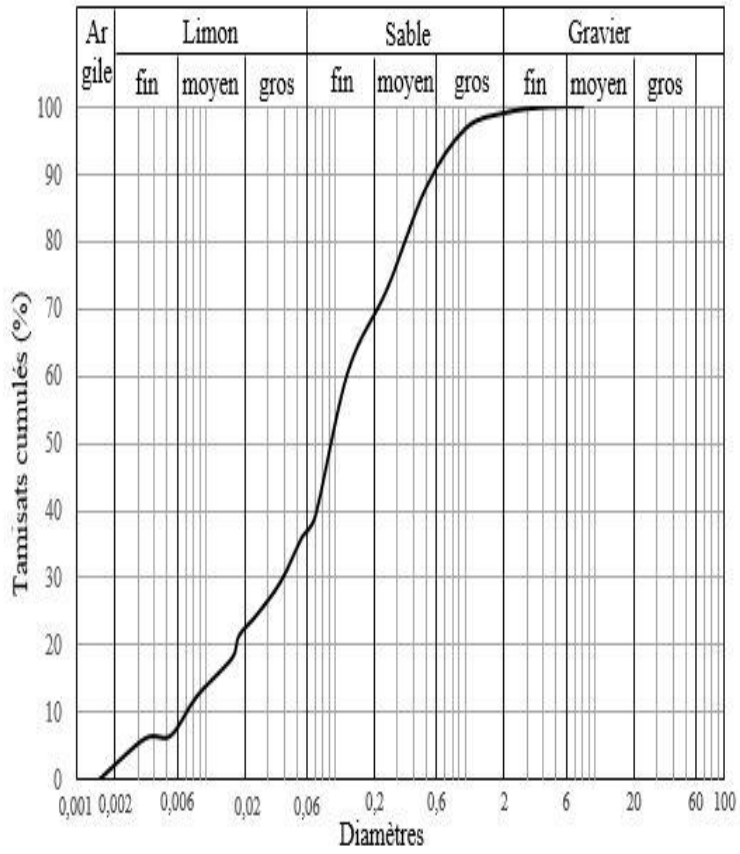

Courbe granulometrique : Echantillon n°33
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°33
NC
WL
54,49
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

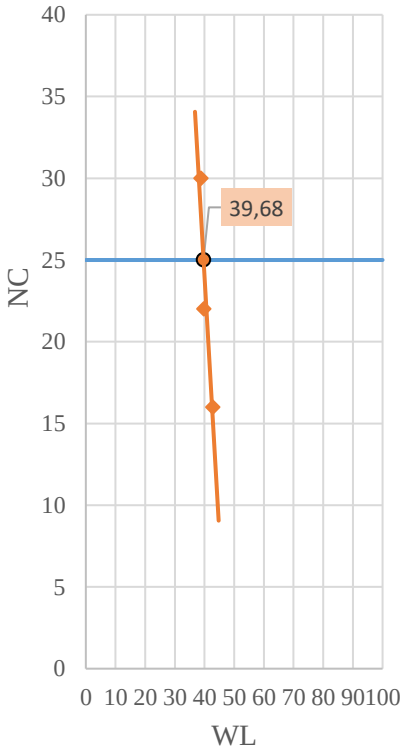

Courbe granulometrique : Echantillon n°34
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°34
NC
WL
56,84
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

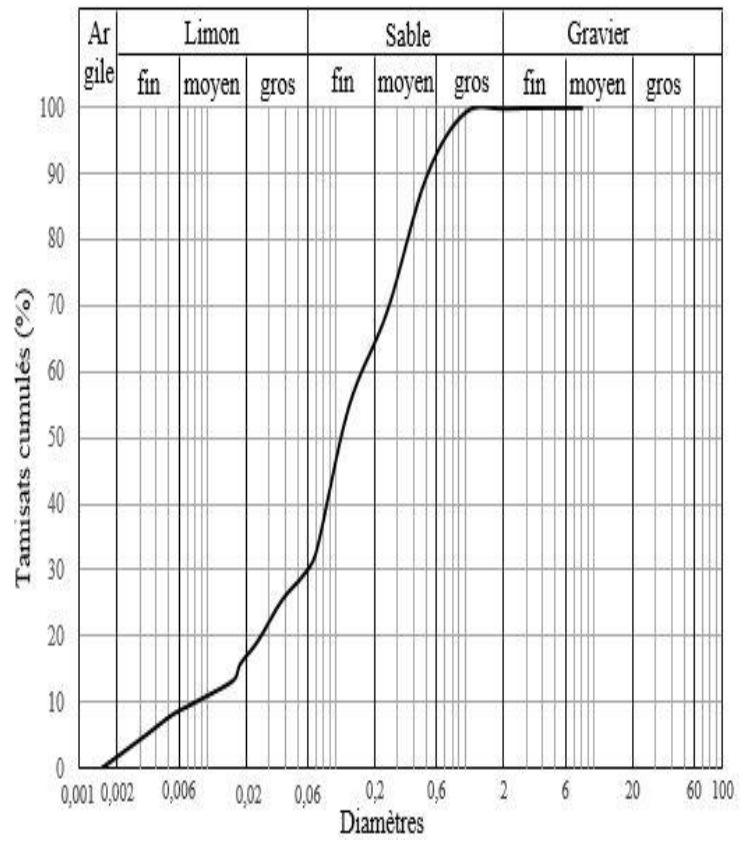
Courbe granulometrique : Echantillon n°35



