

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل -  
Université Mohammed Seddik Benyahia - Jijel -

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département : des Sciences de la Terre et de  
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم : علوم الأرض و الكون

جامعة محمد الصديق بن يحيى  
كلية علوم الطبيعة و الحياة  
المكتبة  
رقم الجرد : 2.461

## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : Master Académique en Géologie

Option : Génie Géologique

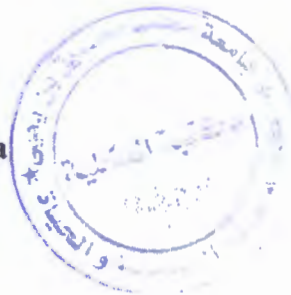
### Thème

*Etude expérimentale des facteurs de variation  
des limites d'Atterberg*

#### Membres de Jury

Président : M<sup>me</sup> TEBIB Houria  
Examinateur : M<sup>me</sup> ILLAS Chahra  
Encadrants : Dr BENZAID Riad

: M<sup>me</sup> KhERROUBA Hassiba



#### Présenté par :

- Boughazi Dalal  
- Grine Sihem

Année Universitaire 2016-2017

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....

## *Remerciements*

*Il est primordial de remercier «ALLAH EL-KARIM» de nous avoir donné le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours pour réaliser ce Modest en travail.*

*Nous tenons d'abord à exprimer toute notre gratitude à nos encadrants « Dr. BENZAID RIAD et M<sup>lle</sup> KHERROUBA HASSIBA » pour leur proposition de ce type de sujet lié à la mécanique des sols tout d'abord et ont accepté de diriger nos travaux relatifs à l'élaboration de notre mémoire de fin d'étude tant sur le plan expérimental au laboratoire des matériaux du Département Des Sciences de la Terre et de l'Univers que sur le plan interprétatif des résultats obtenus.*

*Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour avoir accepté de le juger.*

*Nous remercions également:*

*Tous nos enseignants pour leur participation à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux et notre profonde gratitude pour leur gentillesse, disponibilité et soutien durant les années de notre formation.*

*À tous nos amies et collègues de notre promotion Master 2017. et à tous ceux qui nous ont aidé et encouragé à la réalisation de ce travail et nous ont soutenu quand le moral était au plus bas.*

*Merci enfin à tous ceux qui ont lu et liront ce mémoire...*

*A tous, un grand Merci.*

*.....Dalal et Sihem.....*



# *Dédicace*

*Louange à Dieu seigneur de tout, sans lui rien de tout ça ne serait possible*

*Je dédie ce modeste travail à toute la famille*

*"Boughazi" et "Ben Hanachi"*

*A ma très chère mère et A mon très cher père*

*A tous mes chères sœurs et mon frère*

*A tous les ami(e)s, sans exception et ma collègue de mémoire*

*"Sihem"*

*À toutes mes collègues de la promotion 2016/2017 de Master 2*

*génie géologique.*

*À tous ceux que j'aime et tous ceux qui m'aiment*

*..... " Dalal " .....*

# *Dédicace*

*Louange à Dieu seigneur de tout, sans lui rien de tout ça ne serait possible*

*Je dédie ce modeste travail à toute la famille*

*"Grine " et "Laour"*

*A ma très chère mère*

*A tous mes chères sœurs et mon frère*

*A tous les ami(e)s, sans exception et ma collègue de mémoire*

*"Dalal "*

*À toutes mes collègues de la promotion 2016/2017 de Master 2  
génie géologique.*

*À tous ceux que j'aime et tous ceux qui m'aiment*

*..... " Sihem " .....*

## **Résumé**

L'essai aux limites d'Atterberg a pour but de déterminer la consistance d'un sol fin, qui varie de façon continue selon la teneur en eau lorsque celle-ci augmente, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique, puis à l'état liquide. L'essai définit conventionnellement les limites entre ces états.

Le présent travail consiste à une étude expérimentale des paramètres et facteurs de variation des limites d'Atterberg car dans ce genre d'essais, l'application rigoureuse du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats fiables et comparables d'un opérateur à l'autre.

Le mémoire que nous présentons résume l'ensemble des travaux que nous venons de réaliser dont la détermination des limites d'Atterberg en tenant compte les facteurs de variation. La partie bibliographie montre que la problématique de ce thème est toujours d'actualité eu égard aux volumes des travaux réalisés dans ce domaine. Nos résultats exposés dans ce mémoire témoignent de l'importance géotechnique que doivent accorder tous les opérateurs et techniciens du domaine à la nature des sols fins et leur classification selon ces limites. Enfin et à travers cette étude nous souhaitons avoir contribué à la compréhension des facteurs de variations des limites d'Atterberg.

**Mots-clés :** Limites d'Atterberg, Sol fin, Teneur en eau, Consistance.

## **Abstract**

The purpose of the Atterberg boundary test is to determine the consistency of a fine soil, which varies continuously depending on the water content as it increases, the soil passes successively from solid state to state Plastic, and then in the liquid state. The test conventionally defines the boundaries between these states.

The present work consists of an experimental study of the parameters and factors of variation of the Atterbeg boundaries because in this type of tests the rigorous application of the procedure is therefore particularly indispensable if reliable and comparable results are to be obtained. From one operator to another.

The present paper summarizes all the work we have just done, including the determination of the Atterberg limits, taking into account the factors of variation. The bibliography shows that the issue of this theme is still relevant given the volume of work carried out in this field. Our results presented in this paper demonstrate the geotechnical importance that all operators and technicians in the field must accord to the nature of fine soils and their classification according to these limits. Finally, and through this study, we wish to have contributed to the understanding of the factors of variation of the limits of Atterberg.

**Keywords:** Atterberg limits, Fine soil, water content, Consistency.



## ملخص

تجربة حدود أثر بارغ تهدف إلى تغيير ومعرفة قوامه التربة الدقيقة التي تختلف بشكل مستمر وفقا لمحتوى الماء. عندما تزيد هذه الأخيرة تمر التربة في سلسلة متتالية من الحالة الصلبة الى الحالة البلاستيكية ثم الحالة السائلة هذه التجربة تسمح بمعرفة الحدود بين الحالات السابقة. هذا العمل عبارة عن دراسة تجريبية حول عوامل تغيير حدود أثر بارغ لأن في هذا النوع من التجارب التطبيق الصارم لطريقة العمل يعتبر أمر ضروري خاصة إذا اردنا الحصول على نتائج موثوقة و قابلة للمقارنة من عمل آخر .

هذه المذكرة تلخص مجموعة الأعمال التي تم القيام بها لتحديد ومعرفة حدود أثر بارغ مع الأخذ بعين الاعتبار عوامل الاختلاف في النتائج المعروضة .

الجزء البيبليوغرافي من البحث كان ثريا جدا حيث يبين أهمية الاشكالية المطروحة كما ظهر من خلال نتائج الأعمال المنجزة.

وأخيرا ومن خلال هذه الدراسة نأمل أن نكون قد ساهمنا في معرفة عوامل إختلاف حدود أثر بارغ.

## الكلمات المفتاحية

حدود أثر بارغ ، التربة الدقيقة ، القوام ، محتوى الماء .

# *Table de matière*



## Table des matières

Introduction générale .....	1
 <i>Chapitre 1. Etude bibliographique</i> 	
1.1. Introduction .....	2
1.2. Quelques travaux antérieurs sur les limites d'Atterberg.....	2
1.3. Détermination indirecte des limites d'Atterberg.....	4
 <i>Chapitre 2. L'essai des limites d'Atterberg</i> 	
2.1. Introduction .....	7
2.2. Essais des limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	7
2.2.1. But des essais.....	7
2.2.2. Limites d'Atterberg.....	8
2.2.3. Appareillage spécifique.....	9
2.2.4. Appareillage d'usage courant .....	10
2.2.5. Préparation de l'échantillon .....	10
2.2.6. Exécution de l'essai.....	11
Limite de liquidité $W_L$ (méthode de Casagrande).....	11
Limite de plasticité $W_P$ (Rolling-test) .....	13
2.3. Détermination de la limite de liquidité par la méthode du cône de pénétration.....	13
2.3.1. Principe de l'essai et appareillage.....	13
2.3.2. Mode opératoire.....	14
2.4. Utilisation des limites d'Atterberg pour la classification et description des sols.....	14
2.4.1. Abaque de Casagrande.....	15
2.4.2. Classification de la public road administration (P.R.A.).....	16
2.4.3. Classification GTR (NF P 11-300).....	16
2.4.4. Classification LCPC.....	17
 <i>Chapitre 3. Etude Expérimentale</i> 	
3.1. Matériaux et démarche expérimentale.....	20
3.2. Caractéristiques physiques des sols étudiés .....	20
3.3. Programme expérimental.....	21
3.4. Présentation des résultats.....	22
3.5. Analyses et discussions.....	23
3.5.1. Influence du matériel utilisé sur les résultats des limites d'Atterberg.....	23
3.5.1.1. Effet de l'état du socle de l'appareil de Casagrande.....	23
3.5.1.2. Effet de l'outil à rainure.....	25
3.5.1.3. Effet de la hauteur de chute de la coupelle .....	27
3.5.2. Influence du mode de préparation du mortier destiné à l'essai.....	28
3.5.3. Influence de la nature du sol sur les résultats des limites d'Atterberg.....	30
3.5.3.1. Rôle de la granulométrie (taux des particules fines 0-0,2 mm).....	30
3.5.3.2. Rôle de la matière organique.....	31
Conclusion générale.....	34
<i>Références Bibliographiques</i>	
<i>Annexe</i>	

## Liste des figures

<b>Figure 2.1.</b> Les états de consistance possibles d'un sol (GEO3).....	7
<b>Figure 2.2.</b> Représentation schématique des limites d'Atterberg.....	8
<b>Figure 2.3.</b> Appareil de Casagrande et outil à rainurer.....	10
<b>Figure 2.4.</b> Détermination de la limite de liquidité.....	12
<b>Figure 2.5.</b> Détermination de la limite de liquidité.....	12
<b>Figure 2.6.</b> Détermination de la limite de plasticité.....	13
<b>Figure 2.7.</b> Appareillage du cône de pénétration (Sol mesures).....	14
<b>Figure 2.8.</b> Abaque de plasticité de Casagrande.....	15
<b>Figure 2.9.</b> Système de classification LCPC.....	18
<b>Figure 3.1.</b> Carte des affleurements des formations superficielles du bassin néogène de Jijel.....	20
<b>Figure 3.2.</b> Effet de l'état du socle sur les résultats des limites d'Atterberg.....	24
<b>Figure 3.3.</b> (a) Outil à rainures de Casagrande et (b) outil à rainures ASTM.....	25
<b>Figure 3.4.</b> Effet de l'outil à rainure sur les résultats des limites d'Atterberg .....	26
<b>Figure 3.5.</b> Effet de la hauteur de chute de la coupelle sur la limite de liquidité .....	27
<b>Figure 3.6.</b> Effet du mode de préparation du mortier sur les limites d'Atterberg .....	28
<b>Figure 3.7.</b> Effet du taux des particules fines (0-0,2 mm) dans le sol sur les limites d'Atterberg.....	31
<b>Figure 3.8.</b> Effet du taux de matière organique dans le sol sur les limites d'Atterberg.....	33

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1.</b> Type d'argile en fonction de l'indice de plasticité $I_p$ .....	8
<b>Tableau 2.2.</b> Activité de certains minéraux.....	9
<b>Tableau 2.3.</b> Symboles internationaux désignant les sols fins.....	15
<b>Tableau 2.4.</b> Classification selon la Public Road Administration.....	16
<b>Tableau 2.5.</b> Classification des sols (NF P 11-300) - Tableau simplifié.....	16
<b>Tableau 2.5.</b> Classification des sols (NF P 11-300) - Tableau simplifié.....	18
<b>Tableau 2.6.</b> Indice de plasticité des argiles et des limons.....	19
<b>Tableau 2.7.</b> Caractérisation de l'activité d'une argile dans un sol.....	19
<b>Tableau 2.8.</b> Caractérisation de l'activité d'une argile dans un sol.....	19
<b>Tableau 3.1.</b> Caractéristiques physiques des deux sols utilisés.....	21
<b>Tableau 3.2.</b> Détail du programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude.....	21
<b>Tableau 3.3.</b> Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon d'argile.....	22
<b>Tableau 3.4.</b> Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon de marne.....	23
<b>Tableau 3.5.</b> Quantification de l'influence de l'état du socle.....	25
<b>Tableau 3.6.</b> Quantification de l'influence l'outil à rainure.....	26
<b>Tableau 3.7.</b> Quantification de l'influence de la hauteur de chute de la coupelle.....	28
<b>Tableau 3.8.</b> Quantification de l'influence du mode préparatoire du mortier.....	29
<b>Tableau 3.9.</b> Quantification de l'influence de 25 % de la fraction fine (0-0,2 mm).....	30
<b>Tableau 3.10.</b> Quantification de l'influence de 50 % de la fraction fine (0-0,2 mm).....	30
<b>Tableau 3.11.</b> Quantification de l'influence de 75 % de la fraction fine (0-0,2 mm).....	30
<b>Tableau 3.12.</b> Quantification de l'influence de 10 % de la matière organique.....	32
<b>Tableau 3.13.</b> Quantification de l'influence de 5 % de la matière organique.....	32
<b>Tableau 3.14.</b> Quantification de l'influence de 2,5 % de la matière organique.....	32

*INTRODUCTION  
GÉNÉRALE*



## Introduction Générale

Compte tenu de leur structure, les sols argileux ont la propriété d'absorber des quantités très importantes d'eau ou au contraire, de se dessécher, ceci est en fonction des conditions d'humidité auxquels ils sont soumis. Quelle que soit la nature de l'argile, une fois malaxée avec des quantités d'eau de plus en plus importantes, finit par se transformer en boue. Dans ce cas, l'argile aura un comportement liquide. Au contraire, si l'argile est suffisamment desséchée, les grains sont très resserrés et les liaisons deviennent de plus en plus intenses ce qui donnera à l'argile un comportement solide.

C'est en 1911 qu'Albert Mauritz Atterberg, chimiste et scientifique agricole suédois, a présenté un rapport sur la plasticité des sols argileux. Il définissait alors six limites, d'un sol, dont deux ont essentiellement été retenues : il s'agit de **la limite de liquidité ( $W_L$ )** et **la limite de plasticité ( $W_P$ )**. La limite de retrait ( $W_S$ ), bien que représentant une caractéristique très importante, n'est que très rarement recherchée. Ceci provient de ce que le domaine de variation de cette limite est très restreint, en même temps que le facteur personnel de l'opérateur joue un grand rôle, de sorte qu'il est difficile d'accorder une grande confiance aux résultats trouvés. C'est à Arthur Casagrande qui a ensuite en 1932 étudié les limites d'Atterberg et a mis au point l'essai de limites de liquidité, tel qu'il est pratiquement encore réalisé aujourd'hui (LCPC, 1987).

Les limites d'Atterberg ou limites de consistance sont considérées comme les essais les plus anciens et les plus utilisés pour l'identification des sols cohérents en laboratoire. Seulement, il s'agit d'essais empiriques dont les résultats peuvent être fortement influencés par plusieurs facteurs tels que : l'exactitude de l'opérateur, la qualité et l'usure du matériel, le mode de la préparation de l'échantillon soumis à l'essai, etc.

L'objet de ce travail est de monter l'importance relative des facteurs de variation des limites d'Atterberg. Car dans ce genre d'essais, l'application rigoureuse du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats fiables et comparables d'un opérateur à l'autre.

Le manuscrit commence par une étude bibliographique montrant quelques travaux de recherche en relation avec l'essai des limites d'Atterberg.

Le deuxième chapitre présente le protocole d'essai des limites d'Atterberg conformément à la norme NFP94-051.

L'étude expérimentale ainsi que l'interprétation des résultats obtenus sont exposés dans le troisième chapitre.

A l'issue de ce travail nous estimons que l'appréciation de la limite de plasticité demande, de la part de l'opérateur, une certaine expérience de la pratique de l'essai. On pourrait penser a priori que le résultat de cet essai dépend beaucoup du facteur personnel de l'opérateur. En réalité il n'est pas plus dispersé que celui observé par la limite de liquidité.

*CHAPITRE 1*  
*Etude Bibliographique*





## 1.1. Introduction

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles exprimant des différences de comportement mécanique des sols, différences essentiellement liées aux variations de la teneur en eau. Elles sont donc susceptibles de fournir des indications sur la facilité, plus ou moins grande de travail du sol. Elles correspondent en principe aux seuils de passage de l'état solide à l'état plastique (limite de plasticité  $W_p$ ) et de l'état plastique à l'état liquide (limite de liquidité  $W_L$ ). L'intervalle entre ces deux limites définit l'étendue du domaine de la plasticité qui est nommé l'indice de plasticité  $I_p$  (Combeau, 1963 ; Chantal Proust et al., 2004).

Les limites d'Atterberg sont utilisées depuis longtemps, mais beaucoup plus systématiquement dans les laboratoires des travaux publics que pour les études de caractère agronomique. Elles ont cependant fait l'objet d'études destinées à permettre l'interprétation pratique des résultats obtenus. (Combeau, 1963 ; LCPC, 1987).

## 1.2. Quelques travaux antérieurs sur les limites d'Atterberg

Les travaux de recherche sur le comportement des sols argileux ont progressivement évolué, au cours des dernières décennies. Cette évolution a bien passé de la phase de caractérisation mécanique et hydraulique en laboratoire à l'état saturé vers la caractérisation à l'état non saturé. Cette évolution a été favorisée par les besoins de modélisation identifiés dans le cadre des études des ouvrages de stockage de déchets radioactifs à grande profondeur. Ainsi, certains chercheurs ont mis l'accent sur le comportement mécanique des argiles non saturées par l'utilisation de tenseurs capillaires (Robinet et al., 1999) en modifiant leurs lois de comportement mécanique, pour obtenir des lois constitutives valables dans le domaine non saturé et jusqu'à saturation.

Plus récemment, la modélisation des effets couplés chimie-transport a également progressé, bien que le problème de l'écrouissage chimique des argiles sous l'effet de polluants soit un domaine très peu étudié sur le plan mécanique, tant au niveau des lois de comportement que des limites de liquidité (Jullien et al., 2002 ; Pothier, 2001). C'est cet ensemble de considérations qui a conduit à utiliser un appareillage de dessiccation d'échantillons de boues pour déterminer des limites de liquidité des matériaux argileux. Des essais ont été réalisés sur des argiles classiques pour valider la méthode et permettre l'étude ultérieure de matériaux non standards ou de boues polluées. Dans ce dernier cas, au vu du grand nombre de polluants susceptibles d'être étudiés, la caractérisation des limites d'Atterberg est une étape préliminaire indispensable à la réalisation d'essais mécaniques de laboratoire visant à étudier l'écrouissage de l'argile polluée. Enfin, il est évident que le comportement élasto-plastique des argiles présente un lien avec les propriétés physiques telles que les limites d'Atterberg (Grabowska-Olszewska, 2003 ; Seed et al., 1964).

