

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DE MOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA**



**Faculté de Technologie**  
Département de Génie Civil

**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL**

Spécialité : Géotechnique

Thème :

---

**ETUDE EXPERIMENTALE COMPARATIVE ENTRE LES DEUX METHODES**  
**DE DETERMINATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE**

---

Réalisé par :

**Chetouane Dounia**

**Tahrat Asma**

Encadré par :

Dr. Younes Abed

Mr. Karim Malki

U.S.D.B

U.S.D.B

Promoteur

Co-Promoteur

Blida, Novembre 2022



## RESUME

---

Les limites d'Atterberg sont des paramètres indispensables à tout dimensionnement d'ouvrages géotechniques. Pour déterminer ces paramètres on dispose de plusieurs types d'essais, en l'occurrence les essais de laboratoires (Casagrande, pénétromètre à cône).

Le présent travail consiste d'une part à déterminer la limite de liquidité et de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes (méthode de Casagrande et méthode du pénétromètre à cône) et d'autres parts à étudier l'effet de l'ajout du sable sur les résultats. Sur la base des résultats obtenus, une corrélation entre les deux types d'essai est proposée et comparée aux corrélations trouvées dans la littérature.

Les mots clés : les limites d'Atterberg, la limite de liquidité, la méthode de pénétromètre à cône et la méthode de casagrande.

## ABSTRACT

---

The Atterberg limits are essential parameters for any dimensioning of geotechnical structures. To determine these parameters, several types of tests are available, in this case laboratory tests (Casagrande, cone penetrometer).

The present work consists on the one hand in determining the liquid limit and comparing the results obtained by the two methods (Casagrande method and cone penetrometer method) and on the other hand in studying the effect of the addition of sand on the results. Based on the results obtained, a correlation between the two types of test is proposed and compared to the correlations found in the literature.

The keywords: the Atterberg limits, the liquid limit, the cone penetrometer method and the casagrande method.

## ملخص

---

حدود أتبرغ هي معايير أساسية لأي تصميم للهياكل الجيوتقنية. لتحديد هذه المعايير، تتوفر عدة أنواع من التجارب المخبرية الجيوتقنية، ومن بين هذه التجارب: تجربة مقياس الاختراق المخروطي، تجربة كاساغراندي.

هذا العمل يتمثل في تحديد حد السيولة لعينات مختلفة من الطين ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من الطريقتين (طريقة مقياس الاختراق المخروطي وطريقة كاساغراندي). ومن ناحية أخرى دراسة تأثير إضافة الرمال على النتائج المتحصل عليها.

بناءً على النتائج المتحصلة، تم اقتراح علاقة بين نوعي الاختبارات ومقارنتها بالعلاقات الموجودة في الأبحاث السابقة.

الكلمات المفتاحية: حدود أتبرغ، حد السائل، طريقة الاختراق المخروطي وطريقة كاساغراندي.



## *Remerciements*

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma  
profonde gratitude à notre cher professeur et  
encadrant Mr. Abed. Younes pour son suivi et pour  
son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer  
tout au long de la période du projet.*

*Je tiens à remercier également notre Co- encadrant  
Mr. Malki. Karim pour le temps qu'il a consacré et  
pour les précieuses informations qu'il nous  
prodiguées avec intérêt et compréhension. L'adresse  
aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys  
pour avoir bien voulu examiner et juger notre  
travail.*

# *Dédicace*

*De dieu tout puissant, qui trace le chemin de ma vie.*

*A ma mère رَحْمَهَا اللهُ*

*A mon très cher père « Arab » qui m'a toujours encouragé, tu m'a pleinement soutenu par tous les moyens, tu as tout mis à ma disposition je n'ai jamais manqué de rien ...tu es toujours là quand j'ai besoin de toi ... rien ne saurait exprimer l'estime, le respect et l'amour que j'ai pour toi.*

*A mes deux grands-sœurs et leurs maris qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.*

*A ma petite sœur*

*A mes chers neveux qui font le printemps de ma vie.*

*ASMA.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

- A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père «Hacene».*
- A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère «Nacera».*
- A mes chères sœurs, qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*
- A mon grand - mère et ma tante. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*
- A ma meilleure amie «Selma» qui a aidé et m'a soutenu dans les moments difficiles.*
  - A tous les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant surtout «Warda »et «Manel ». Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*
- Sans oublier mon binôme «Asma» pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

**DOUNIA.**

## Table des matières

---

**Résumé**

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Sommaire**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Liste des symboles**

**Introduction générale**

### **Chapitre I : Synthèse Bibliographique traite les méthodes de mesure des limites d'Atterberg.**

1.1	Introduction .....	14
1.2	Définition des limites d'atterberg.....	14
1.3	Définition des sols (NF XP 94-010).....	14
1.4	Formation des sols.....	15
1.5	Généralité sur les argiles .....	16
1.5.1	Définition de l'argile .....	16
1.5.2	Origine des argiles .....	16
1.5.3	Structure d'argile.....	17
1.5.4	Les propriétés des minéraux argileux.....	17
1.5.5	Les types d'argiles .....	18
1.5.6	Activité des argiles.....	19
1.5.7	Classification des argiles selon la couleur .....	20
1.6	La teneur en eau.....	21
1.7	Les limites d'Atterberg .....	22
1.7.1	Histoire des limites d'Atterberg .....	22
1.7.2	Définition des limites d'Atterberg (NF P 94-051) .....	22
1.7.3	Les états des limites d'Atterberg .....	22
1.7.4	L'indice de plasticité.....	23
1.7.5	Classification selon LCPC .....	24
1.8	Détermination de la limite de liquidité par la méthode du cône de pénétration.....	25
1.8.1	Historique de l'essai.....	25
1.8.2	Mode opératoire .....	26
1.8.3	Limite de liquidité FCT.....	27
1.8.4	Exécution de l'essai Après imbibition.....	28

## Table des matières

---

1.9	Détermination de la limite de liquidité par la méthode de Casagrande.....	29
1.9.1	Historique de l'essai.....	29
1.9.2	Définition de l'appareil.....	29
1.9.3	Principe de l'essai.....	30
1.9.4	Appareillage.....	30
1.9.5	Mode opératoire.....	30
1.10	Détermination de la limite de plasticité WP.....	31
1.10.1	L'indice de plasticité IP.....	32
1.11	Comparaison entre la méthode de Casagrande et la méthode de pénétromètre a cône	32
1.12	Conclusion.....	33

## **Chapitre II : programme expérimentale, réalisation des essais et présentation des résultats.**

2.1	Introduction.....	35
2.2	Présentation des matériaux utilisés.....	35
2.2.1	Sol naturels.....	35
2.2.2	Sols reconstitués.....	36
2.3	Préparation des sols naturels.....	37
2.4	Présentation des essais de laboratoire effectués.....	38
2.4.1	Détermination de la limite de liquidité.....	38
2.4.1.1	Essai de la coupelle de Casagrande (NFP 94-051)..	38
2.4.1.2	Essai Fall cône test FCT (NFP94 052-1- BS 1377:2).....	39
2.4.1.2.1	Présentation de l'appareil FCT.....	39
2.4.1.2.2	Mode opératoire.....	41
2.5	Détermination de la limite de plasticité $\omega_p$ .....	43
2.5.1	Mode opératoire.....	44
2.6	Présentation des résultats.....	45
2.6.1	Détermination de la limite de liquidité.....	45
2.6.1.1	Méthode de la coupelle de Casagrande.....	45
2.6.1.2	Méthode de FCT.....	46
2.7	Conclusion.....	48

## Table des matières

---

### **Chapitre III : Dépouillement, interprétation des résultats, l'établissement de corrélation entre les deux méthodes et comparaison.**

3.1 Introduction .....	50
3.2 Calcul de l'indice de plasticité .....	50
3.3 L'effet de l'ajout de sable sur la limite de liquidité de l'argile jaune 2.....	51
3.4 Comparaison des valeurs de limite de liquidité obtenues à partir de la méthode de coupelle de Casagrande et le FCT aux pénétrations 17mm et 20mm .....	53
3.5 Etablissement de corrélations.....	53
3.5.1 Equation de corrélation $\omega_{L(cup)} ; \omega_{L(17)}$ .....	54
3.5.2 Equation de corrélation $\omega_{L(cup)} ; \omega_{L(20)}$ .....	55
3.6 Comparaison des équations de corrélation obtenues avec celles des études antérieures...	56
3.7 Comparaison de corrélation de $\omega_{L(17)} = f \omega_{L(cup)}$ avec la littérature.....	61
3.8 Comparaison de corrélation de $\omega_{L(20)} = f \omega_{L(cup)}$ avec la littérature .....	62
3.9 Comparaison de corrélation de $\omega_{L(17)} = f \omega_{L(cup)}$ avec la littérature de même cône (30°, 80g).....	63
3.10. Comparaison de corrélation de $\omega_{L(20)} = f \omega_{L(cup)}$ avec la littérature de même cône (30°, 80g).....	64
3.11 Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale</b>	<b>66</b>
<b>Reference</b>	<b>67</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

### **Chapitre I : Synthèse Bibliographique sur les méthodes de mesure des limites d'Atterberg.**

Tableau 1.1 : Activité des minéraux argileux.....	20
Tableau 1.2 : Classe d'activité des argiles.....	20
Tableau 1.3 : Classification selon IP.....	23
Tableau 1.4 : Un résumé des différentes normes existantes Limite de liquide FCT.....	27

### **Chapitre II : Programme expérimentale, réalisation des essais et présentation des résultats.**

Tableau 2.1 : Caractéristiques du cône et de sa tige.....	40
Tableau 2.2 : Résultats des essais de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.....	45
Tableau 2.3 : Résultats des essais de détermination de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande utilisés pour l'étude comparative.....	46
Tableau 2.4 : Essais de détermination de limite de liquidité par la méthode de FCT.....	47
Tableau 2.5 : Essais FCT utilisés pour l'étude comparative.....	48

### **Chapitre III : Dépouillement, interprétation des résultats, l'établissement de corrélation entre les deux méthodes et comparaison.**

Tableau 3.1 : Classification des sols testés.....	51
Tableau 3.2 : Effet de l'ajout du sable sur l'évolution de la limite de liquidité.....	51
Tableau 3.3 : Valeurs de $\omega_{L(17)}$ ; $\omega_{L(20)}$ et $\omega_{L(cup)}$ des sols testés.....	53
Tableau 3.4 : Corrélations des travaux antérieurs.....	56
Tableau 3.5 : Comparaison entre et $\omega_{L(17)}$ les 15 corrélations.....	60
Tableau 3.6 : Comparaison entre $\omega_{L(20)}$ et les 15 corrélations.....	60

## LISTE DES FIGURES

---

Chapitre I : Synthèse Bibliographique sur les méthodes de mesure des limites d'Atterberg.

Figure 1.1 : Les états des sols.....	14
Figure 1.2 : Structure des argiles.....	17
Figure 1.3 : La structure minérale de la montmorillonite.....	18
Figure 1.4 : La structure minérale d'illite.....	18
Figure 1.5 : La structure minérale des kaolinites.....	19
Figure 1.6 : les états de sol.....	23
Figure 1.7 : Classification selon LCPC.....	24
Figure 1.8 : Composants du FCT.....	26
Figure 1.9 : Le cône et sa tige.....	27
Figure 1.10 : Le malaxage du sol.....	28
Figure 1.11 : Appareillage de Casagrande.....	30
Figure 1.12 : Préparation du rouleau pour la détermination de WP.....	31

## **Chapitre II : Programme expérimentale, réalisation des essais et présentation des résultats.**

Figure 2.1 : Argile jaune 1prélevée au lieu-dit Oued El Maleh commune de Boughezoul – wilaya de Médéa.....	35
Figure 2.2 : Argile grise prélevée de la région Tessala El-Mardja, wilaya d'Alger.....	36
Figure 2.3 : Argile jaune 2prélevée au lieu-dit Maskoni commune de Benchicao–wilaya de Médéa.....	36
Figure 2.4 : Etapes de préparation des échantillons.....	37
Figure 2.5 : Essai de détermination de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.....	38
Figure 2.6 : Appareil de FCT utilisé avec cône de 80g et 30° .....	39
Figure 2.7 : Le cône et la tige.....	40
Figure 2.8 : L'horizontalité du socle.....	41
Figure 2.9 : Remplissage de la coupelle métallique.....	41

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 2.10 : Réglage de la position de la pointe du cône.....	42
Figure 2.11 : Enfoncement du cône dans le sol.....	42
Figure 2.12 : Prélèvement du sol pour mesurer la teneur en eau.....	43
Figure 2.13 : Méthode de détermination de $\omega_p$ .....	44

### **Chapitre III : Dépouillement, interprétation des résultats, l'établissement de corrélation entre les deux méthodes et comparaison.**

Figure 3.1 : Effet de l'ajout de sable sur la limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité (argile jaune2).....	52
Figure 3.2 : Corrélation $\omega_{L(cup)} ; \omega_{L(17)}$ .....	54
Figure 3.3 : Corrélation $\omega_{L(cup)} ; \omega_{L(20)}$ .....	55
Figure 3.4 : Comparaison des corrélations.....	58
Figure 3.5 : Comparaison de corrélation de $\omega_{L(17)}$ .....	61
Figure 3.6 : Comparaison des corrélations de $\omega_{L(20)}$ .....	62
Figure 3.7 : Comparaison des corrélations $\omega_{L(17)}$ du cône (30°, 80g).....	63
Figure 3.8 : Comparaison des corrélations $\omega_{L(20)}$ du cône (30°, 80g).....	64

## LISTE DES SYMBOLES

---

$M_w$  : Masse d'eau.

$M_d$  : Masse de sol sec.

$\omega_L$  : La limite de liquidité .

$\omega_p$  : La limite de plasticité .

$W_r$  : La limite de retrait.

$I_p$  : Indice de plasticité.

$A_c$  : Activité .

$M$  : Masse de sol humide.

$W$  : Teneur en eau.

$C_2$  : Teneur en particules de dimensions inférieures à  $2\mu\text{m}$ .

$L_t$  : Les limons très plastiques .

$L_p$  : Les limons peu plastiques .

$A_t$  : Les argiles très plastiques.

$A_p$  : Les argiles peu plastiques.

## LISTE DES SYMBOLES

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Les sols argileux sont différents, tout comme les propriétés techniques à divers degrés d'humidité. Ainsi, la frontière entre chaque état peut être définie en fonction d'un changement de comportement de l'argile.

Le scientifique suédois Albert Atterberg a été le premier à définir les limites de la consistance du sol pour la classification des sols à grains fins et plus tard, elles ont été affinées par Arthur Casagrande. Selon la teneur en eau d'un sol, le sol peut être dans l'un des quatre états suivants : solide, semi-solide, plastique et liquide.

Le pénétromètre à cône connu sous le nom de Fall Cône Test (FCT) est aussi utilisé pour la détermination des limites d'Atterberg. Il est même introduit dans l'Eurocode 7.