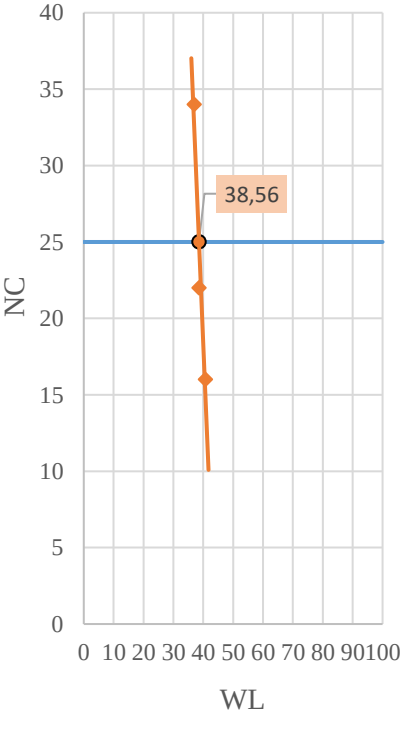
Limite de liquidité : Echantillon n°35



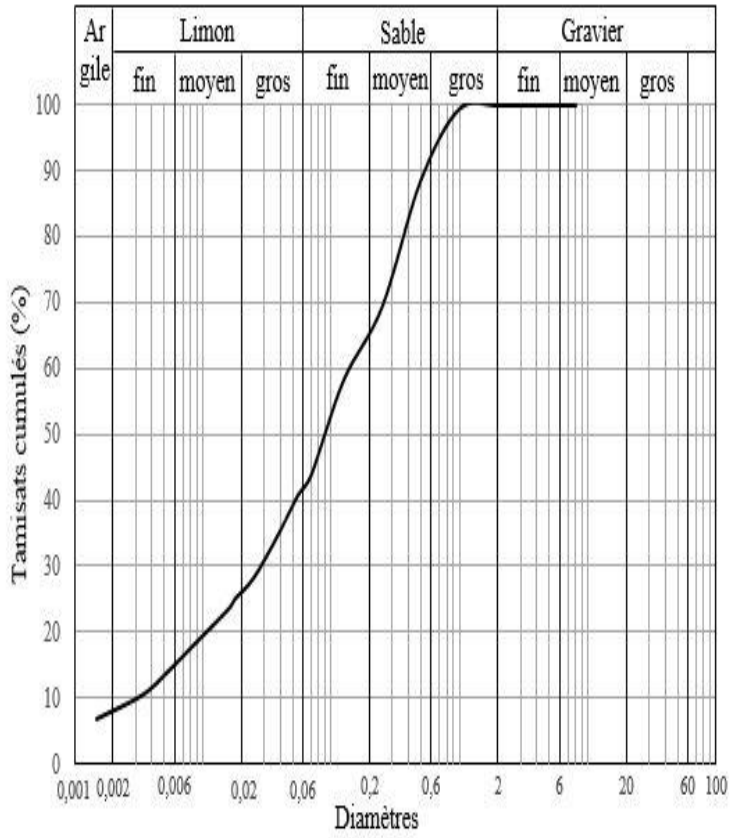
Courbe granulometrique : Echantillon n°36



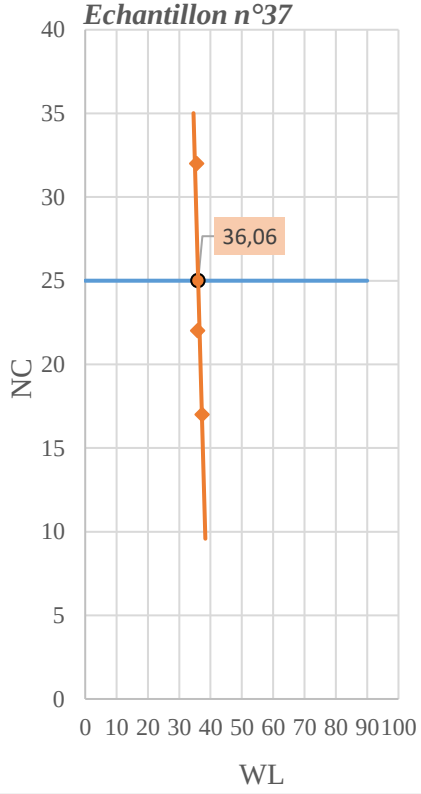
Limite de liquidité : Echantillon n°36



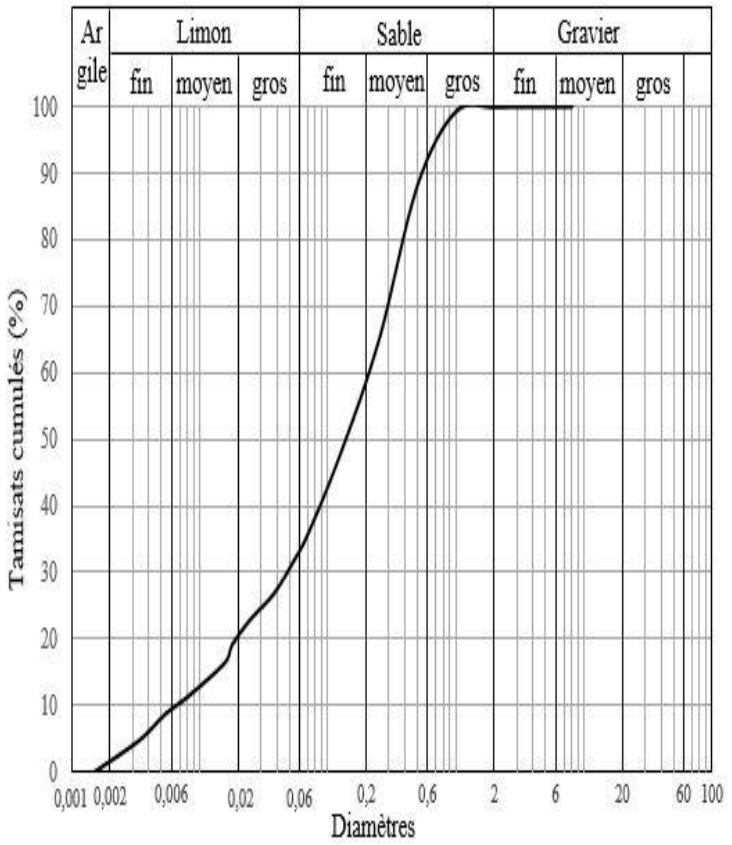
Courbe granulometrique : Echantillon n°37