Selon Combeau, (1963), trois chercheurs (Russell et Wehr, 1928; puis Bayer, 1930) ont étudié les facteurs de variations des limites d'Atterberg effectuées sur des échantillons provenant de deux types de sols tropicaux, très différents l'un de l'autre. L'objet de leurs



travaux de recherche été la détermination des facteurs de variation des limites d'Atterberg. Les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- Les limites d'Atterberg dépendent étroitement de la granulométrie de l'échantillon, les valeurs des limites de liquidité et de plasticité et celles de l'indice de plasticité augmentant régulièrement avec le taux d'éléments fins 0-0,02 mm et de façon comparable pour les deux types de sols étudiés.
- Le taux de la matière organique joue également un rôle sur les deux limites, dont il élève la valeur, mais ses variations ne paraissent pas affecter l'indice de plasticité.
- Le type de minéral argileux peut permettre d'interpréter certaines variations des limites d'Atterberg. La présence d'oxyde de fer semble également jouer un rôle appréciable, en particulier en augmentant la limite de liquidité et l'indice de plasticité.
- Le potentiel capillaire correspondant aux limites d'Atterberg varie selon les échantillons. L'un des facteurs importants de variation, en particulier pour la limite de liquidité, est la teneur en éléments fins 0-0,02 mm.

Smith et al. (1985), ont recueillis des échantillons de sol dans 32 sites différents de la Palestine représentant les principaux types de sol dans la région. Ces échantillons ont été analysés pour leurs caractéristiques pédologiques et leurs propriétés mécaniques. Les relations corrélatives entre le rétrécissement (mesuré par le coefficient d'extensibilité linéaire, COLE), les limites d'Atterberg (*WL* et *WP*) et les propriétés physico-chimiques ont été établies et indiquent des possibilités d'estimation des propriétés mécaniques à partir de données pédologiques connues. De fortes corrélations ont été observées entre les propriétés mécaniques et les caractéristiques pédologiques reflétant la minéralogie et la texture des argiles, par exemple la capacité d'échange de cations, surface spécifique, humidité hygroscopique et teneur en argile. Ces relations sont, selon les auteurs, utiles dans la mesure où la minéralogie de l'argile est habituellement évidente à partir de la classification des sols. La sodicité et la salinité, communes dans les sols secs des régions semi-arides, peuvent entraîner des facteurs compliqués tels que l'élévation ou l'abaissement des limites d'Atterberg, respectivement. Le rétrécissement est également affecté, ce qui est accentué à des niveaux élevés de sodium et à faible teneur en sel et réduit dans les sols hautement salés-sodiques. La matière organique était corrélée aux limites de liquidité et limites de plastiques, mais aucune relation avec le retrait n'a été notée. Le carbonate de calcium a également eu peu d'influence sur les limites Atterberg.

Ghembaza et al. (2012), ont étudié l'effet du ciment en tant que liant hydraulique sur le comportement physico-chimique d'un sol de la région de Sidi bel Abbés. Le sol étudié avait initialement des caractéristiques médiocres, ne répondant pas aux normes utilisées en géotechnique routière. L'objectif de leurs travail été de traiter ce sol par ajout du ciment en vue d'améliorer ses caractéristiques physiques. Les résultats obtenus ont montré que le traitement par le ciment a diminué l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène du sol étudié.



### 1.3. Détermination indirecte des limites d'Atterberg

Schmitz et al. (2004) ont montrés que l'essai des limites d'Atterberg est un essai mécanique de base permettant d'avoir une première idée sur la réactivité chimique des argiles. Fondamentalement, la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont fortement influencés par la capacité des minéraux d'argile à interagir avec des liquides. Les auteurs nous ont présentés une corrélation entre les limites d'Atterberg et la minéralogie de l'argile. Cette corrélation a facilité la compréhension entre les minéralogistes et les géotechniciens. En outre, une richesse d'informations dans la littérature sur la minéralogie des argiles est maintenant disponible pour prédire le comportement mécanique des argiles par des tests d'index.

Chantal Proust et al. (2006) ont présenté une nouvelle méthode de mesure des limites d'Atterberg par dessiccation dynamique, pour certaines argiles polluées ou des mélanges d'argiles. C'est une méthode basée sur la mesure de la quantité d'eau libre présente dans un matériau, ce procédé s'appuie sur le phénomène de désaturation du matériau par ventilation dynamique. Les valeurs des limites d'Atterberg obtenues sur des argiles courantes se révèlent peu différentes de celles déterminées par la méthode de Casagrande. Ces résultats permettent de considérer cette méthode comme une caractérisation physique des boues argileuses. Cette nouvelle démarche constitue également, selon les auteurs, une solution intéressante pour la détermination des  $W_P$  des argiles polluées, rendue impossible par la méthode de Casagrande, du fait, de la consolidation ou de l'écrouissage du matériau.

Dans tous les cas étudiés par Chantal Proust et al., (2006), le phénomène de fissuration se produit, mais à des échelles différentes suivant le type de matériau et ne perturbe pas la détermination de  $W_L$  et  $W_P$ . Les mesures effectuées présentent un écart de 10 % au maximum par rapport à celles obtenues par la méthode de Casagrande, permettant d'envisager des développements intéressants de cette méthodologie pour des matériaux pour lesquels cette méthode n'est pas applicable.

Bouazza et al. (2007), ont constaté que dans les applications du système de couverture d'enfouissement, un revêtement d'argile géo-synthétique peut être exposé à des cations inorganiques tels que le calcium, le magnésium et l'aluminium, ce qui peut altérer les performances du composant de bentonite GCL, en particulier s'il est accompagné d'un cycle de séchage/mouillage suite aux variations saisonnières de la température et des précipitations. Pour étudier les impacts du mouillage et du séchage, les limites d'Atterberg et le gonflement du composant de la bentonite GCL ont été déterminés lors d'un cycle à sec et humide avec une solution de chlorure de calcium utilisée pour les cycles de mouillage. À partir des quantités de chlorure de calcium ajoutées à chaque étape de mouillage, les auteurs ont estimé le degré d'échange d'ions de calcium pour le sodium sur l'argile. Dans les essais, deux solutions de chlorure de calcium ont été utilisées: 0,0125 et 0,125 M. Cela a permis une étude détaillée des effets du degré d'échange de sodium-calcium sur la bentonite. Ils ont démontré que, pour les tests de limite Atterberg, même en utilisant une solution de chlorure de calcium de 0,125 M, l'échange complet de calcium ne pouvait être obtenu car la quantité de liquide ajoutée pour amener la bentonite à la limite de liquidité ou à la limite de plasticité ne contenait



pas suffisamment d'ion de calcium pour un échange complet. Pour les tests de gonflement, des rapports liquide-solide beaucoup plus élevés ont été utilisés, de sorte que l'échange presque complet pourrait être réalisé seulement après plusieurs cycles de séchage/humidité. En utilisant ces données, le document développe une méthodologie pour estimer la position de l'équilibre d'échange de cations et montre à quel point cette analyse peut devenir complexe. Il montre également qu'un échange de cations limité peut être réalisé dans des tests de laboratoire alors qu'un échange presque complet peut survenir seulement sur le terrain.

Zentar et al. (2009), ont examiné les effets des traitements induisant la réduction des sels et le contenu organique sur les limites Atterberg des sédiments marins dragués. Pour définir les limites liquidités des sédiments, les auteurs ont comparé les résultats du test de percussion et ceux du test du cône pour des sédiments bruts et des sédiments traités. Pour la détermination de la limite de plasticité, les résultats de la méthode d'essai de roulement étaient comparés à la prédiction du test du cône.

Pour mieux comprendre le comportement de rétention d'eau des argiles riches en smectite <sup>(1)</sup>, une étude microstructurale a été menée par Marek et al., (2015), sur la bentonite Amcol australienne en suspension aqueuse à proximité de la limite de liquidité ( $W_L$ ) et de la limite plasticité ( $W_p$ ). L'étude a été menée à l'aide de la tomographie par microscope à rayons X par transmission synchrotron (TXM), avec une reconstruction informatique ultérieure. Les images tirées des études de microscopie ont été analysées statistiquement à l'aide du système d'analyse STIMAN (*STatistical IMAge ANalysing*). Cette étude a révélé que les particules d'argile forment un cadre calciné dans lequel les particules minérales, les agrégats et les vides remplis d'eau se montent comme des éléments structurels hiérarchiques. La taille de ces éléments structurels était plus grande dans la suspension d'eau et est ensuite devenue plus petite suite à l'effet de la perte d'eau dans les conditions de suspension liquide et de la limite de plasticité. La structure de suspension d'argile était presque isométrique, avec un faible coefficient d'anisotropie ( $K\alpha$  - 9%). Ce paramètre a augmenté à  $K\alpha$  - 17% dans la limite de liquidité ( $W_L$ ) et a augmenté davantage dans la limite de plasticité ( $W_p$ ) à  $K\alpha$  - 35%. Les vides dans les éléments structurels étaient beaucoup plus petits que les vides inter-flocons remplis d'eau, avec leur diamètre médian de 140 nm (suspension), 120 nm ( $W_L$ ) et 90 nm ( $W_p$ ). Des différences significatives dans les limites d'Atterberg ont été observées entre les poudres fraîchement mélangées à l'eau et un échantillon naturel.

Kayabali et al. (2016) ont utilisé une nouvelle méthode appelée MPM (Mud Press Method: méthode de compression de la boue) pour prédire les deux limites de consistance. Le matériel utilisé pour cette étude couvre 275 échantillons de sol dont les limites de liquidité se situent entre 28 et 166. Les paramètres  $\log(a)$  et  $1/b$  obtenus à partir de la méthode MPM ont été corrélés aux résultats des méthodes classiques. Les valeurs de  $W_p$  et  $W_L$  pour chaque sol ont été prédits en utilisant des formes empiriques et ont été comparées avec les valeurs obtenues en laboratoire. Des convergences remarquablement ont été obtenues entre les résultats des

---

(1) Les **smectites** sont un groupe de minéraux argileux, et donc des silicates, plus précisément des phyllo-silicates.

tests classiquement et les valeurs prédites pour les limites de liquides et de plasticités. L'outil nouvellement développé est, selon les auteurs, meilleur dans plusieurs aspects aux méthodes et outils conventionnels disponibles.

Cheshomi et al. (2017), ont étudié l'influence de l'ajout de la chaux et des cendres volantes sur le gonflement et les limites d'Atterberg des sols argileux. Leur travail consiste à ajouter 3%, 5% et 7% de chaux à une argile sulfatée et de suivre son potentielle de gonflement et ces limites d'Atterberg. À mesure que la teneur en chaux augmentait, les réactions chimiques entre la chaux et l'argile sulfatée conduisaient à la formation d'étrangéité. Ce minéral présente un bon potentiel d'absorption d'eau, ce qui a augmenté le pourcentage de gonflement, la pression et les propriétés plastiques de l'argile. À travers cette étude, les auteurs ont démontré que la chaux (avec des ajouts de 3%, 5% et 7% en poids d'argile) est incapable de modifier les propriétés de gonflement des argiles sulfatées. Dans la deuxième partie de leur travail, 3%, 5% et 7% de cendres volantes ont été ajoutées à l'argile. L'introduction des cendres volantes a réduit le gonflement et l'indice de plasticité de l'argile. La teneur optimale en cendres volantes de 3% (en poids) a amélioré les propriétés de gonflement de l'argile sulfatée. Les cendres volantes ont ensuite été ajoutées à 5% en poids d'argile sulfatée stabilisée à la chaux. Les résultats ont montré que les cendres volantes compensaient les effets négatifs de la chaux, réduisant le pourcentage de gonflement et l'indice de plasticité de l'argile sulfatée.

## CHAPITRE 2

### *Essai des limites d'Atterberg*



#### **Albert Mauritz ATTERBERG**

*Né le 19 Mars 1846 et mort le 4 Avril 1916, c'est un chimiste suédois et scientifique agricole qui a créé les limites d'Atterberg qui sont communément appelés par les géotechniciens et les ingénieurs géologues. En Suède, il est également connu pour la création de l'échelle de la granulométrie d'Atterberg (Wikipédia).*



## 2.1. Introduction

La consistance d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de la teneur en eau ; ceci est lié à l'importance plus ou moins grande des couches d'eau adsorbées autour de ses grains et plus généralement aux propriétés colloïdales des argiles et à leur proportion dans le sol considéré :

- Si la teneur en eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir en place les particules de sol. Ce dernier se comporte sensiblement comme un fluide (boue). Il est à l'état **liquide** (le sol tend à s'étaler si on le dépose sur une surface horizontale).
- Si la teneur en eau diminue, le sol peut être modelé sans qu'il s'effrite et conserve sa forme. Les particules sont rapprochées car l'eau adsorbée est mise en commun (les grains sont reliés entre eux par des molécules d'eau). Le sol est alors à l'état **plastique**. (posé sur une surface horizontale, il ne s'étale pas mais n'offre aucune résistance à l'action d'une charge même très faible).
- Si la teneur en eau diminue encore, les grains deviennent très rapprochés ; le sol ne peut plus être modelé et se fend lorsqu'on le travail, c'est l'état **solide**.

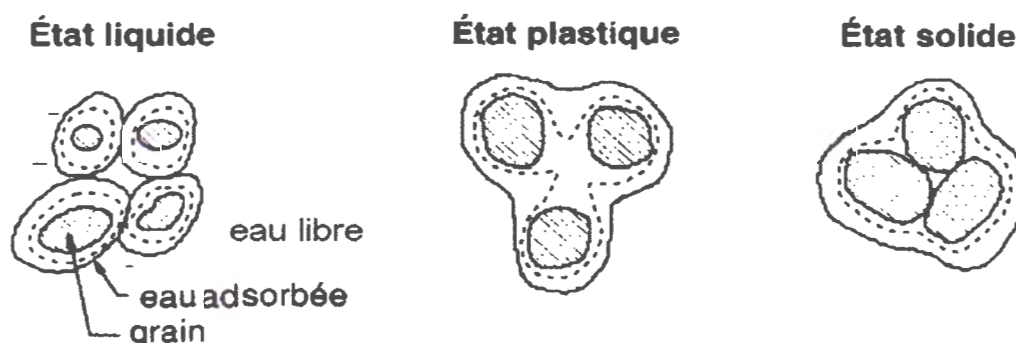


Figure 2.1. Les états de consistance possibles d'un sol (GEO3)

## 2.2. Essais des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

### 2.2.1. But des essais

Les argiles sont des pâtes où chaque grain est relié au grain voisin par des forces de cohésion dues à la présence de couches d'eau adsorbée. En fonction de la teneur en eau dans le sol, quatre états de consistance des argiles ont été définis :

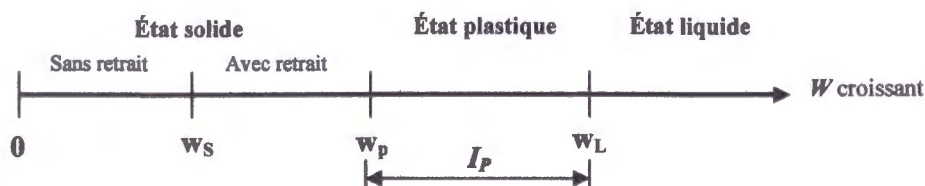
- **Etat liquide** : l'argile baigne dans l'eau et se comporte comme un liquide visqueux.
- **Etat plastique** : l'argile peut subir des déformations à volume constant sans fissurations.
- **Etat solide** : l'argile développe de petites fissures au cours des déformations, celles-ci sont dues à l'augmentation de sa rigidité (état semi-solide). Par la suite, les grains

constituants le sol ont de grandes forces de frottement entre eux d'où une grande rigidité de l'argile (état solide).

### 2.2.2. Limites d'Atterberg

La transition d'un état de consistance à l'autre n'est pas visible à l'œil nu, elle se produit progressivement. Ces limites sont mesurées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 0,4 mm. Cependant, on utilise généralement deux limites (Figure 2.2) universellement appelées limites d'Atterberg (Costet et Sanglerat, 1981 ; Dupain et al., 2000) :

- Limite de liquidité  $W_L$  ou  $L_L$  : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
- Limite de plasticité  $W_P$  ou  $L_P$  : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.



**Figure 2.2.** Représentation schématique des limites d'Atterberg (Holtz et Kovacs, 1991 ; Lérau, 2006)

A partir des résultats obtenus, on détermine trois paramètres à savoir :

- l'indice de plasticité  $I_P$  qui définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité :

$$I_P = W_L - W_P \quad (2.1)$$

Cet indice est d'une grande utilité pour la détermination du type d'argile (Tableau 2.1). Les sols sableux n'ont pas de phase de plasticité d'où leur indice de plasticité est égal à zéro ( $I_P = 0$ ).

**Tableau 2.1.** Type d'argile en fonction de l'indice de plasticité  $I_P$

$0,01 \leq I_P \leq 0,07$	Sable argileux
$0,07 < I_P \leq 0,17$	Argile sableuse
$0,17 < I_P$	Argile

D'autre part, la détermination des limites d'Atterberg permet de se faire une idée de la structure d'une argile de teneur en eau ( $w$ ) par le calcul de son :

- Indice de consistance :  $I_C = (W_L - W) / I_P \quad (2.2)$

- Indice de liquidité :  $I_L = (W - W_P) / I_P \quad (2.3)$

En 1953, **Skempton** a défini le coefficient d'activité d'une argile  $A_C$  qui se définit comme suit (Costet et Sanglerat, 1981 ; Holtz et Kovacs, 1991 ; Philipponnat et Hubert, 2003 ; Chelghoum, 2006 ; et autres) :

$$A_C = \frac{I_P}{(\% \text{ des éléments } < \text{ à } 2\mu\text{m})} \quad (2.4)$$

Skempton a proposé en outre d'appeler « **inactive** » les argiles dont l'activité était inférieure à 0,75, ce sont principalement des argiles à base de kaolinite ou contenant extrêmement peu de minéraux argileux plus actifs, ces argiles ont souvent été formées par dépôt en eau douce. Les argiles « **normales** » ont une activité comprise entre 0,75 et 1,25. Les argiles « **actives** » ont une activité supérieure à 1,25. A titre indicatif le Tableau 2.2 donne l'activité de certains minéraux.