Ces méthodes sont toujours utilisées pour déterminer la limite de liquidité. La détermination de la limite de liquidité faite généralement en Algérie par l'utilisation de l'appareil de Casagrande.

L'essai Fall Cône Test, n'est utilisé en Algérie que rarement. Afin de donner plus d'importance à cet appareil, nous proposons le présent travail qui rentre dans le cadre d'un thème de recherche sur l'étude expérimentale comparative entre les deux méthodes de déterminations de la limite de liquidité.

Le travail proposé est scindé en trois chapitres, organisés comme suit :

Le premier chapitre intitulé synthèse bibliographique traite les méthodes de mesure des limites d'Atterberg.

Le deuxième Chapitre présente le programme expérimental, la réalisation des essais et la présentation des résultats.

Le dernier chapitre concerne le dépouillement et l'interprétation des résultats et l'établissement de corrélation entre les deux méthodes et comparaison avec la littérature.

A la fin, une conclusion générale est proposée pour récapituler les résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

# **CHAPITRE 01**

## **Synthèse bibliographique sur les méthodes de mesure des limites d'Atterberg.**

### 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les limites d'Atterberg ainsi que les méthodes de mesure de ces limites.

Ces définitions nous permettent de savoir quelles sont les limites de l'Atterberg et leur importance dans la connaissance du type de sol, et donc de savoir ce que nous présenterons dans d'autres chapitres.

### 1.2. Définition des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques générales qui expriment des différences de comportement mécanique du sol, les différences sont principalement liées aux modifications de la teneur en eau. Ils correspondent en principe à des seuils de passage de l'état solide à l'état plastique (limite plastique  $\omega_p$ ) et passage de l'état plastique à l'état liquide (limite de liquidité  $\omega_L$ ).

L'intervalle entre ces deux limites définit le domaine plastique, appelé indice de plasticité.

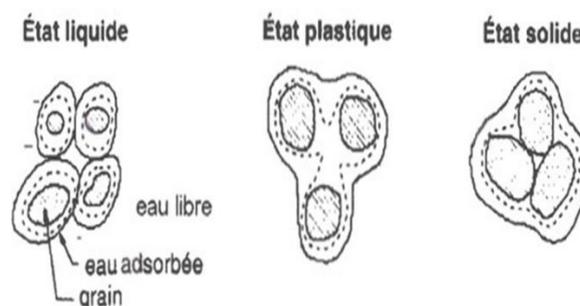


Figure 1.1 : Les états des sols.

### 1.3. Définition des sols (NF XP 94-010)

Le sol peut être défini comme étant le résultat de la transformation des roches mères sous-jacentes en contact avec l'atmosphère et les organismes sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques. . Êtres sensibles.

Selon la norme (NF XP 94-010), le sol est défini comme une masse composée de particules solides pouvant être séparées par broyage dans l'eau, qui est due à la décomposition des roches par des modifications mécaniques ou chimiques sous l'action de facteurs naturels. . , soit de la décomposition d'organismes vivants, végétaux ou animaux, soit d'activités industrielles. [1]

#### 1.4. Formation des sols

La formation et l'évolution des sols se font selon trois processus plus ou moins simultanés :

**Processus 1 :** Changements du substratum rocheux La roche mère, qui peut être dure (granit, schiste, grès...), tendre (craie, marne, argile...) ou meuble (sable, pierre concassée, lœss...), est fissurée, en éléments plus fins ; c'est Les effets de la pluie, du vent, du froid et du soleil sont décomposés.

**Processus 2 :** Altération continue de la matière organique Le sol décomposé et altéré est . Composé de minéraux et d'éléments plus ou moins pâteux, qui sont ensuite peuplés d'une flore et d'une faune riches en matières chimiques et organiques, dont l'humus.

**Processus 3 :** Migration verticale des éléments solubles Dans les climats pluvieux, les éléments solubles migrent vers le bas : c'est le lessivage. Dans les climats secs à évaporation intense, les éléments solubles migrent en surface et les enrichissent. La migration de cet élément va créer des couches plus ou moins distinctes dans le sol et déterminer les horizons qui composent le profil pédologique du sol. [2]

## 1.5. Généralité sur les argiles

Le mot argile a deux origines, le latin « Argilla » et le grec « Argillos » qui signifie blanc. Le terme a deux significations, l'une liée à la taille des particules et l'autre liée à la minéralogie. Fait généralement référence à toutes les particules dont la taille est inférieure à 2 $\mu$ m. Le terme « argile » est souvent utilisé pour désigner différentes roches sédimentaires, les cristaux. L'argile n'est pas une, mais plusieurs. Selon leur composition et leur concentration minérale.

### 1.5.1. Définition de l'argile

Historiquement, en géologie et en science du sol, les argiles correspondent à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2  $\mu$ m dans une roche, sont des minéraux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenue par dégradation et altération des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface.

Beaucoup de définitions ont été proposées pour caractériser les argiles, mais elles se ramènent toujours à celle proposée.

L'apparent « il s'agit d'un corps minéral caractérisé spécifiquement par la nature, le nombre et l'arrangement mutuel des atomes » [3]

### 1.5.2. Origine des argiles

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et se sont déposés. Certains dépôts se transforment par diagénèse (déshydratation et compactage) et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllo silicates, Ces derniers sont des minéraux argileux. [4]

### 1.5.3. Structure d'argile

Les sols argileux sont formés d'un assemblage de particules fines dont les unités de base sont des feuillets bidimensionnels élémentaires et organisés en plusieurs couches superposées. Les deux unités structurales de base sont des Feuilletés tétraédriques de silice et octaédriques de alumine conduit à la formation des couches structurales formées par empilement d'ions ou d'hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte.

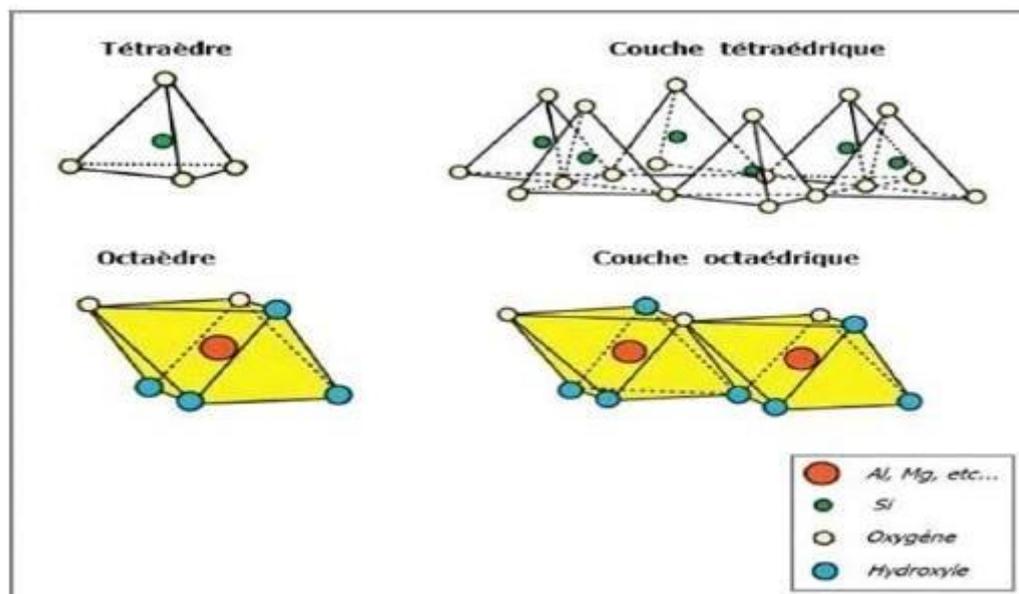


Figure 1.2 : Structure des argiles.

### 1.5.4. Les propriétés des minéraux argileux

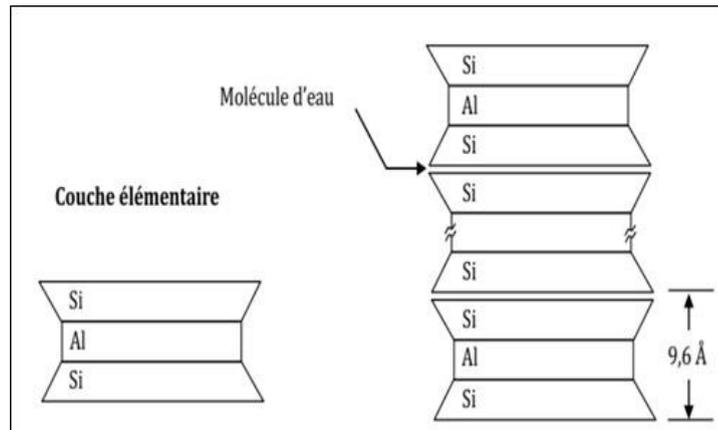
Les types de minéraux argileux sont distingués par :

- La combinaison des feuillets : assemblage de la couche octaédrique à la couche tétraédrique T/O.
- le nombre de feuillets formant le cristal d'argile est variable.
- Le nombre des couches dans le feuillet élémentaire (une ou deux).
- Activité des argiles.

### 1.5.5. Les type d'argiles

- **La montmorillonite :  $n [(Si_4O_{10})(Al_{5/3} Mg_{1/3}) Na_{1/3}(OH)_2]$**

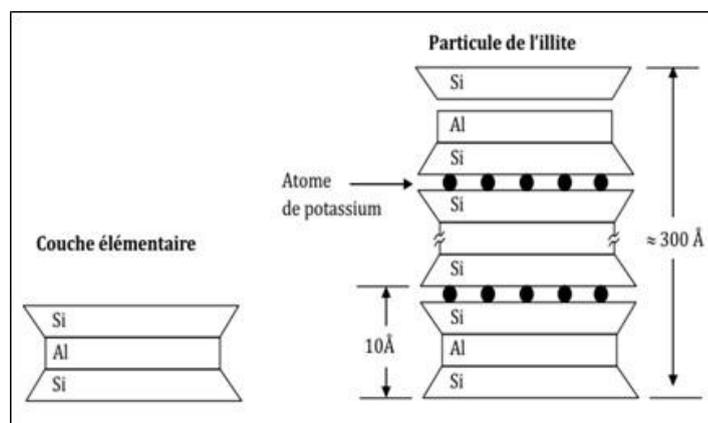
Est un minéral argileux composé d'une couche d'alumine (octaèdre) comprise entre deux couches de silice (tétraèdre). Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque et de taille très petite. La montmorillonite possède une surface spécifique totale entre 700 et 900m<sup>2</sup>/g et un espace inter-feuillets de 9,6 Å à 15 Å.



**Figure 1.3** : La structure minérale de la montmorillonite.

- **L'illite :  $n [(Si_{4-n} Al_nO_{10}) Al_2 K_n (OH)_4]$ .**

Sa composition est riche en calcium (14%), en fer (9%) et pauvre en magnésium, Les particules d'illite sont plates de forme moins régulière que celle des particules de kaolinite. Elles ont un diamètre moyen variant entre 0,1 µm et 3 µm et une épaisseur de l'ordre de 0,01µm à 0,3 µm a une surface spécifique totale de l'ordre de 65 à 100 m<sup>2</sup>/g.



**Figure 1.4** : La structure minérale d'illite.

- Les kaolinites n [(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) Al<sub>2</sub> (OH) 4] (T-0 ou 1 :1)

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de silice (tétraèdre) et d'alumine (octaèdre). Chaque couche élémentaire a une épaisseur de 7 Å.

Elles ont une épaisseur de l'ordre de 0,1 mm et une largeur de 1mm et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas 45 m<sup>2</sup>/g.

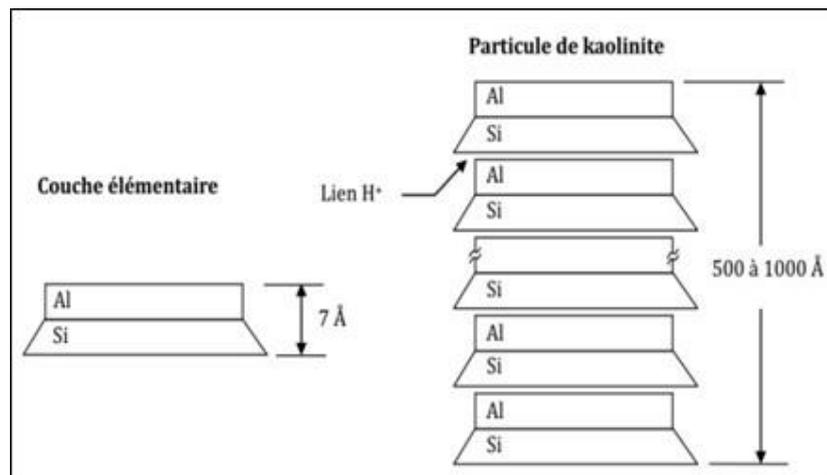


Figure 1.5 : La structure minérale des kaolinites

### 1.5.6. Activité des argiles

Par définition L'activité AC, c'est le rapport de l'indice de plasticité  $I_p$  à la teneur en particules argileuses ( $C_2$  : teneur en particules de dimensions inférieures à  $2\mu\text{m}$ ) :

$$Ac = \frac{I_p}{C_2} \dots\dots\dots(1.1)$$

Elle dépend de la nature minéralogique de sol.

Le tableau suivante (Tableau 1.1) donne les activités des quelques particules argileuses les plus courantes.

**Tableau 1.1** : Activité des minéraux argileux.

Type de minéral	Activité Ac
Quartz	0
Calcite	0.18
Kaolinite	0.46
Illite	0.90
Montmorillonite sodique	7.5
Montmorillonite calcique	1.5

-Les sols argileux peuvent être en classes En fonction de la valeur de l'activité AC.

**Tableau 1.2** : classe d'activité des argiles.

Activité Ac	Dénomination
$0 < Ac < 0.5$	Inactif
$0.5 < Ac < 0.75$	Peu actif
$0.75 < Ac < 1.25$	Normal
$1.25 < Ac < 2$	Actif
$2 > Ac$	Très actif

### 1.5.7. Classification des argiles selon la couleur

Les argiles ne sont pas identifiées par leur couleur. Une couleur peut être attribuée à plusieurs types d'argiles, La variation de la couleur constatée est fonction de la concentration en oxyde de fer.

**a) Verte** : Les argiles vertes présentent une faible teneur en fer, ce sont généralement les montmorillonites, les illites et les smaltites.

**b) Blanche** : Ces argiles ne contiennent aucune substance colorée. Leur formation n'a donc pas été perturbée, elle a été uniforme. On retrouve le plus souvent des kaolinites mais également des smaltites.

- c) **Rose** : Ces roches argileuses ne sont pas retrouvées au naturel, telles quelles. Il s'agit d'un mélange d'argile rouge et d'argile blanche. Ce mélange a pour but d'augmenter la concentration en oligo-éléments de l'argile blanche tout en diminuant la concentration en fer de l'argile rouge.
- d) **Rouge** : Généralement des illites, ces argiles sont riches en oxyde de fer.
- e) **Jaune** : Ces illites riches en oxyde de fer et magnésie.

