REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Dr. YAHIA FARES De MEDEA
Institut Des Sciences et Technique
Département Génie Civil

Projet de Fin d'Etude
Pour l'obtention du diplôme Master en génie civil

Option : Géotechnique

THEME

Proposition D'un Manuel Des Essais De Laboratoire

Réalisé par :
Mr.Moukli Rabah.
Mr. Laissaoui Benaissa

Dirigé par :
Dr.Djillali Amar Bouzid.

Promotion: Septembre 2012

الملخص

يتمثل هذا العمل في انجاز مذكرة متواضعة لمشروع نهاية الدراسة حيث أن المعطيات التي تجمع بين مكانيك التربة و المتمثلة في العناصر الأساسية لتحديد طبيعة هذه الأخيرة و التصميم المناسب لأساسات البناء الخاصة بمؤسسة الهندسة المدنية.هذا العمل أنجز خصيصا من اجل التحليل و آصال المدلول الإعلامي للتجارب المخبرية في مجال الجيوتقنية ويمكن تقسيم هدا العمل إلى قسمين:

القسم الأول: يتمثل في وصف دقيق لمختلف التجارب المخبرية في مجال التربة والمتمثلة في تجارب تعريفية لطبيعة التربة وأخرى ميكانيكية لاستنباط الخصائص الميكانيكية للتربة كقدرة التحمل...الخ. وكذالك إبراز أهم المعايير الدولية الخاصة بهذا المجال وكل العلاقات التي توصلنا إلى استنتاج العوامل الخاصة بالتربة.

القسم الثاني: يتمثل في اقتراح دليل يحتوي على كافة التجارب المخبرية الجوتقنية التعريفية منها والميكانيكية وفق المعاير الفرنسية المعمول بها.

القسم الثالث: يتمثل في قسم البرمجة الالكترونية المنشقة من برنامج Visual Basic فهو عبارة عن وسيلة مبرمجة تساعد على استنتاج خصائص التربة.نتمنى تطويره مستقبلا حيث خصصناه لإبراز أهم العناصر المميزة لتربة الأساس لضمان أساس صحيح ومناسب للبناء.ودالك لإعطائنا أهم العناصر الخاصة المميزة لتربة الأساس من اجل بناء صحيح ومناسب.

Résumé

Les donenes recueillies de la mécanique des sols constituent les éléments essentiels pour décides de la nature et du dimensionnement des fondations des ouvrages en Génie Civil. Ce mémoire de fin d'études qui a été consacréà l 'analyse et la conception informatisée des essais de laboratoire en géotechnique peut se diviser en trois volets :le premier volet a été dédié à la présentation des différents essais de laboratoire ,en montrant la norme internationale régissant chaque essai .le rôle des essais de laboratoire dans l'ingénierie des fondation a été clairement présenté .le seconde volet s'est consacré à proposer du manuel de laboratoire cette manuel contient tous les essais de laboratoire (les essais d'identification et les essais mécanique) suivent les normes française. Le troisième volet s'est consacré à la partie logiciel du mémoire .En effet, un programme en Visual Basic a été élaboré .ce programme permet la visualisation de l'essai analyse granulométrie et essai Proctor qui joue un rôle majeur dans la géotechnique.

Abstract :

The data collected from the soil mechanics constitute the essential elements permitting the appropriate design of foundations in Civil Engineering. This thesis which was devoted to the analysis and the computerized design of the laboratory tests in Geotechnics can be divided into three parts:

the first part is dedicated to the presentation of the various laboratory tests, by showing the international standard governing each test. The role of the laboratory tests in the foundation engineering is clearly presented.

The second part is the proposal manual contains all the laboratory tests Jawtguenih tariff and mechanical calibrated according to the French force.

the third parts is devoted to the software part of the report .a Indeed ,a program in Visual Basic has been elaborated .this program allows analysegranulométrie and Proctor ,which plays a major role in Geometechnics .

Sommaire

Introduction général ……..……..…….1

Chapitre I

I.1 Les essais de laboratoire …….....3

I.1.1 Les essais des Identifications et de classifications des sols par Les normes françaises……..……..3

I.1.1.1 Objet de l'identification……..……4

I.1.1.2 Teneur en eau naturelle …….....…5

I.1.1.3 Degré de saturation ……..…….…….6

I.1.1.4 Poids spécifiques …….…….…….6

I.1.1.5 Poids spécifique du sol sec……..……...6

I.1.1.6 Poids spécifique des grains du sol……..……6

I.1.1.7 Essai de limites d'Atterberg : (NF P94-051)…….....6

I.1.1.8 Analyse granulométrique (NF P 94-056) ……..……....9

I.1.1.9 Essai de compactage: (NF P 94-093)……...…9

I.1.1.9.A Les domaines d'application ……..…….…11

I.1.1.9.B Objectifs de compactage ……..…..11

I.1.1.9.C L'essai de compactage Proctor (NF P 94-093)……...……..12

I .2 conclusion …….……...…..…..14

Chapitre II

II.1 Introduction générale pour l'essais mécanique ou laboratoire ……...……15

II.2 Essais œdométriques (NF P 94-090-1) ……..…....…16

II.2.1 Essai oedométrique a chargement par paliers …….…...……..…18

II.2.1.1 Courbe de compressibilité des sols pulvérulents……..……..19

II.2.1.2 Courbe de compressibilité des sols fins ……....20

II.2.1.3 Courbe de consolidation……....20

II.2.1.4 Courbe oedometrique ……..…..21

II.2.2 Paramètres de compressibilité……...……....22

II.2.3 Pression de préconsolidation…….……22

II.2.4 Indices de compression et de gonflement…….……23

II.2.5 Coefficients de compressibilité et module oedométrique……..…...24
II.2.6 Autres types d'essais oedométriques……..…..24
II.2.6.1 Essai à vitesse de déformation constante ……25
II.3 Essais de cisaillement direct (NF P 94-071)…….....27
II.3.1 Types d'essais ……..…27
II.3.1.1 essais non consolidés non drainés (UU)…….……..…..27
II.3.1.2 essais consolidés non drainés (CU) ……..…27
II.3.1.3 essais consolidés drainés (CD)……..……27
II.4 Essais de compression simple ……..…...28
II.5 Essais de cisaillement direct à la boîte…….... …28
II.5.1 Appareillage ……..……...29
II.5.2Types d'essais …….…….30
II.6 Exploitation des résultats……..…...31
II.7 Essais de cisaillement direct alterné à la boîte…….....31
II.7.1 Appareillage ……..……..…..32
II.7.2 Procédure d'essai et résultats ……..……..…32
II.8 conclusion ……..……33

Chapitre III

III.1 Introduction……..……. 34
III.2 teneur en eau……...…...……..…….34
III.2.1 Norme Applicable……...… 34
III.2.2 but de l'essai ……..……..……....34
III.2.3 définitions et théorie……..…….…….... 35
III.2.4 l'équipent et les matériaux ……..…..35
III.2.5 mode opératoire…….……..….... 35
III.2.6 Expression des résultats…….....…....36
III.3 essai de limite d'atterberg …….....36
III.3.1 Norme Applicable …….……..…36
III.3.2 But de l'essai……... ..36
III.3.3 Définitions et théorie …….... 37
III.3.4 L'équipent et les matériaux…….…….38
III.3.5 mode opératoire……. …….…….....40

III.3.6 Expression des résultats…… .....…43
III.4. Analyse granulométrique par tamisage …….....44
III.4.1 Norme Applicable …….....…...44
III.4.2 But de l'essai ……...…….....44
III.4.3 Définitions et théorie…….....….....45
III.4.4 L'équipent et les matériaux…….....…..45
III.4.5 Mode opératoire …….…….....46
III.4.6 Expression des résultats…….……...49
III.6.Analyse granulométrique par sédimentation……..……...….51
III.6.1 Norme Applicable…….....51
III.6.2 But de l'essai ……..…….....51
III.6.3 Définitions et théorie …….....51
III.6.4 L'équipent et les matériaux……..….....….51
III.6.5. Mode opératoire……..…….....54
III.6.6 Présentation des résultats ……..……..56
III.7 L'essai de compactage ou laboratoire :(essai de Proctor) ……...58
III.7.1 Norme applicable……..…58
III.7.2 But de l'essai ……..……58
III.7.3 Définitions et théorie……...58
III.7.4 l'équipent et les matériaux ……..…60
III.7.5 Mode opératoire…….62
III.7.6 Exécution de l'essai ……63
III.7.7 Expression des résultats…….65
III.8. Essai œdométrique …….67
III.8.1 Norme applicable…….67
III.8.2 but de l'essai……67
III.8.3 définitions et théorie …….....67
III.8.4 l'équipent et les matériaux……..68
III.8.5 Mode opératoire……..……..……71

III.9. Essai de cisaillement à la boite de casagrande…….…….…….76
III.9.1 Norme applicable …….....….76
III.9.2 but de l'essai…….....…76
III.9.3 définitions et théorie ……..…….....….77

III.9.4 l'équipent et les matériaux……...……78
III.9.5 *Mode opératoire*……..….*80*
III.9.6 Réalisation de l'essai ……..…….82
III.9.7 Expression des résultats……..……..84
III.10 conclusion……..…..……..86

Chapitre IV

IV .1 Introduction ……..……..……87
IV.2 présentation du langage de programmation utilisé ……..…….87
IV.3 l'environnement de Visual basic……..……..…..87
IV.3.1 l'écran de travail……...….87
IV.3.2 barre de titre……..…..… 89
IV.3.4 la barre d'outils ……..…....89
IV.3.5 l'explorateur de projet …….....90
IV.3.6 la boite à outils …….…….....90
IV.3.7 la fenêtre des propriétés ……..…….....90
IV.3.8 la feuille de projet ……..……..91
IV.3.9 La fenêtre de code……...…….....91
IV.4 Application ……..….92
II. Conclusion générale ……..…96

I. Introduction générale :

La géotechnique fait appel aux techniques du génie civil ; qu'elle applique à l'étude du sol et de la roche .Pour l'ingénieure ; le sol est défini comme un agrégat peu compact composé de minéraux ; de matières organique et de sédiments que l'on trouve au-dessus du substrat rocheux .Il est souvent difficile de déterminer ce qui différencie le sol de la roche C'est pourquoi il est parfois impossible de classer de façon absolue certains matériaux naturels dans les travaux de génie.