**Tableau 2.2.** Activité de certains minéraux (Costet et Sanglerat, 1981)

Minéral	Activité $A_C$
Quartz	0
Calcite	0,18
Kaolinite	0,33 à 0,44
Illite	0,90
Montmorillonite Ca	1,50
Montmorillonite Na	7,20

### 2.2.3. Appareillage spécifique

**a- Appareil de casagrande** : le matériel couramment utilisé et composé de (Figure 2.3) :

- Un socle de base en bois bakélinisé<sup>(1)</sup> monté sur quatre pieds en caoutchouc,
- Un support métallique portant la coupelle en laiton chromé et la manivelle actionnant la came qui soulève de 10 mm la coupelle au-dessus du socle.

**b- Outil à rainures** : Les détails de cet outil sont donnés par la Figure 2.3. Cet outil doit réaliser sur le fond de la coupelle une rainure de  $0,05 \pm 2$  mm de large. En pratique on a deux types d'outils à savoir l'outil à réunir de Casagrande et celui de l'ASTM<sup>(2)</sup>.

**c- Accessoires** :

- Une cale de 10 mm pour le réglage de la hauteur de chute de la coupelle,
- Une plaque de bois ou de plexiglas d'environ  $6 \times 10 \times 2$  cm pour confectionner les rouleaux.

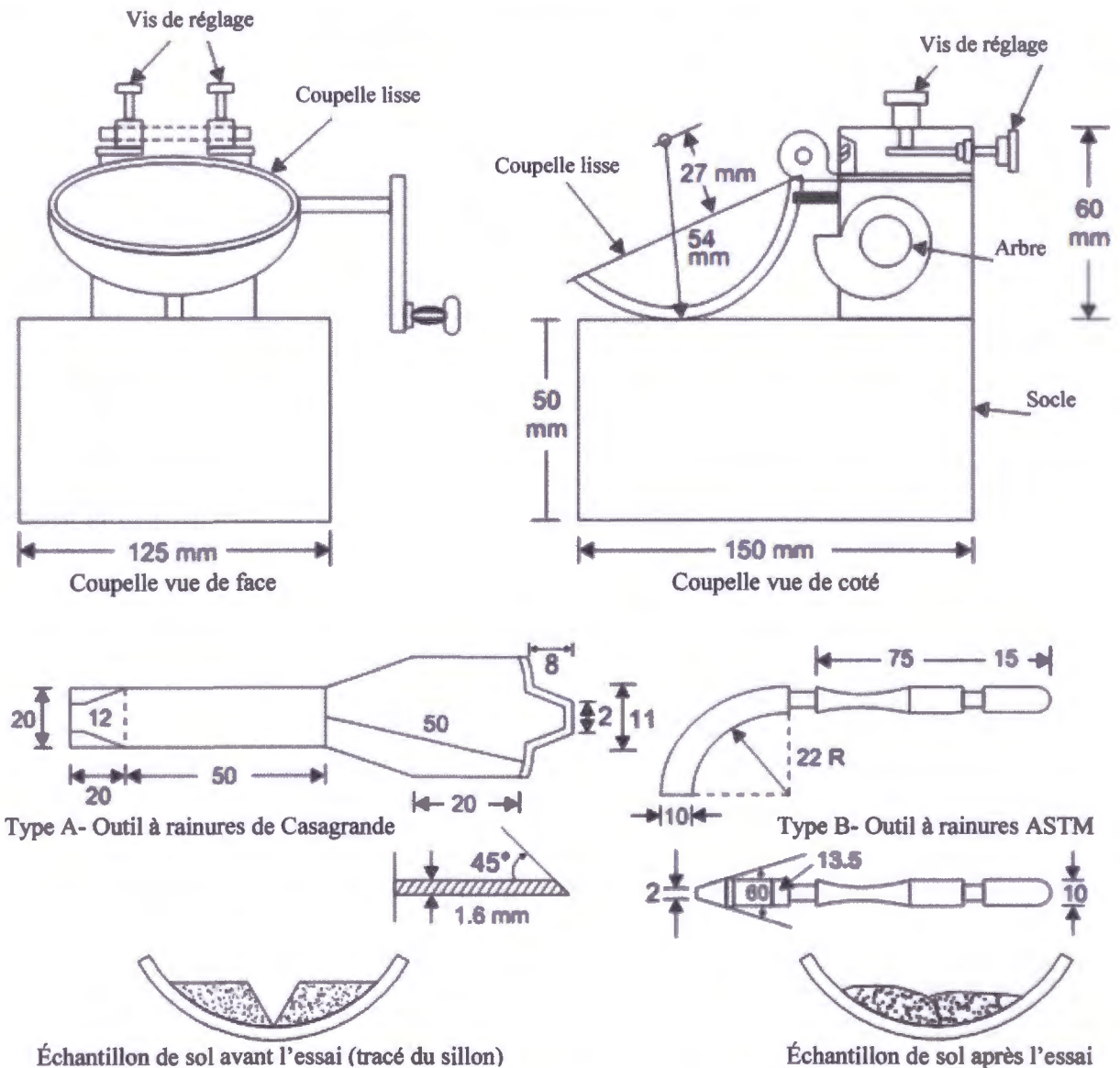
<sup>(1)</sup> **Bakéliniser** : renforcer en utilisant de la bakélite, matériau constitué à partir d'une résine de formaldéhyde de phénol thermodurcissable aussi appelée phénoplaste.

<sup>(2)</sup> **ASTM** : ASTM International est un organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services. Il a été fondé en 1898 aux États-Unis sous la direction de Charles Benjamin Dudley. Il portait alors le nom de : *American society for testing material* (Wikipédia).



**2.2.4. Appareillage d'usage courant**

- Spatule, truelles et un marbre pour le malaxage du mortier,
- Une pissette,
- Verres de montre tarés ou flacons tarés à couvercle étanche,
- Une balance de précision (précision recommandée : 1 mg) de préférence automatique,
- Une étuve avec thermostat permettant de la régler à 105 °C,
- Un tamis d'ouverture 0.4 mm selon la Norme NF X 11-501, X11-508(L.C.P.C, 1987).



**Figure 2.3.** Appareil de Casagrande et outil à rainurer (Venkatramaiah, 2006)

**2.2.5. Préparation de l'échantillon**

L'essai des limites d'Atterberg se fait sur la fraction des matériaux appelés mortier, qui passe au tamis de 0,40 mm. L'échantillonnage se fait sur matériau non séché à l'étuve, une

quantité suffisante de matériau devant être tamisée pour obtenir 150 à 200 g de mortier pour chaque prise d'essai.

Avant tamisage le matériau doit être imbibé pendant au moins 12 heures. Cette imbibition peut être faite, soit dans des récipients faciles à nettoyer soit directement dans le tamis placé dans un bac de dimensions légèrement supérieures.

Le tamisage s'effectue par voie humide selon une des deux manières suivantes :

- a- Soit manuellement, en remuant à l'aide d'un pinceau souple le matériau sur la toile tamisant. Le refus devra être parfaitement propre. Cette méthode nécessite peu d'eau de lavage.
- b- Soit au vibro-tamis placé au-dessus d'un bac recueillant l'eau de lavage ; le tamisage est terminé lorsque l'eau s'écoulant du tamis est claire. Cette méthode nécessite des quantités d'eau plus importantes et dans certains cas (ex. matériau très plastique) on peut être amené à terminer le tamisage manuellement.

Après décantation de l'eau de lavage, on siphonnera avec précaution pour ne pas entraîner les éléments inférieurs à 0,40 mm, puis on évaporerà l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas 60 °C. On recueille ensuite ces éléments inférieurs à 0,40 mm de préférence à l'état pâteux sur lesquels l'essai des limites d'Atterberg sera effectué.

Les éléments supérieurs à 0,40 mm doivent être séchés et re-tamisés à sec dans le bac contenant le mortier. Cette opération est très importante surtout pour un matériau à granulométrie serrée vers 0,40 mm. Les grains voisins de cette dimension pouvant être tenus par des films d'eau dans le tamis et fausser ainsi la quantité de sable que doit contenir le mortier (L.C.P.C, 1987).

Concernant la préparation de la pâte, on s'efforcera de recueillir le mortier à une teneur en eau élevée pour pouvoir débuter l'essai de limite de liquidité. Si le matériau est humide, mais trop consistant, on peut rajouter de l'eau. Si le matériau est totalement sec, il faut le laisser imbiber pendant 12 heures au minimum. Pour obtenir une pâte bien homogène et presque fluide, on malaxe vigoureusement la totalité du mortier à l'aide de la truelle.

## 2.2.6. Exécution de l'essai

### (a) Limite de liquidité $W_L$ (méthode de Casagrande)

Elle est déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande (1932), Figure 2.3. Une portion d'argile est placée sur une coupelle dans laquelle une rainure est tracée préalablement à l'aide d'un instrument en forme de V. la coupelle est ensuite soumise à un certain nombre de coups pour fermer la rainure sur environ 1 cm (Figure 2.4). La teneur en eau de l'échantillon du sol est ensuite déterminée. Le même essai est répété 4 à 5 fois avec des teneurs en eau décroissantes et telles que le nombre de coups à chaque essai soit compris entre 15 et 35 (Costet et Sanglerat, 1981 ; Holtz et Kovacs, 1991 ; Dupain et al., 2000 ; Chelghoum, 2006 ; Budhu, 2007).



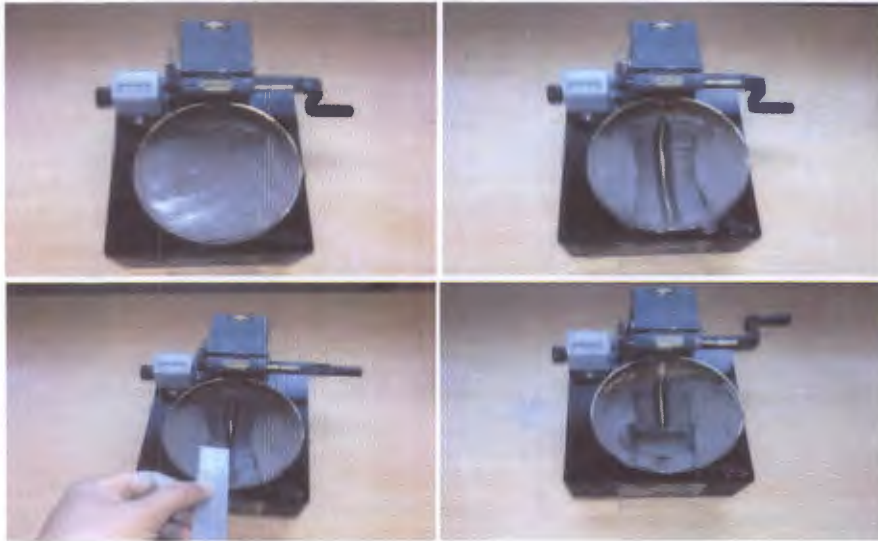


Figure 2.4. Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique de la teneur en eau ( $W$ ), mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant ( $N$ ), Figure 2.5. Par définition, la limite de liquidité ( $W_L$ ) est la teneur en eau ( $W$ ) qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25 coups. Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, la limite de liquidité peut être lue directement sur le graphe pour  $N = 25$  coups. Elle peut être aussi donnée par la relation approchée de Skempton (Costet et Sanglerat, 1981 ; Holtz et Kovacs, 1991 ; Venkatramaiah , 2006 ; Chelghoum, 2006 ; et autres) :

$$W_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121} \quad (2.5)$$

Avec ( $W$ ) la teneur en eau du mortier au moment de l'essai et ( $N$ ) le nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1cm dans la coupelle. Cette relation de Skempton est valable pour un nombre de coups ( $N$ ) compris entre 15 et 35.

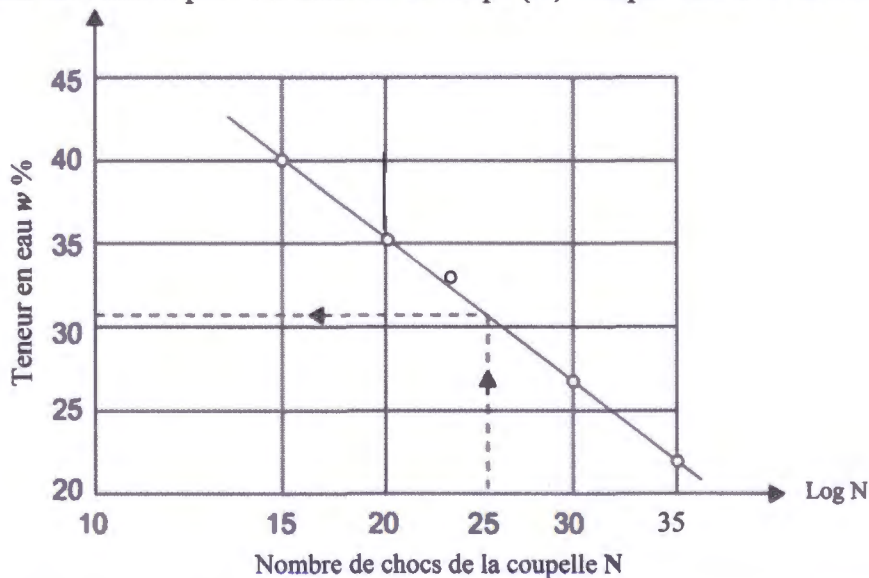


Figure 2.5. Détermination de la limite de liquidité (Venkatramaiah, 2006)

### (b) Limite de plasticité $W_P$ (Rolling-test)

Elle est mesurée par la préparation d'un fuseau de sol à partir d'une boulette de mortier d'environ 12 mm de diamètre qui sera aminci progressivement en-là roulant sur une plaque de marbre propre, lisse et sèche (Figure 2.5). Par définition, la limite de plasticité ( $W_P$ ) est la teneur en eau ( $W$ ) du fuseau qui se brise en tronçon de 1 à 2 cm de long au moment où le diamètre atteint 3 mm. Par conséquent, pour un même sol il est recommandé de refaire l'essai au minimum trois fois (Costet et Sanglerat, 1981 ; Dupain et al., 2000 ; Chelghoum, 2006 ; Budhu, 2007).



Figure 2.6. Détermination de la limite de plasticité

## 2.3. Détermination de la limite de liquidité par la méthode du cône de pénétration

### 2.3.1. Principe de l'essai et appareillage

L'appareil à cône doit permettre de maintenir fermement le cône et de le libérer instantanément pour le laisser chuter librement suivant la direction verticale en pénétrant dans le sol. Il doit avoir un mécanisme qui permet au cône d'être amené au contact de la surface de l'éprouvette avant sa libération. En plus, il doit comprendre un moyen de mesure de la valeur de la pénétration dans le sol après libération.

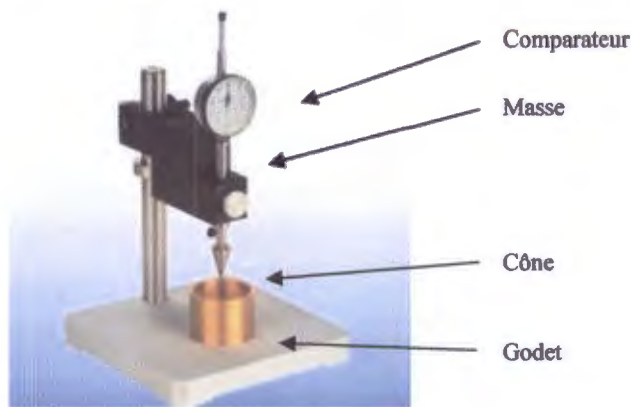
Dans ce type d'appareil, le cône doit être en acier inoxydable, avoir soit une masse totale de 80g et un angle de sommet de 30°, soit une masse totale de 60g et un angle au sommet de 60°.

D'autre part, les coupelles doivent être en acier, en porcelaine ou en plastique, de forme cylindrique ou semi-sphérique avec un diamètre supérieur à 55 mm et une profondeur de 30 mm pour le cône 60g/60° ou une profondeur de 40 mm pour le cône 80g/30° (Shehadeh et Serhal, 2013).

Le matériel couramment utilisé dans ce type d'essai est composé de (Figure 2.6) : une spatule, un pulvérisateur d'eau distillée, une coupelle d'évaporation, une plaque plane sur laquelle s'effectue le malaxage, une balance de précision (précision recommandée : 1 mg), un récipient hermétique, un cône de pénétration muni d'un dispositif automatique de libération et de fixation.



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



**Figure 2.7.**Appareillage du cône de pénétration (Sol mesures)

### 2.3.2. Mode opératoire

On mélange complètement la pâte préparée. Si nécessaire on ajoute de l'eau distillée au début. On place par la suite, au moyen de spatule une partie du sol qui a été malaxé, dans une coupelle propre et sèche, en prenant soin de ne pas inclure des bulles d'air. Pour cette raison, le mélange doit être de préférence introduit en trois étapes dans la coupelle. On arase l'excédent de sol avec une règle à araser pour obtenir une surface lisse.

Le cône étant bloqué en position haute, le support est abaissé jusqu'à ce que la pointe soit en contact avec la surface de l'échantillon. Quand le cône est dans la position correcte, un léger mouvement à la coupelle conduira à produire une très légère marque à la surface du sol. Finalement, le cône est libéré pendant une durée de 5 secondes. Puis on note sa pénétration dans l'échantillon de sol qui est donnée par un comparateur à 0,1 mm près.

Pour avoir une valeur moyenne, pour un même échantillon, la pénétration est déterminée plusieurs fois dans plusieurs endroits de la surface plane de l'échantillon.

Cette procédure est répétée en ajoutant à chaque fois la teneur en eau du sol, jusqu'à arriver à une pénétration de l'ordre de 25 mm (Shehadeh et Serhal, 2013).

### 2.4. Utilisation des limites d'Atterberg pour la classification et description des sols

Les différents types de sol rencontrés dans les projets de génie civil ou travaux publics peuvent être regroupés ou classés dans des catégories ayant des propriétés similaires, selon un système de classification. Les principaux systèmes de classification des sols sont les suivants (Bouafia, 2013) :

- Classification géologique (ou selon l'origine du sol),
- Classification minéralogique des sols,
- Classification structurelle des sols,
- Classification géotechnique des sols,

Dans cette partie nous nous intéressons à quelques descriptions et classifications géotechniques des sols et particulièrement celle basées sur les résultats des limites d'Atterberg.