#### 1.6. La teneur en eau : (NF P 94-049-1)

Selon la norme (NF P 94-049-1) ; la teneur en eau (W) est rapport de la masse de l'eau interstitielle ( $M\omega$ ) par la masse des grains solides (Md). [5]

$$W = \frac{M\omega \times 100}{Md} \dots\dots\dots(1.2)$$

Avec :

W : masse de sol humide

$M\omega$  : masse d'eau

Md : masse de sol sec

## 1.7. Les limites d'Atterberg

### 1.7.1. Histoire des limites d'Atterberg

En 1911, le chimiste et agronome suédois Albert Atterberg fut le premier à définir les limites de la consistance des sols pour la classification des sols à grains fins. Il a constaté que la plasticité est une propriété unique des sols cohésifs (argile et limon) et a suggéré de classer les sols ayant une taille de particule de  $2\mu\text{m}$  (0,002mm) ou moins comme argiles. Karl Terzhagi et Arthur Casagrande ont reconnu la valeur de la caractérisation de la plasticité des sols pour les applications géotechniques au début des années 1930. Casagrande affiné et standardisé les tests, et ses méthodesencore déterminer le liquide.

### 1.7.2. Définition des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité( $\omega_L$ ),
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité( $\omega_P$ ).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. [6]

### 1.7.3. Les états des limites d'Atterberg

Les essais sont réalisés en laboratoire et mesurent la cohésion du sol et son taux d'humidité, pour lesquels ils forment de petits cylindres d'épaisseur avec le sol. Suite à ces procédures, trois restrictions sont définies :

- Limite de liquidité : C'est la teneur eau à partir de laquelle une argile donnée cesse d'avoir un comportement de solide et commence à s'écouler sous son poids propre comme un liquide.
- Limite de plasticité : C'est la teneur en eau à partir de laquelle, une argile donnée cesse d'être plastique, c'est-à-dire aisément déformable sans fissuration, et devient fragile et sensible à la fissuration dès les petites déformations.

- Limite de rétraction ou de rétrécissement : lorsque le sol passe de semi-solide à solide et se rétrécit à mesure que l'eau est perdue. La teneur en eau à laquelle le sol passe de semi-solide à solide est appelée la limite de retrait.

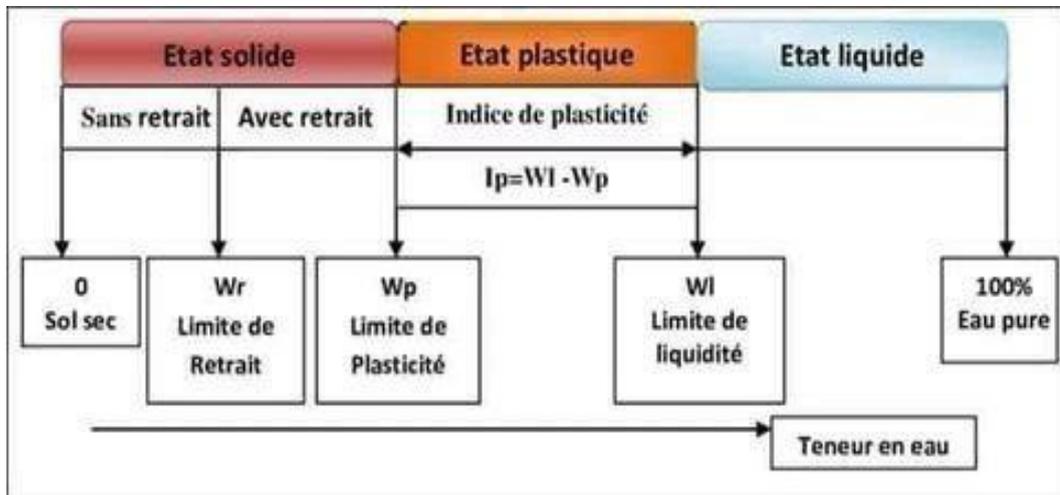


Figure 1.6 : les états de sol.

#### 1.7.4. L'indice de plasticité

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Il renseigne sur l'étendue du domaine plastique du sol.

$$I_p = \omega_L - \omega_p \dots \dots \dots (1.3)$$

Tableau 1.3 : classification selon  $I_p$ .

Indice de plasticité $I_p$ (%)	Degré de plasticité
< 12	Sol non plastique
12 à 25	Sol peu plastique
25 à 40	Sol moyennement plastique
> 40	Sol très plastique

### 1.7.5. Classification selon LCPC

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après. Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- Limons très plastiques : **L<sub>t</sub>**
- Limons peu plastiques : **L<sub>p</sub>**
- Argiles très plastiques : **A<sub>t</sub>**
- Argiles peu plastiques : **A<sub>p</sub>**

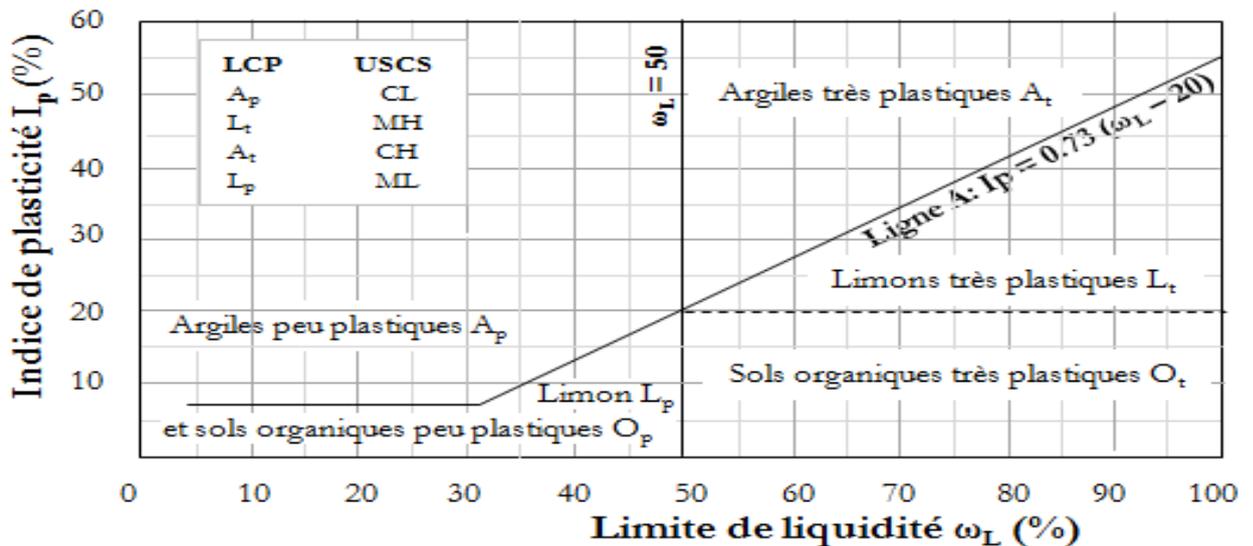


Figure 1.7 : Classification selon LCPC.

**Il existe deux méthodes pour déterminer la teneur en eau correspondant à la limite de liquidité :**

- l'essai au cône de pénétration (NF P94-052-1) [3]
- l'essai à la coupelle de Casagrande (NF P94-051) [2]

**1.8. Détermination de la limite de liquidité par la méthode du cône de pénétration**

**1.8.1. Historique de l'essai**

Ce test a été modifié par Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) pour le bitume (LCPC1966), et a été introduit au Royaume-Uni comme un test pour les sols par Sherwood et Ryley (1970). Ce test est devenu le test standard pour la limite de liquide au Royaume-Uni (BSI1990) et un test appuyé dans la pratique canadienne (CAN/BNQ 1986).

Le test de la norme britannique BS1377 (BSI 1990) est essentiellement un test de dureté dans lequel un cône de 80 g avec un angle de cône de 30° pénètre 20 mm dans un échantillon de sol. La résistance du sol à ce stade est signalée dans la littérature comme étant comprise entre 0,7 et 2,65 kPa, et a été considéré comme étant au centre de cette plage (1,7 kPa) par Wroth et Bois (1978). Ce critère de résistance sera utilisé dans l'analyse présentée dans cet article. Koumoto et Houlsby (2001) donnent une analyse théorique détaillée de la mécanique du test du cône de chute. Cette analyse montre les sensibilités du test (c'est-à-dire l'angle du cône, l'émoussé du cône, rugosité de la surface du cône et soulèvement du cône).

La méthode du cône tombant pour déterminer la limite de liquidité est recommandée par la norme canadienne, britannique et suédoise.

### 1.8.2. Mode opératoire

L'appareil de pénétromètre à cône (NF P 94-052-1), il est constitué d'une base en aluminium et d'une colonne.

Un dispositif mécanique manuel à ressort maintient le cône en place ou le libère.

Il existe deux versions : manuelle et semi-automatique avec minuterie. Cône en en acier inox avec angle au sommet de  $30^\circ$  et une génératrice de longueur 35 mm, L'appareil est livré avec son comparateur de 25mm/0,01mm inverse et un godet de pénétration normalisé de dia.55 x haut.55 mm. [7]

Accessoires recommandés :

- a. Minuterie de 5 secs. +/- 1 sec.
- b. Cône de recharge : VJT/0808CO
- c. Godet de pénétration de rechange : VJT0808CU
- d. Conforme NF P94-052.1

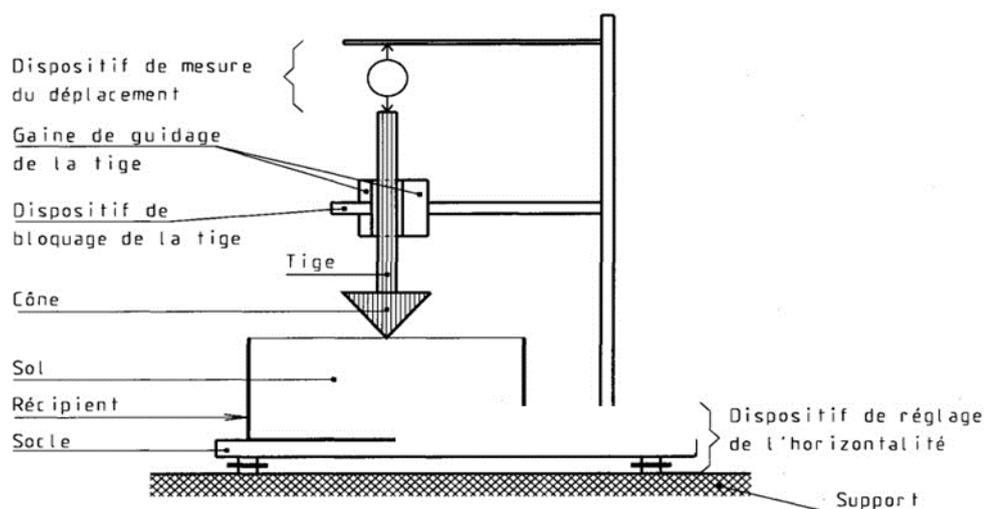


Figure 1.8 : Composants du FCT.

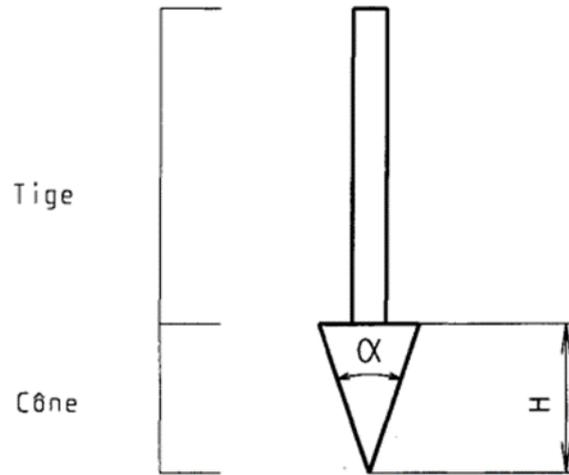


Figure 1.9 : Le cône et sa tige.

### 1.8.3. Limite de liquidité FCT

Le tableau présente un résumé de différentes normes existant de limite de liquidité FCT.

Tableau 1.4 : Un résumé des différentes normes existantes Limite de liquide FCT.

Pays	Russisa	Royaume-Uni	France	India	Australie	Nouvelle-Zélande	Chine	ISO	Suède	Norvège	Canada	Japon
Standard	GOST 5184-49	BS 1377	NF P 94-052-	IS 2720	AS 1289	4402 NZS	128-007-84	ISO/TS 17892-	SS 027120	NS 8002	CAN/BN Q 2501-	JGS 0142
Angle de cône (°)	30	30	30	30, 5	30	30	30	30 60	60	60	60	60
Masse du cône (g)	76	80	80	80	80	80	76	80 60	60	60	60	60
Profondeur de pénétration du cône à la limite de liquide (mm)	10	20	17	20	20	20	17	20 10	10	10	10	11.5

#### 1.8.4. Exécution de l'essai Après imbibition

vider le matériau sur la plaque de marbre. Puis malaxer avec la spatule en ajoutant de l'eau en petite quantité jusqu'à obtenir une pâte presque fluide homogène et exempte de bulle d'air. La consistance de la pâte doit être telle que la pénétration au cône soit de l'ordre de **25 mm**. Ensuite, placer la pâte dans la coupelle cylindrique à l'aide de la spatule en essayant d'éviter l'emprisonnement des bulles d'air.



**Figure 1.10** : Le malaxage du sol.

Le rempli doit être excédentaire pour permettre un arasage parfait avec la règle à araser pour obtenir une surface plane. Placer et centrer la coupelle sous le cône. Descendre le cône jusqu'à ce qu'il affleure à la surface du sol.

La pointe du cône doit juste marquer la surface du sol. Ajuster le comparateur sur le cône et relever position à **0.1 mm** près. Débloquer le cône pendant **5 secondes  $\pm$ 1seconde**.

En faisant très attention de ne pas secouer l'appareil si le déblocage est manuel. Puis bloquer le et faire une deuxième lecture du comparateur. La différence entre les deux lectures représente la pénétration du cône.

Le cône est ensuite remonté et soigneusement nettoyé on ajoute un peu de sol dans la coupelle.

On arase puis on effectue une deuxième mesure si la différence entre les deux valeurs consécutives de pénétration est inférieure à 0,5 mm.

On retient la valeur moyenne. Si la différence entre 0.5 mm et 1.0 mm, une troisième mesure doit être effectuée Si la différence entre les extrêmes des trois mesures est inférieure ou égale à 1.00 mm. La coupelle doit être vidée, Le sol remalaxé et l'essai est recommencé jusqu'à obtention de résultats corrects Prélever à l'aide de la spatule une quantité du matériau qui sera mise dans une coupelle ou boîte de pétri pour la détermination de la teneur en eau. L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pate. Entre chaque opération la pâte est malaxe pour faire baisser la teneur en eau.