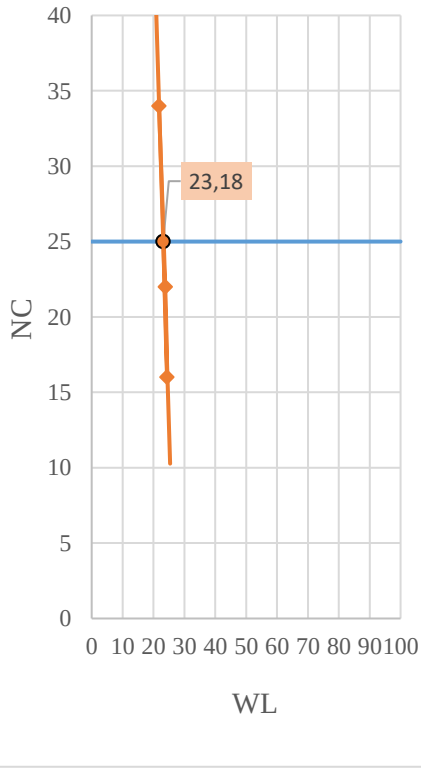
Limite de liquidité : Echantillon n°37

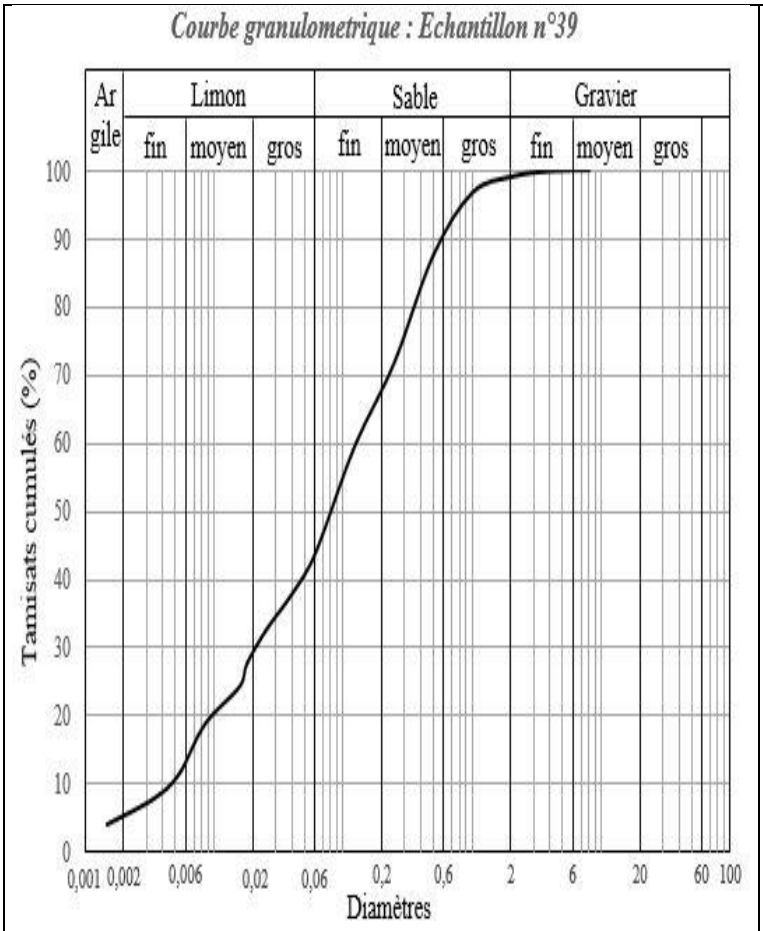


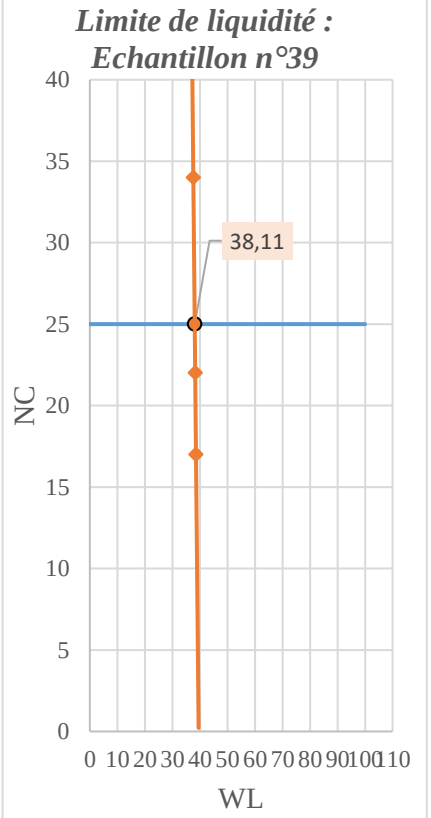
Courbe granulometrique : Echantillon n°38