### 2.4.1. Abaque de Casagrande

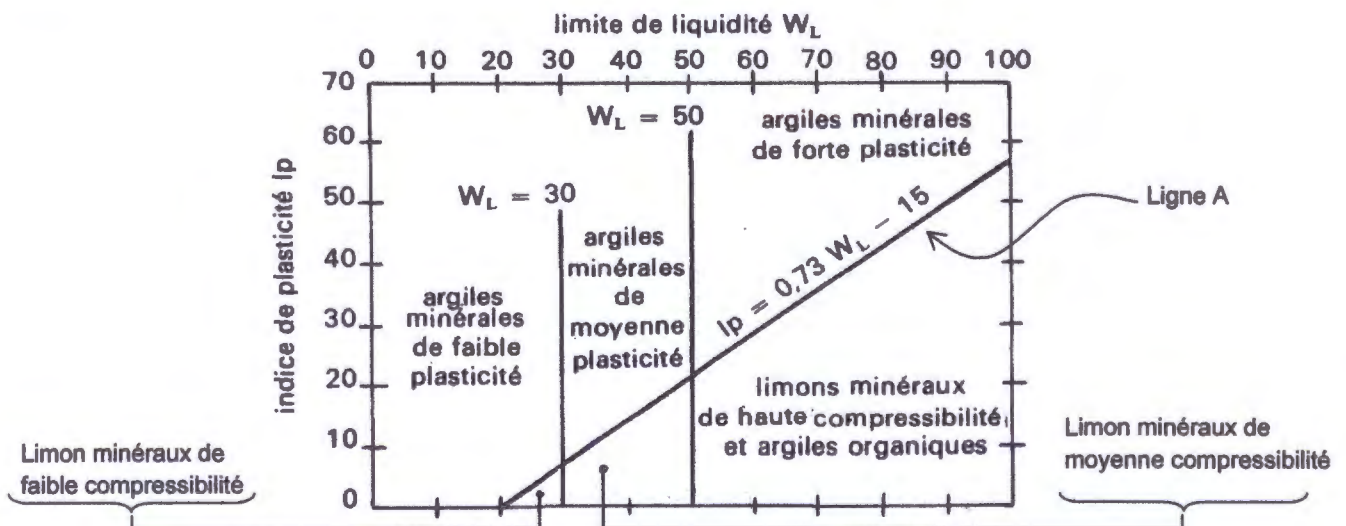
Les limites de liquidité et de plasticité sont les meilleurs paramètres permettant d'identifier et de classer physiquement les sols à particules très fines. Dans la Figure 2.7, une classification tenant compte de ces paramètres a été proposé par Casagrande (Chelghoum, 2006). Dans cette figure les argiles étant situées au-dessus de la ligne A et les limons au-dessous. Un sol est dit *très plastique* si ( $W_L \geq 50\%$ ), *moyennement plastique* si ( $30\% \leq W_L < 50\%$ ) et *peu plastique* si ( $W_L < 30\%$ ).

Selon la position de son point représentatif à l'intérieur du diagramme de Casagrande, un sol non organique prend l'une des appellations et est désigné par l'un des symboles ci-après (Tableau 4.4).

**Tableau 2.3.** Symboles internationaux désignant les sols fins (Philipponnat et Hubert, 2003)

Désignation	Symbole international	Symbole français
Limon peu plastique	ML	L <sub>P</sub>
Argile peu plastique	CL	A <sub>P</sub>
Limon très plastique	MH	L <sub>T</sub>
Argile très plastique	CH	A <sub>T</sub>

D'après Costet et Sanglerat, (1981) cette classification est très intéressante, mais reste comme même insuffisante dans la plus part des cas, car les sols naturels sont des mélanges, aussi les limites d'Atterberg sont-elles influencées par des facteurs qui peuvent ajouter ou retrancher leurs effets : à titre d'exemple, la présence de matière organique ou de chaux, le faible pourcentage de bentonite dans un matériau nettement sableux, etc.



**Figure 2.8.** Abaque de plasticité de Casagrande (Costet et Sanglerat, 1981)



### 2.4.2. Classification de la "Public Road Administration <sup>(3)</sup>" (P.R.A.)

Une classification basée sur les résultats des limites d'Atterberg est proposée par la « Public Road Administration » par laquelle on peut, en première approximation, classer les sables, les limons et argiles en fonction des limites d'Atterberg comme le montre le Tableau 2.4 (Costet et Sanglerat, 1981 ; Chelghoum, 2006).

**Tableau 2.4.** Classification selon la Public Road Administration

Sols	Limite de liquidité $W_L$	Indice de plasticité $I_p$
Sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_p < 25$
Argile	$W_L > 30$	$I_p > 15$

### 2.4.3. Classification GTR (NF P 11-300)

En France, la seule classification présentant un réel intérêt pratique est celle utilisée dans les travaux de terrassement. Elle est décrite dans la norme NF P 11-300 et son utilisation est détaillée dans un document intitulé « *Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de formes* » c'est pourquoi cette classification est désigné par *classification GTR* (Tableau 2.5). Cette classification est très utilisée en géotechnique routière et elle est aussi basée sur les résultats des limites d'Atterberg (Philipponnat et Hubert, 2003 ; Bouafia, 2013)

<sup>(3)</sup> **Public Road Administration** : Administration public des routes



**Tableau 2.5.** Classification des sols (NF P 11-300) - Tableau simplifié

<b>Sols FINS A</b>  $d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} < 0,08$ mm	$VBS \leq 2,5^*$ ou $IP \leq 12$	<b>A<sub>1</sub></b> : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
	$12 < IP \leq 25^*$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	<b>A<sub>2</sub></b> : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
	$25 < IP \leq 40^*$ ou $6 < VBS \leq 8$	<b>A<sub>3</sub></b> : argiles et argiles mameuses, limons très plastiques...
	$IP > 40^*$ ou $VBS > 8$	<b>A<sub>4</sub></b> : argiles et argiles mameuses très plastiques
<b>Sols sableux ou graveleux avec fines B</b>  $d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} \geq 0,08$ mm	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>1</sub></b> : sables silteux...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>2</sub></b> : sables argileux (peu argileux)...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>3</sub></b> : graves silteuses...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>4</sub></b> : graves argileuses (peu argileuses)...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS \leq 1,5^*$ ou $IP \leq 12$	<b>B<sub>5</sub></b> : sables et graves très silteux...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS > 1,5^*$ ou $IP > 12$	<b>B<sub>6</sub></b> : sables et graves argileux à très argileux.
<b>Sols comportant des fines et des gros éléments C</b>  $d_{max} > 50$ mm	$d_{12} < 0,08$ mm ou $d_{12} > 0,08$ mm et $VBS > 0,1$	<b>C</b> : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.
<b>Sols insensibles à l'eau D</b>  $VBS \leq 0,1$  $d_{12} \geq 0,08$ mm	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm	<b>D<sub>1</sub></b> : sables alluvionnaires propres, sables de dune...
	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm	<b>D<sub>2</sub></b> : graves alluvionnaires propres, sables...
	$d_{max} > 50$ mm	<b>D<sub>3</sub></b> : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...

\* Paramètre dont le choix est à privilégier

### 2.4.4. Classification LCPC

C'est une classification proposée par le Laboratoire Centrale des Ponts et chaussées (LCPC). Elle est utilisée en particulier en France dans les laboratoires de mécanique des sols et sciences des matériaux (Figure 2.8). Cette classification est basée d'une part sur l'analyse granulométrique pour les sols à matrice grossière et d'autre part sur les limites d'Atterberg pour les sols à matrice fine ou pour la partie fine des sols grenus.

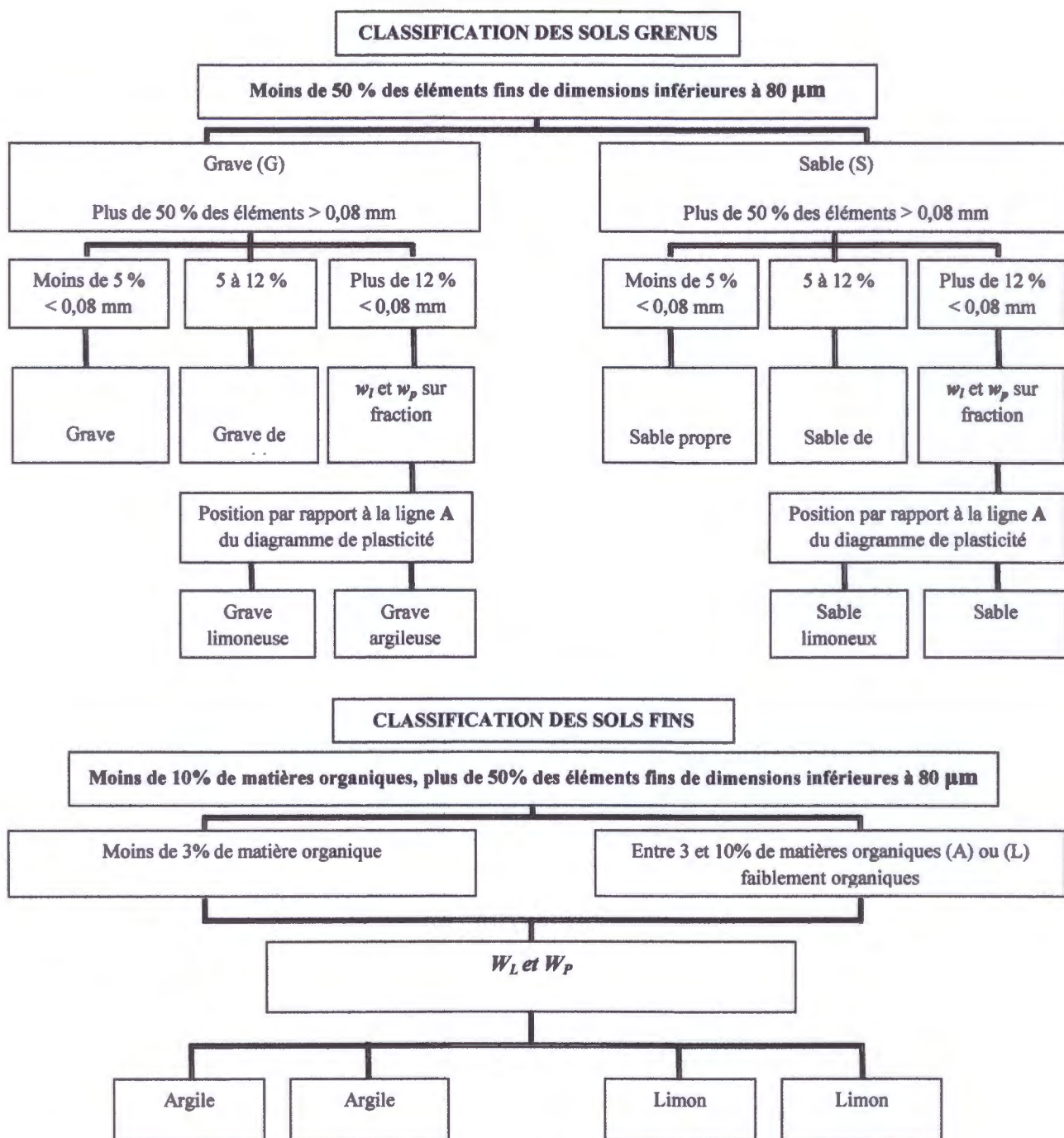


Figure 2.9. Système de classification LCPC (Bouafia, 2011)

Dans la bibliographie de la géotechnique, plusieurs auteurs nous proposent des classifications utiles pour la description des sols fins. A titre d'exemple nous citons ce qui suit :

**Tableau 2.6.**Indice de plasticité des argiles et des limons (Berthaud et al.2013)

L'indice de plasticité $I_P$	Degré de plasticité
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

On peut aussi proposer une classification des sols en quatre groupes comme l'indique le tableau suivant :

**Tableau 2.7.**Caractérisation de l'activité d'une argile dans un sol (Berthaud et al.2013)

Activité colloïdale $A_C$	Catégorie
> 0,75	Argile inactive
0,75 - 1,25	Argile normale
1,25 - 2	Argile active
>2	Argile très active

Enfin, pour terminer ce chapitre nous donnons à titre indicatif quelques valeurs caractéristiques de sol :

**Tableau 2.8.**Caractérisation de l'activité d'une argile dans un sol (Berthaud et al.2013)

Minéral	$W_L$	$I_P$	$A_C$
Kaolinite	40-60	10-25	0,4
Illite	80-120	50-70	0,9
Sodium montmorillonite	700	650	7
Autres montmorillonites	300-650	200-550	1,5
Sol granulaire	< 20	0	0





## CHAPITRE 3

### Etude Expérimentale



#### **Arthur CASAGRANDE**

*(28 août 1902 - 6 septembre 1981) ingénieur civil américain né en Autriche il a apporté d'importantes contributions aux domaines de la géologie de l'ingénieur et du génie géotechnique à ses débuts. Reconnu pour ses conceptions ingénieuses d'appareils destinées aux essais sur les sols et ses recherches fondamentales sur les infiltrations et la liquéfaction des sols, il est également crédité pour le développement du programme d'enseignement de mécanique des sols à l'Université de Harvard au début des années 1930 (Wikipédia).*

### 3.1. Matériaux et démarche expérimentale :

Dans cette partie on s'intéresse à montrer l'importance relative des facteurs de variation des limites d'Atterberg. Car dans ce genre d'essais, l'application rigoureuse du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats fiables et comparables d'un opérateur à l'autre.

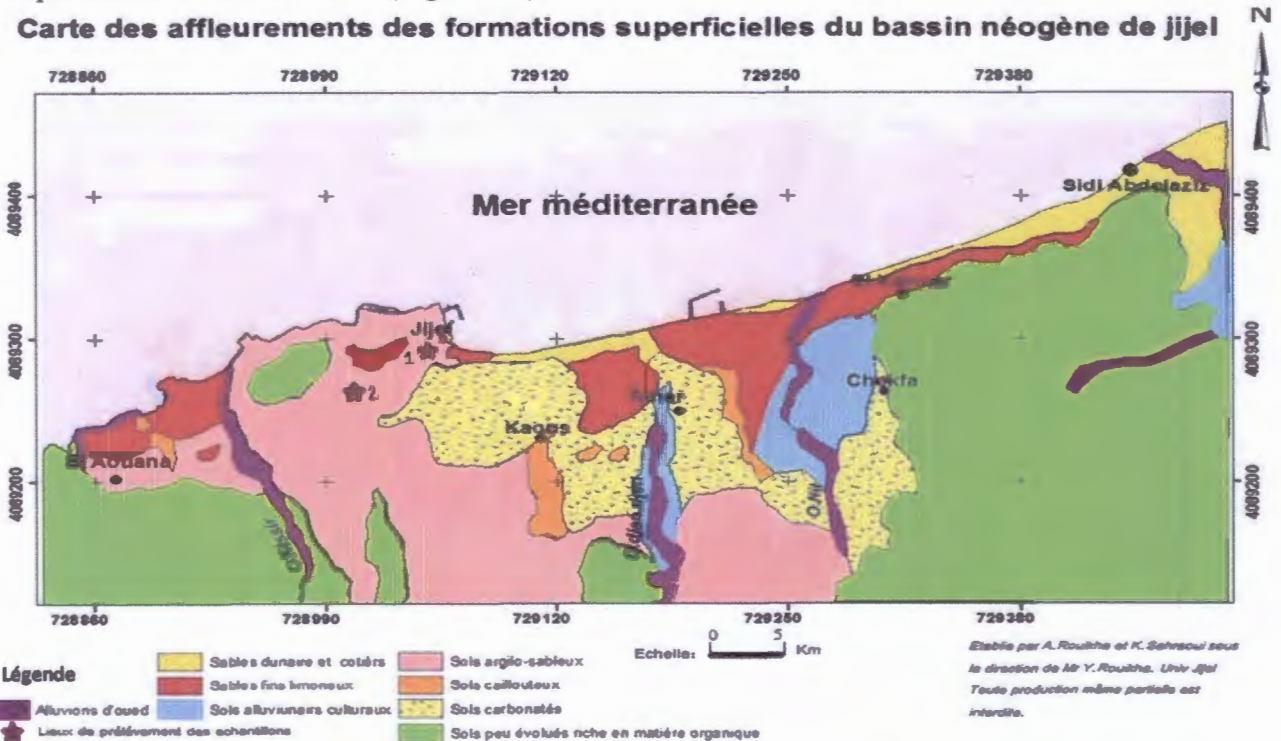
Pour répondre aux objectifs fixés dans cette étude, on va d'abord présenter les caractéristiques physiques de deux types de sol utilisés ainsi que la démarche expérimentale suivie.

### 3.2. Caractéristiques physiques des sols étudiés

Dans notre étude on a utilisé deux types de sol provenant de deux endroits différents dans la Wilaya de Jijel (Nord-Est Algérien), à savoir :

- **Un sol marneux** : prélevé dans la région de *T'Hourat* située au sud de la ville de Jijel. C'est un sol fins, carbonaté représenté par de fines particules d'argile carbonatée ou « marne » de couleur sombre à bleu-gris où les particules siliceuses sont très rares.
- **Un sol argilo-sableux** : l'échantillon a été prélevé dans la localité de *Ouled Aissa* au sud de Jijel ville sur l'affleurement au flanc nord du djebel *Talouda*, C'est un sol rouge sableux rubané de passée blanche argileuse avec des inclusions des galets centimétrique de silice aggloméré.

Les essais d'identification des sols ont étaient réalisés au laboratoire des matériaux du département des Sciences de le Terre et de l'Univers de l'Université Mohamed Seddik Benyahia- Jijel. Le Tableau 1.3 regroupe les caractéristiques physiques et la classification des deux sols utilisés dans cette étude. Les lieux de prélèvement des échantillons de sol sont reportés sur la carte suivante (Figure 3.1).



**Figure 3.1.** Carte des affleurements des formations superficielles du bassin néogène de Jijel (Rouikha et Sahraoui, 2016)

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques des deux sols utilisés.

Propriétés physiques	Argiles	Marnes
Poids volumique humide $\gamma_h$ ( $kg/m^3$ )	21,40	22,20
Poids volumique sec $\gamma_d$ ( $kg/m^3$ )	18,50	18,80
Teneur en eau $W$ (%)	16,35	19,00
Limite de plasticité $W_P$ (%)	18,85	19,30
Limite de liquidité $W_L$ (%)	39,36	30,96
Indice de plasticité $I_p$	20,51	11,66
Indice de consistance $I_c$	1,12	1,02
Valeur au bleu ( $VBS$ )	5,84	7
Classification GTR*	A2	A2

\*GTR : Guide des Terrassements Routiers.

Les résultats consignés dans le tableau ci-dessus ont été obtenus suite aux essais de laboratoire réalisés par nos soins durant la phase de préparation de ce mémoire.