Les valeurs de pénétration obtenues doivent s'échelonner entre 15 mm et 25 mm.

## **1.9. Détermination de la limite de liquidité par la méthode Casagrande**

### **1.9.1. Historique de l'essai**

L'appareil standard d'essai limite de liquide a été conçu par Arthur Casagrande dans les années 1930 sur la base de la procédure développée par Albert Atterberg ; par conséquent, l'essai limite de liquide est parfois appelé l'essai de Casagrande.

L'appareil d'essai se compose d'une coupelle Casagrande, également connue sous le nom de dispositif de limite de liquide, et d'un outil de rainurage Casagrande.

### **1.9.2. Définition de l'appareil**

Appareil de Casagrande (**NF P 94-051**), il est constitué d'une coupelle normalisée (coupelle lisse pour la majorité des essais et coupelle rugueuse pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupelle lors de chaque choc), montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois dur. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le socle, chaque choc entraînant la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol jusqu'à sa fermeture d'une distance de 1 cm. [8]



**Figure 1.11 :** Appareillage de Casagrande.

### 1.9.3. Principe de l'essai

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau  $w_l$  pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée.
- Recherche de la teneur en eau  $w_p$  pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

### 1.9.4. Appareillage

Appareil de Casagrande constitué d'une coupelle pouvant recevoir des chocs et d'un outil à rainurer.

### 1.9.5. Mode opératoire

L'échantillon de sol est mis en place dans la coupelle et on trace un sillon avec l'outil à rainurer.

Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.

## 1.10. Détermination de la limite de plasticité $w_p$

À partir de la pâte préparée, former une boulette comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et en faire un cylindre en la roulant sur la plaque de marbre propre ;lisse et sèche Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde.

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de  $\omega_L$ . Le cylindre terminé doit avoir 10 à 15 cm de longueur.

Dans la pratique, procéder ainsi :

- Confectionner le cylindre de 3 mm, S'il se brise avant d'atteindre ce diamètre le matériau est trop sec.
- Il faut alors le remodifier égarement.
- S'Il ne s'est pas brisé. Le soulever en son milieu de 15 à 20mm. La limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement. On effectue alors directement la mesure de la teneur en eau  $\omega$  sur le rouleau de sol.
- Si la rupture ne se produit pas, laisser le teneur en eau diminuer. L'essai est effectué une deuxième fois. Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2 % de la valeur moyenne, si non un nouvel essai est à effectuer.



Figure 1.12 : Préparation du rouleau pour la détermination de  $\omega_L$ .

### 1.10.1. L'indice de plasticité $I_p$

$$\text{Rappelons que : } I_p = \omega_L - \omega_p \dots \dots \dots (1.3)$$

Un sol, dont l'indice IP est grand, est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus IP est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.

### 1.11. Comparaison entre la méthode de Casagrande et la méthode de pénétromètre à cône

Les deux méthodes sont basées sur la résistance au cisaillement du sol. Le pénétromètre à cône par rapport à la méthode de Casagrande est préféré parce que :

- L'appareil de Casagrande rapporte que la résistance du sol à la limite de liquidité est d'environ 2,0 à 2,5 kPa, dans la méthode du cône, la limite de liquidité est mesurée à 1,7 kPa. Par conséquent, il devrait y avoir une certaine variation dans les limites de liquidité entre les deux méthodes.
- La méthode du cône est préférée car elle est sujette à moins d'erreurs.
- En général, la méthode de pénétration du cône donne des valeurs de limites de liquidité plus élevées dans les sols où la limite de liquidité est inférieure à 100 %), tandis que la méthode de Casagrande donne des valeurs de limites de liquidité plus élevées dans les sols où la limite de liquidité est supérieure à 100 %. En pratique, on constate que la plupart des sols ont généralement une limite de liquidité inférieure à 100 %, de sorte qu'il peut être utilisé pour une large gamme de sols.
- Le mode opératoire du pénétromètre à cône est facile à réaliser en comparaison avec celui de Casagrande.

Dans le test au pénétromètre à cône, l'aiguille est progressivement insérée dans un moule rempli de terre jusqu'à ce que la profondeur de pénétration souhaitée soit atteinte. Ainsi, il n'y a pas de déformation soudaine du sol. Mais dans l'appareil de Casagrande, après que la terre a été coupée par un outil de rainurage approprié, la poignée est tournée à raison d'environ 2 tours par seconde, un impact soudain est donné au sol et le nombre de coups comptés, jusqu'à ce que les deux parties de l'échantillon de sol entrent en contact sur une longueur d'environ 10 mm. [9]

**1.12. Conclusion**

Cette étude bibliographique nous a permis de créer le cadre scientifique auquel les principaux points à considérer ceux de comparative entre les deux méthodes de détermination de la limite de liquidité.

Une revue détaillée sur les procédures d'essais de laboratoire, principalement focalisée sur l'essai de pénétromètre à cône, et l'essai de la coupelle de Casagrande sont été exposée. Les constatations établies dans cette partie nous a permis de mettre en exergue l'utilisation de l'essai de pénétromètre à cône pour déterminer les limites de liquidités dans le chapitre suivant.

La comparaison bibliographique sera présentée dans les chapitres suivants.

## **CHAPITRE 02**

**Programme expérimental, réalisation  
des essais et présentation des résultats.**

## **2.1. Introduction**

L'objectif de ce chapitre est l'identification des sols utilisés pour réaliser notre campagne expérimentale sur les sols suivants : argile grisâtre provenant de Tessala El-Mardja (Alger), argile jaune reprenant de Boughezoul (Médéa) et argile jaunâtre provenant de Ben-Chicao (Médéa), la présentation de l'appareillage utilisé, à savoir, le Fall Cone Test (FCT) et l'appareil de casagrande ainsi que la détermination des limites d'Atterberg.

## **2.2. Présentation des matériaux utilisés**

Dans notre campagne expérimentale, nous avons utilisé cinq types de sols de plasticités différentes dont trois sols naturels et deux sols reconstitués.

### **2.2.1. Sol naturels**

Il s'agit de trois types d'argiles dont deux argiles prélevés de la région de Médéa et la troisième de la région d'Alger comme le montre les figures 2-1,2-2 et 2-3.



**Figure2.1** : Argile jaune 1prélevée au lieu-dit Oued El Maleh commune de Boughezoul –wilaya de Médéa.



**Figure2.2** : Argile grise prélevée de la région Tessala El-Mardja, wilaya d'Alger.



**Figure2.3** : Argile jaune 2 prélevée au lieu-dit Maskoni commune de Benchicao–wilaya de Médéa.

### **2.2.2 .Sols reconstitués**

nous avons utilisé deux sols reconstitués en utilisant des mélanges de l'argile jaune 2 avec le sable de dune à des teneurs de 15% et 30%.Le sable utilisé est un sable de dune de Rechaïga wilaya de Tiaret.

L'utilisation des sols reconstitués par l'ajout de sable a deux objectifs :

- Etudier l'effet de l'ajout de sable sur limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité.
- Bien ajuster les équations de corrélation (avoir cinq points mieux que trois points dont deux sont rapprochées).

### 2.3. Préparation des sols naturels

Les trois sols naturels cités ci-dessus extraits sous forme de blocs de dimension peut atteindre 100mm ce qui nécessite un prétraitement pour avoir des échantillons homogènes nécessaire à la réalisation de notre campagne expérimentale. Ce prétraitement consiste à la réalisation des opérations suivantes :

- a) **Imbibition** : La quantité d'échantillon est placée dans un grand récipient en plastique, puis recouverte d'eau et laissée pendant 48 heures.
- b) **Tamissage** : cette opération s'effectue manuellement par voie humide en remuant à l'aide d'un pinceau souple le matériau sur la toile du tamis 400 $\mu$ m
- c) **Décantation et siphonage** : L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac en plastique. Après une durée de décantation d'au moins 12h, l'eau claire du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides.
- d) **Évaporation** : l'eau excédentaire est évaporée dans l'étuve à une température 50°C. on recueille ensuite ces éléments inférieurs à 400 $\mu$ m à l'état pâteux sur lesquels l'essai des limites d'Atterberg sera effectué.

Les étapes de préparation des échantillons sont montrées sur la figure 2.4 ci-dessous :



a) Imbibition.



b) tamisage 400 $\mu$ m.



c) décantation et siphonage.



d) évaporation.

**Figure 2.4 :** Etapes de préparation des échantillons.

## 2.4. Présentation des essais de laboratoire effectués

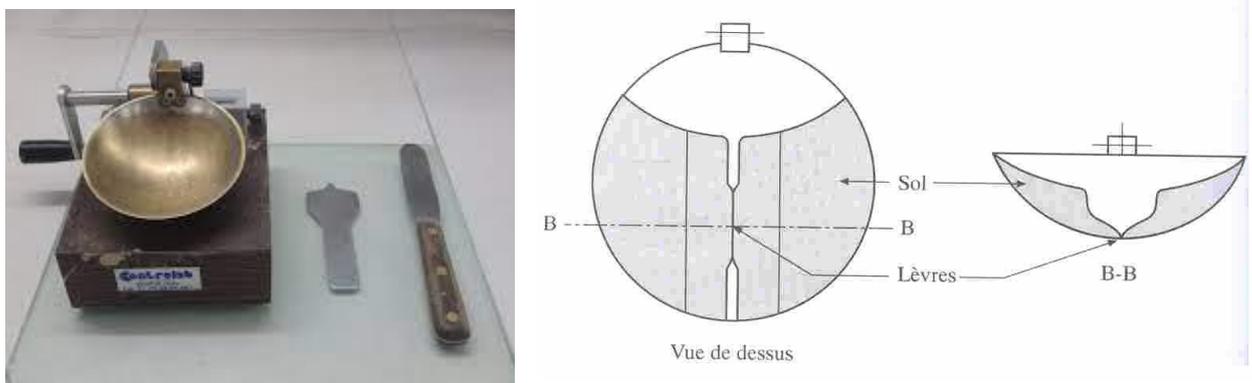
L'ensemble des essais de laboratoire ont été effectués au laboratoire de géotechnique du département de génie civil de l'université de Blida1. Nous avons déterminé la limite de liquidité des sols testés à l'aide de deux méthodes ; celle de la coupelle de Casagrande et celle de la méthode du Fall Cone Test FCT. L'essai FCT fournit deux valeurs de limite de liquidité  $\omega_{L(17)}$  et  $\omega_{L(20)}$  qui correspondent aux pénétrations 17mm et 20mm

La limite de plasticité des sols testés est déterminée à l'aide de la méthode des rouleaux.

### 2.4.1 Détermination de la limite de liquidité

#### 2.4.1.1 Essai de la coupelle de Casagrande (NFP 94-051)

Lors de la détermination de la limite de liquidité avec l'appareil Casagrande, la base de la coupelle est remplie de terre et une rainure est ensuite pratiquée à travers la terre jusqu'à la base de la coupelle. L'appareil est agencé pour permettre à la coupelle en métal d'être soulevée à plusieurs reprises de 10 mm et de tomber librement sur sa base en caoutchouc à un taux constant de deux chocs par seconde. La limite de liquidité est la teneur en humidité d'un sol lorsque 25 coups provoquent 10 mm de fermeture de la rainure à la base de la coupelle. La limite de liquidité est généralement déterminée en mélangeant les sols à des consistances justes humides et sèches de la limite de liquidité et en déterminant la teneur en humidité de la limite de liquidité par interpolation entre quatre points.



**Figure 2.5 :** Essai de détermination de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.

Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs  $N$  à la teneur en eau  $w$ , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques (échelle arithmétique pour les teneurs en eau, logarithmique pour le nombre de chocs), lorsque le nombre est compris entre 15 et 35.

#### **2.4.1.2. Essai Fall cone test FCT (NFP94 052-1- BS 1377:2)**

L'essai consiste à mesurer, après un temps fixé (5 secondes), l'enfoncement d'un cône, sous son propre poids, dans un échantillon de sol remanié imbibé à une teneur en eau qui sera déterminée en utilisant l'étuve.

##### **2.4.1.2.1. Présentation de l'appareil FCT**

L'appareil se compose :

- a) D'un socle avec son dispositif de réglage de l'horizontale et une tige verticale sur laquelle coulisse une pince de blocage ;



**Figure 2.6** : Appareil de FCT utilisé avec cône de 80g et 30°.

b) D'un cône de pénétration constitué d'une tige solidaire d'un cône.

Le cône à surface lisse a un angle au sommet de  $30^\circ$  et une hauteur minimale de 35mm  
La masse totale de la tige et du cône est de 80g ; les caractéristiques du cône et de sa tige sont représentées sur le tableau mentionné ci-dessous.

c) D'un dispositif de mesure du déplacement du cône sans influence sur le déplacement de celui-ci. L'incertitude sur la masse de l'enfoncement du cône doit être inférieure à 0.1mm.

d) D'un récipient cylindrique rigide (verre, métal,...) de plus petite dimension transversale intérieure supérieure ou égale 55 mm et de hauteur supérieure ou égale 35mm, destiné à contenir le sol soumis à l'essai.

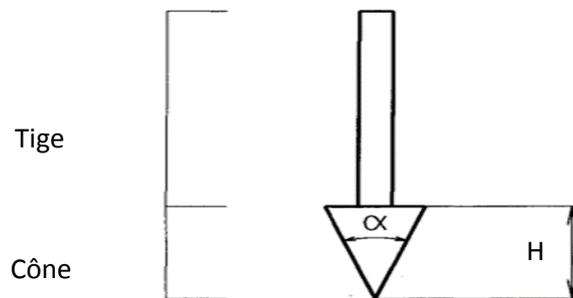


Figure2.7 : Le cône et la tige.

Tableau.2.1 : Caractéristiques du cône et de sa tige.

	Caractéristiques	Unité	Valeur	Tolérance De fabrication	Tolérance D'utilisation
<b>Cône</b>	Hauteur H	mm	$\geq 35$		
	Angle $\alpha$ au sommet	degré	30	$\pm 1$	+ 1 - 2
<b>Tige + cône</b>	<b>Masse totale m</b>	<b>g</b>	<b>80</b>	<b><math>\pm 0.1</math></b>	<b>+ 0.1 - 0.5</b>

#### 2. 4.1.2.2. Mode opératoire

- Régler l'horizontalité du socle.



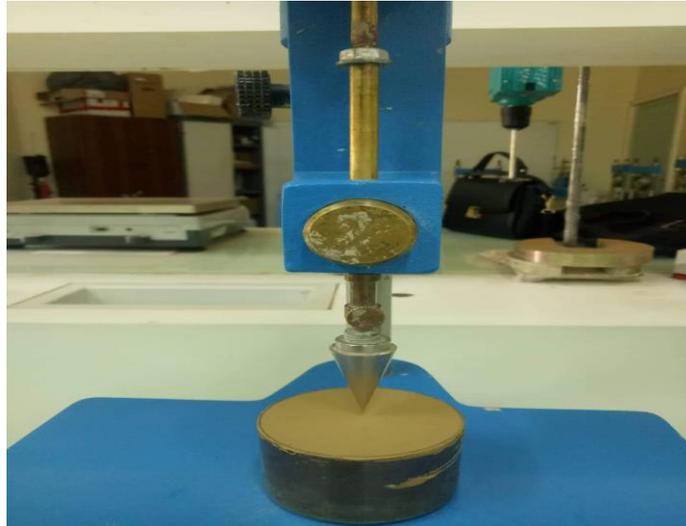
**Figure2.8** :L'horizontalité du socle.