A cause de la nature même du sol et de la roche, on utilise beaucoup, géotechnique les essais en laboratoire et sur le terrain. La meilleure façon de bien comprendre le comportement du sol et de la roche consiste à effectuer, sur plusieurs échantillons différents, les essais courant de classification et d'indentification des propriétés mécaniques.

Après plusieurs essais, on peut déterminer le type du sol, a quoi il ressemble, la quantité d'eau qu'il contient, leur comportement sous l'effet des charges, et quelle devrait être l'ordre des résultats de différent essais. Par la suite l'ingénieur aura déjà une idée sur les problèmes qui se posent à un endroit précis.

Ces essais contribuent donc également développer une certaine intuition.

Bien entendue, en géotechnique comme dans tout autre domaine, on ne pourra jamais se passer complètement des données théoriques empiriques, et conceptuelles.

Les techniques de fondation appliquant à la conception et à la construction de fondation ou de structure les données qui appartiennent à la géologie ; et la mécanique des sols.

L'ingénieur en fondation doit pouvoir prédire la performance et le comportement du sol ou de la roche de fondation quelle que soit la charge imposée par la structure. Il doit aussi pouvoir résoudre les problèmes que posent les fondations de bâtiments industriels ou d'autres types de construction.

Aujourd'hui, en ingénierie des fondation, on utilise les données recueillies en mécanique des soles de même que celles provenant des études géologique pour décider de la nature et du dimensionnement des fondation d'ouvrage et pour en assurer la stabilité.

Avec la disponibilité des ordinateurs et l'avance spectaculaire dans le domaine de logiciel : l'utilisation de l'informatique est devenu être pratique en particulier dans les bureaux d'études de génie civile, et a cause de la nature du sol et de la roche, on utilise beaucoup ; en géotechnique les essais en laboratoire et sur terrain.

C’est la meilleure façon de bien comprendre le comportement du sol : après plusieurs essais effectués dans le laboratoire ; sur plusieurs échantillons. C’est pour cette raison l’objectif de notre mémoire ; c’est une proposition d’un manuel des essais de laboratoire

Notre sujet scinde en trois volets :

Le premier volet se consacre à dépouillement des défirent types d’essais de laboratoire (les essais d’identification et les essais mécanique).

Le 2eme volet se consacre à proposer du manuel de laboratoire cette manuel contient tous les essais de laboratoire (les essais d’identification et les essais mécanique) suivent les normes française.

Le dernier volet consacre à la réalisation d’un logiciel de dépouillement de certain essai, c’est un programme en Visual Basic .Ce logiciel permettra l’automatisation de l’essai analyse granulométrie, l’essai Proctor limite d’atterberg.

I.1 Les essais de laboratoire :

La détermination des caractéristiques du sol d'assise et leurs natures se base sur des essais qu'on peut partager en deux grandes parties :

Les essais d'identifications et de classifications des sols :

- ✓ La teneur en eau d'un sol.
- ✓ Limites d'Atterberg.
- ✓ L'analyse granulométrique par tamisage.
- ✓ L'analyse granulométrique par sédimentométrie.
- ✓ Essai Proctor.

En plus on peut effectuer les essais mécaniques suivants:

- ✓ Essai de cisaillement direct.
- ✓ Essai de triaxial.
- ✓ Essai oédométrique.
- ✓ Essai CBR.

I.1.1 Les essais des Identifications et de classifications des sols par Les normes françaises :

Tous ces essais (granulométrie, teneur en eau, Proctor, limites d'Atterberg, essai au bleu) sont des essais d'identification. Parmi ceux-ci, granulométrie et teneur en eau concernent le squelette du sol et ne renseignent absolument pas sur les relations entre grains.

Les limites d'Atterberg, l'essai au bleu et l'essai Proctor sont au Contraire des essais qui tiennent compte des relations inter granulaires. Mais tous ces essais d'identification sont effectués en remaniant le sol. Ils ne sont donc pas suffisants pour étudier un sol en place – une fondation d'ouvrage par exemple. Surtout, ils ne peuvent pas renseigner sur l'histoire du sol (au sens géologique). D'autres essais le permettront.

Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...).

Une telle appellation est très utile quand elle est un peu rigoureuse car le mécanicien des sols sait, pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles, quelles sont les aptitudes principales. Ainsi :

- Une argile, un limon argileux conviennent a priori pour réaliser la zone étanche d'un barrage.
- Un sable ne convient pas.
- Sous réserve d'une certaine propreté, un sable grossier peut convenir pour construire le drain d'un barrage.
- Un sol fin est plus compressible qu'un sol grossier.
- Un sol fin est plus sensible à l'eau qu'un sol grossier du point de Vue de la mise en oeuvre.

I.1.1.1 Objet de l'identification:

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser.

Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive, du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d'aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents.

Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Leurs résultats permettent aussi d'estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés Mécaniques des sols et d'établir un pré dimensionnement grossier des ouvrages au stade des premières études.

On distingue classiquement deux grandes catégories d'essais d'identification:

- Les essais qui répondent de l'arrangement et de la répartition des phases (squelette solide, eau, air). Ces essais caractérisent l'état du sol et ne peuvent être réalisés que sur des échantillons intacts.
- Les essais qui traduisent les propriétés des particules du sol et l'intensité de leurs liaisons avec l'eau. Ces essais caractérisent la nature du sol et sont réalisés sur des échantillons intacts ou remaniés (dont l'état a été perturbé lors du prélèvement ou du transport.

I.1.1.2 Teneur en eau naturelle W% :

Avant d'entamer les différents essai de laboratoire, on doit passer par la détermination de la teneur en eau définie par la perte d'eau (M_{ht}-M_{st}) d'un échantillon représentatif après séchage au four jusqu'à une masse constante à une température de 110C° ± 5 C°, et après on compare cette masse d'eau perdue (évaporée) à la masse des solides obtenus après séchage cet essai s'effectue pour au moins 3 mesures pour sol donné.

$$w\% = \frac{\text{Poids deau}}{\text{Poids du sol sec}} \times 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (I.1)$$

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve ce sol.



(Figure. I.1) le matérielle utilise pour déterminer la teneur en eau

I.1.1.3 Degré de saturation Sr % :

C'est le rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol.

$$S_r = \frac{V_W}{V_V} \times 100 \quad \text{.....(I.2)}$$

I.1.1.4 Poids spécifiques :

Poids spécifique du sol humide (ou apparent) « γ »:

C'est le rapport du poids total d'une certaine quantité de sol à son volume apparent.

$$\gamma = \frac{w}{v} \quad \text{.....(I.3)}$$

I.1.1.5 Poids spécifique du sol sec « γ_d »:

C'est le rapport du poids de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume de ce même sol.

$$\gamma_d = \frac{w}{v_s} \quad \text{.....(I.4)}$$

Le poids spécifique sec définit l'état dans lequel se trouve le matériau: suivant la valeur de « γ_d », un matériau sera très dense, dense, lâche ou très lâche.

I.1.1.6 Poids spécifique des grains du sol « γ_s »:

C'est le rapport de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains du sol.

$$\gamma_s = \frac{w_s}{v_s} \quad \text{.....(I.5)}$$

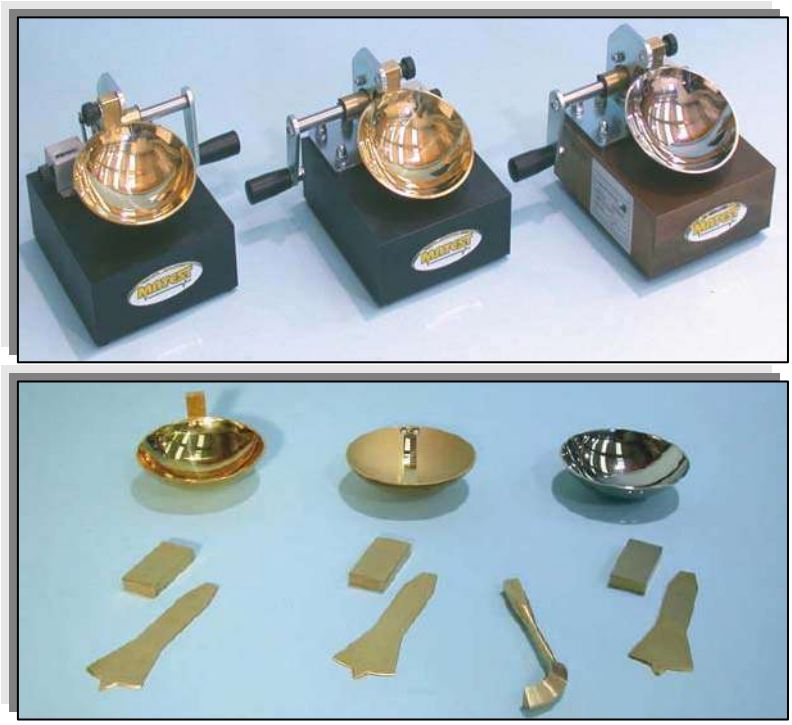
Pour les sols courants, « γ_s »: est compris entre 2,6 et 2,7.