### 3.3. Programme expérimental

La préparation des échantillons de sol et la réalisation des limites d'Atterberg des différentes séries d'essais étaient conformément à la norme NF P 94-051 exposée dans le chapitre 2 de ce mémoire. Afin d'atteindre les objectifs de notre thème de fin d'étude et répondre sur la question des facteurs de variation des limites d'Atterberg, on a proposé et réaliser le programme expérimental suivant (Tableau 3.2). Nous rappelons que la partie expérimentale de ce travail été réalisée au laboratoire des matériaux du département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université Mohamed Seddik ben yahia- Jijel.



Tableau 3.2. Détail du programme expérimental réalisé dans le cadre de cette étude

Séries d'essais réalisés	Type de sol utilisé	Observations
<b>I. Influence de la nature du sol sur les résultats des limites d'Atterberg</b>		
<b>Série 01 :</b> Essai de référence	Argile	Essai normalisé
	Marne	Essai normalisé
<b>Série 02 :</b> La proportion des éléments fins $\leq 0,2$ mm	Argile + 25% éléments fins	Essai normalisé : Présence des éléments $\leq 0,2$ mm
	Argile + 50% éléments fins	
	Argile + 75% éléments fins	
	Marne + 25% éléments fins	Essai normalisé : Présence des éléments $\leq 0,2$ mm
	Marne + 50% éléments fins	
	Marne + 75% éléments fins	
<b>Série 03 :</b> La proportion de la matière organique (sciure de bois de diamètre $< 0,2$ mm)	Argile + 25% matière organique	Essai normalisé : Présence de la matière organique
	Argile + 10% matière organique	
	Argile + 5% matière organique	
	Argile + 2,5% matière organique	
	Marne + 25% matière organique	Essai normalisé : Présence de la matière organique
	Marne + 10% matière organique	
	Marne + 5% matière organique	
	Marne + 2,5% matière organique	
<b>II. Influence du matériel utilisé sur les résultats des limites d'Atterberg</b>		
<b>Série 04 :</b> Etat du socle	Argile	Essai non normalisé : - socle en acier - socle en caoutchouc
	Marne	Essai non normalisé : - socle en acier - socle en caoutchouc
<b>Série 05 :</b> Type d'outil à rainure	Argile	Essai normalisé : - outil Casagrande - outil A.S.T.M
	Marne	Essai normalisé : - outil Casagrande - outil A.S.T.M
<b>Série 06 :</b> La hauteur de chute de la coupelle	Argile	Essai non normalisé : Hauteur de chute de 0,5 cm
	Marne	Essai non normalisé : Hauteur de chute de 0,5 cm
<b>III. Influence du mode de préparation du mortier destiné à l'essai</b>		
<b>Série 07 :</b> mode de préparation du mortier	Argile	- Séchage complet à l'étuve - Séchage partiel à l'air libre
	Marne	- Séchage complet à l'étuve - Séchage partiel à l'air libre

### 3.4. Présentation des résultats

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation, les résultats expérimentaux seront présentés sous forme de tableau comme le montre à titre d'exemple les (Tableaux 3.3 et 3.4).

Les résultats des sept séries du programme expérimental réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'étude sont regroupés dans l'annexe à la fin de ce mémoire.

**Tableau 3.3. Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon d'argile (essai de référence)**

Essai normalisé (avec l'utilisation de l'outil de Casagrande)							
N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	25	25	26	27			
Poids du sol humide	7,89	5,75	7,91	7,29	2,98	2,59	3,16
Poids du sol sec	5,70	4,11	5,70	4,22	2,50	2,16	2,69
Poids de l'eau	2,19	1,64	2,21	2,07	0,48	0,43	0,47
Teneur en eau $W$ (%)	38,42	39,90	38,77	39,65	19,2	19,90	17,47
$W_L$ (%)	39,36						
$W_P$ (%)	18,85						
$I_P$ (%)	20,51						

**Tableau 3.4. Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon de marne(essai de référence)**

Essai normalisé (avec l'utilisation de l'outil de Casagrande)							
N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	23	28	25	27			
Poids du sol humide	4,86	6	4,67	4,73	4,06	3,34	3,19
Poids du sol sec	3,73	4,60	3,57	3,59	3,42	2,80	2,66
Poids de l'eau	1,13	1,40	1,10	1,14	0,64	0,54	0,53
Teneur en eau $W$ (%)	30,29	30,43	30,81	31,75	18,71	19,28	19,92
$W_L$ (%)	30,96						
$W_P$ (%)	19,30						
$I_P$ (%)	11,66						

### 3.5. Analyses et discussions

A travers ce travail de recherche nous avons vu que les limites d'Atterberg sont des essais empiriques dont les résultats peuvent être fortement influencés par le facteur personnel de l'opérateur, la qualité et l'usure du matériel utilisé ainsi que le mode de préparation des échantillons testés. Pour cela nous recommandons pour ce type d'essai l'application rigoureuse du mode opératoire si l'on veut obtenir des résultats fiables et représentatifs.

Dans le but de montrer les facteurs qui peuvent influencés les résultats de l'essai des limites d'Atterberg, nous allons essayer d'interpréter et expliquer les résultats obtenus suivant les séries réalisées dans notre programme expérimental.



### 3.5.1. Influence du matériel utilisé sur les résultats des limites d'Atterberg

#### 3.5.1.1. Effet de l'état du socle de l'appareil de Casagrande

L'inventeur de l'appareil actuellement utilisée pour mesurer la limite de liquidité A., Casagrande (1932) recommande qu'on utilise pour le socle un matériau, type ébonite<sup>(1)</sup>, qui permette un re-surfage aisé lorsque la coupelle réussit à creuser le socle à l'emplacement de sa chute. Par ailleurs, ce socle doit être réalisé dans un matériau présentant toujours la même dureté, les appareils commercialisés actuellement comportent des socles en bois bakélinisé<sup>(2)</sup>. Ce matériau présente une résistance au choc minimale de 11 Kilojoule<sup>(3)</sup> et maximale de 17 kJ.

Pour vérifier l'influence de l'état du socle de l'appareil de Casagrande sur les résultats de la limite de liquidité et par conséquent les limites d'Atterberg, nous avons réalisé l'essai de limite de liquidité en utilisant une plaque en acier dure entre la coupelle et le socle de l'appareil pour amplifier le choc. Ensuite, on a utilisé une plaque en caoutchouc afin d'amortir ce chocs entre la coupelle et le socle de l'appareil de Casagrande.

Les résultats obtenus pour les deux types de sols utilisés (argile et marne) montrent que l'état du socle est important et qu'il a une influence sur les valeurs de la limite de liquidité ce qui affecte par conséquent les autres paramètres de consistance du sol (Figure 3.2). On constate bien une augmentation sensible de  $W_L$  et  $I_P$  par rapport à l'échantillon de référence comme le montre la Figure 3.2 et le Tableau 3.5.

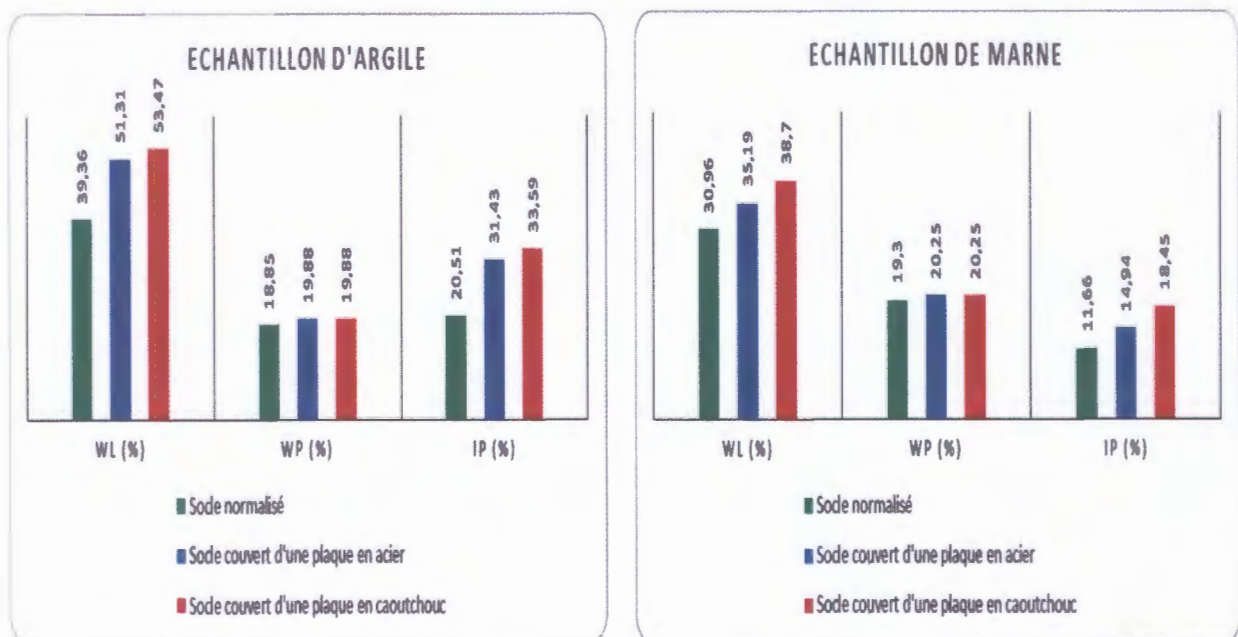


Figure 3.2. Effet de l'état du socle sur les résultats des limites d'Atterberg

(1) **Ebonite** : Caoutchouc durci.

(2) **Bakéliniser** : renforcer en utilisant de la bakélite, matériau constitué à partir d'une résine de formaldéhyde de phénol thermodurcissable aussi appelée phénoplaste.

(3) **kilojoule (kJ)** : Unité de mesure d'énergie du système international (SI), valant  $10^3$  joules. Un joule est égale au travail produit par une force d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.



Tableau 3.5. Quantification de l'influence de l'état du socle

		Socle normalisé	Socle couvert d'une plaque d'acier	Observations	Socle couvert d'une plaque en caoutchouc	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	51,31	+ 11,95 %	53,47	+ 14,11 %
	$W_P$ (%)	18,85	19,88		19,88	
	$I_P$ (%)	20,51	31,43	+ 10,92 %	33,59	+ 13,08 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	35,19	+ 4,23 %	38,7	+ 7,74 %
	$W_P$ (%)	19,30	20,25		20,25	
	$I_P$ (%)	11,66	14,94	+ 3,28 %	18,45	+ 6,79 %

### 3.5.1.2. Effet de l'outil à rainure

Selon la norme NF P 94-051 l'outil à rainure doit produire une rainure de  $2 \pm 0,05$  mm, pour cette raison elle préconise l'utilisation de l'outil à rainure de Casagrande présenté dans la Figure 3.3.a. En ce qui concerne l'outil de type A.S.T.M (Figure 3.3b) son emploi est déconseillé par les utilisateurs de la norme française NF P 94-051 alors qu'il est utilisé dans plusieurs pays anglo-saxon.

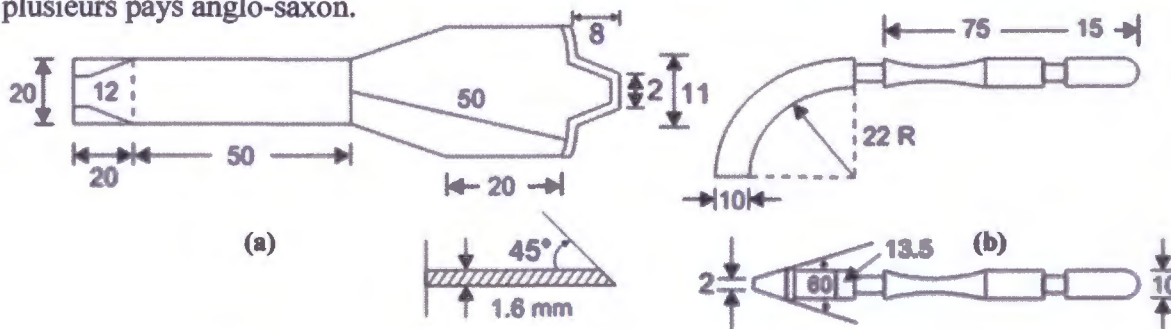


Figure 3.3. (a) Outil à rainures de Casagrande et (b) outil à rainures ASTM

Ce qui nous intéresse concernant ce point c'est l'influence de l'outil à rainure sur les résultats de la limite de liquidité sans parler de l'effet d'usure<sup>(4)</sup>. Pour cette raison ont à effectuer deux séries d'essais, une avec l'outil à rainure de Casagrande et l'autre avec celui de l'ASTM.

Nous remarquons que l'angle que font les lèvres des rainures effectuées avec ces deux outils est le même ( $60^\circ$ ) mais la profondeur est différente (8 mm pour l'outil de Casagrande, contre 10 mm pour l'outil ASTM). De plus, l'outil ASTM présente l'inconvénient de produire une rainure dont la profondeur est fonction de l'épaisseur du matériau placé dans la coupelle, épaisseur qu'il surélève encore en repoussant latéralement le matériau. Ceci n'est pas le cas avec l'outil de Casagrande qui rectifie même l'épaisseur de matériau et donne par conséquence une rainure de même profondeur.

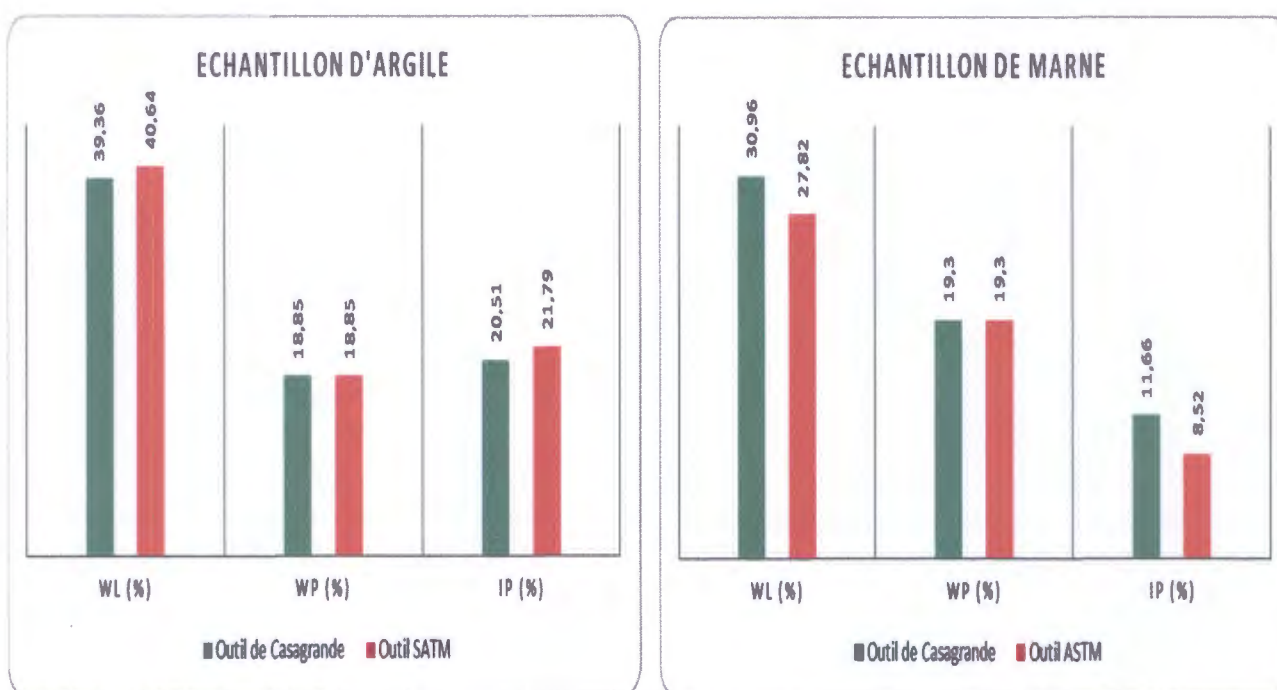
Cette constatation devienne de plus en plus intéressante lorsqu'on se dit, que l'essai de limite de liquidité est un essai de cisaillement du sol à une certaine teneur en eau.

<sup>(4)</sup> L'outil à rainure est utilisable sans incidence sur les résultats tant que l'usure de la pointe est inférieure à 0,2mm. On reformera donc l'outil à rainure lorsque sa pointe atteint 2,2 mm de large (LCPC 1987).

Il en résulte que, plus la rainure est profonde, plus la résistance au cisaillement durant l'essai de limite de liquidité est faible, c'est ce que montrent les essais comparatifs réalisés en utilisant les deux outils à rainurer (Figure 3.4 et Tableau 3.6). Ces résultats indiquent les différences sur  $W_L$  observées en utilisant les outils à rainure A.S.T.M et Casagrande.

**Tableau 3.6.** Quantification de l'influence l'outil à rainure

		Outil de Casagrande	Outil ASTM	Observations
<b>Argile</b>	$W_L$ (%)	39,36	40,64	+ 1,28 %
	$W_P$ (%)	18,85	18,85	
	$I_P$ (%)	20,51	21,79	+ 1,29 %
<b>Marne</b>	$W_L$ (%)	30,96	27,82	- 3,14 %
	$W_P$ (%)	19,30	19,30	
	$I_P$ (%)	11,66	8,52	- 3,14



**Figure 3.4.** Effet de l'outil à rainure sur les résultats des limites d'Atterberg

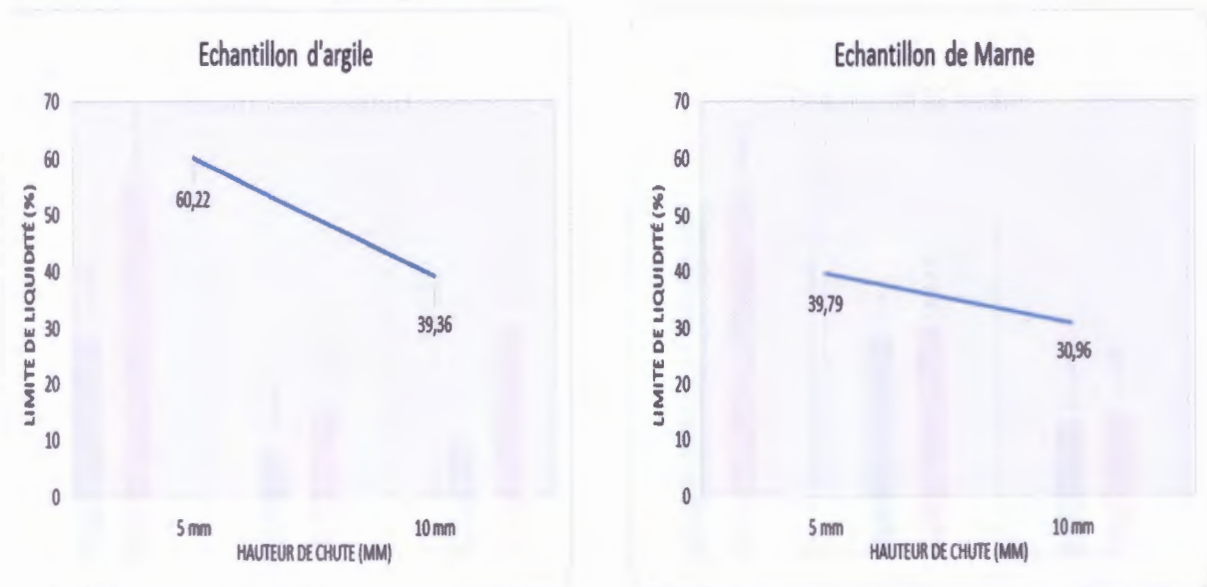
### 3.5.1.3. Effet de la hauteur de chute de la coupelle

Dans l'essai des limites d'Atterberg, la hauteur de chute de la coupelle doit toujours être soigneusement réglée (selon la norme NF P 94-051 elle est égale à 10 mm). Le graphique de la Figure 3.5 montre les variations de la limite de liquidité  $W_L$  en fonction de la hauteur de chute et ce pour les deux sols étudiés à savoir : les argiles avec une valeur de référence de  $W_L = 39,36$  % et les marnes avec  $W_L = 30,96$  %.