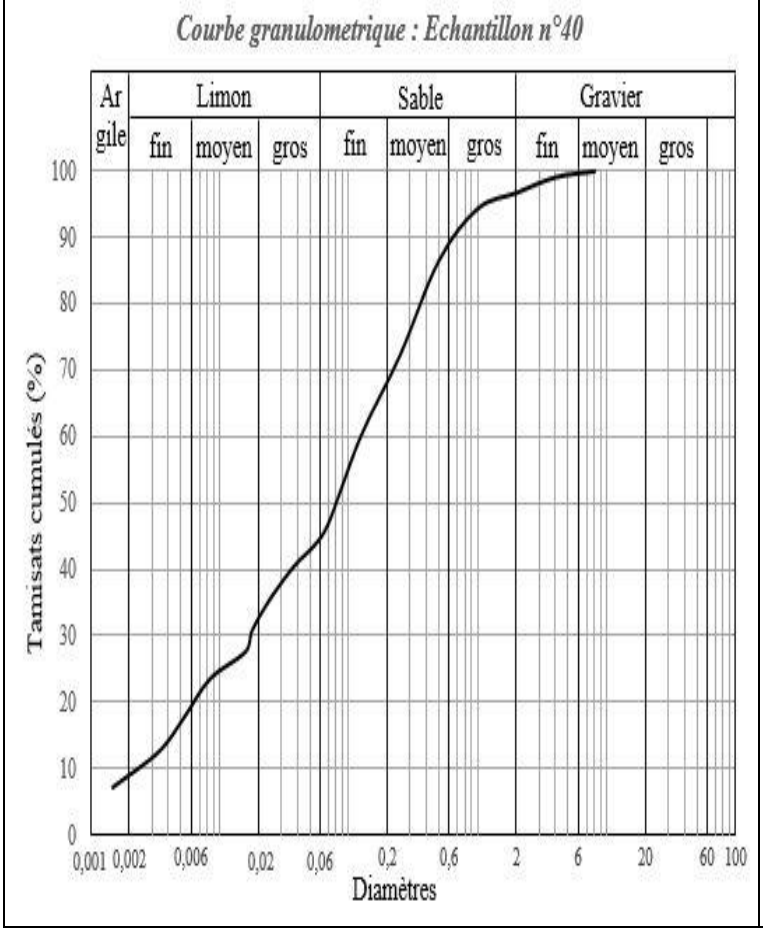


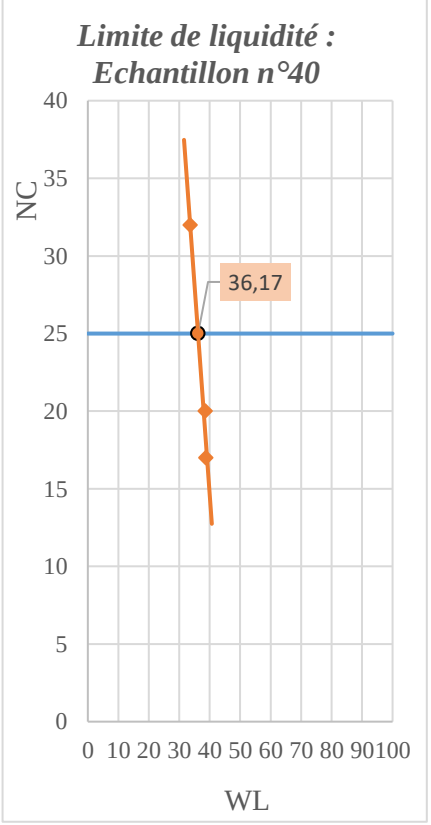
Limite de liquidité : Echantillon n°38



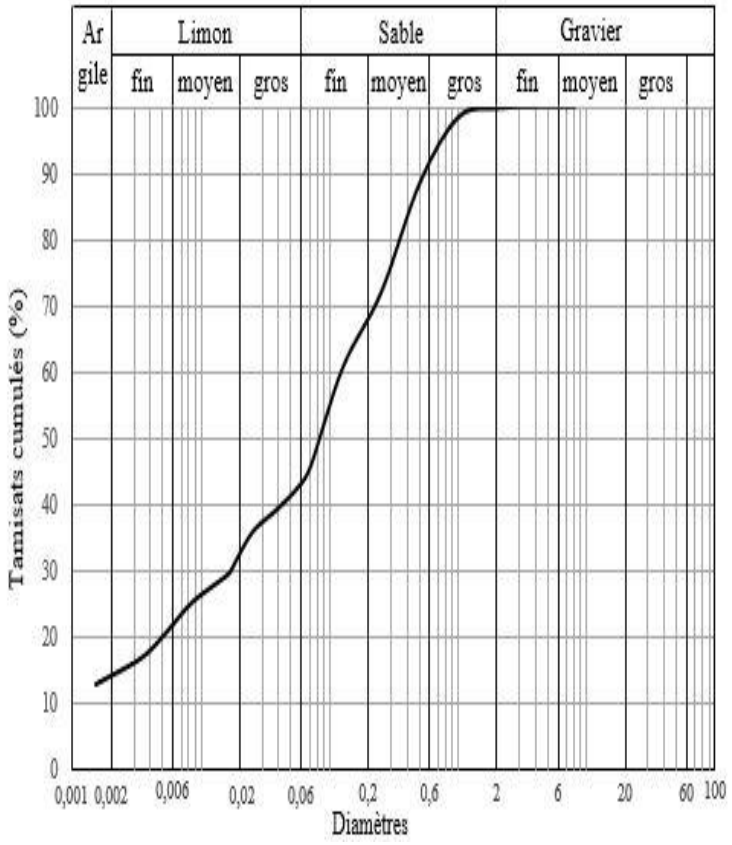

Courbe granulometrique : Echantillon n°39
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°39
38,11
NC
WL

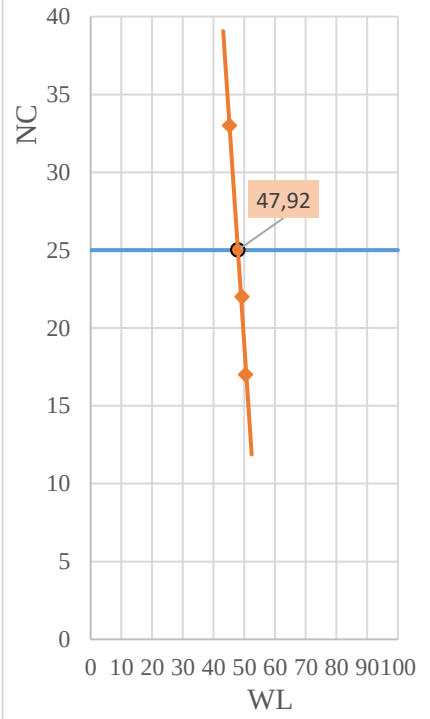

Courbe granulometrique : Echantillon n°40
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°40
36,17
NC
WL

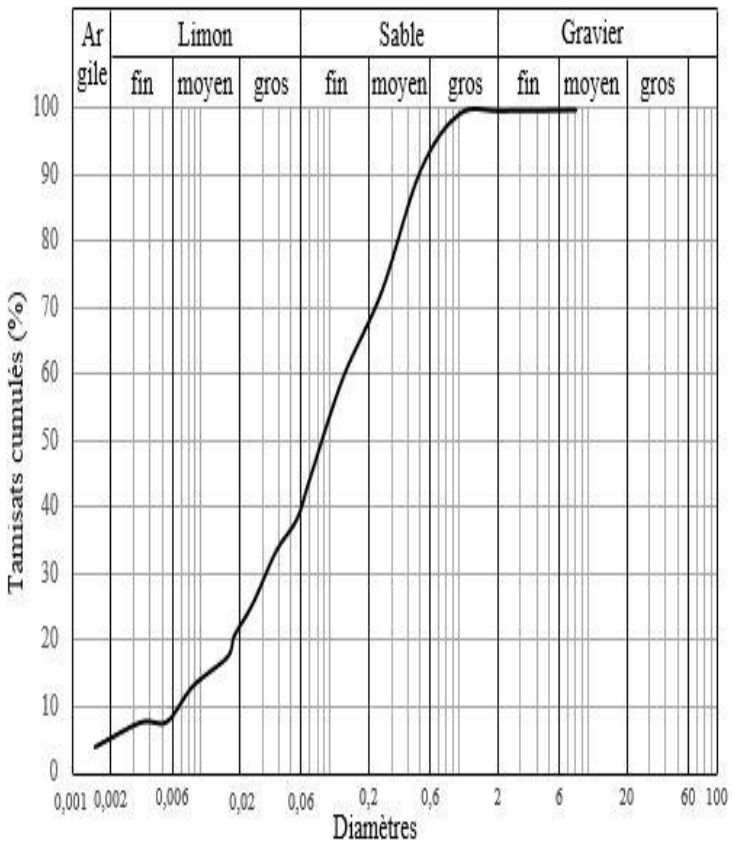
Courbe granulometrique : Echantillon n°41