I.1.1.7 Essai de limites d'Atterberg : (NF P94-051)

En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait. En réalité, le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par les limites d ' Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont donc des teneurs en eau. Pour les obtenir, les essais sont effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,42 mm.

Limite de liquidité $\mathbf{W_L}$ entre l'état liquide et l'état plastique. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande



(figure I.2) L'appareil de Casagrande

Limite de plasticité $\mathbf{W_p}$ entre l'état plastique et l'état solide avec retrait. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau au-dessous de laquelle.

Il n'est plus possible de confectionner avec le sol des rouleaux' de 3 mm de diamètre sans qu'ils se rompent.

Limite de retrait W_R est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal.

La limite de retrait est peu utilisée en mécanique des sols.

I.1.1.7.A Indice de plasticité I_P :

Différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, il donne l'étendue, en teneur en eau, de la plage de plasticité du sol:

$$\mathbf{I_P = W_L - W_R} \quad \text{.....(I.6)}$$

Indice de plasticité I_p	Degré de plasticité
0-5	non plastique
5-15	peu plastique
15-40	plastique
>40	très plastique

Tableau(1) L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol

Bien que leur définition soit arbitraire, les limites d'Atterberg ont une importance essentielle en mécanique des sols.

Elles permettent en particulier de classer les sols suivant un diagramme de plasticité.

I.1.1.7.B Indice de consistance I_c :

L'indice de consistance I_c est défini par la relation suivante qui situe le sol à l'intérieur de la plage de plasticité :

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_P} \quad \text{.....(I.7)}$$

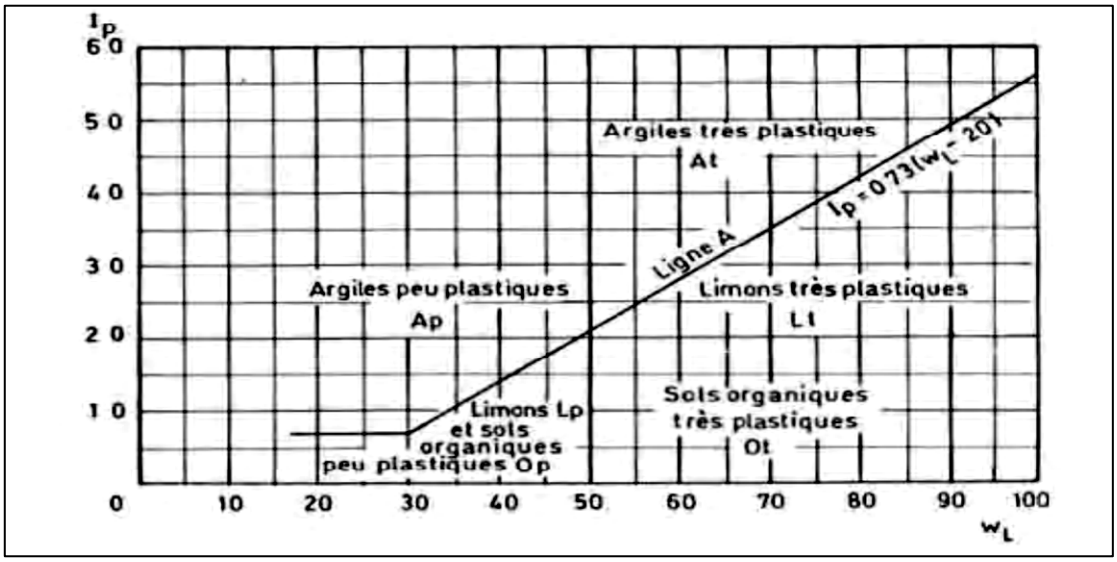


Figure (I.3) Diagramme de plasticité et classification des sols fins

Il permet d'apprécier la consistance des sols plastiques.

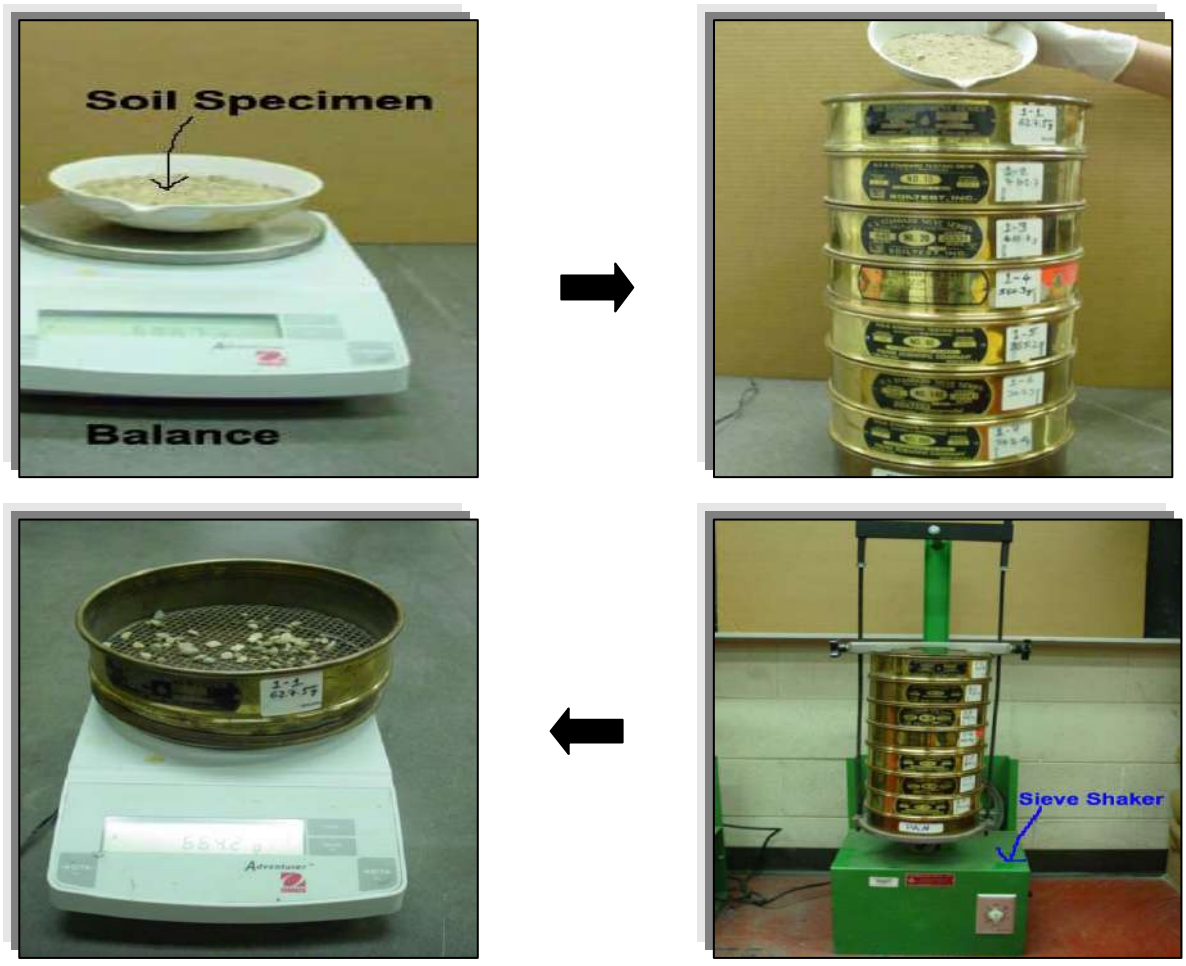
I_c	0	0.25	0.50	0.75	1	>1
consistance	liquide	pàtcuse	molle	ferme	Très dure	ferme

Tableau (2) consistance des sols plastiques

I.1.1.8 Analyse granulométrique (NF P 94-056) :

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

Le tamisage, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension supérieure ou égale à 80 microns.