Nous constatons que, un écart de  $\pm 1$  mm sur la hauteur de chute de la coupelle peut entraîner une erreur allant de 4% (cas des argiles) à 2% (cas des marnes) sur la valeur de la limite de liquidité  $W_L$  sans oublier l'incidence de ces erreurs sur les autres paramètres de consistance du sol en question.



Il en résulte que le socle doit être re-surfacé lorsque il est creusé par la coupelle au fur et à mesure du temps. Le contrôle du diamètre de l’empreinte est important car on ne tient pas compte au moment du réglage de la hauteur de chute, du supplément de hauteur entraîné par le creux réalisé par la coupelle dans le socle.



**Figure 3.5.** Effet de la hauteur de chute de la coupelle sur la limite de liquidité

**Tableau 3.7.** Quantification de l’influence de la hauteur de chute de la coupelle

		Hauteur de chute de 10 mm (Essai normalisé)	Hauteur de chute de 5 mm	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	60,22	+ 20,86 %
	$W_P$ (%)	18,85	20,71	
	$I_P$ (%)	20,51	39,51	+ 19,00 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	39,79	+ 8,83 %
	$W_P$ (%)	19,30	20,03	
	$I_P$ (%)	11,66	19,76	+ 8,10 %

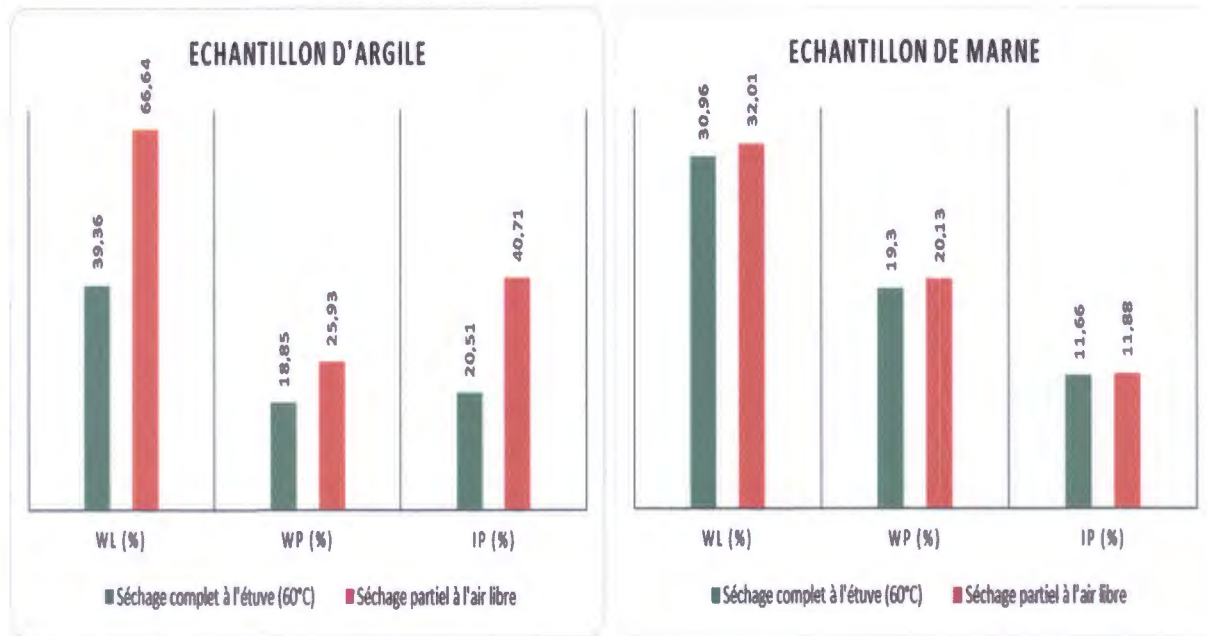
### 3.5.2. Influence du mode de préparation du mortier destiné à l’essai

Le séchage à l’étuve, même à faible température (60°C par exemple) peut modifier les particules argileuses d’un sol, les graphiques ci-dessous (Figure 3.6) montrent clairement les différences observées sur la limite de liquidité et l’indice de plasticité ( $I_P = W_L - W_P$ ) juste par le fait de changer le mode de préparation du mortier. Pour faire sortir l’influence du mode de préparation sur les limites d’Atterberg nous avons procédé comme suit :

- Une série d’essai avec un échantillon préparé par tamisage humide suivi d’un séchage complet à l’étuve (60°C environ). Ce qui implique la réalisation des opérations suivantes : tamisage, rinçage abondant, décantation, siphonage et séchage total du matériau.



- Une deuxième série d'essai avec un échantillon préparé par tamisage humide suivi d'un séchage partiel permettant de recueillir le matériau à l'état de boue. La chronologie de préparation est la suivante : tamisage dans un peu d'eau, séchage partiel (entre l'étuve et l'air libre) et prise du mortier à l'état pâteux.



**Figure 3.6.** Effet du mode de préparation du mortier sur les limites d'Atterberg

On constate que les différences sont très importantes pour le cas des argiles que celui des marnes, ce qui implique que le non respecte du mode opératoire de la préparation du mortier affecte les résultats de l'essai des limites d'Atterberg comme le montre le (Tableau 3.8).

**Tableau 3.8.** Quantification de l'influence du mode préparatoire du mortier

		Séchage complet à l'étuve (60 C°)	Séchage partiel à l'air libre	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	66,64	+ 27,28 %
	$W_P$ (%)	18,85	25,93	+ 7,08 %
	$I_P$ (%)	20,51	40,71	+ 20,20 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	32,01	+ 1,05 %
	$W_P$ (%)	19,30	20,13	+ 0,83 %
	$I_P$ (%)	11,66	11,88	+ 0,22 %

En employant les deux méthodes de préparation des échantillons, mentionnées ci-dessus, nous constatons ce qui suit :

1. Le délai de préparation est nettement plus court en prélevant le mortier à l'état pâteux.
2. Les indices de plasticité sont différents, ce qui implique que l'opération du séchage complet à l'étuve a pour conséquence la diminution de l'indice de plasticité  $I_P$ , la différence provenant surtout de la limite de liquidité  $W_L$ .

Ce résultat permet aussi de dire qu'il faut absolument retenir la méthode sans séchage complet à l'étuve pour la préparation du mortier.

### 3.5.3. Influence de la nature du sol sur les résultats des limites d'Atterberg

#### 3.5.3.1. Rôle de la granulométrie (taux des particules fines 0-0,2 mm)

Les résultats obtenus sur les deux types de sols (Tableaux 3.9 à 3.11 et la Figure 3.7) concordent et mettent en évidence la relation entre les limites d'Atterberg et le taux des particules fines du sol (0-0,2 mm). Par rapport aux résultats des échantillons de références, il apparaît que l'influence observée est plus remarquable lorsque sont prises en considération les particules de diamètres comprises entre 0-0,2 mm (argile et limon fin) avec un taux de 75%. Ce qui implique, que les limites d'Atterberg sont étroitement liées à la teneur du sol en argile et limon fin.

**Tableau 3.9.** Quantification de l'influence de 25 % de la fraction fine (0-0,2 mm)

		Echantillon de référence	+ 25 % de particules fines	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	41,27	+ 1,91 %
	$W_P$ (%)	18,85	20,98	+ 2,13 %
	$I_P$ (%)	20,51	20,29	- 0,22 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	31,34	+ 0,38 %
	$W_P$ (%)	19,30	20,45	+ 1,15 %
	$I_P$ (%)	11,66	10,89	- 0,77 %

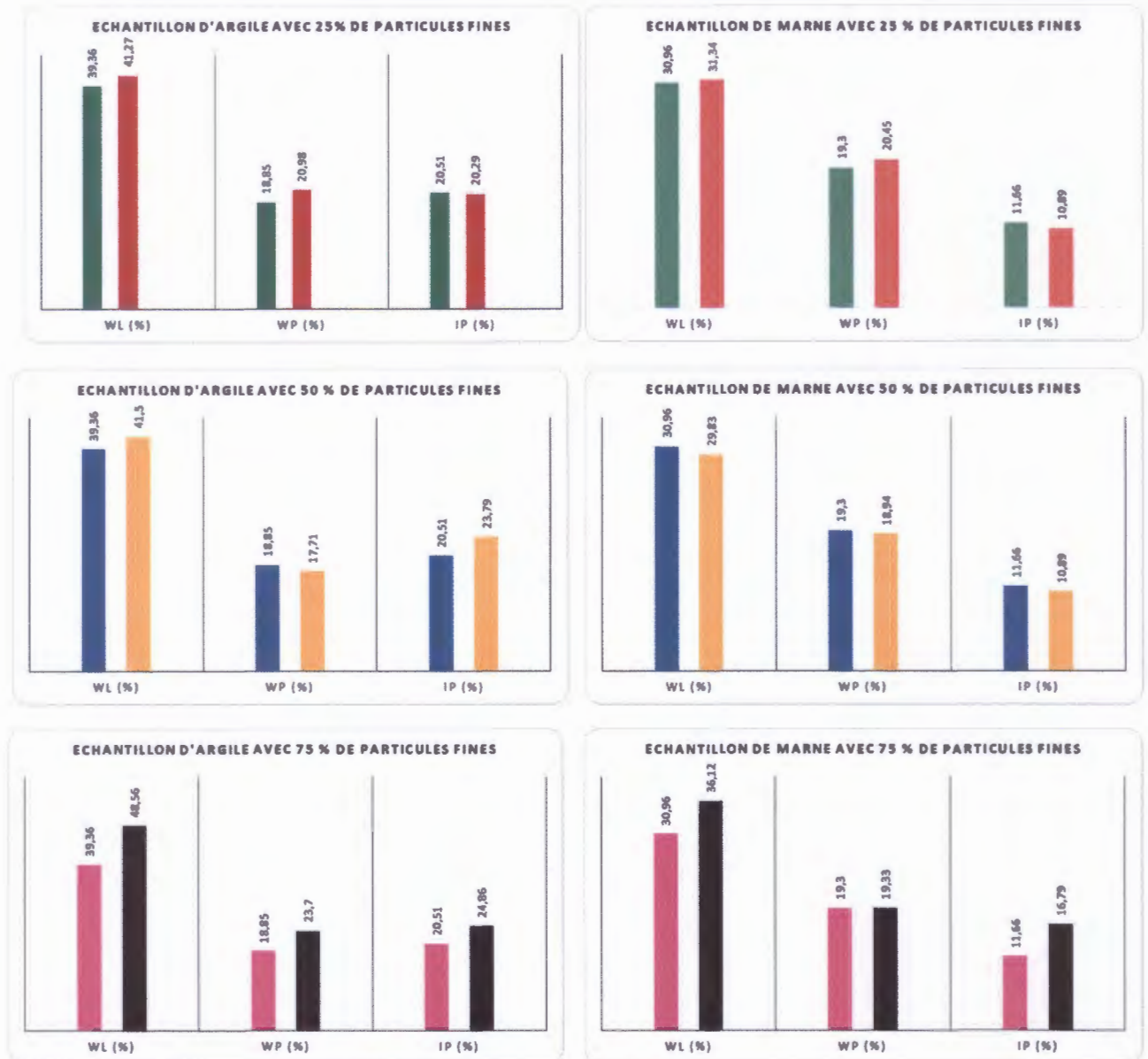
**Tableau 3.10.** Quantification de l'influence de 50 % de la fraction fine (0-0,2 mm)

		Echantillon de référence	+ 50 % de particules fines	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	41,50	+ 2,14 %
	$W_P$ (%)	18,85	17,71	- 1,14 %
	$I_P$ (%)	20,51	23,79	+ 3,28 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	29,83	- 1,13 %
	$W_P$ (%)	19,30	18,94	- 0,36 %
	$I_P$ (%)	11,66	10,89	- 0,77 %

**Tableau 3.11.** Quantification de l'influence de 75 % de la fraction fine (0-0,2 mm)

		Echantillon de référence	+ 75 % de particules fines	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	48,56	+ 9,20 %
	$W_P$ (%)	18,85	23,70	+ 4,85 %
	$I_P$ (%)	20,51	24,86	+ 4,35 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	36,12	+ 5,16 %
	$W_P$ (%)	19,30	19,33	+ 0,03 %
	$I_P$ (%)	11,66	16,79	+ 5,13 %





**Figure 3.7.** Effet du taux des particules fines (0-0,2 mm) dans le sol sur les limites d'Atterberg

A partir de ces résultats on constate immédiatement que, pour le cas des sols contenant 75 % de particules fines (0-0,2 mm), l'élévation de la limite de liquidité  $W_L$  est nettement plus importante que celle de la limite de plasticité  $W_P$ . En conséquence l'indice de plasticité  $I_P$  tend à augmenter avec la teneur en argile et limon fin.

### 3.5.3.2. Rôle de la matière organique

Dans cette partie, la matière organique utilisée été la sciure de bois de diamètre  $\leq 0,2$  mm mélangée soigneusement avec les échantillons de sol suivant trois taux différents à savoir : 10 %, 5 % et 2,5 %. D'après les résultats obtenus, on observe que les valeurs de la limite de



liquidité  $W_L$  et la limite de plasticité  $W_P$  soient plus élevées dans les sols riches en matière organique (Tableaux 3.12 à 3.14 et Figure 3.8).

**Tableau 3.12.** Quantification de l'influence de 10 % de la matière organique

		Echantillon de référence	+ 10 % de matière organique	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	52,29	+ 12,93 %
	$W_P$ (%)	18,85	29,7	+ 10,85 %
	$I_P$ (%)	20,51	22,59	+ 2,08 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	42,88	+ 11,92 %
	$W_P$ (%)	19,30	27,29	+ 7,99 %
	$I_P$ (%)	11,66	15,59	+ 3,93 %

**Tableau 3.13.** Quantification de l'influence de 5 % de la matière organique

		Echantillon de référence	+ 5 % de matière organique	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	48,71	+ 9,35 %
	$W_P$ (%)	18,85	23,88	+ 5,03 %
	$I_P$ (%)	20,51	24,83	+ 4,32 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	38,19	+ 7,23 %
	$W_P$ (%)	19,30	22,75	+ 3,45 %
	$I_P$ (%)	11,66	15,44	+ 3,78 %

**Tableau 3.14.** Quantification de l'influence de 2,5 % de la matière organique

		Echantillon de référence	+ 2,5% de matière organique	Observations
Argile	$W_L$ (%)	39,36	47,63	+ 8,27 %
	$W_P$ (%)	18,85	21,09	+ 2,24 %
	$I_P$ (%)	20,51	26,54	+ 6,03 %
Marne	$W_L$ (%)	30,96	34,39	+ 3,43 %
	$W_P$ (%)	19,30	22,93	+ 3,63 %
	$I_P$ (%)	11,66	11,46	- 0,20 %

Le facteur matière organique joue un rôle significatif et positif, aussi bien sur les valeurs des limites de liquidités que sur celles des limites de plasticités. La présence de matière organique dans le sol tend à accroître la limite de liquidité  $W_L$  un peu plus fortement que la limite de plasticité  $W_P$ . Cette différence est beaucoup plus faible pour le sol contenant 10 % de matière organique.

En remarque que, l'augmentation de la quantité de matière organique d'un sol entraîne une augmentation des seuils de passage à l'état plastique ( $W_P$ ) et à l'état liquide ( $W_L$ ), sans que l'étendue du domaine de la plasticité en soit affectée d'une manière importante (seulement une augmentation moyenne de 3,5 % pour les échantillons contenant 5% et 10% de matière organique). Alors que l'échantillon contenant 2,5 % de matière organique à garder presque le même indice de plasticité que l'échantillon de référence.

En définitive, l'effet de la matière organique consisterait donc, à accroître les teneurs en eau correspondant à l'apparition de l'état plastique, puis de l'état liquide, sans modifier d'une manière substantielle l'étendue du domaine de la plasticité.