- S'assurer que la pointe du cône est propre et lisse.
- Malaxer sur la plaque lisse, la totalité du tamisât précédemment préparé afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- Remplir le récipient avec une partie de cette pâte au moyen d'une spatule, en prenant soin de ne pas emprisonner de bulles d'air. Araser avec un couteau afin d'obtenir une surface lisse et plane.



**Figure2.9** : Remplissage de la coupelle métallique.

- Mettre en place le récipient rempli de la pâte et ajuster la position de la pointe du cône approximativement au centre de la surface du récipient en faisant coulisser la tige du cône dans la gaine de guidage de façon à ce que la pointe affleure juste la surface du sol. Le cône est dans une position correcte, si en déplaçant le récipient horizontalement la pointe du cône ne laisse qu'une légère trace à la surface du sol.



**Figure 2.10** : Réglage de la position de la pointe du cône.

- Repérer la position du cône.
- Libérer le cône et le laisser s'enfoncer dans le sol pendant ( $5s \pm 1s$ ) puis le bloquer. Noter sa nouvelle position.



**Figure 2.11** : Enfoncement du cône dans le sol.

- Enlever le cône.
- Effectuer un prélèvement de sol dans le récipient, dans la zone de la pénétration du cône. Cette prise d'essai est placée dans une coupelle de masse connue, pesée immédiatement puis introduite dans l'étuve pour dessiccation et mesure de sa teneur en eau conformément à la norme NFP 94 050.



**Figure2.12** : Prélèvement du sol pour mesurer la teneur en eau.

L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente pour chaque essai. La pâte est selon le cas légèrement séchée ou humidifiée avec de l'eau déminéralisée puis homogénéisée. Les enfoncements du cône doivent encadrer 17mm et 20mm. Les enfoncements doivent être situés dans l'intervalle 15 mm à 25mm et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être compris entre 2mm et 5mm inclus.

### **2.5. Détermination de la limite de plasticité $\omega_p$**

La limite de plasticité représente le passage entre l'état plastique et l'état semi-solide d'un sol donnée. Elle se détermine en confectionnant des rouleaux de sol. Elle est définie comme la teneur en eau à partir de laquelle les bâtonnets de sol d'environ 3mm de diamètre et de 100mm de longueur se cassent en morceaux.

### 2.5.1 Mode opératoire

- Prélever une éprouvette d'environ 15 à 20 g de pâte préparé et la placer sur la plaque de malaxage.
- Sécher au moyen d'un léger courant d'air la pâte partiellement jusqu'à ce qu'elle devienne plastique pour faire une boulette.
- Pétrir la boulette entre les doigts et la rouler entre les paumes des mains jusqu'à le sol devient séché et de fines fissures apparaissant à sa surface.
- Diviser la boulette en deux parties égales.
- Diviser une partie en 3 sous - parties.
- Pétrir chacune pour obtenir un rouleau d'environ 6 mm de diamètre.
- Rouler le rouleau en arrière et en avant d'un mouvement régulier à la main, avec une légère pression Jusqu'à ce que le rouleau se brise en morceaux après avoir atteint le diamètre de 3 mm.
- Placer les morceaux des rouleaux dans un récipient.



**Figure2.13** : Méthode de détermination de  $\omega_p$

## 2.6. Présentation des résultats

### 2.6.1. Détermination de la limite de liquidité

#### 2.6.1.1. Méthode de la coupelle de Casagrande

La limite de liquidité  $\omega_{L(cup)}$  est la teneur en eau qui correspond à une fermeture de la rainure sur 1 cm après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales  $(\omega; N)$  portées sur un quadrillage semi-logarithmique.

Le modèle linéaire est estimé par la méthode des moindres carrés et  $R^2$  représente le coefficient de détermination. Lorsqu'il est proche de 1 le pouvoir prédictif du modèle est fort.

Les équations de la droite moyenne pour chaque essai, coefficients de détermination ainsi que les valeurs de limite de liquidité sont portées sur le tableau (2.2).

**Tableau 2.2** : Résultats des essais de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.

Sol	Essai n°	Equation	R <sup>2</sup>	$\omega_{L(cup)}$
<b>Sol naturel-1 Argile jaune 1</b>	1	$\omega = 1,894 \times \ln(N) + 41,19$	0,236	47,29
	2	$\omega = -3,76 \times \ln(N) + 58,32$	0,305	46,22
	3	$\omega = -6,86 \times \ln(N) + 68,24$	0,972	46,16
	4	$\omega = -10,6 \times \ln(N) + 77,54$	0,324	43,42
	5	$\omega = -5,87 \times \ln(N) + 65,6$	0,905	46,71
<b>Sol naturel-2 Argile grise</b>	1	$\omega = -7,72 \times \ln(N) + 76,79$	0,838	51,94
	2	$\omega = -4,86 \times \ln(N) + 67,74$	0,893	52,10
	3	$\omega = -7,38 \times \ln(N) + 76,82$	0,956	53,06
	4	$\omega = -7,84 \times \ln(N) + 76,26$	0,929	51,02
	5	$\omega = -7,52 \times \ln(N) + 75,79$	0,951	51,58
<b>Sol naturel-3 Argile jaune 2</b>	1	$\omega = -5,84 \times \ln(N) + 65,03$	0,91	46,23
	2	$\omega = -7,58 \times \ln(N) + 67,98$	0,848	43,58
	3	$\omega = -4,40 \times \ln(N) + 60,76$	0,949	46,60
	4	$\omega = -6,60 \times \ln(N) + 67,86$	0,709	46,62
	5	$\omega = -6,29 \times \ln(N) + 67,97$	0,984	47,72
<b>Sol reconstitué-1 argile jaune-2 avec 15% sable</b>	1	$\omega = -11,1 \times \ln(N) + 76,47$	0,934	40,74
	2	$\omega = -1,95 \times \ln(N) + 46,08$	0,717	39,80
<b>Sol reconstitué-2 argile jaune-2 avec 30% sable</b>	1	$\omega = -6,26 \times \ln(N) + 56,74$	0,905	36,59

Nous constatons que la plupart des valeurs de limite de liquidité pour chaque sol sont très proches ce qui signifie le protocole de l'essai a été bien respecté. Toutefois, sur la base de ces résultats nous choisissons pour chaque sol une seule droite moyenne correspondant au pouvoir prédictif fort ( $R^2$  proche de 1).

**Tableau 2.3 :** Résultats des essais de détermination de limite de liquidité à la coupelle de Casagrande utilisés pour l'étude comparative.

Sol	Essai n°	équation $w=f(p)$	$R^2$	$\omega_{L(cup)}$
Sol naturel-1 Argile jaune 1	3	$\omega = -6,86 \times \ln(N) + 68,24$	0,972	46,16
Sol naturel-2 Argile grise	2	$\omega = -4,86 \times \ln(N) + 67,74$	0,893	52,10
Sol naturel-3 Argile jaune 2	3	$\omega = -4,40 \times \ln(N) + 60,76$	0,949	46,60
Sol reconstitué-1 Argile jaune-2 avec 15% sable	1	$\omega = -11,1 \times \ln(N) + 76,47$	0,934	40,74
Sol reconstitué-2 Argile jaune-2 avec 30% sable	1	$\omega = -6,26 \times \ln(N) + 56,76$	0,905	36,59

### 2.6.1.2. Méthode de FCT

Dans cette partie, selon la norme utilisée, nous avons deux définitions de la limite de liquidité.

Selon NFP 94 052-1 : La limite de liquidité  $\omega_{L(17)}$  est la teneur en eau qui correspond à un enfoncement de 17mm d'un cône de 80g et 30°.

Selon BS 1377 -2 : La limite de liquidité  $\omega_{L(20)}$  est la teneur en eau qui correspond à un enfoncement de 20mm du cône précité.

La limite de liquidité est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales  $(\omega; p)$  portées sur une échelle arithmétique. Avec  $p$  représente la pénétration qui correspond la teneur en eau  $\omega$ .

Le modèle linéaire est estimé par la méthode des moindres carrés et  $R^2$  représente le coefficient de détermination. Lorsqu'il est proche de 1 le pouvoir prédictif du modèle est fort.

Les équations de la droite moyenne pour chaque essai, coefficients de détermination ainsi que les valeurs de limite de liquidité sont portées sur le tableau n°01 .

**Tableau 2.4 :** essais de détermination de limite de liquidité par la méthode de FCT.

Sol	Essai n°	équation $\omega=f(p)$	$R^2$	$\omega_{L(17)}$	$\omega_{L(20)}$
<b>Sol naturel-1</b> <b>Argile jaune 1</b>	1	$\omega = 0,827 \times p + 31,48$	0,976	45,54	48,02
	2	$\omega = 0,404 \times p + 37,36$	0,134	44,23	45,44
	3	$\omega = 1,023 \times p + 27,15$	0,814	44,54	47,61
	4	$\omega = 1,117 \times p + 26,22$	0,987	45,21	48,56
	5	$\omega = 1,024 \times p + 26,71$	0,98	44,12	47,19
<b>Sol naturel-2</b> <b>Argile grise</b>	1	$\omega = 0,534 \times p + 43,15$	0,905	52,23	53,83
	2	$\omega = 0,614 \times p + 39,87$	0,955	50,31	52,15
	3	$\omega = 0,900 \times p + 35,00$	0,934	50,30	53,00
	4	$\omega = 0,830 \times p + 38,39$	0,968	52,50	54,99
	5	$\omega = 1,044 \times p + 32,20$	0,986	49,95	53,08
<b>Sol naturel-3</b> <b>Argile jaune 2</b>	1	$\omega = 0,786 \times p + 31,25$	0,935	44,61	46,97
	2	$\omega = 0,780 \times p + 31,71$	0,992	44,97	47,31
	3	$\omega = 0,793 \times p + 30,81$	0,992	44,29	46,67
	4	$\omega = 0,790 \times p + 30,96$	0,977	44,39	46,76
	5	$\omega = 1,354 \times p + 20,65$	0,638	43,67	47,73
<b>Sol reconstitué-1</b> <b>Argile jaune-2</b> <b>avec 15% sable</b>	1	$\omega = 0,886 \times p + 24,30$	0,995	39,36	42,02
	2	$\omega = 0,739 \times p + 26,54$	0,958	39,10	41,32
<b>Sol reconstitué-2</b> <b>Argile jaune-2</b> <b>avec 30% sable</b>	1	$\omega = 0,817 \times p + 21,72$	0,995	35,61	38,06

Nous constatons que la plupart des valeurs de limite de liquidité pour chaque sol sont très proches ce qui signifie le protocole de l'essai a été bien respecté. Toutefois, sur la base de

ces résultats nous choisissons pour chaque sol une seule droite moyenne correspondant au pouvoir prédictif fort ( $R^2$  proche de 1).

Les valeurs obtenues sur le tableau ci-dessous seront utilisées pour l'étude comparative.

**Tableau 2.5** : Essais FCT utilisés pour l'étude comparative

Sol	Essai n°	équation $\omega = f(p)$	$R^2$	$\omega_{L(17)}$	$\omega_{L(20)}$
Sol naturel-1 Argile jaune 1	1	$\omega = 0,827 \times p + 31,48$	0,976	45,54	48,02
Sol naturel-2 Argile grise	5	$\omega = 1,044 \times p + 32,20$	0,986	49,95	53,08
Sol naturel-3 Argile jaune 2	3	$\omega = 0,793 \times p + 30,81$	0,992	44,29	46,67
Sol reconstitué-1 Argile jaune-2 avec 15% sable	1	$\omega = 0,886 \times p + 24,30$	0,995	39,36	42,02
Sol reconstitué-2 Argile jaune-2 avec 30% sable	1	$\omega = 0,817 \times p + 21,72$	0,995	35,61	38,06

## 2.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est la détermination des limites d'Atterberg (la limite de liquidité et la limite de plasticité) avec l'appareil de FCT et l'appareil de CASAGRANDE, les équations de la droite moyenne pour chaque essai et les coefficients de détermination ( $R^2$ ) avec une comparaison des valeurs obtenus.

Lors de la réalisation des essais de limites d'Atterberg, on a constaté que les essais à la coupelle de casagrande sont plus sensibles à la manipulation que les essais FCT. Le mode opératoire de l'essai FCT est moins compliqué que l'essai de casagrande.

Les résultats obtenus dévoilent une tendance linéaire dont la précision est fonction de la qualité des essais réalisés.

## **CHAPITRE 03**

**Dépouillement, interprétation des  
résultats, établissement de corrélation  
entre les deux méthodes et comparaison  
avec la littérature.**

### 3.1.Introduction

A partir des résultats des essais réalisés et afin de les exploiter nous procédons à :

- Calculer l'indice de plasticité des sols étudiés pour les classer.
- Etudier l'effet de l'ajout de sable sur la limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité.
- Comparer les valeurs de limite de liquidité obtenues à partir de la méthode de coupelle de Casagrande et celles de FCT aux pénétrations 17mm et 20mm.
- Etablissement des équations de corrélations pour pénétrations de 17mm et 20mm.
- Comparaison des équations de corrélation obtenues avec celles des travaux antérieurs.

### 3.2.Calcul de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Pour toutes les teneurs en eau comprises entre ces deux bornes, le matériau sera dans un état plastique. Plus l'écart est grand, plus la plasticité du sol est élevée.

$$I_p = m_l - m_p$$

Avec  $m_l$  et  $m_p$  obtenus respectivement à partir de l'essai à la coupelle de Casagrande et la méthode de rouleau.