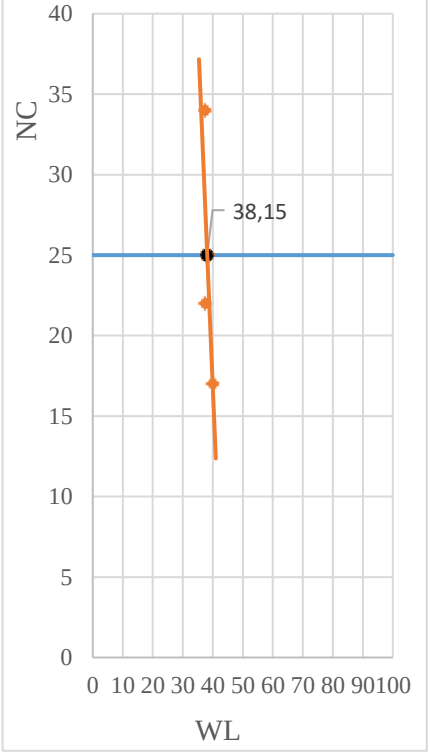
Limite de liquidité : Echantillon n°41

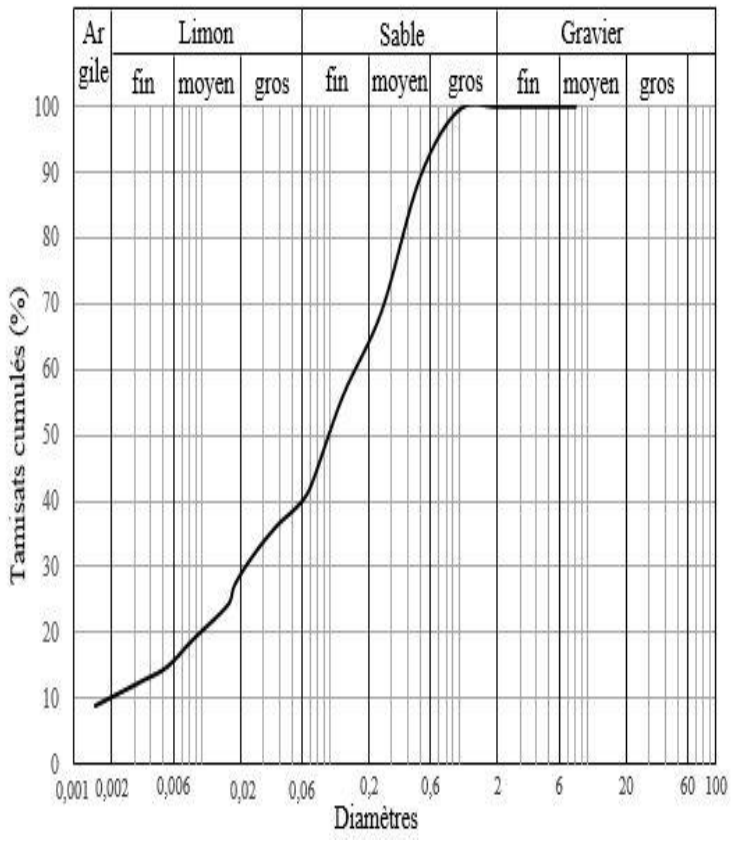


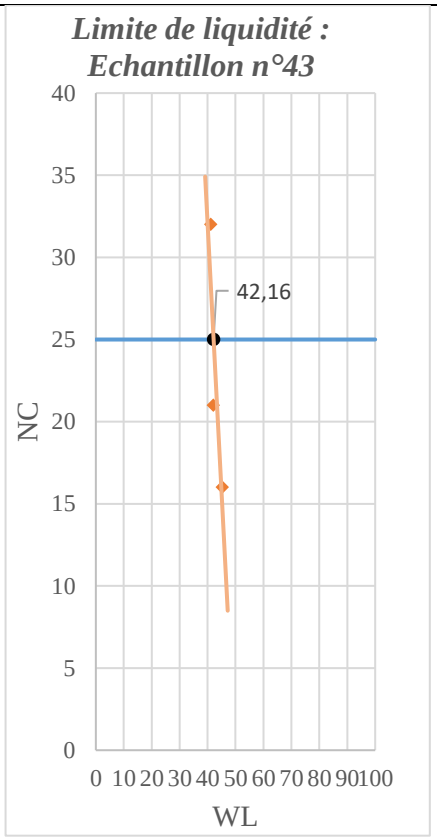
Courbe granulometrique : Echantillon n°42