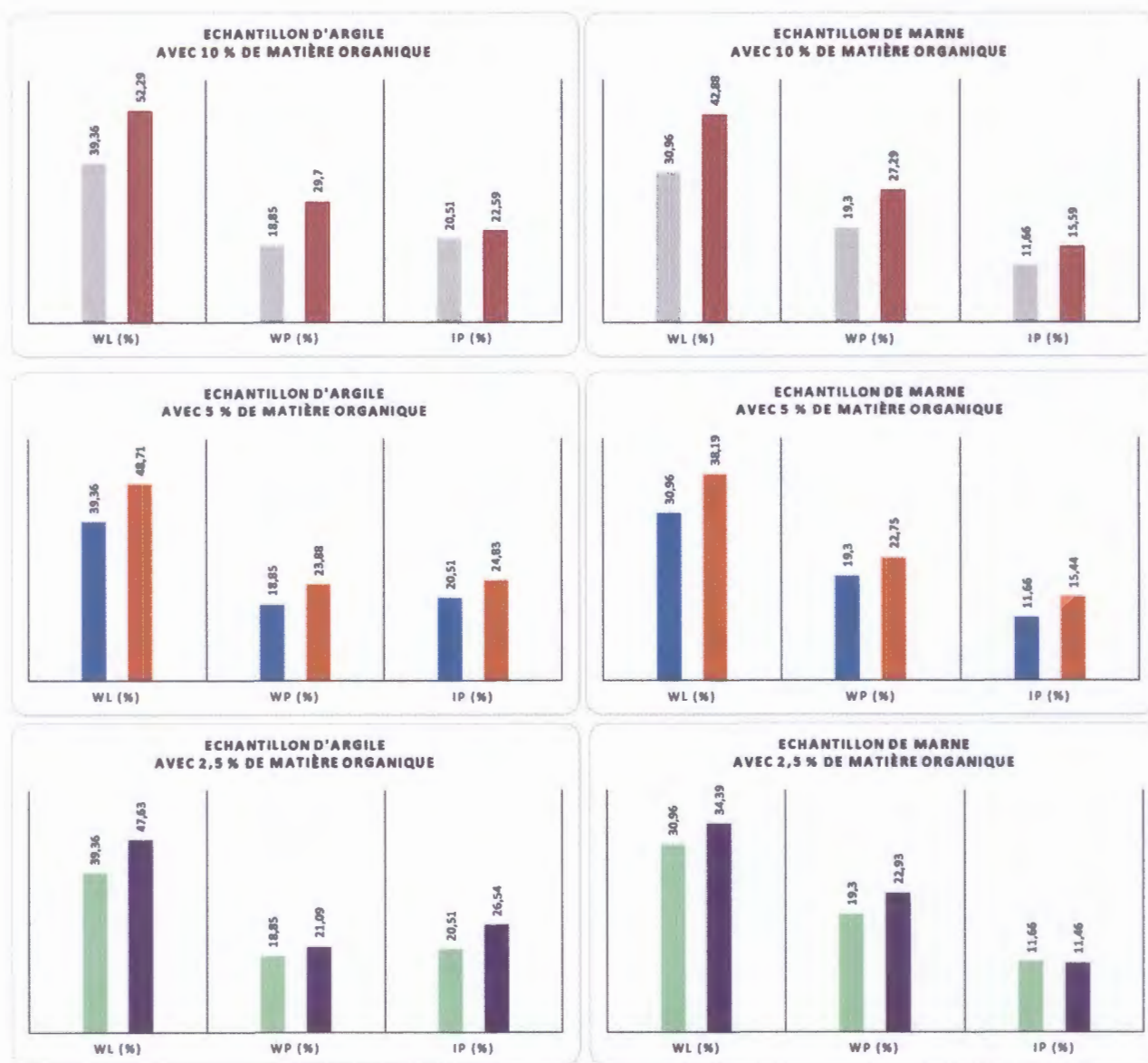


Figure 3.8. Effet du taux de matière organique dans le sol sur les limites d'Atterberg

*CONCLUSION  
GÉNÉRALE*



## Conclusion Générale

Les limites d'Atterberg ou limites de consistance sont considérées comme les essais les plus anciens et les plus utilisés pour l'identification des sols cohérents en laboratoire. Seulement, il s'agit d'essais empiriques dont les résultats peuvent être fortement influencés par plusieurs facteurs tels que : l'exactitude de l'opérateur, la qualité et l'usure du matériel, le mode de la préparation de l'échantillon soumis à l'essai, et bien d'autres facteurs.

L'objet de ce travail été de monter l'importance relative des facteurs de variation des limites d'Atterberg. Car dans ce genre d'essais, l'application rigoureuse du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats fiables et comparables d'un opérateur à l'autre.

Les résultats obtenus dans cette étude ont conduit aux conclusions suivantes :

- Les limites de liquidité dépendent de l'état du socle de l'appareil de Casagrande, elles sont directement influencées par l'état de dureté de ce dernier ce qui affecte par conséquence les limites de plasticités ainsi que l'indice de plasticité.
- Nous avons remarqué que l'angle que font les lèvres des rainures effectuées avec ces deux outils est le même mais la profondeur est différente (8 mm pour l'outil de Casagrande, contre 10 mm pour l'outil ASTM). De plus, l'outil ASTM présente l'inconvénient de produire une rainure dont la profondeur est fonction de l'épaisseur du matériau placé dans la coupelle, épaisseur qu'il surélève encore en repoussant latéralement le matériau. Ceci n'est pas le cas avec l'outil de Casagrande qui rectifie même l'épaisseur de matériau et donne par conséquence une rainure de même profondeur. C'est pour cette raison que la norme NF P 94-051 recommande l'outil à rainure de Casagrande.
- Dans l'essai des limites d'Atterberg, la hauteur de chute de la coupelle doit toujours être soigneusement réglée (selon la norme NF P 94-051 elle est égale à 10 mm). Nous avons constaté que, un écart de  $\pm 1$  mm sur la hauteur de chute de la coupelle peut entraîner une erreur allant de 2 à 4% sur la valeur de la limite de liquidité  $W_L$  sans oublier l'incidence de ces erreurs sur les autres paramètres de consistance du sol en question.
- En employant les deux méthodes de préparation des échantillons à savoir le séchage complet à l'étuve et le séchage partiel à l'air libre. Nous avons constaté, d'une part, que le délai de préparation est nettement plus court en prélevant le mortier à l'état pâteux, et d'autre part, les indices de plasticité son différents ce qui implique que l'opération du séchage complet à l'étuve a pour conséquence la diminution de l'indice de plasticité  $I_P$ . Certainement la différence provenant surtout de la limite de liquidité

$W_L$ . Notre résultat permet aussi de dire qu'il faut absolument retenir la méthode sans séchage complet à l'étuve pour la préparation du mortier.

- Les limites d'Atterberg dépendent d'une manière directe de la granulométrie de l'échantillon, les valeurs des limites de liquidité  $W_L$  et de plasticité  $W_P$  et celles de l'indice de plasticité  $I_P$  augmentant régulièrement avec le taux des éléments fins de diamètre (0-0,2 mm) et de façon comparable pour les deux types de sols étudiés à savoir les argiles et les marnes de la région de Jijel.
- Le taux de matière organique joue également un rôle sur les deux limites d'Atterberg dont il élève la valeur, mais ses variations ne paraissent pas affecter d'une manière substantielle l'indice de plasticité. L'effet de la matière organique consisterait donc, à accroître les teneurs en eau correspondant à l'apparition de l'état plastique, puis de l'état liquide, sans modifier d'une manière substantielle l'étendue du domaine de la plasticité du sol étudié.
- L'appréciation de la limite de plasticité demande, de la part de l'opérateur, une certaine expérience de la pratique de l'essai. On pourrait penser a priori que le résultat de cet essai dépend beaucoup du facteur personnel de l'opérateur. En réalité il n'est pas plus dispersé que celui observé par la limite de liquidité.

A travers cette étude nous souhaitons avoir contribué à la compréhension des facteurs de variations des limites d'Atterberg. On espère aussi que cette étude éclaircira les pratiques de base liées à ce type d'essai.

*RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES*



## Références bibliographiques

**Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A., (1990):** A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique* (40), (3), 405–430pp.

**Baver, L.D. (1930):** The Atterberg consistency constants: factors affecting their values and a new concept of their significance. *J. Amer. Soc. Agron., Geneva, N.Y.*, 22, p.935-948.

**Bouazza, A., Jefferis, S., Vangpaisal, T. (2007) :** Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet–dry cycles, *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 25, Issue 3, 170-185pp.

**Budhu, M. (2007):** Soil mechanics and foundations, 2ème édition, John Wiley & sons, Inc., 634 p.

**Bouafia, A. (2011) :** Génie civil : conception et calcul des ouvrages géotechniques, Pages Bleues, Algérie, 389 p.

**Bouafia, A. (2013) :** Aide mémoire de mécanique des sols, Office des Publications Universitaire, Algérie, 416 p.

**Berthaus, Y., De-Buhan, P., Schmitt, N. (2013) :** Aide-mémoire de mécanique des sols”, 2ème édition, Dunod, 337p.

**Costet, J. et Sanglerat, G. (1981) “**Cour pratique de mécanique des sols, 1 Plasticité et calcul des tassements”, Troisième édition, Dunod, 285 p.

**Casagrande, A. (1932):** Research on the Atterberg limits of soils, *Public Roads* Vol. 1, n° 2, 121-136pp.

**Chelghoum, N. (2006) :** Eléments de base en mécanique des sols, Publications de l’université Badji Mokhtar- Annaba, 318 p.

**Cheshomi, A., Eshaghi, A., Hassanpour, J., (2017) :** Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay, *Applied Clay Science*, Volume 135, 190-198pp.

**Combeau, A. (1963) :** Remarques sur les facteurs de variation Des limites d’Atterberg, p 29-37.

**Dupain, R., Lanchon, R. et Saint-Arroman, J.-C., (2000) :** Granulat, Sols, Ciments et Bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire”, 2<sup>ème</sup> édition conforme aux normes européennes, éditions Casteilla, Paris, 236 p.

**Grabowska-Olszewska, B. (2003):** Modelling physical properties of mixture of clays: example of a two-component mixture of kaolinite and montmorillonite, *Appl. Clay Sci.* (22), 251–259pp.

**Ghembaza, M.S., Dadouch, M., Bellia, Z. (2012) :** Effet du ciment sur le comportement physico-chimique d'un matériau de la région de Sidi bel Abbès, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie.

**Holtz, R et Kovacs, W. (1991) :** Introduction à la géotechnique, (traduit en français par Lafleur, J), édition de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.

**Jullien, A., Proust, C., Le Forestier, L and P. (2002):** Baillif, Hydro-chemo-mechanical coupling effects on permeability and swelling behaviour of a Casmectite soaked by Cu solutions, *Appl. Clay Sci.* (21), 143–153pp.

**Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., and al (2016):** Determiration of Atterberg limits using newly devised mud press machine, *Journal of African Earth Sciences*, Volume 116, 127-133pp.

**Léreau, J. (2006) :** Mécanique des sols 1, *polycopié de cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, Département de Sciences et Technologie pour l'Ingénieur, 3<sup>ème</sup> année ingénierie de la construction.

**Marek, S, Ź., David. J, W., Yen-Fang, S., Chun-Chieh, W., Ch.C (2015):** Smectite clay microstructural behaviour on the Atterberg limits transition, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 467, 89-96pp.

**Perigaud, S. (1964) :** Travail du sol et limites d'Atterberg.- *C.R.Acad.Agric.*, Paris, (50), (1), 57-66pp.

**Pothier, C. (2001) :** Etudes des propriétés de confinement de matériaux argileux pour barrières ouvrages de stockages de déchets, thèse université d'Orléans.

**Philipponnat, G. et Hubert, B. (2003) :** Fondations et ouvrages en terre, éditions Eyrolles, 548 p.

**Proust, Ch., Jullien, A., Le Forestier, L. (2004) :** Détermination indirecte des limites d'Atterberg par gravimétrie dynamique. *Comptes Rendus Géoscience*, Elsevier Masson, 336p.

**Russell, J.C. et Wehr, F.M. (1928):** The Atterberg consistency constants. *J. Amer. Soc. Agron., Geneva, N.Y.*, (20), 354-372pp.

**Robinet, J.C., Pakzad, M., Jullien, A., and al. (1999):** A general modelling of expansive and non-expansive clays, *Int. J. Numer. Methods Geomech.*, 1319–1335pp.



**Seed, H.B., Woodward Jr, R.J., Lundgren, R. (1964):** Clay mineralogical aspects of the Atterberg limits, *J. Soil Mech. Foundations Division, Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, 107–131pp.

**Smith, C.W., Hadas, A., Dan, J., Koyumdjisky, H. (1985):** Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel, *Geoderma*, Volume 35, Issue 1, 47-65pp.

**Schmitz, R.M., Schroeder, Ch., Charlier, R. (2004):** Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits, *Applied Clay Science*, Volume 26, Issues 1–4, 351-358pp.

**Shehadeh, S., Serhal, S. (2013):** Influence d'un traitement thermique et d'inclusions granulaires sur les caractéristiques géotechniques de matériaux naturels. Projet de fine d'étude en Génie civil, Université Libanaise.

**Sahraoui, K., Rouikha, A. (2016) :** Etude expérimentale des facteurs qui gouvernent le compactage des sols. Mémoire de Master académique en génie géologique, Université Mohamed SeddikBenyahia- Jijel, Algérie.

Secteur géotechnologies, hydrogéologie, prospection géophysique (GEO<sup>3</sup>), Institut de mécanique et de génie civil (Bât. B52/3), laboratoire de géotechnologie

**Venkatramaiah, C. (2006) :** Geotechnical engineering, 3<sup>ème</sup> édition révisée, Publié par New Age International (P) Ltd, 926 p.

**Zentar, R., Abriak, N.E.,Dubois, V. (2009):** Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments, *Applied Clay Science*, Volume 42, Issues 3–4,391-397pp.

### **Normalisations Françaises**

**NF P 94-053 (1991) :** Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau, octobre 1991.

**NF P 94-051 (1993) :** Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau, mars 1993.

**NF P 94-050 (1995) :**Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage, septembre 1995.



## **Liens Internet**

<http://www.sols-mesures.com/product=limite-de-liquidite-penetrometre-a-cone-wl>

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr>

[www.sols-mesures.com](http://www.sols-mesures.com)

*ANNEXE*

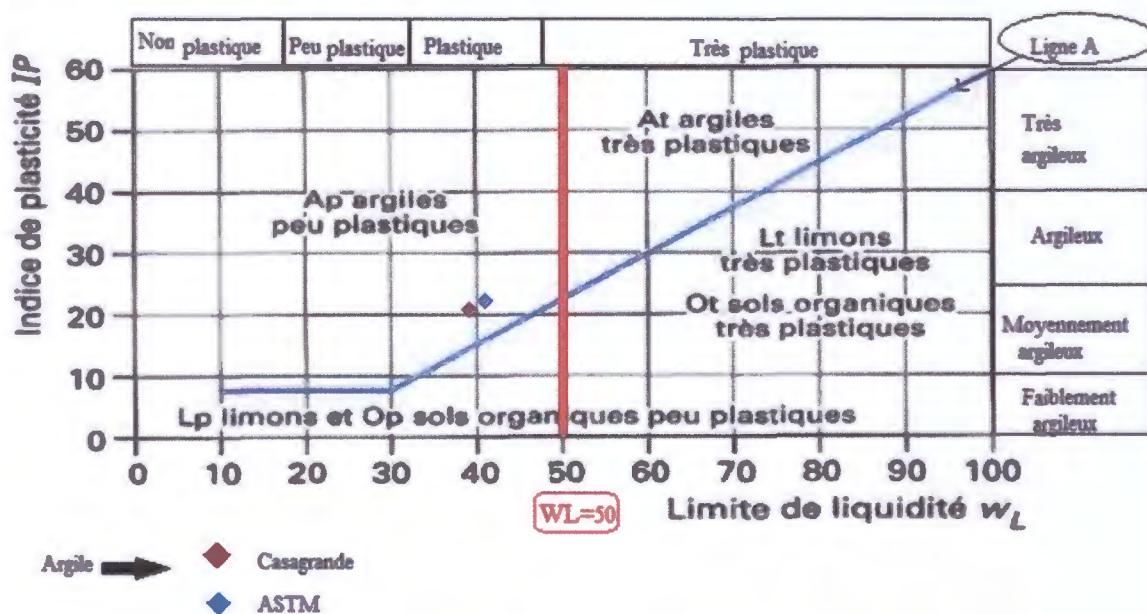
## 1. Le sol argileux

### 1.1. Essai normalisé avec l'outil Casagrande (essai de référence)

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	25	25	26	27			
Poids du sol humide	7,89	5,75	7,91	7,29	2,98	2,59	3,16
Poids du sol sec	5,7	4,11	5,7	4,22	2,50	2,16	2,69
Poids de l'eau	2,19	1,64	2,21	2,07	0,48	0,43	0,47
Teneur en eau $W$ (%)	38,42	39,90	38,77	39,65	19,2	19,90	17,47
$W_L$ (%)	39,36						
$W_P$ (%)	18,85						
$I_P$ (%)	20,51						

### 1.2. Essai réalisé avec l'outil ASTM

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	17	25	23	25			
Poids du sol humide	11,79	6,56	12,06	13,98	2,98	2,59	3,16
Poids du sol sec	8,34	4,63	8,57	9,95	2,50	2,16	2,69
Poids de l'eau	3,45	1,93	3,49	4,03	0,48	0,43	0,47
Teneur en eau $W$ (%)	41,36	41,68	40,72	40,50	19,20	19,90	17,47
$W_L$ (%)	40,64						
$W_P$ (%)	18,85						
$I_P$ (%)	21,79						



Calcification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (l'essai normalisé et réalisé)



## 1.3. Séchage partiel de l'échantillon à l'aire libre

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	27	25	24	20			
Poids du sol humide	4,6	4,9	4,3	6,9	2,95	2,20	2,23
Poids du sol sec	2,8	3	2,5	4,1	2,34	1,73	1,79
Poids de l'eau	1,8	1,9	1,8	2,8	0,61	0,47	0,44
Teneur en eau $W$ (%)	64,28	63,33	72	68,29	26,06	27,16	24,58
$W_L$ (%)	66,64						
$W_P$ (%)	25,93						
$I_P$ (%)	40,71						

## 1.4. Etat du socle de l'appareil de Casagrande

## (a) introduction d'une plaque en acier entre la coupelle et le socle

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	18	26	20	19			
Poids du sol humide	6,39	4,38	3,88	3,94	3,24	2,53	2,97
Poids du sol sec	4,19	2,89	2,55	2,60	2,70	1,96	2,48
Poids de l'eau	2,20	1,49	1,33	1,39	0,54	0,39	0,49
Teneur en eau $W$ (%)	52,50	51,55	52,15	53,46	20	19,89	19,75
$W_L$ (%)	51,31						
$W_P$ (%)	19,88						
$I_P$ (%)	31,43						

## (b) introduction d'une plaque en caoutchouc entre la coupelle et le socle

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	18	23	23	27			
Poids du sol humide	4,36	5,48	4,11	5,09	3,24	2,35	2,97
Poids du sol sec	2,82	3,55	2,68	3,31	2,70	1,96	2,48
Poids de l'eau	1,54	1,93	1,43	1,78	0,54	0,39	0,49
Teneur en eau $W$ (%)	54,60	54,36	53,35	53,77	20	19,89	19,75
$W_L$ (%)	53,47						
$W_P$ (%)	19,88						
$I_P$ (%)	33,59						

## 1.5. Rôle de la granulométrie (taux des particules fines 0-0,2 mm)

## (a) Echantillon avec 25% de particules fines (0-0,2 mm)

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	28	31	31	28			
Poids du sol humide	6,41	6,35	6,83	6,38	2,80	3,73	3,07
Poids du sol sec	4,53	4,46	4,83	4,44	2,32	3,06	2,55
Poids de l'eau	1,88	1,89	2	1,94	0,48	0,67	0,52
Teneur en eau $W$ (%)	41,50	42,23	41,40	43,69	20,68	21,89	20,39
$W_L$ (%)	41,27						
$W_P$ (%)	20,98						
$I_P$ (%)	20,29						