**Tableau 3.1** : Classification des sols testés.

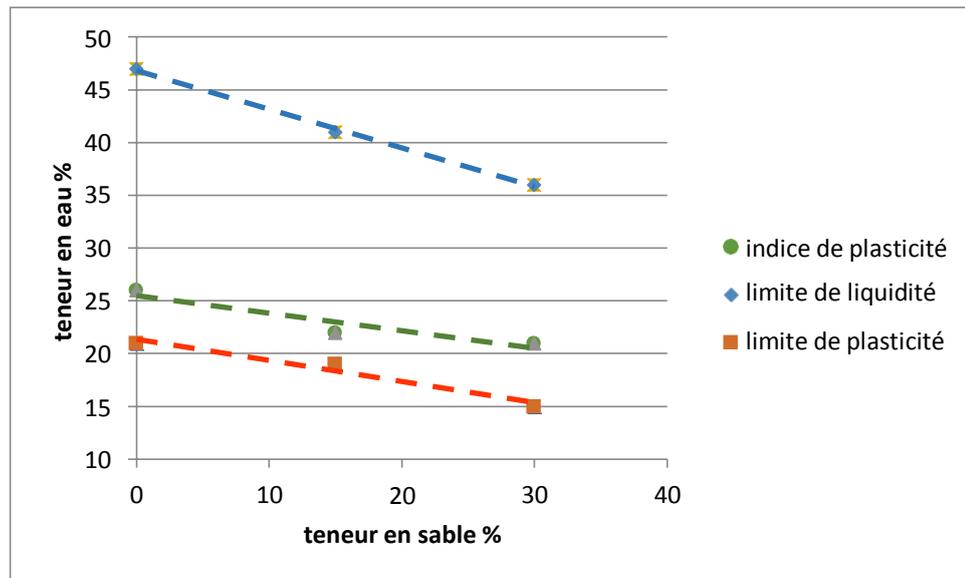
Sol	$\omega_{L(\text{cup})}$	$m$ %	$I_{\pi}$	Classification selon LCPC
Sol naturel-1 Argile jaune 1	46	22	24	Argile peu plastique
Sol naturel-2 Argile grise	52	25	27	
Sol naturel-3 Argile jaune 2	47	20	27	
Sol reconstitué-1 Argile jaune-2 avec 15% sable	41	19	22	Argile sableuse peu Plastique
Sol reconstitué-2 Argile jaune-2 avec 30% sable	36	15	21	

### 3.3. L'effet de l'ajout de sable sur la limite de liquidité de l'argile jaune 2

Pour étudier l'effet de pourcentage de sable sur la limite de liquidité, nous avons utilisé des mélanges de l'argile jaune avec le sable à 15% et 30%.

**Tableau 3.2** : effet de l'ajout du sable sur l'évolution de la limite de liquidité.

Sol	$\omega_{L(\text{cup})}$	$\omega_p$	$I_{\pi}$
Sol naturel-3 Argile jaune 2	47	20	27
Sol reconstitué-1 Argile jaune-2 avec 15% sable	41	19	22
Sol reconstitué-2 Argile jaune-2 avec 30% sable	36	15	21



**Figure3. 1 :** Effet de l'ajout de sable sur la limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité (argile jaune2).

A partir de la figure (3.1), nous pouvons constater que les valeurs de la limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité diminuent en fonction de pourcentage du sable ajouté. Donc les valeurs de la limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité des mélanges sont inversement proportionnelles avec le pourcentage du sable. Ce résultat confirme les résultats obtenus par A.Cabbalar et W.Musarfa (Fall cône tests on Clay–Sand mixtures 2015).

### 3.4. Comparaison des valeurs de limite de liquidité obtenues à partir de la méthode decoupe de Casagrande et le FCT aux pénétrations 17mm et 20mm

Nous avons résumé les résultats sur le tableau (3.3) ci-dessus :

**Tableau 3.3** : valeurs de  $\omega_{L(17)}$ ;  $\omega_{L(20)}$  et  $\omega_{L(cup)}$  des sols testés.

sol	$\omega_{L(cup)}$	$\omega_{L(17)}$	$\omega_{L(20)}$	Ecart type* $\omega_{L(cup)}$ ; $\omega_{L(17)}$	Ecart type* $\omega_{L(cup)}$ ; $\omega_{L(20)}$
Argile jaune 1	46,16	45,54	48,02	0,01	-0,04
Argile grise	52,1	49,95	53,08	0,04	-0,02
Argile jaune 2	46,6	44,29	46,67	0,05	0,00
Sol reconstitué avec 15% sable	40,74	39,36	42,02	0,03	-0,03
Sol reconstitué avec 30% sable	36,59	35,61	38,06	0,03	-0,04

$$*\text{Ecart type}_{(cup)} \ ; \ \omega_{L(17)} = \frac{\omega_{L(cup)} - \omega_{L(17)}}{\omega_{L(cup)}}$$

$$*\text{Ecart type}_{(cup)} \ ; \ \omega_{L(20)} = \frac{\omega_{L(cup)} - \omega_{L(20)}}{\omega_{L(cup)}}$$

Le signe (-) signifie que la valeur de  $\omega_{L(cup)}$  est inférieure à celle de  $\omega_{L(20)}$

A partir des résultats obtenus, nous constatons que les  $\omega_{L(17)}$  et  $\omega_{L(20)}$  sont très proches des valeurs de  $\omega_{L(cup)}$  (écart type inférieures ou égale à 5%).

L'écart type  $\omega_{L(cup)}$  ;  $\omega_{L(17)}$  atteint 5% au maximum alors que l'écart type  $\omega_{L(cup)}$  ;  $\omega_{L(20)}$  atteint 4% au maximum. On peut opter que  $\omega_{L(20)}$  donne des valeurs très proche de  $\omega_{L(cup)}$ .

### 3.5. Etablissement de corrélations

Afin d'obtenir une classification des sols plus rigoureuse, des corrélations sont proposées entre les résultats obtenus à partir des deux approches pour la détermination de la limite de liquidité. Dans cette section, à l'aide de nos résultats (voir tableau (3.3)), composés de 05

sols d'origines différentes. Les corrélations sont établies entre  $\omega_{L\text{ cone}(20)}$ ,  $\omega_{L\text{ cup}(17)}$  d'une part et  $m_{L(\text{cup})}$  et  $m_{L(\text{cone})}$  d'une part.

**3.5.1. Equation de corrélation  $(\text{cup}) ; \omega_{L(17)}$**

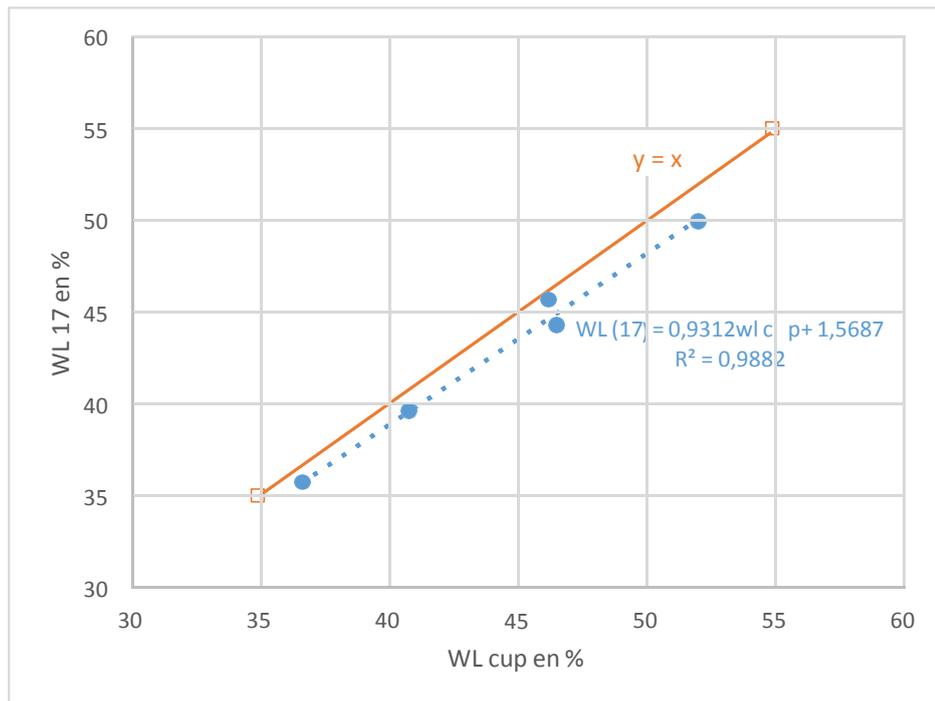
A partir du tableau (3.3), nous représentons les résultats des essais  $(17)$  en abscisse et  $(\text{cup})$  en ordonnée et nous obtenons l'équation suivante :

$$\omega_{L(\text{cone})} = 0,931 \times \omega_{L(\text{cup})} + 1,568 \dots\dots\dots (3.1)$$

**Avec :**

$(\text{cup})$ : Limite de liquidité déterminée par la méthode de la coupelle à base dure.

$(17)$ : Limite de liquidité déterminée par la méthode du FCT à 17mm de pénétration (selon la norme française NFP 94-052-1).



**Figure 3.2 :** Corrélation  $\omega_{L(\text{cup})} ; \omega_{L(17)}$ .

Nous constatons une très bonne corrélation entre  $(\text{cup})$  et  $\omega_{L(17)}$  avec un coefficient de détermination proche de 1 ( $R^2=0,988$ ).

A partir de la figure (3.2) ci-dessus, nous pouvons constater que les valeurs de  $\omega_{L(cup)}$  sont inférieures aux valeurs de  $\omega_{L(17)}$  pour les échantillons étudiés de limite de liquidité entre 35% et 52%.

**3.5.2. Equation de corrélation (cup) ;  $\omega_{L(20)}$**

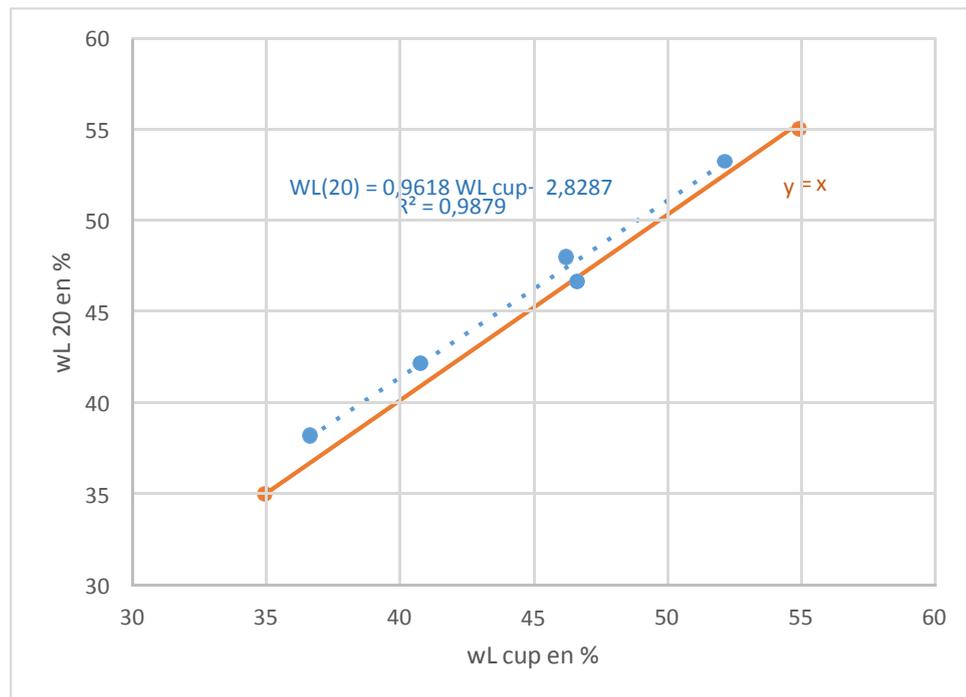
A partir du tableau (3.3) ci-dessus, nous représentons les résultats des essais (20) en abscisse et  $\omega_{L(cup)}$  en ordonnée et nous obtenons l'équation suivante :

$$(cone) = 0,961 \times \omega_{L(cup)} + 2,828 \dots \dots \dots (3.2)$$

**Avec :**

(cup) : Limite de liquidité déterminée par la méthode de la coupelle à base dure.

(20) : Limite de liquidité déterminée par FCT à 20mm de pénétration (selon la norme britannique BSI1377).



**Figure 3.3 :** Corrélation  $\omega_{L(cup)}$  ;  $\omega_{L(20)}$ .

Nous constatons une très bonne corrélation entre (cup) et  $\omega_{L(20)}$  avec un coefficient de détermination proche de 1 ( $R^2=0,987$ ).

A partir de la figure (3.3), nous pouvons constater que les valeurs de  $\omega_{L(cup)}$  sont supérieures aux valeurs de  $\omega_{L(20)}$  pour les échantillons étudiés de limite de liquidité entre 35% et 52%.

### 3.6. Comparaison des équations de corrélation obtenues avec celles des études antérieures

Nous avons proposé 17 corrélations dont 02 corrélations de notre étude et 15 corrélations des travaux antérieurs citées par Satoru Shimobe et Giovanni Spagnoli. [10]

**Tableau 3.4** : Corrélations des travaux antérieurs

N°	proposant	Equation proposée	Cône utilisé Angle et poids	Base de la coupelle utilisée
01	Stefanoff (1957)	$\omega_{L(cone)} = 0,690 \times \omega_{L(cup)} + 5,1$	30° ; 76g	Base dure
02	Wasti (1987)	$(cone) = 1,0056 \times \omega_{L(cup)} + 4,92$	30° ; 80g	Base dure
03	Koester (1992)	$(cone) = 0,955 \times \omega_{L(cup)} + 4,41$	30° ; 76g	Base dure
04	Dragoni et al. (2008)	$(cone) = 1,02 \times \omega_{L(cup)} + 2,87$	30° ; 80g	Base dure
05		$\omega_{L(cone)} = 0,93 \times \omega_{L(cup)} + 1,94$		Base souple
06	Grønbech et al. (2010)	$\omega_{L(cone)} = 1,011 \times \omega_{L(cup)} + 3,49$	60° ; 60g	Base dure
07	Sousa (2011)	$\omega_{L(cone)} = 1,104 \times \omega_{L(cup)} - 1,235$	30° ; 80g	Base dure
08	Di Matteo (2012)	$\omega_{L(cone)} = 1,00 \times \omega_{L(cup)} + 2,20$	30° ; 80g	Base dure
09	Spagnoli (2012)	$\omega_{L(cone)} = 0,99 \times \omega_{L(cup)} + 1,05$	30° ; 80g	Base dure
10	Cevallos Luna (2012)	$\omega_{L(cone)} = 1,118 \times \omega_{L(cup)} - 6,308$	30° ; 80g	Base dure
11	Kayabali et al. (2016)	$(cone) = 1,00 \times \omega_{L(cup)} + 2$	30° ; 80g	Base dure
12	Matusiewicz et al. (2016)	$(cone) = 0,86 \times \omega_{L(cup)} + 3,75$	60° ; 60g	Base dure
13	O'Kelly et al. (2018)	$(cone) = 1,62 \times \omega_{L(cup)}^{0,88}$	30° ; 80g	Base souple
14		$\omega_{L(cone)} = 1,45 \times \omega_{L(cup)}^{0,92}$		Base dure
15	Karakan and Demir (2018)	$(cone) = 0,96 \times \omega_{L(cup)} + 0,302$	30° ; 80g	Base dure
16	Etude actuelle pénétration 17mm	$(cone) = 0,931 \times \omega_{L(cup)} + 1,568$	30° ; 80g	Base dure
17	Etude actuelle pénétration 20mm	$(cone) = 0,961 \times \omega_{L(cup)} + 2,828$	30° ; 80g	Base dure

Comme on peut le voir dans le tableau (3.4), la plupart des auteurs relient les valeurs de limite de liquidité de la Coupelle et celles du FCT par une équation linéaire.