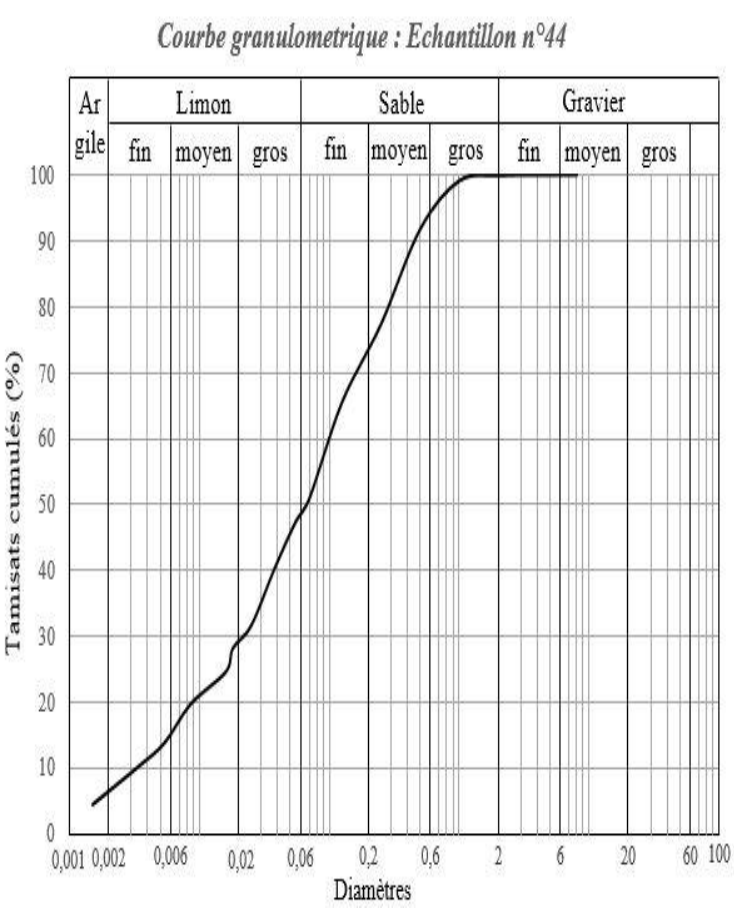


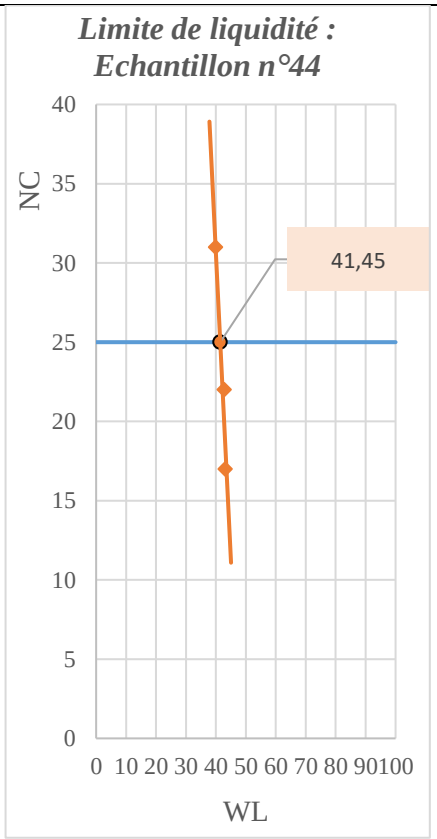
Limite de liquidité : Echantillon n°42

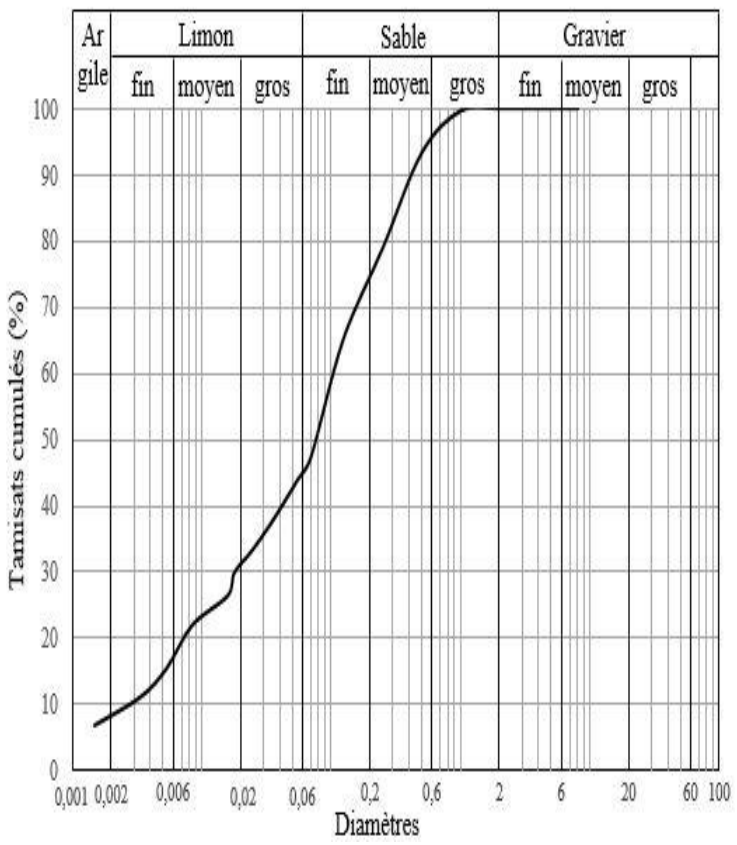


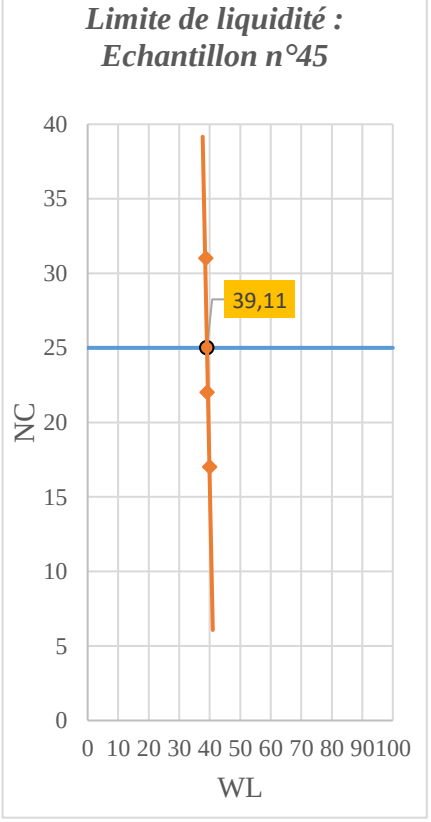

Courbe granulometrique : Echantillon n°43
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100

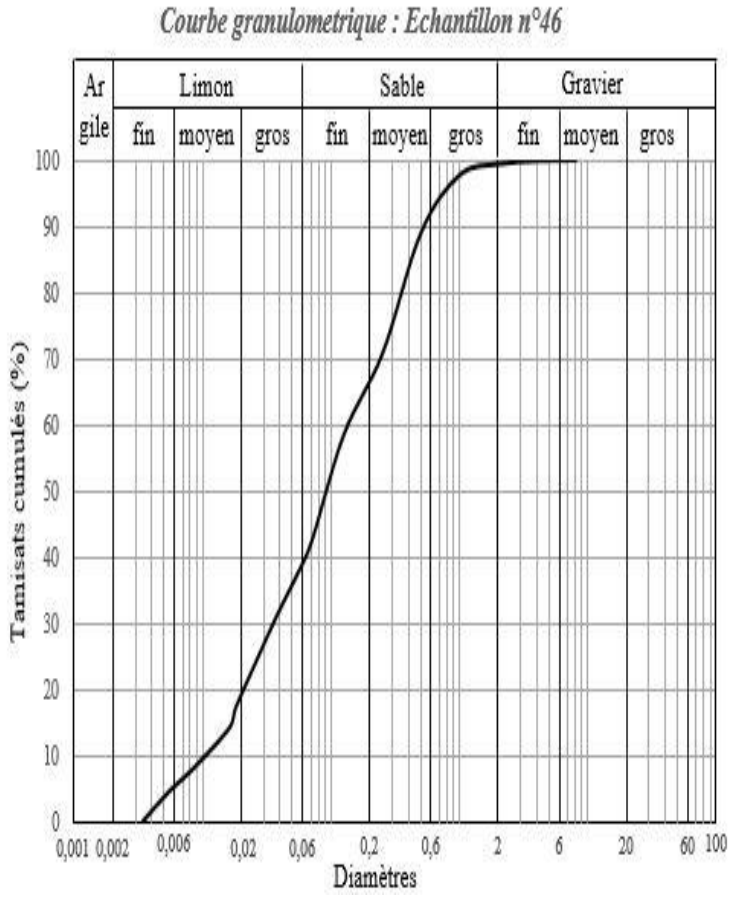

Limite de liquidité : Echantillon n°43
42,16
NC
WL
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