## (b) Echantillon avec 50 % de particules fines (0-0,2 mm)

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	18	28	29	27			
Poids du sol humide	6,24	6,34	5,53	6,23	2,74	2,78	2,08
Poids du sol sec	4,39	4,48	3,94	4,41	2,24	2,30	1,71
Poids de l'eau	1,85	1,86	1,59	1,82	0,5	0,48	0,17
Teneur en eau $W$ (%)	42,14	41,51	40,35	41,26	22,32	20,86	9,95
$W_L$ (%)	41,50						
$W_P$ (%)	17,71						
$I_P$ (%)	23,79						

## (c) Echantillon avec 75 % de particules fines (0-0,2 mm)

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	28	26	27	28			
Poids du sol humide	8,66	7,62	6,07	6,32	1,91	1,72	1,86
Poids du sol sec	5,89	4,41	4,11	4,28	1,55	1,37	1,52
Poids de l'eau	2,77	2,21	1,96	2,04	0,36	0,35	0,34
Teneur en eau $W$ (%)	47,02	50,11	47,68	47,66	23,22	25,54	22,36
$W_L$ (%)	48,56						
$W_P$ (%)	23,70						
$I_P$ (%)	24,86						



**(c) Echantillon avec 2,5 % de la matière organique**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	27	25	28	27			
Poids du sol humide	7,65	6,36	8,04	6,24	2,53	2,45	2,48
Poids du sol sec	5,28	4,30	5,44	4,21	2,08	2,03	2,05
Poids de l'eau	2,37	2,06	2,60	2,03	0,45	0,42	0,43
Teneur en eau $W$ (%)	44,88	47,90	47,79	48,21	21,63	20,68	20,97
$W_L$ (%)	47,63						
$W_P$ (%)	21,09						
$I_P$ (%)	26,54						

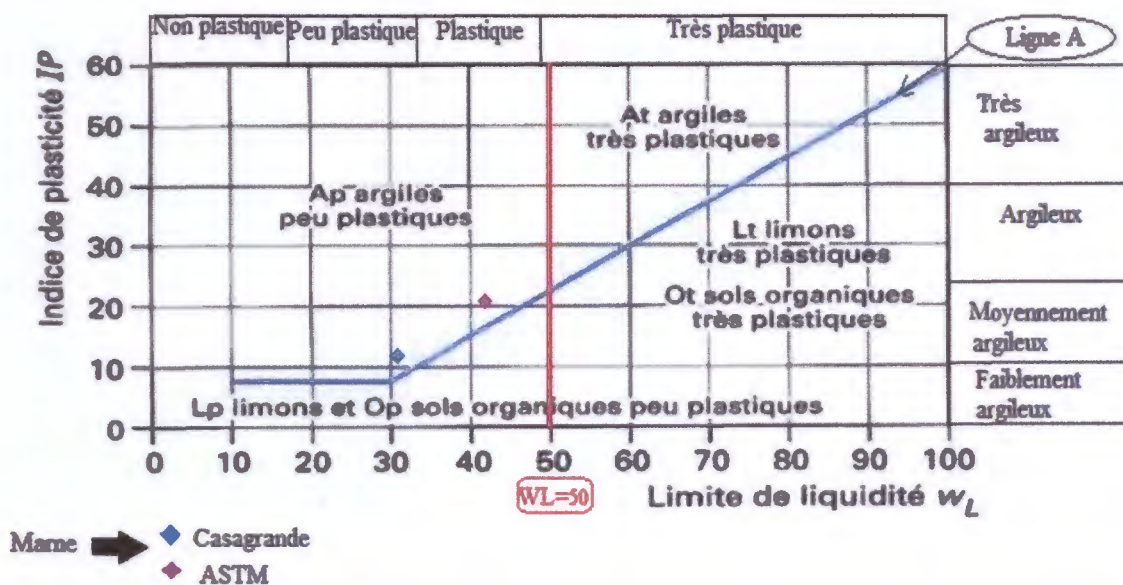
**2. Le sol marneux****1.1. Essai normalisé avec l'outil Casagrande (essai de référence)**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	23	28	25	27			
Poids du sol humide	4,86	6	4,67	4,73	4,06	3,34	3,19
Poids du sol sec	3,73	4,6	3,57	3,59	3,42	2,80	2,66
Poids de l'eau	1,13	1,4	1,1	1,14	0,64	0,54	0,53
Teneur en eau $W$ (%)	30,29	30,43	30,81	31,75	18,71	19,28	19,92
$W_L$ (%)	30,96						
$W_P$ (%)	19,30						
$I_P$ (%)	11,66						

**1.2. Essai réalisé avec l'outil ASTM**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	21	25	21	30			
Poids du sol humide	12,11	11,46	7,69	11,23	4,06	3,34	3,19
Poids du sol sec	9,51	8,99	5,98	8,74	3,42	2,80	2,66
Poids de l'eau	2,6	2,47	1,71	2,49	0,64	0,54	0,53
Teneur en eau $W$ (%)	27,33	27,47	28,59	28,48	18,71	19,28	19,92
$W_L$ (%)	27,82						
$W_P$ (%)	19,30						
$I_P$ (%)	8,52						





Calcification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (l'essai normalisé et réalisé)

### 1.3. Séchage partiel de l'échantillon à l'aire libre

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	16	18	15	17			
Poids du sol humide	4,96	4,49	4,35	4,63	2,77	2,26	3,26
Poids du sol sec	3,71	3,35	3,26	3,48	2,31	1,88	2,71
Poids de l'eau	1,25	1,14	1,09	1,15	0,46	0,38	0,55
Teneur en eau $W$ (%)	33,69	34,02	33,43	33,04	19,91	20,21	20,29
$W_L$ (%)	32,01						
$W_P$ (%)	20,13						
$I_P$ (%)	11,88						

### 1.4. Etat du socle de l'appareil de Casagrande

#### (a) introduction d'une plaque en acier entre la coupelle et le socle

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	20	17	27	27			
Poids du sol humide	7,86	6,91	8,09	7,53	3,02	2,86	2,53
Poids du sol sec	6,15	5,02	5,88	5,41	2,49	2,38	2,12
Poids de l'eau	1,71	1,89	2,21	2,12	0,53	0,48	0,41
Teneur en eau $W$ (%)	27,80	37,64	37,58	39,18	21,28	20,16	19,33
$W_L$ (%)	35,19						
$W_P$ (%)	20,25						
$I_P$ (%)	14,94						

**(b) introduction d'une plaque en caoutchouc entre la coupelle et le socle**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	21	23	27	27			
Poids du sol humide	7,17	9,88	8,93	10,66	3,02	2,86	2,53
Poids du sol sec	5,16	7,10	6,45	7,71	2,49	2,38	2,12
Poids de l'eau	2,01	2,78	2,48	2,95	0,53	0,48	0,41
Teneur en eau $W$ (%)	38,95	39,15	38,44	38,26	21,28	20,16	19,33
$W_L$ (%)	38,7						
$W_P$ (%)	20,25						
$I_P$ (%)	18,45						

**1.5. Rôle de la granulométrie (taux des particules fines 0-0,2 mm)****(a) Echantillon avec 25% de particules fines (0-0,2 mm)**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	22	21	22	24			
Poids du sol humide	6,24	5,43	5,16	6,83	4,29	5,39	6,01
Poids du sol sec	4,77	4,1	3,9	5,18	3,55	4,48	5
Poids de l'eau	1,47	1,33	1,26	1,65	0,74	0,91	1,01
Teneur en eau $W$ (%)	30,81	32,36	32,30	31,85	20,84	20,31	20,02
$W_L$ (%)	31,34						
$W_P$ (%)	20,45						
$I_P$ (%)	10,89						

**(b) Echantillon avec 50 % de particules fines (0-0,2 mm)**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	25	17	26	25			
Poids du sol humide	7,48	7,45	7,03	8,08	4,19	4,47	3,81
Poids du sol sec	5,76	5,73	5,40	6,19	3,45	3,88	3,17
Poids de l'eau	1,72	1,72	1,63	1,89	0,74	0,59	0,64
Teneur en eau $W$ (%)	29,86	30,01	30,18	30,53	21,44	15,20	20,18
$W_L$ (%)	29,83						
$W_P$ (%)	18,94						
$I_P$ (%)	10,89						



**(c) Echantillon avec 75 % de particules fines (0-0,2 mm)**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	21	25	25	25			
Poids du sol humide	6,59	5,92	4,92	5,36	2,78	2,19	2,57
Poids du sol sec	5,03	4,49	3,73	4,07	2,34	1,83	2,15
Poids de l'eau	1,65	1,53	1,19	1,89	0,44	0,36	0,42
Teneur en eau $W$ (%)	32,80	34,07	31,90	46,43	18,80	19,67	19,53
$W_L$ (%)	36,12						
$W_P$ (%)	19,33						
$I_P$ (%)	16,79						

**1.6. Influence de la hauteur de chute de la coupelle sur le socle****Hauteur de chute égale à 5 mm**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	30	29	30	26			
Poids du sol humide	6,10	7,37	6,17	5,91	2,23	1,96	2,78
Poids du sol sec	4,39	5,31	4,43	4,24	1,86	1,63	2,33
Poids de l'eau	1,71	2,06	1,74	1,67	0,37	0,33	0,45
Teneur en eau $W$ (%)	38,95	38,79	39,27	39,38	19,89	20,24	19,31
$W_L$ (%)	39,79						
$W_P$ (%)	20,03						
$I_P$ (%)	19,76						

**1.7. Rôle de la matière organique****(a) Echantillon avec 10% de la matière organique**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
Nombre de coups	24	24	27	25			
Poids du sol humide	6,49	4,97	6,92	6,86	2,35	2,36	1,74
Poids du sol sec	4,55	3,49	4,85	4,77	1,85	1,87	1,36
Poids de l'eau	1,94	1,48	2,07	2,09	0,50	0,50	0,38
Teneur en eau $W$ (%)	42,63	42,40	42,68	43,81	27,02	26,73	27,94
$W_L$ (%)	42,88						
$W_P$ (%)	27,29						
$I_P$ (%)	15,59						



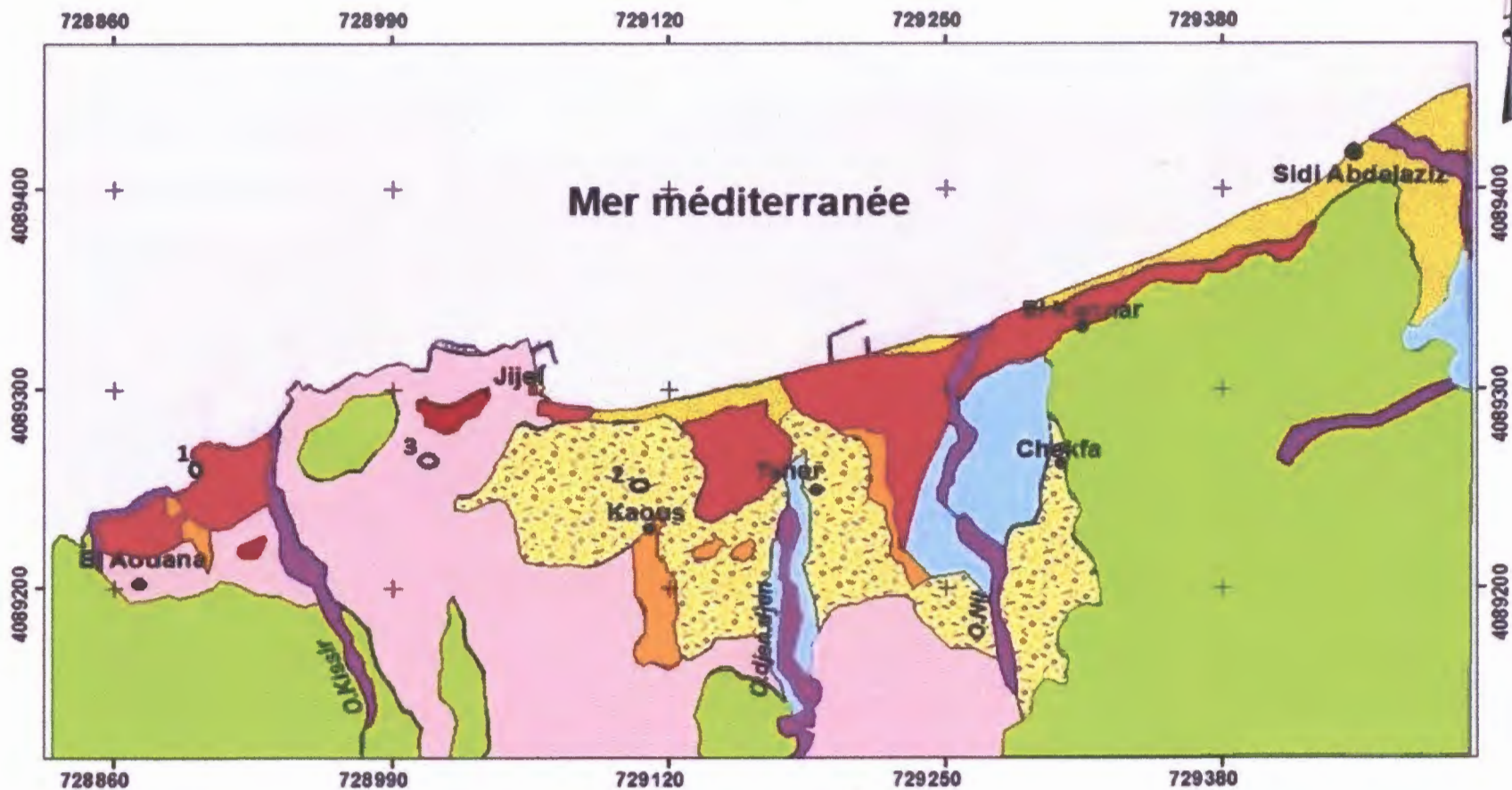
**(b) Echantillon avec 5 % de la matière organique**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
<b>Nombre de coups</b>	15	15	18	16			
<b>Poids du sol humide</b>	4,83	4,48	5,21	4,44	2,38	2,16	1,97
<b>Poids du sol sec</b>	3,48	3,24	3,78	3,22	1,92	1,76	1,62
<b>Poids de l'eau</b>	1,35	1,24	1,43	1,22	0,46	0,40	0,35
<b>Teneur en eau <math>W</math> (%)</b>	38,79	38,27	37,83	37,88	23,95	22,72	21,60
<b><math>W_L</math> (%)</b>	38,19						
<b><math>W_P</math> (%)</b>	22,75						
<b><math>I_P</math> (%)</b>	15,44						

**(c) Echantillon avec 2,5 % de la matière organique**

N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	1	2	3	4	1	2	3
<b>Nombre de coups</b>	23	17	22	22			
<b>Poids du sol humide</b>	6,96	8,56	5,28	6,31	2,87	3,14	3,05
<b>Poids du sol sec</b>	5,16	6,33	3,91	4,66	2,33	2,56	2,48
<b>Poids de l'eau</b>	1,80	2,23	1,37	1,65	0,54	0,58	0,57
<b>Teneur en eau <math>W</math> (%)</b>	34,88	35,22	35,03	35,40	23,17	22,65	22,98
<b><math>W_L</math> (%)</b>	34,39						
<b><math>W_P</math> (%)</b>	22,93						
<b><math>I_P</math> (%)</b>	11,46						

# Carte des affleurements des formations superficielles du bassin néogène de Jijel



## Légende

- |  |                                       |  |   |
|--|---------------------------------------|--|---|
|  | Sables dunaire et cotiers             |  | Soils argilo-sableux                          |
|  | Sables fins limoneux                  |  | Soils caillouteux                             |
|  | Alluvions d'oued                      |  | Soils carbonatés                              |
|  | Lieux de prélèvement des échantillons |  | Soils peu évolués riches en matière organique |
|  |                                       |  | Soils alluvionnaires culturaux                |

Echelle: 0 5 Km

Etablie par A. Rouikha et K. Sahrroui sous la direction de Mr Y. Rouikha. Univ Jijel  
Toute production même partielle est interdite.



## Resumé

Le présent travail consiste à une étude expérimentale des paramètres et facteurs de variation des limites d'Atterberg car dans ce genre d'essais, l'application rigoureuse du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats fiables et comparables d'un opérateur à l'autre.

Le mémoire que nous présentons résume l'ensemble des travaux que nous venons de réaliser dont la détermination des limites d'Atterberg en tenant compte les facteurs de variation. La partie bibliographie montre que la problématique de ce thème est toujours d'actualité eu égard aux volumes des travaux réalisés dans ce domaine. Nos résultats exposés dans ce mémoire témoignent de l'importance géotechnique que doivent accorder tous les opérateurs et techniciens du domaine à la nature des sols fins et leur classification selon ces limites. Enfin et à travers cette étude nous souhaitons avoir contribué à la compréhension des facteurs de variations des limites d'Atterberg.

**Mots-clés :** Limites d'Atterberg, Sol fin, Teneur en eau, Consistance.

## Abstract

The present work consists of an experimental study of the parameters and factors of variation of the Atterberg boundaries because in this type of tests the rigorous application of the procedure is therefore particularly indispensable if reliable and comparable results are to be obtained. From one operator to another.

The present paper summarizes all the work we have just done, including the determination of the Atterberg limits, taking into account the factors of variation. The bibliography shows that the issue of this theme is still relevant given the volume of work carried out in this field. Our results presented in this paper demonstrate the geotechnical importance that all operators and technicians in the field must accord to the nature of fine soils and their classification according to these limits. Finally, and through this study, we wish to have contributed to the understanding of the factors of variation of the limits of Atterberg.

**Keywords:** Atterberg limits, Fine soil, water content, Consistency.

## ملخص

هذا العمل عبارة عن دراسة تجريبية حول عوامل تغيير حدود أتربارغ لأن في هذا النوع من التجارب التطبيق الصارم لطريقة العمل يعتبر أمر ضروري خاصة إذا اردنا الحصول على نتائج موثوقة وقابلة للمقارنة من عمل لآخر . هذه المنكرة تلخص مجموعة الأعمال التي تم القيام بها لتحديد ومعرفة حدود أتربارغ مع الأخذ بعين الاعتبار عوامل الاختلاف في النتائج المعروضة .

الجزء البيبليوغرافي من البحث كان ثريا جدا حيث يبين أهمية الاشكالية المطروحة كما ظهر من خلال نتائج الأعمال المنجزة . وأخيرا ومن خلال هذه الدراسة نأمل أن نكون قد ساهمنا في معرفة عوامل إختلاف حدود أتربارغ

## الكلمات المفتاحية

حدود أتربارغ ، التربة الدقيقة ، القوام ، محتوى الماء .