L'équation de corrélation est en fonction des paramètres suivant :

- L'essai FCT : Le cône de chute utilisé (poids, angle) et normes : par exemple la norme russe **GOST 5184-49** définit la limite de liquidité à pénétration de 10mm de cône de 30° et 76g. le même cône est utilisé en Chine avec limite de liquidité qui correspond à 17mm (**SD128-007-84**).
- L'essai de la Coupelle de Casagrande : la base de la coupelle soit dure ou soit souple
- Le type de sol utilisé (la composition granulométrique, minéralogique ainsi que la marge de la limite de liquidité des sols testés).

La figure (3.4) montre les équations publiées dans la littérature scientifique répertoriées dans le tableau (3.4) valables pour les sols avec une limite de liquidité varie de 35% à 52%, conjointement avec les deux droites de régression proposée dans ce travail.

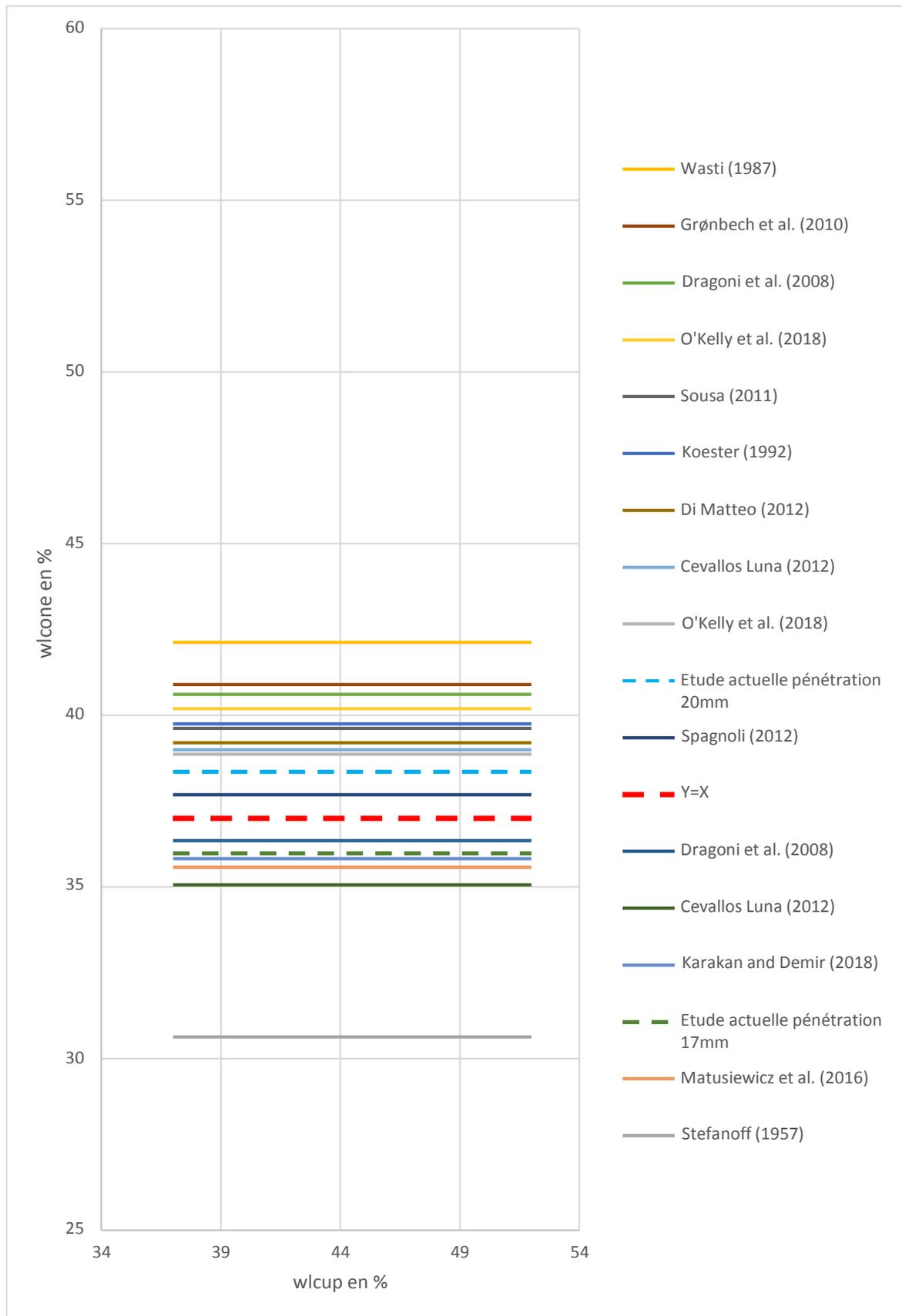


Figure 3.4 : Comparaison des corrélations.

Comme on peut le voir, il y a une dispersion notable dans les équations de régression linéaire proposées probablement du fait que les corrélations ont une portée locale et que les tests ont été effectués par différents opérateurs.

Les résultats donnés par le cône russe ne sont pas comparables avec le reste des résultats (Leroueil et Le Bihan, 1996) par ce que la norme russe **GOST 5184-49** définit la limite de liquidité à la pénétration de 10mm de cône de 30° et 76g alors que le même cône est utilisé en Chine avec limite de liquidité qui correspond à 17mm (**SD128-007-84**) ceci d'une part, d'autre part la même pénétration de 10 mm définit la limite de liquidité pour le cône suédois de 60g et 60°.

-La majorité de courbes se situe à la partie supérieure de la courbe  $Y=X$  ; c'est-à-dire que les valeurs de limites de liquidité cône sont supérieures à celles de la coupelle.

Pour comparer nos équations de corrélations (3.1) et (3.2) avec celles obtenues nous avons calculé les écarts correspondants aux différences entre l'équation établie et celles proposées par les autres :

- Les valeurs de  $\omega_{L(cup17)}$  ;  $\omega_{L(cup20)}$  ;  $\omega_{L(cup1)}$  ; ... ;  $\omega_{L(cup15)}$  à partir des deux valeurs de  $\omega_{L(cône)35\%}$  et 52%.
- Les écarts types  $(cup17) - m_{L(cup1)}$  ;  $m_{L(cup17)} - m_{L(cup2)}$  ;  $m_{L(cup17)} - m_{L(cup3)}$  ; ... ;  $m_{L(cup17)} - m_{L(cup15)}$ .

Les résultats sont mentionnés sur les tableaux (3.5) et (3.6).

Pour l'équation de corrélation  $(17) = f(m_{L(cup)})$  deux équations donnent des valeurs qui se concordent avec cette équation. Il s'agit des équations de Dragoni et al. (2008) et Karakan and Demir (2018) avec un écart type inférieur à 2%. Les trois équations de Koester (1992), DiMatteo (2012) et Kayabali et al. (2016) donnent des écarts type inférieur ou égal à 4%.

Pour l'équation de corrélation  $(20) = f(m_{L(cup)})$  deux équations donnent des valeurs qui se concordent. Il s'agit des équations de Spagnoli (2012) et O'Kelly et al. (2018) avec un écart type inférieur à 2%. Les équations de Cevallos Luna (2012) et Matusiewicz et al. (2016) donnent des écarts type inférieur ou égal à 4%.

**Tableau 3.5** : comparaison entre cône 17 et les 15 corrélations.

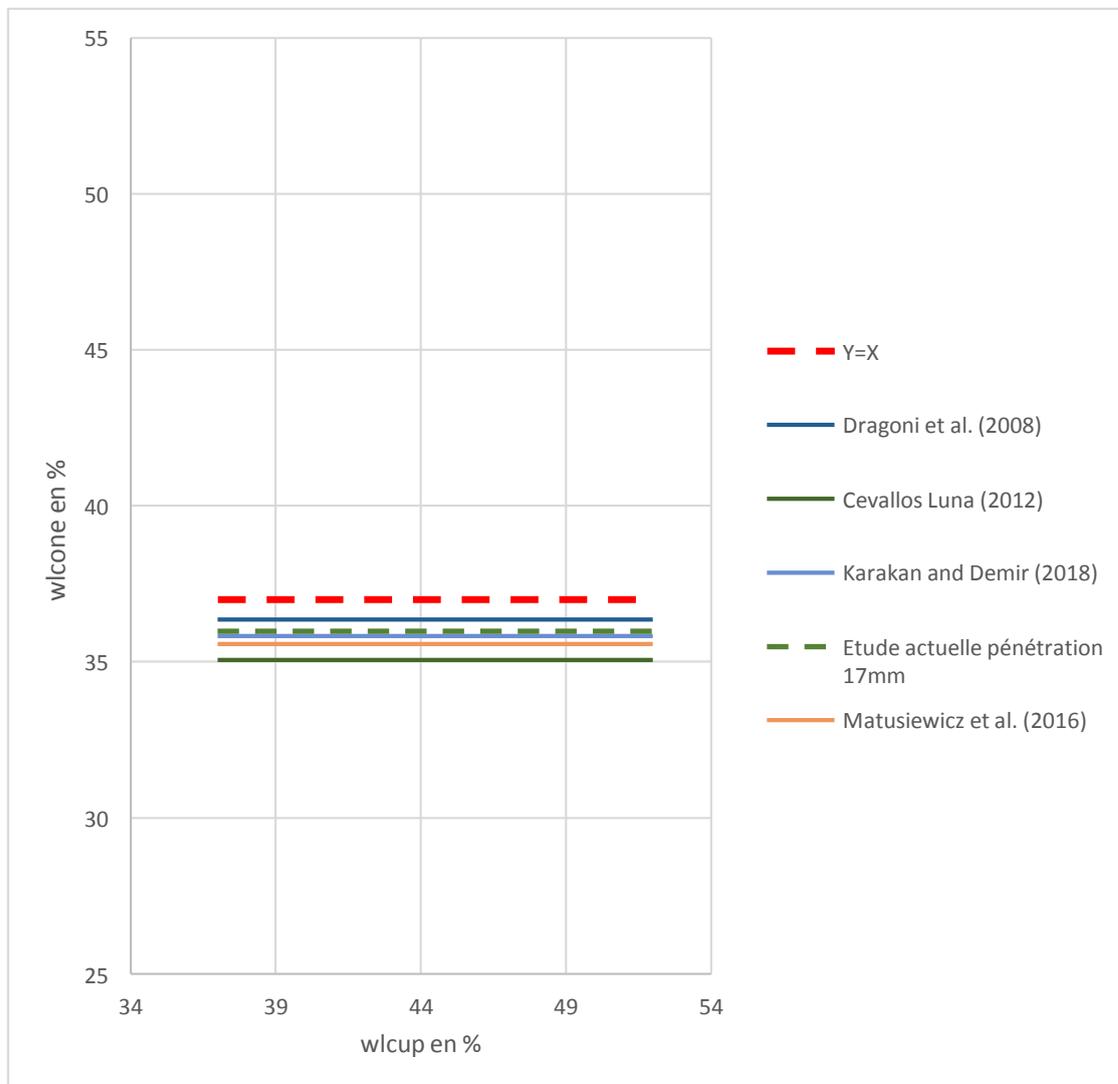
<b>écart cône<sub>17</sub>-1</b>	<b>14,87</b>	<b>17,93</b>
écart cône <sub>17</sub> -2	-17,09	-14,58
écart cône <sub>17</sub> -3	-10,46	-8,29
écart cône <sub>17</sub> -4	-12,87	-11,98
écart cône <sub>17</sub> -5	-1,03	-0,74
écart cône <sub>17</sub> -6	-13,67	-12,28
écart cône <sub>17</sub> -7	-10,10	-12,50
écart cône <sub>17</sub> -8	-8,95	-8,55
écart cône <sub>17</sub> -9	-4,72	-5,21
écart cône <sub>17</sub> -10	2,56	-3,80
écart cône <sub>17</sub> -11	-8,39	-8,15
écart cône <sub>17</sub> -12	1,14	2,92
écart cône <sub>17</sub> -13	-8,01	-5,01
écart cône <sub>17</sub> -14	-11,7	-10,09
écart cône <sub>17</sub> -15	0,44	-0,58

**Tableaux 3.6** : Comparaison entre cône 20 et les 15 corrélations

<b>écart cône<sub>20</sub>-1</b>	<b>20,13</b>	<b>22,31</b>
écart cône <sub>20</sub> -2	-9,85	-8,46
écart cône <sub>20</sub> -3	-3,64	-2,50
écart cône <sub>20</sub> -4	-5,89	-5,99
écart cône <sub>20</sub> -5	5,22	4,64
écart cône <sub>20</sub> -6	-6,65	-6,28
écart cône <sub>20</sub> -7	-3,29	-6,49
écart cône <sub>20</sub> -8	-2,22	-2,75
écart cône <sub>20</sub> -9	1,75	0,42
écart cône <sub>20</sub> -10	8,58	1,75
écart cône <sub>20</sub> -11	-1,69	-2,37
écart cône <sub>20</sub> -12	7,25	8,11
écart cône <sub>20</sub> -13	-1,34	0,60
écart cône <sub>20</sub> -14	-4,80	-4,20
écart cône <sub>20</sub> -15	6,59	4,79

**3.7. Comparaison de corrélation de  $\omega_{(17)} = f_{mL(cup)}$  avec la littérature :**

La figure (3.5) montre les équations publiées dans la littérature scientifique répertoriées dans le tableau (3.4) valables pour les sols avec une limite de liquidité varie de 35% à 52%, conjointement avec les deux droites de régression proposée dans ce travail.