(Figure I.4) Les procédures de l'analyse granulométrie par tamisag

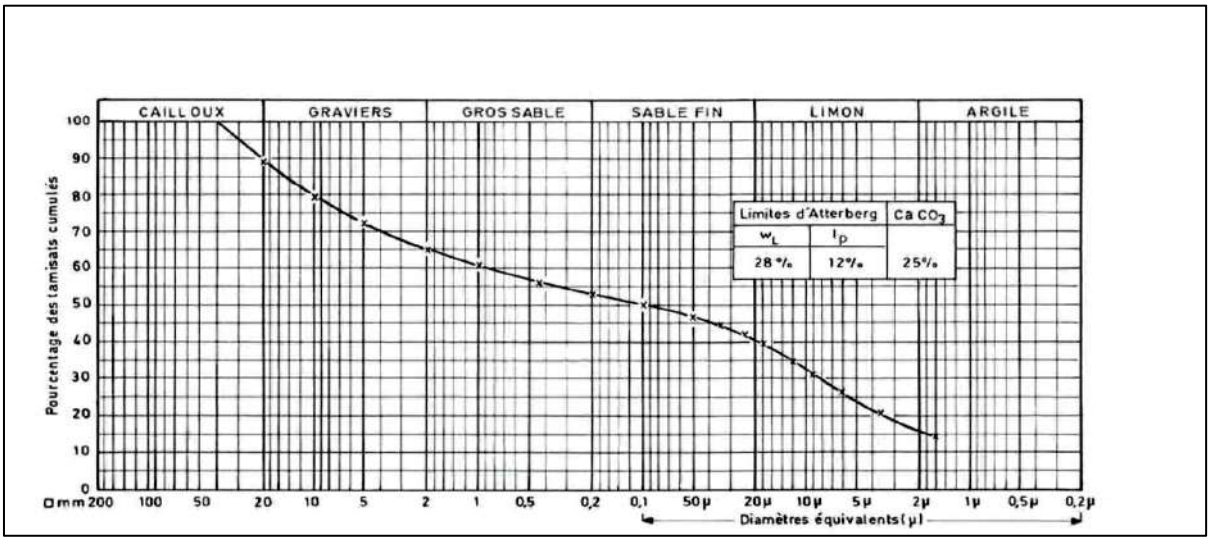
La sédimentométrie, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension inférieure à 80 microns.

La sédimentométrie est basée sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux.



(Figure I.5) Les procédures de l'analyse granulométrie par sédimentation

L'analyse granulométrique se traduit par la courbe granulométrique. Cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés.



(Figure I.6) Courbe de l'analyse Granulométrique

I.1.1.9 Essai de compactage: (NF P 94-093).

Le compactage se définit comme un procédé permettant d'augmenter la densité et la capacité de charge d'un matériau grâce à l'application de forces extérieures statiques ou dynamiques. Dans les domaines de la construction, la capacité de charge et la stabilité d'un empierrement, d'un sol ou d'un revêtement bitumineux, leur imperméabilité et leur aptitude à supporter les charges dépendent de la qualité du compactage auquel le matériau est soumis.

A titre d'exemple, une augmentation de 1% de la densité équivaut normalement à une augmentation d'au moins 10 à 15% de la capacité de charge [9].

- Si un compactage est mal exécuté ou impropre, des affaissements ou autres défauts sont à craindre, avec pour conséquence des travaux de rénovation et/ou d'entretien très importants.

I.1.1.9.A Les domaines d'application :

- ✓ Les routes, les autoroutes,
- ✓ Les barrages,
- ✓ Les remblais,
- ✓ Les fondations des bâtiments,
- ✓ Les stades,
- ✓ Les parkings, les chemins de fer,

La nature des matériaux et l'épaisseur de la couche à compacter varient suivant la nature de l'ouvrage

- ➢ Les caractéristiques et l'aptitude d'un sol au compactage dépendent en grande partie:
  - ✓ Des paramètres des natures.
  - ✓ Des paramètres d'état.
- ➢ Les résultats du compactage influence considérablement les :
  - ✓ Paramètres de comportement mécanique.
  - ✓ Les paramètres de comportement hydraulique.

I.1.1.9.B Objectifs de compactage :

Compacter un sol, un remblai, une plate-forme, une couche de forme, un corps de chaussée, un noyau de barrage en terre, un enrobé, c'est réduire le volume des vides entre les grains.

Le compactage est, d'une manière générale, l'ensemble des mesures prises afin de densifier le sol pour améliorer ses propriétés mécaniques.

Les autres procédés d'amélioration consistent à remplir les vides par un liant (ciment, chaux, bitume,…), ils sont connus sous le nom de stabilisation.

L'amélioration des qualités d'un sol a pour objet:

- Pour un remblai, d'éviter des tassements et des possibilités de glissement.
- Pour un noyau de barrage, de réaliser un massif étanche, non fissurant.
- Pour une couche de fondation de chaussée d'améliorer la force portante et la rigidité.

Lors de la réalisation d'une piste ou d'une route en terre, d'adapter les qualités du sol en place ou de la couche d'amélioration;

Dans tous les cas, de réduire la perméabilité et la susceptibilité à l'absorption de l'eau.

I.1.1.9.C L'essai de compactage Proctor: (NF P 94-093).

L'essai Proctor Normal ou Modifié permet de trouver la teneur en eau optimale qui conduit au meilleur compactage possible d'un sol. Le compactage de l'échantillon de sol est fait dans un moule normalisé, avec une dame normalisée, selon un processus bien défini (NF P 94-093). La teneur en eau et le poids spécifique sec après compactage du sol sont mesurés. L'essai est répété plusieurs fois sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. L'essai Proctor permet de tracer la courbe de poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau **W** pour une énergie de compactage donnée, cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique en construction de remblai en grande masse.

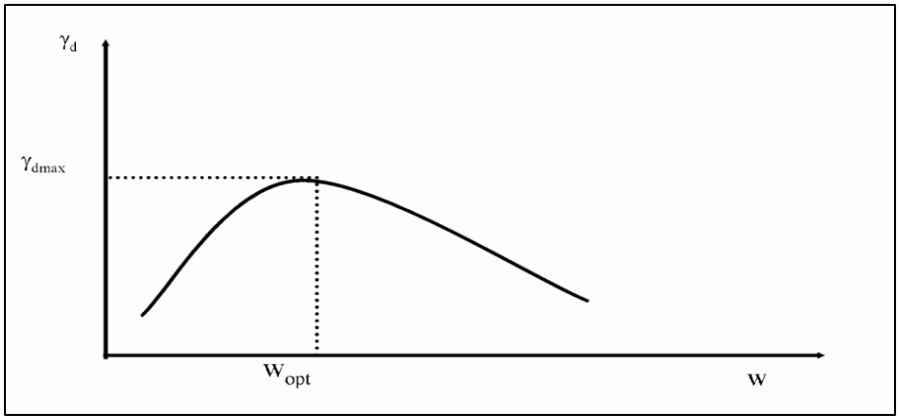


(Figure I.7) le matérielle utilise pour déterminer la teneur en eau

Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales

W_{opN} : teneur en eau à l'optimum Proctor normale O_{PN}.

W_{OPM} : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié O_{PM}.



(Figure I.8) Courbe Proctor

Les Caractéristique des essais Proctor modifié et normalisé sont regroupées dans le tableau suivant:

Essai	Caractéristique	**NF P 94-093**	
		Moule Proctor	Moule CBR
Proctor Normal	Masse de la dame	2,490	2,490
	Nombre des couches	3	3
	Nombre des coups/couches	25	56
Proctor Modifié	Masse de la dame	4,535	4,535
	Nombre des couches	5	5
	Nombre des coups/couches	25	56

Tableau(3) Les Caractéristique des essais Proctor modifié et normalisé

Cet essai se pratique pour les sols entrant dans la constitution d'un remblai, l'aptitude d'un sol à se compacter peut être appréhendée par l'étude Proctor seul , à partir de cette dernière, sont déterminées les caractéristiques Proctor Ces valeurs peuvent servir de référence pour caractériser la qualité de compactage réalisée sur chantier mais les caractéristiques Proctor constituent avant tout les critères d'identification d'un sol permettant de situer son état naturel par rapport à son état optimale de mise en œuvre .

Le principe de l'essai consiste à compacter avec énergie définie un échantillon de sol remanié dans un moule normalisé, et à mesure le poids volumique sec obtenu.

Puis déterminer la relation expérimentale entre la teneur en eau et la masse volumique d'un sol sensible à l'eau :

- Masse volumique humide.
- Masse volumique sèche.

La masse volumique sèche maximale $\gamma_{d\ max}$: obtenue par une énergie de compactage donnée.

La teneur en eau optimale W_{opt} c'est la teneur en eau correspondant à la masse volumique maximale.

Densité sèche maximale G_{dmax}: c'est la valeur maximale correspondant à W_{opt}.

I .2 conclusion

Ces nombreux essais d'identification (teneur en eau, limite d'atterberg, analyse granulométrie, et sédimentométrie, Proctor) nous à permet de donne une description détaillé et précise du sol.

II.1 Introduction générale pour l'essais mécanique ou laboratoire :

Les essais mécaniques réalisés en laboratoire sur des éprouvettes homogènes de matériau constituent le principal outil de détermination des lois de comportement des sols. L'homogénéité de l'éprouvette permet de déterminer un comportement moyen du sol à partir de mesures faites sur ses frontières.

Elle constitue pour l'expérimentateur un souci permanent.

L'autre grande limite des études expérimentales sur éprouvettes en laboratoire réside dans les possibilités des matériels d'essai existants :

Les appareils les plus courants (appareils triaxiaux de révolution et l'œdomètre) permettent de faire varier deux contraintes principales seulement, c'est-à-dire seulement le tiers des variables des contraintes.

Les directions des déformations principales restent constantes. On ne fait donc également varier simultanément que le tiers des variables de déformation.

Il existe quelques appareils d'essai plus complexes (appareil triaxial « vrai », cylindre creux soumis à un couple de torsion, boîte de cisaillement simple) permettant de faire varier plus de paramètres de contraintes ou de déformations, mais leur utilisation reste confidentielle et ils ne permettent pas de déterminer les propriétés des sols pour les études courantes.



(Figure II.1) Appareille œdomètrique



(figure II.2) Appareille de cisaillement

II.2 Essais œdométriques (NF P 94-090-1) :

L'essai oedométrique reproduit les conditions de déformation des sols dans le cas d'un massif à surface horizontale chargé par une pression uniforme et où le sol ne peut se déplacer que verticalement.