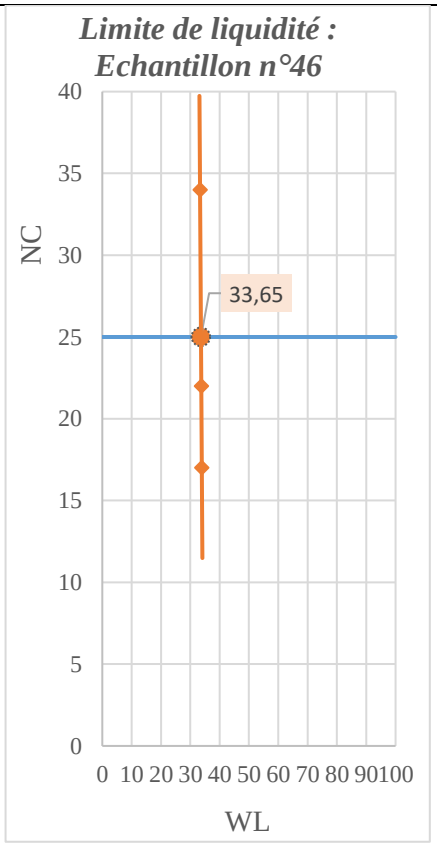

Courbe granulometrique : Echantillon n°44
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°44
41,45
NC
WL
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

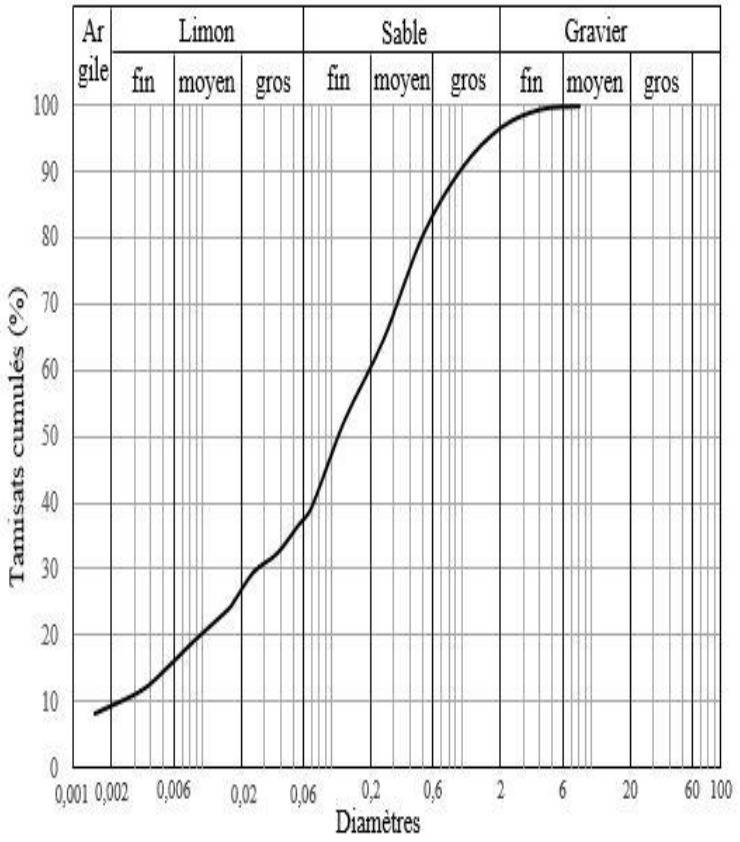

Courbe granulometrique : Echantillon n°45
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°45
39,11
NC
WL
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

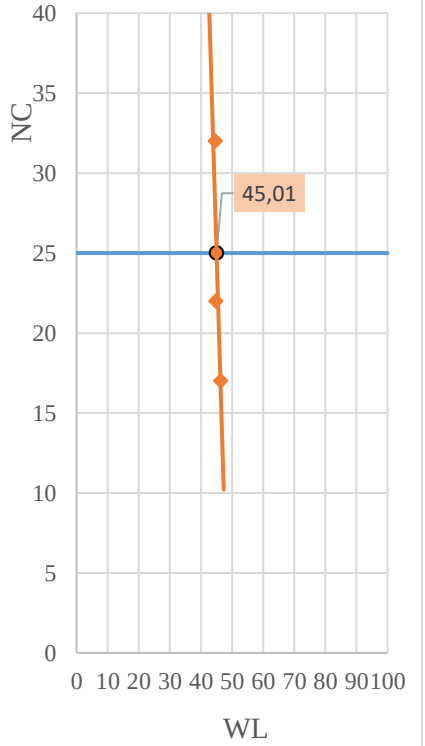

Courbe granulometrique : Echantillon n°46
Ar gile
Limon
Sable
Gravier
fin
moyen
gros
Tamisats cumulés (%)
Diamètres
0,001 0,002 0,006 0,02 0,06 0,2 0,6 2 6 20 60 100


Limite de liquidité : Echantillon n°46
33,65
NC
WL
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100

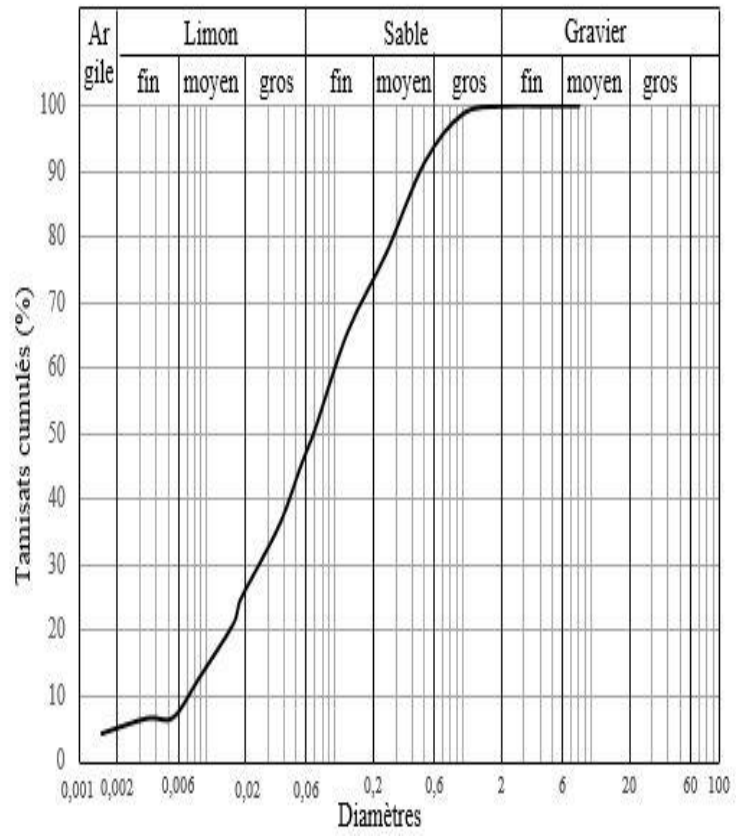
Courbe granulometrique : Echantillon n°47