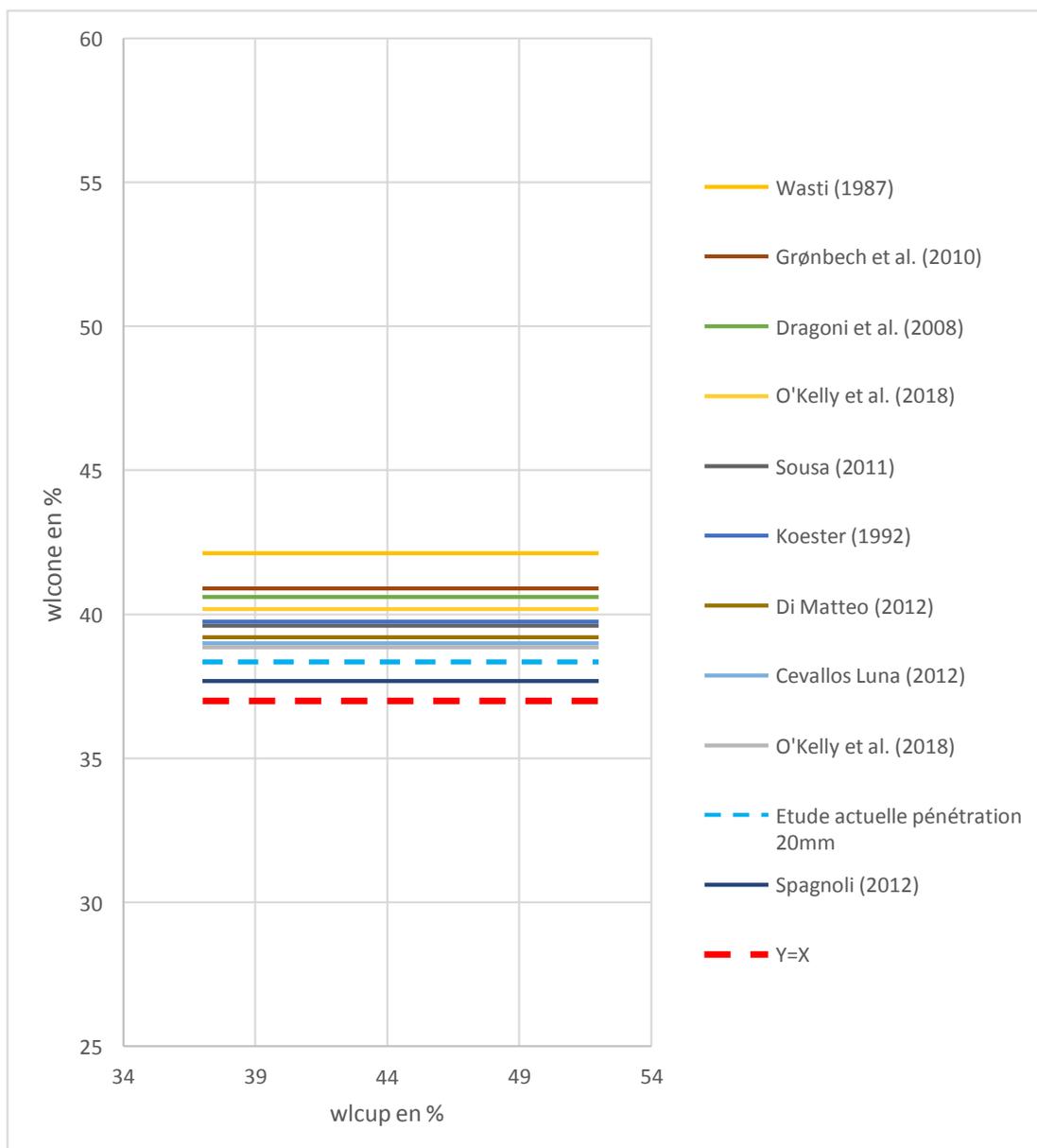


**Figure 3.5 :** comparaison de corrélation de  $\omega_{L(17)}$

Pour l'équation de corrélation  $\omega_{(17)} = f(mL(cup))$  quatre équations donnent des valeurs qui se concordent avec cette équation. Il s'agit des équations de Dragoni et al. (2008), Karakan and Demir (2018), Cevallos luna (2012) et Matusiewicz et al. (2016).

**3.8. Comparaison de corrélation de  $\omega_{(20)} = f(m_{L(cup)})$  avec la littérature**

La figure (3.6) montre les équations publiées dans la littérature scientifique répertoriées dans le tableau (3.4) valables pour les sols avec une limite de liquidité varie de 35% à 52%, conjointement avec les deux droites de régression proposée dans ce travail.



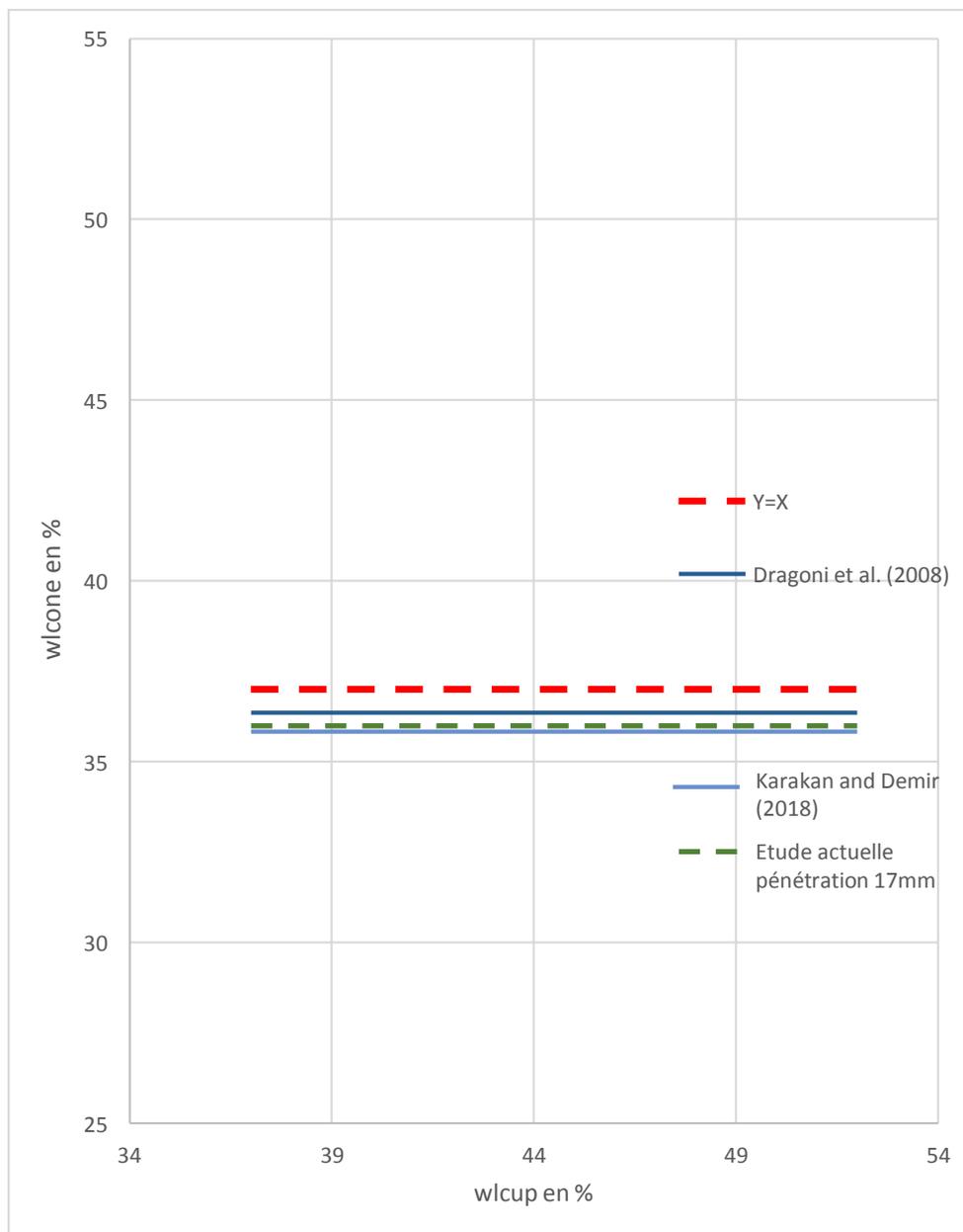
**Figure 3.6 :** comparaison des corrélations de  $\omega_{L(20)}$

Pour l'équation de corrélation  $\omega_{(20)} = f(m_{L(cup)})$  10 équations donnent des valeurs qui se concordent. Il s'agit des équations de Wasti (1987), Gronbech et al. (2010), Dragoni et al. (2008), Spagnoli (2012), O'Kelly et al. (2018), Cevallos Luna (2012), Sousa(2011), koester (1992), Di Matto (2012).

**3.9. Comparaison de corrélation de  $\omega_{(17)} = f m_{L(cup)}$  avec la littérature de même**

**Cône (30°, 80g)**

La figure (3.7) montres les équations publiées dans la littérature scientifique répertoriées dans le tableau (3.4) valables pour les sols avec une limite de liquidité varie de 35% à 52%.



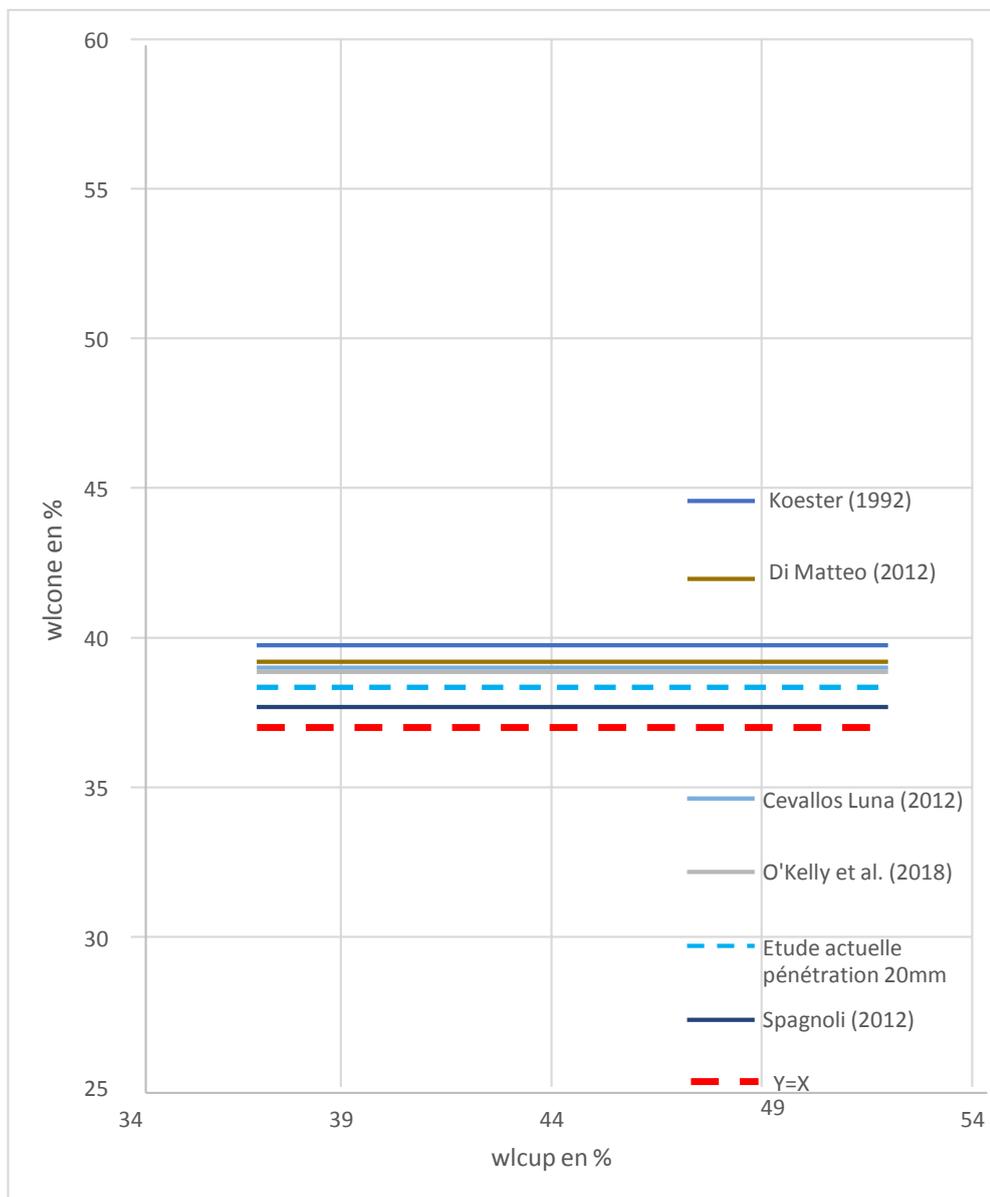
**Figure 3.7 :** comparaison des corrélations  $\omega_{L(17)}$  du cône (30°, 80g).

Pour l'équation de corrélation  $\omega_{(17)} = f(m_{L(cup)})$  deux équations donnent des valeurs qui se concordent avec cette équation. Il s'agit des équations de Dragoni et al. (2008), Karakan and Demir (2018) avec un écart type inférieur à 2%.

**3.10. Comparaison de corrélation de  $\omega_{(20)} = f m_{L(cup)}$  avec la littérature de même**

**Cône (30°, 80g)**

La figure (3.8) montres les équations publiées dans la littérature scientifique répertoriées dans le tableau (3.4) valables pour les sols avec une limite de liquidité varie de 35% à 52%.



**Figure 3.8** : comparaison des corrélations  $\omega_{L(20)}$  du cône (30°, 80g).

Pour l'équation de corrélation  $\omega_{(20)} = f(m_{L(cup)})$  cinq équations donnent des valeurs qui se concordent. Il s'agit des équations de Koester (1992), O'Kelly et al. (2018), Di Matteo (2012), Cevallos luna (2012) et Spagnoli (2012).

**Conclusion**

Sur la base des résultats obtenus, on constate que :

- La limite de liquidité, la limite de plasticité, ainsi que l'indice de plasticité diminuaient d'une manière proportionnelle en fonction du pourcentage du sable ajouté.
- Les résultats obtenus de  $(17)$  et  $\omega_{L(20)}$  sont très proches des résultats de  $m_{L(cup)}$ .
- Les corrélations obtenues sont très comparables avec celles tirées de la littérature.

## CONCLUSION GENERALE

---

L'identification des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour classifier les sols argileux. Le but de cette étude est de faire une comparaison entre les méthodes de déterminations des limites d'Atterberg (la méthode du FCT et la méthode de Casagrande).

Sur la base des résultats obtenus nous pouvons conclure que :

- L'essai FCT est plus commode que l'essai de casagrande ; le mode opératoire est très simple en comparaison avec celui de casagrande. Ce dernier présente l'inconvénient qu'il dépend beaucoup de l'opérateur.
- Les valeurs de  $w_l$  (*cup*) sont situées entre les valeurs  $w_l$  (*cone*) correspondant aux pénétrations de 17mm et de 20mm.
- Les corrélations obtenues, divulguent des expressions comparables avec celles tirées de la littérature.
- Nous recommandons l'utilisation de l'essai FCT pour la détermination de  $w_L$  dans la réglementation Algérienne.
- Nous recommandons la réflexion sur le développement d'une procédure pour la détermination de  $w_p$  à travers l'essai FCT.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- [3] CAILLERE, SIMONNE. « Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés Physicochimiques», Paris, Masson, 1982.
- [4] CEFOR LYSS. Centre pour le génie forestier Argiles, limons et stabilisation des sols.2016.
- [2] GUILLAUD, Hugo HOUBEN& HUBERT. 1989. Traité de construction en terre. Marseille.
- [1] NORME AFNOR (NF XP 94-010).
- [5] NORME AFNOR (NF P 94-049-1).
- [6] NORME AFNOR (NF P 94-051).
- [7] NORME AFNOR (NF P 94-052-1).
- [8] NORME AFNOR (NF P 94-051).
- [9] SATORU SHIMOBÉ, GIOVANNI SPAGNOLI. a global data base considering atterberg limits with the casagrande and fall cône tests journal elsevier 2019.