Le principe de l'oedomètre a été inventé au début du XXe siècle et cet appareil fait partie de l'équipement de tous les laboratoires de mécanique des sols.

❖ **œdomètre**

L'oedomètre, utilisé pour réaliser les essais de compressibilité à déformation horizontale nulle, comporte deux parties :

- ✓ Une cellule contenant l'éprouvette de sol.
- ✓ Un système de mise en charge.

❖ **Cellule oedometrique :**

Deux types de cellules oedométriques sont utilisés à l'heure actuelle. Ils se différencient par le fait que, dans un cas, on peut contrôler l'écoulement de l'eau qui sort de l'éprouvette ou la pression de l'eau pendant l'essai, tandis que, dans l'autre cas, on ne le peut pas.

Les cellules oedométriques ouvertes, qui ne permettent pas de contrôler l'eau pendant l'essai, comportent :

- ✓ Une bague annulaire rigide contenant l'éprouvette de sol.
- ✓ Deux pierres poreuses assurant le drainage des deux faces supérieure et inférieure de l'éprouvette.
- ✓ Un piston coulissant à l'intérieur de l'anneau et venant charger l'éprouvette.
- ✓ Un réservoir d'eau dans lequel l'ensemble précédent est immergé.
- ✓ Un ou deux comparateurs pour mesurer les déplacements verticaux du piston.
- Si l'on remplace la pierre poreuse inférieure par une bague métallique, on peut réaliser les essais sur des éprouvettes drainées d'un seul côté.

Les cellules oedométriques fermées, qui permettent de contrôler la quantité d'eau qui sort de l'éprouvette ou la pression de l'eau dans le sol, comprennent :

- ✓ Une bague annulaire rigide contenant l'éprouvette de sol.
- ✓ Une embase comportant un logement pour la pierre poreuse inférieure et un conduit pour l'évacuation de l'eau interstitielle.

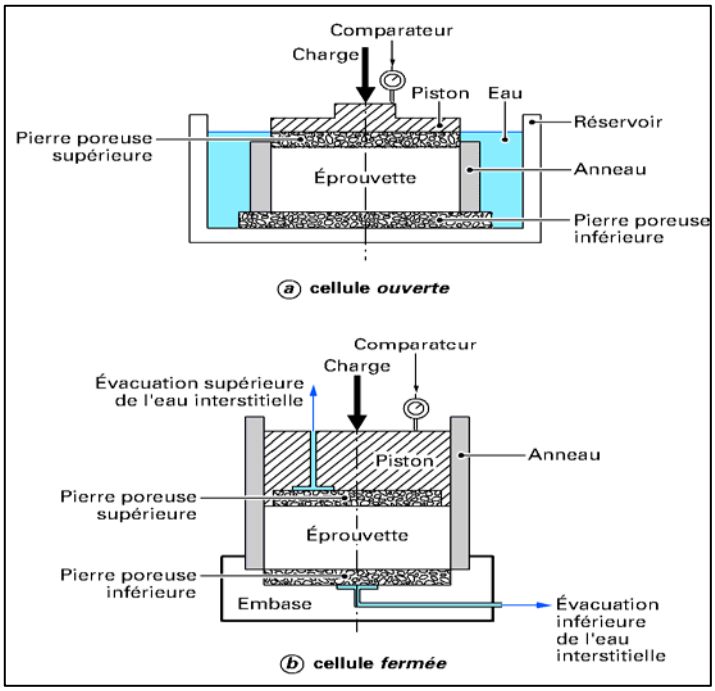
- ✓ Un piston coulissant à l'intérieur de l'anneau et comportant un logement pour la pierre poreuse supérieure et un conduit pour l'évacuation de l'eau interstitielle.
- ✓ Deux pierres poreuses assurant le drainage des deux faces de l'éprouvette,
- ✓ Un ou deux comparateurs pour mesurer les déplacements verticaux du piston.
- Les éprouvettes oedométriques ont des dimensions variables selon le matériel utilisé. Les dimensions les plus fréquentes sont les suivantes :
    - ♦ Diamètre : 60 ou 70 mm.
    - ♦ Hauteur : 20 ou 25 mm.

❖ **Système de mise en charge :**

Pour appliquer les charges nécessaires sur le piston de l'oedomètre, on utilise principalement :

- ✓ Des systèmes mécaniques de chargement par poids, en général avec des bras de levier pour augmenter les efforts appliqués.
- ✓ Des systèmes pneumatiques ou hydrauliques.

Ces deux types de systèmes sont également adaptés à la réalisation des essais classiques de chargement par paliers. Toutefois, les systèmes hydrauliques et pneumatiques, plus faciles à automatiser,



(Figure II.3) système de mise en charge

❖ **Cellule oedométrique :**

S'avèrent souvent indispensables pour la réalisation des nouveaux types d'essais oedométriques.

Les systèmes de mise en charge utilisés pour les essais oedométriques permettent, en général, de faire varier les pressions appliquées entre 5 ou 10 kPa (poids propre du piston) et 2 500 kPa. Pour les essais sur les sols raides (et les roches tendres), des œdomètre spéciaux, permettant des charges dix fois supérieures, sont utilisés.

II.2.1 Essai oedométrique a chargement par paliers :

Cet essai, couramment appelé essai œdométriques, traduit dans la pratique l'idée qui vient à l'esprit quand on veut mesurer la compressibilité d'un matériau, on applique une charge, on mesure la déformation jusqu'à ce qu'elle se stabilise, puis on applique une charge plus forte et l'on recommence les observations, etc. L'interprétation de l'essai consiste à tracer la courbe donnant la variation de l'indice des vides de l'éprouvette en fonction de la contrainte appliquée, c'est la courbe de compressibilité œdométriques ou courbe œdométriques.

L'exécution de l'essai comporte les opérations suivantes :

- ✓ Taille de l'éprouvette et mise en place dans l'oedomètre.
- ✓ Saturation de l'éprouvette (dans le cas des sols fins pour lesquels, on s'intéresse à la vitesse de tassement, il est indispensable que le sol soit saturé pour que l'on puisse interpréter les courbes de tassement au cours du temps sous chacune des charges appliquées, l'application d'une contre-pression est considérée comme la technique de saturation la plus efficace, elle implique l'utilisation de cellules oedométriques fermées).
- ✓ L'application de la charge sur le piston par paliers de 24 heures et mesure du tassement au cours du temps sous chacune des charges successivement imposées à l'éprouvette , on applique habituel- le ment des charges dont chacune est le double de la précédente, en début d'essai, la succession des charges peut être différente, elle est précisée par les modes opératoires officiels des essais.
- ✓ En fin d'essai, déchargement de l'éprouvette, pesée avant et après séchage à l'étuve (pour déterminer l'indice des vides).
- ✓ dépouillement des résultats :

La procédure de l'essai oedométrique à chargement par paliers est décrite par la norme française XP P 94-091. Les modes opératoires détaillés des différents types d'essais oedométriques décrits dans cet article ont été publiés par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

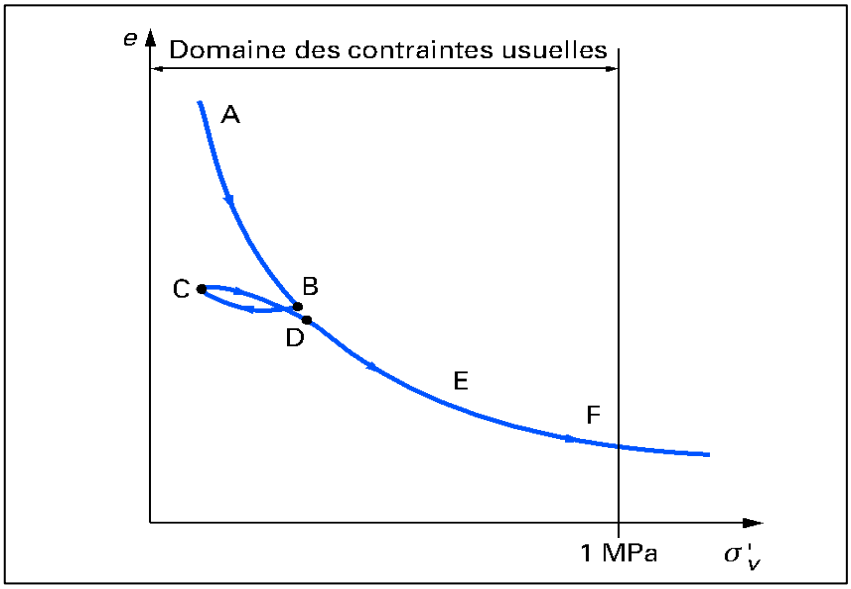
II.2.1.1 Courbe de compressibilité des sols pulvérulents :

La perméabilité des sols pulvérulents est en général assez forte pour que l'eau ne s'oppose pas à la déformation du sol. Les déformations sont pratiquement instantanées. Elles sont dues :

- ✓ Pour l'essentiel au réarrangement des particules qui constituent le squelette solide du sol,
- ✓ Pour une faible part, à la déformation des particules solides aux points de contact entre les particules.

La courbe de compressibilité oedométrique d'un sol pulvérulent a l'allure générale indiquée sur la figure(1), en termes d'indice des vides, et de contrainte effective verticale .