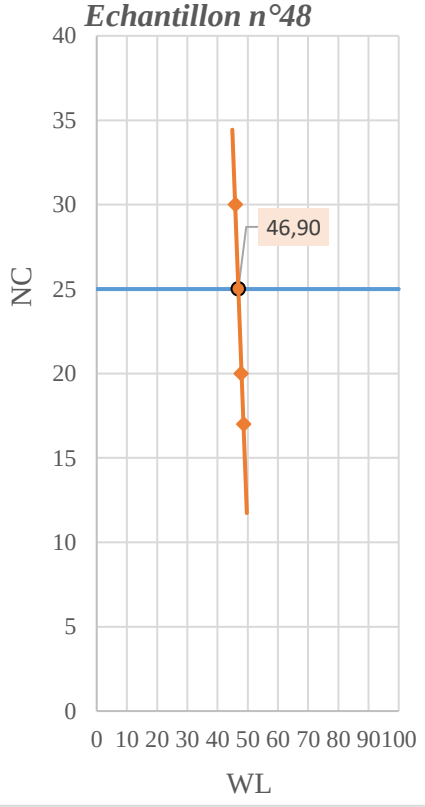
Limite de liquidité : Echantillon n°47



Courbe granulometrique : Echantillon n°48



Limite de liquidité : Echantillon n°48



BIBLIOGRAPHIE

Ahmed, B. (2017). Types de solutions de construction sur sols gonflants . OUARGLA : UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA .

ARGIC, P. (2009). Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions. paris: Armines-Centre de Géosciences.

Bahya, A. A. (2016). *CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA FISSURATION DES ARGILES.* Algerie: Université de Tlemcen.

BELABBACI, Z. (2014). *STABILISATION DES SOLS GONFLANTS.* Universite Aboubakar: Laboratoire Risk Assesment and Management "risAM" - Tlemcen.

BENABED, M. L. (2006). Stabilisation physico-chimique des sols gonflants (sable de dune + sel). 11.

CHRÉTIEN, M. (2008). Recherche des paramètres d'identification géotechnique optimaux pour une classification des sols sensibles au retrait-gonflement. 16.

civil, I. d. (2007). Stabilisation chimique de deux sols gonflantsde de la région d'Oran. 11.

Duy, T. V. (2013). Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux. Liège: Université de Liège .

FLEUREAU, A. e.-M. (1999). Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. 15.

FLEUREAU, A. J.-M. (1999). Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants quelques sols gonflants. 11.

forestier, c. p. (2016). Argiles, limons et stabilisation des sols. 13.

GLEN LÉGÈRE, I. (2001). *ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA STABILISATION A LA CHAUX*. MONTRÉAL: UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

GLEN LÉGÈRE, I. (2001). *ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA STABILISATION A LA CHAUX DES SOLS ARGILEUX EN VOIRIE FORESTIÈRE*. QUÉBEC: UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

Grégory MEYER1, L. B. (2016). IMPACT DU COMPORTEMENT DES ARGILES GONFLANTES SUR LES SOUTENEMENTS. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Nancy 2016 , 9.

Hallaire, V. (1987). Retrait vertical d'un sol argileux au cours du. archives ouvertes, 8.

Hallaire, V. (1987). Retrait vertical d'un sol argileux au cours du des dessèchement.Mesures de l'affaissement et conséquences structurales. *HAL Id: hal-00885036*, 8.

Hamza, D. H. (2018). Amélioration des sols. Algerie: Université 8 Mai 1945 de Guelma.

J. P. MOLARD, J. P. (1987). Etude de l'extrusion et de la stabilisation par leciment d'argiles monominerales. Materials and Structures/MatOriaux et Construction, 2.

JACQUARD, C. (2015). APPRECIER LES EFFETS DU RETRAIT GONFLEMENT A PARTIR D'ESSAIS CLASSIQUES. Symposium International SEC 2015 International Symposium, 10.

JACQUARD1, C. (2015). CARACTERISATION OF SHRINKAGE AND SWELLING OUT OF USUALGEOTECHNICAL LABORATORY TESTS. Symposium International SEC 2015 International Symposium, 10.

Larisa CHINDRIS, D. P. (2017). EXPANSIVE SOIL STABILIZATION - GENERAL CONSIDERATIONS. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference *SGEM 2017*, 9.

M. LAMARA, M. K. (2006). Stabilisation physico-chimique des sols gonflants (sable de dune + sel). 11.

MASEKANYA, J.-P. (2008). *Stabilité des pentes et saturation partielle Etude expérimentale et modélisation numérique.* Liège: UNIVERSITE DE LIEGE.

MEHENNI, A. (2018). *COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE ET ÉROSION DES SOLS FINS TRAITÉS* . Lorraine: Université de Lorraine.

Mohamed, A. F. (2015). *Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux.* Algerie: Université Hassiba Benbouali de Chlef.

Mohamed, B. (2011). *Étude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane.* UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM .

Nancy. (2016). IMPACT DU COMPORTEMENT DES ARGILES GONFLANTES SUR LES SOUTENEMENTS. *EGIS Géotechnique, Grenoble, France*, 9.

NEBATI, N. D. (2016). *STABILISATION DES SOLS FINS.* Algerie: universite Aboubekr belkaid Tlemcen.

NGUYEN, T.-T.-H. (s.d.). *Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel.* paris: Université Paris-Est.

Nowamooz, H. (2008). *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et.* École Nationale Supérieure de Géologie.

Ouadah, A. D. (2009). Paramètres d'état et gonflement des sols argileux, exemple de la teneur en eau et de la densité sèche initiale. *Colloque International Sols Non Saturés et Environnement UNSATlemcen09*, 9.

PHILIPPONNAT, G. (1991). Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. 18.

PHILIPPONNAT, G. (1991). Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. 18.

SAADI, M. K. (2017). *Stabilisation des sols gonflant avec la chaux, cas de la region de MILA.* MILA: UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI.

selma, O. (2018). *EFFET DU TRAITEMENT DES SOLS LIMONEUX PAR LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE.* Algerie: UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI .

SERTIER, N. (2006). *Amélioration des sols.* université de la réunion.

SZYMKIEWICZ, F. (2011). *Evaluation des propriétés mécaniques du matériau Soil-Mixing.* PARIS-EST: L'UNIVERSITE PARIS-EST.

TRAN, T. D. (2014). *Rôle de la microstructure des sols argileux dans les processus de retrait-gonflement : de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle de la chambre environnementale.* Paris: l'École nationale supérieure des mines de Paris.