- Si l'on décharge puis recharge une éprouvette, on constate que le comportement du sol n'est pas réversible, en pratique, l'essai oedométrique est peu utilisé pour les sables.



(Figure II.4) Courbe de compressibilité des sols pulvérulents

II.2.1.2 Courbe de compressibilité des sols fins :

La perméabilité des sols fins est en général faible et l'écoulement de l'eau à travers les pores du sol ne s'effectue pas instantanément.

Les charges appliquées à la surface de l'éprouvette se transmettent d'abord à l'eau puis, progressivement, au squelette solide, au fur et à mesure que l'eau sort du sol.

Les déformations de l'éprouvette sous chaque charge appliquée Dépendent donc du temps et l'on est conduit à étudier le phénomène en deux étapes :

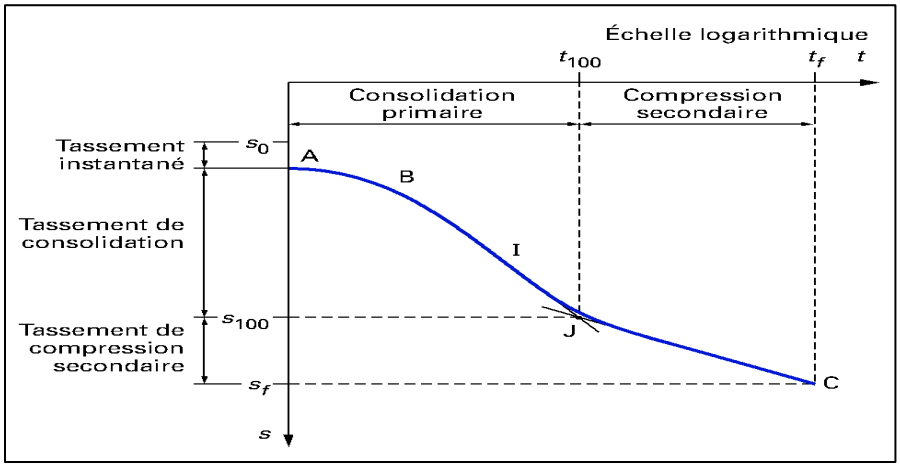
- ✓ La première concerne l'évolution du tassement (ou de l'indice des vides e) de l'éprouvette en fonction du temps, pour une valeur donnée de la pression S_v appliquée
- ✓ La seconde concerne la variation de l'indice des vides e_f à la fin de chaque étape de chargement, en fonction de la pression (à la fin de chaque étape de chargement, les pressions S_v et sont égales). Elle permet de construire la courbe de compressibilité du sol, appelée couramment courbe oedométrique.

II.2.1.3 Courbe de consolidation :

La courbe de variation du tassement **S** en fonction du logarithme du temps **t** a l'allure indiquée sur la figure. On a l'habitude de distinguer trois parties dans cette courbe :

- ✓ La compression initiale ou instantanée, lors de l'application de la charge (a),
- ✓ La consolidation primaire, qui correspond à la dissipation de la pression interstitielle (b) ,
- ✓ La compression secondaire, qui se poursuit dans le temps après la dissipation de la surpression interstitielle (c).

En général, la consolidation primaire est le phénomène prépondérant et, pour les épaisseurs habituelles des éprouvettes, elle se termine en moins de 24 heures



(Figure II.5) Courbe de consolidation

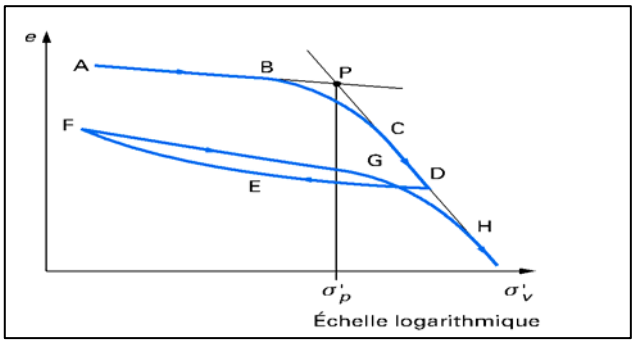
II.2.1.4 Courbe oedometrique :

Par convention, l'essai est réalisé en augmentant toutes les 24 heures la pression appliquée à l'éprouvette et l'on admet que la déformation finale sous chaque charge est celle que l'on mesure au bout des 24 heures. On peut alors tracer le diagramme donnant la variation de l'indice des vides e (en réalité, l'indice des vides $\mathbf{e_f}$ au bout des 24 heures) en fonction de la contrainte effective $\mathbf{\sigma'_v}$ (égale à la contrainte totale, c'est-à-dire à la pression appliquée $\mathbf{\sigma_v}$ puisque la pression interstitielle est devenue négligeable à la fin de la consolidation primaire).

On a pris l'habitude de représenter les variations de l'indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte effective.

L'allure de la courbe obtenue est représentée sur la figure On notera que la définition de la déformation finale sous chaque charge conduit à confondre, dans le tassement oedométrique, les Trois composantes du tassement mentionnées ci-avant.

Ce choix aura des conséquences pour la méthode de calcul des tassements.



(Figure II.6) Courbe Oedometrique

II.2.2 Paramètres de compressibilité :

La courbe oedométrique peut être caractérisée par quatre paramètres :

- ✓ Les coordonnées du point **P** (pression de préconsolidation σ'_p et indice des vides correspondant (e_p)).
- ✓ la pente de la partie initiale de la courbe : C_s, appelée indice de gonflement (C_s est aussi appelé indice de re-compression, pour le distinguer des paramètres caractérisant le comportement des sols gonflants).
- ✓ la pente de la partie finale de la courbe : C_c, appelée indice de compression.

Pour définir complètement la déformabilité du sol, il faut indiquer aussi son état initial ($\sigma'v_0$, e_0). La donnée de l'indice des vides initial rend inutile celle de l'indice des vides e_p correspondant à la pression de préconsolidation, Les cinq paramètres de compressibilité utilisés en pratique sont donc : e_0, $\sigma'v_0$, C_s, σ'_p et C_c.

II.2.3 Pression de préconsolidation :

L'abscisse du point d'intersection **P** des deux parties rectilignes de la courbe de compressibilité oedométrique est appelée pression de préconsolidation et notée σ'_p. Différentes méthodes ont été proposées pour déterminer la pression de préconsolidation en pratique (méthodes de Casagrande, méthode de Schmertmann, méthode LPC, etc.). Elles sont exposées dans les ouvrages spécialisés de mécanique des sols et discutées dans. Si l'on réalise un essai oedométrique sur une éprouvette obtenue en laboratoire par sédimentation d'une suspension de sol, d'argile par exemple, on ne retrouve pas la première partie rectiligne **AB** de la courbe. Celle-ci n'apparaît qu'après application d'un premier cycle de déchargement-rechargement. On en déduit que l'existence de la pression de préconsolidation est subordonnée à celle d'un chargement appliqué au sol antérieurement à l'essai et dont il a gardé la mémoire.

La pression de préconsolidation σ'_p n'est pas nécessairement égale à la contrainte effective initiale $\sigma'v_0$ existant actuellement dans le sol où l'on a prélevé l'échantillon testé. Au cours de son histoire, le sol a pu être soumis au poids de couches de terrains ou de glace qui ont disparu par la suite. Le vieillissement du sol sous son propre poids peut aussi avoir produit un effet comparable. Lorsque la

Pression de préconsolidation est supérieure à la contrainte effective verticale actuelle **σ'v$_0$**, on dit que le sol est surconsolidé. Si les deux contraintes sont égales, le sol est dit normalement consolider. La pression de préconsolidation ne peut être inférieure à la contrainte effective verticale actuelle.

Si l'on se trouve dans ce cas, l'un des deux termes (ou les deux) est erroné (sont erronés) : il se peut, par exemple, que l'essai oedométrique ait été réalisé sur une éprouvette de sol perturbée par les opérations de prélèvement et de taille de l'éprouvette.

Il se peut aussi que la contrainte effective verticale sur le site du prélèvement ait été mal évaluée, en général parce que l'on s'est trompé sur la valeur réelle de la pression interstitielle dans le sol. Le rapport de surconsolidation caractérise l'état initial du sol. Il est égal à

$$R_{OC} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \quad \text{..... (II.1)}$$

Il vaut 1 pour les sols normalement consolidés et est supérieur à 1 pour les sols sur consolidés.

II.2.4 Indices de compression et de gonflement

On appelle respectivement indice de gonflement (ou de recompression), **C$_S$** et indice de compression **C$_C$** les pentes des parties **ABP** et **PCDH** de la courbe de compressibilité oedométrique soit :

$$C_S \xrightarrow{OU} C_C = \frac{\Delta e}{\Delta\left(\log\sigma'_v\right)} \quad \text{..... (II.2)}$$

Sur **ABP** et **PCHD** respectivement. Ces deux paramètres sont indépendants de la valeur de la contrainte effective.

La droite de pente **C$_C$** dans le diagramme semi-logarithmique de la figure est appelée courbe vierge.

II.2.5 Coefficients de compressibilité et module oedométrique:

Si l'on veut décrire la courbe de compressibilité en coordonnées linéaires et non plus semi-logarithmiques, on utilise des paramètres de compressibilité définis de la façon suivante:

Coefficient de compressibilité $\mathbf{a_v}$:

$$a_V = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \qquad \text{..... (II.3)}$$

Coefficient de compressibilité $\mathbf{m_v}$:

$$m_V = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{\Delta e}{(1+e_0)\Delta \sigma'_v} \qquad \text{.....(II.4)}$$

Chacun de ces coefficients peut être défini localement, autour d'un état de contrainte donné (coefficient calculé d'après la tangente à la courbe) ou entre un état initial et un état final.

Le module oedométrique $\mathbf{E_{oed}}$ est une autre représentation classique de la compressibilité des sols à l'oedomètre. Il est défini de la façon suivante :

$$E_{Oed} = \frac{1}{m_v} = \frac{(1+e_0)\Delta \sigma'_v}{\Delta e} \qquad \text{.....(II.5)}$$

On peut définir comme précédemment des modules oedométriques tangents ou des modules oedométriques sécants. Il faut toujours noter les valeurs des contraintes pour lesquelles les valeurs de ces modules ont été définies.

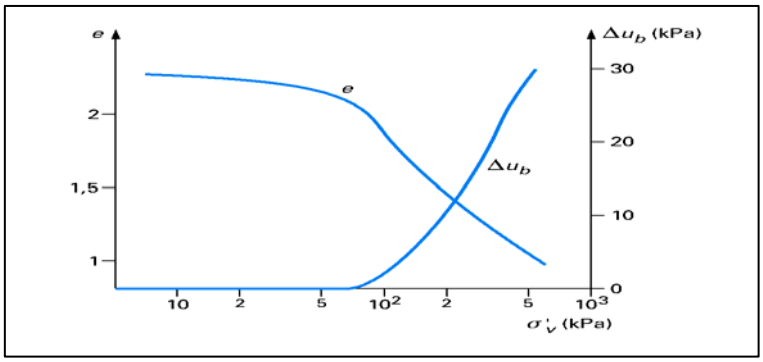
II.2.6 Autres types d'essais oedométriques :

L'essai oedométrique à chargement par paliers reste l'essai de référence pour l'évaluation de la compressibilité des sols fins et l'expérience quotidienne des projeteurs confirme que les tassements déduits des résultats de cet essai sont proches des valeurs observées sur le terrain (à 10 ou 20 % près). Néanmoins, la durée de l'essai (de deux à trois semaines) a fait rechercher des formes d'essai oedométrique

plus rapides qui, sans donner des résultats identiques aux résultats de l'essai classique, permettent d'augmenter un peu la productivité des laboratoires d'essai. Dans la plupart des cas, ces nouveaux essais permettent des prévisions de tassement aussi fiables que l'essai classique et leur utilisation s'est répandue depuis le début des années 1960. Les modes opératoires de ces essais oedométriques, ainsi que celui de l'essai oedométrique à drainage radial, ont été publiés par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

II.2.6.1 Essai à vitesse de déformation constante :

Le principe de cet essai est de placer une cellule oedométrique de type fermé entre les deux plateaux d'une presse à vitesse de déplacement constante et de mesurer l'évolution, en fonction de la déformation imposée (donc du temps), de la pression appliquée sur le piston de l'oedomètre et de la surpression interstitielle ΔU_b à la base, non drainée, de l'éprouvette. L'essai est normalement réalisé avec une contre-pression $\mathbf{U_{cp}}$. Le choix de la vitesse de déformation est le point le plus délicat de l'essai. On admet actuellement que cette vitesse a été bien choisie și $\mathbf{\Delta U_b}$ reste inférieur à **0,15 ($\sigma'v - U_{cp}$).**



(Figure II.7) vitesse de déformation constante

Une vitesse de déformation de10^{-4} min^{-1} paraît adaptée pour une large gamme de sols compressibles.

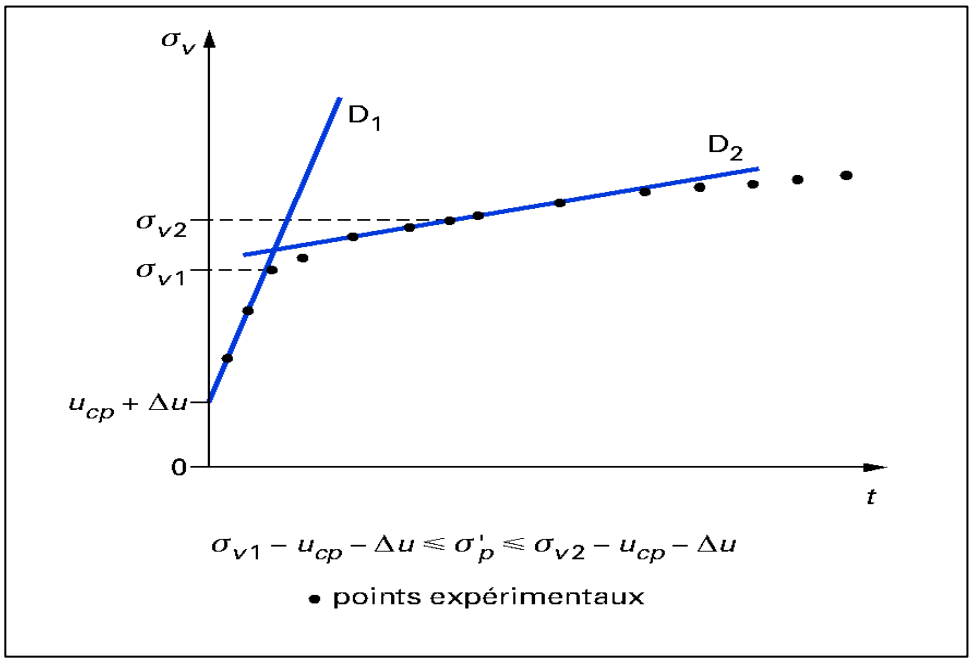
L'interprétation de l'essai repose sur l'hypothèse d'une distribution parabolique des surpressions interstitielles dans l'éprouvette. La contrainte effective moyenne **σ'v** peut alors être calculée au moyen de la formule :

$$\overline{\sigma'_v} = \sigma_v - \frac{2}{3}\Delta U_b - U_{CP} \quad \text{.....(II.6)}$$

Les résultats des mesures faites au cours de l'essai sont représentés sous forme de deux courbes tracées sur le même graphique (figure) :

$$e = f(\lg\overline{\sigma'_v}) \qquad \text{Et} \qquad \Delta U_b = g(\lg\overline{\sigma'_v}) \ \ldots \quad \ldots..(II.7)$$

❖ Courbe de compressibilité



(Figure II.8) Courbe de compressibilité

❖ Courbe de chargement en fonction du temps :

Les résultats de l'essai se présentent sous forme d'une courbe de compressibilité :

$$e = f(\log\sigma'_v) = f\left[\log(\sigma_v - \tfrac{2}{3}\Delta U - U_{CP})\right] \qquad \ldots\ldots..(II.8)$$

Et d'une courbe de variation de la pression appliquée ΔU en fonction du temps (figure II.8). On en déduit la valeur de et celle de **Cc**.

Les valeurs de Cs déduites de la partie initiale de la courbe sont peu fiables.

II.3 Essais de cisaillement direct (NF P 94-071):

II.3.1 Types d'essais :

Les essais de cisaillement à l'appareil triaxial comportent deux étapes **:**

- une première étape de consolidation, au cours de laquelle on amène l'éprouvette dans l'état à partir duquel on veut exécuter le cisaillement,
- une seconde étape, de cisaillement proprement dit, au cours de laquelle on augmente le déviateur des contraintes jusqu'à ce que la rupture de l'éprouvette se produise. Différentes modalités d'essais peuvent être définies, selon que les phases successives de l'essai sont exécutées avec ou sans drainage. On distingue les principaux types d'essais suivants :

II.3.1.1 essais non consolidés non drainés (UU) :

la première étape de l'essai est effectuée à drainage fermé, de même que le cisaillement.

II.3.1.2 essais consolidés non drainés (CU) :

au cours de l'étape de consolidation, le drainage est ouvert et l'on attend que les contraintes effectives deviennent égales aux contraintes totales appliquées (surpressions interstitielles nulles). Au cours de l'étape de cisaillement, le drainage est fermé et l'on peut, si nécessaire, mesurer la pression interstitielle pendant le chargement jusqu'à la rupture (on parle alors d'essais CU avec mesure de u).

II.3.1.3 essais consolidés drainés (CD) : la première étape est identique à celle des essais CU. Le cisaillement est exécuté en condition de drainage ouvert, en augmentant la charge suffisamment lentement pour que la surpression interstitielle reste négligeable tout au long de l'essai.

Suivant le chargement appliqué pendant l'étape de consolidation (pression isotrope ou contrainte anisotrope) et suivant la façon dont est augmenté le déviateur des contraintes (par compression ou augmentation de la contrainte axiale, ou par extension ou diminution de la contrainte horizontale), on précise parfois la dénomination des essais triaxiaux de la façon suivante :

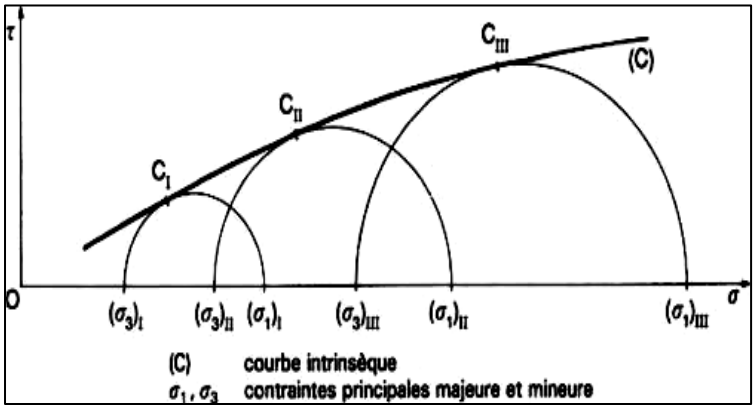
- essai CIU-C (essai de compression consolidé sous pression isotrope, non drainé),
- essai CIU-E (essai d'extension consolidé sous pression isotrope, non drainé),
- essai CID-C (essai de compression consolidé sous pression isotrope, drainé),

- essai CID-E (essai d'extension consolidé sous pression isotrope, drainé),
- essai CAU-C (essai de compression consolidé sous pression anisotrope, non drainé),
- essai CAU-E (essai d'extension consolidé sous pression anisotrope, non drainé),
- essai CAD-C (essai de compression consolidé sous pression anisotrope, drainé),
- essai CAD-E (essai d'extension consolidé sous pression anisotrope, drainé).

Suivant la perméabilité du sol, les phases de consolidation et de cisaillement peuvent être rapides (de l'ordre de quelques minutes à une heure pour les essais sur les sols pulvérulents et pour les essais non consolidés-non drainés sur sols fins) ou beaucoup plus lentes (de l'ordre du mois pour les essais drainés sur les argiles peu perméables).

II.4 Essais de compression simple :

L'essai de compression simple est une forme très simplifiée d'essai triaxial dans laquelle l'éprouvette n'est pas soumise à une pression latérale σ_3 lors de la compression. Cet essai est exécuté sur des éprouvettes cylindriques posées simplement sur le plateau d'une presse capable de les déformer à vitesse constante. L'essai n'est exécuté que sur des éprouvettes de sols fins cohérents.



(Figure II.9) Courbe intrinsèque d'un sol (représentation de Mohr)

II.5 Essais de cisaillement direct à la boîte :

Les essais de cisaillement sur des surfaces de rupture prédéfinies sont les plus anciens des essais de cisaillement utilisés en mécanique des sols. Jusqu'aux années 30, ils étaient les seuls essais possibles. Néanmoins, depuis le développement des procédures d'essais triaxiaux, ces essais sont l'objet de nombreuses critiques qui ont conduit à

restreindre fortement leur utilisation au cas des sols que l'on ne peut pas tester à l'appareil triaxial. En particulier, il est déconseillé d'effectuer des essais non drainés à la boîte de cisaillement.

II.5.1 Appareillage :

L'appareil utilisé pour l'essai, appelé boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande, est constitué (figure) de deux châssis métalliques indépendants, séparés par le plan de cisaillement :

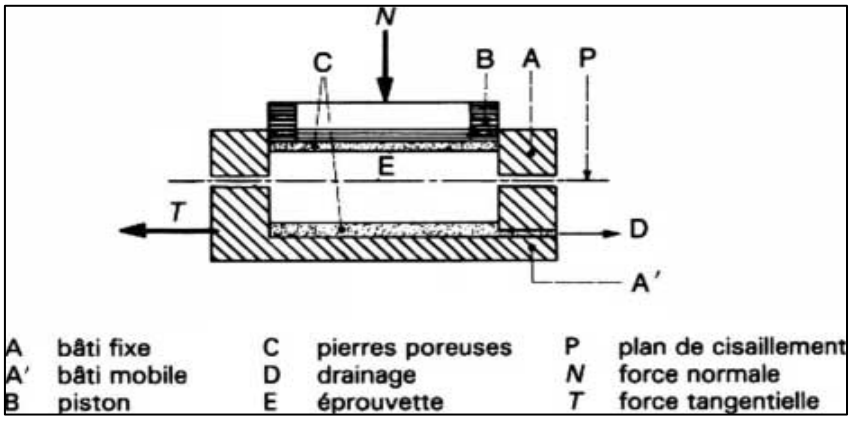
- un bâti supérieur fixe.
- un bâti inférieur mobile, entraîné par la force de cisaillement. L'éprouvette de sol, de forme carrée (6 cm de côté sur 3 cm d'épaisseur dans les modèles couramment utilisés, mais on

Utilise des boîtes de cisaillement de dimension métrique pour les matériaux grossiers) ou cylindrique, est placée à l'intérieur des châssis métalliques et repose, à sa partie inférieure, sur une pierre poreuse dont la perméabilité est grande vis-à-vis de celle du sol de l'éprouvette et par laquelle le sol reste en contact permanent avec l'eau. On place sur la face supérieure de l'éprouvette un piston métallique muni également d'une pierre poreuse. Dans le cas des essais sur milieux granulaires secs, les pierres poreuses peuvent être supprimées. On applique à l'éprouvette :

- une force normale constante **N** sur sa face supérieure au moyen d'un système de poids et de leviers (ou au moyen d'un vérin) et par l'intermédiaire du piston ,
- une force de cisaillement horizontal **T**. L'essai est en général effectué en imposant le déplacement relatif des deux demi-boîtes : un dispositif mécanique approprié entraîne à vitesse constante le châssis inférieur et la force de cisaillement est mesurée sur le châssis supérieur au moyen d'un anneau dynamométrique. Il existe également des dispositifs de chargement à contrainte imposée, où l'on Fixe la loi de croissance de l'effort de cisaillement **T**.

Au cours de l'essai, on mesure :

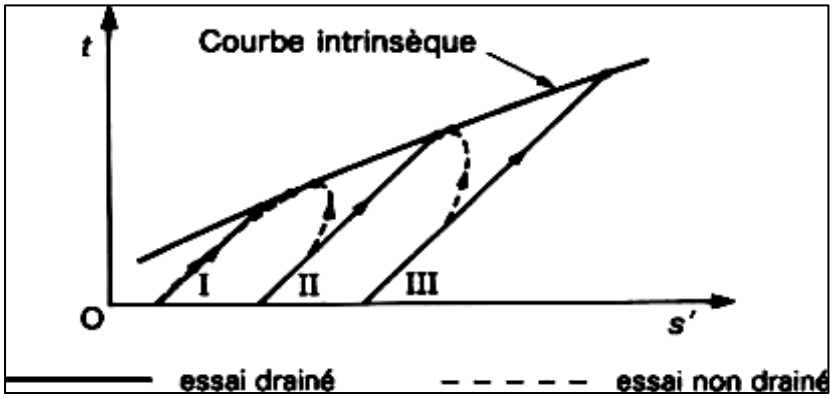
- ✓ l'effort normal **N**.
- ✓ l'effort de cisaillement **T**.
- ✓ le déplacement horizontal du châssis mobile, de l'ordre du centimètre dans les essais courants.
- ✓ le déplacement vertical du piston dans le châssis supérieur. Les déplacements sont mesurés au moyen de comparateurs à cadran ou de capteurs de déplacements.



(FigureII.10) Boite De Cisaillement

II.5.2Types d'essais :

Traditionnellement, on exécute à la boîte de cisaillement des essais rapides et des essais lents. Suivant la perméabilité du sol testé, on réalise ainsi des essais non drainés ou drainés. Néanmoins, l'impossibilité de contrôler les échanges d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la boîte de cisaillement fait que l'exécution d'essais non drainés ne peut être assurée dans des conditions de fiabilité satisfaisantes. Sauf cas exceptionnel, ce genre d'essai est donc déconseillé.



(Figure II.11) Courbe Intrinsèque

Un autre défaut de la boîte de cisaillement est que l'état de contraintes et de déformation de l'éprouvette n'est pas homogène. Cette critique s'applique à tous les types d'essais que l'on peut y exécuter. Toutefois, les essais de cisaillement à la boîte ont le

mérite de la simplicité et peuvent, plus facilement que les essais triaxiaux, être adaptés à la taille des particules constituant le sol à tester. Ils sont, pour cette raison, encore pratiqués Couramment, sous les formes indiquées dans le tableau. Pour réaliser un essai drainé, il faut Utiliser des pierres poreuses:

- ✓ Laisser, le cas échéant, l'éprouvette se consolider sous la charge *N* appliquée.
- ✓ adopter une vitesse de cisaillement suffisamment faible, eu égard à la perméabilité du sol, pour éviter l'apparition de surpressions interstitielles importantes (l'absence de dispositif de mesure de la pression interstitielle à l'intérieur de l'éprouvette ne permet pas de contrôler que cette condition est bien remplie).

II.6 Exploitation des résultats :

L'objectif de l'exploitation des résultats est de construire la courbe intrinsèque représentant le critère de plasticité du sol. Comme on connaît la surface de rupture, on peut reporter directement sur le diagramme de Mohr ($\boldsymbol{\sigma}$, $\boldsymbol{\tau}$) les valeurs des contraintes normale et tangentielle lors de la rupture (pic de la courbe « effort déformation » ou valeur limite conventionnelle). Afin d'exécuter tout ce qui est indiqué ci-dessus, il faut :

- ✓ tracer la courbe « effort de cisaillement - déplacement relatif des demi-boîtes » ,
- ✓ calculer la contrainte normale $\boldsymbol{\sigma}$, supposée uniforme : $\boldsymbol{\sigma = N/A}$

Avec *A* aire de la section de l'éprouvette.

- ✓ calculer la contrainte tangentielle $\boldsymbol{\tau}$, supposée uniforme : $\boldsymbol{\tau = T/A}$

En règle générale, on ne corrige pas la valeur de l'aire ***A*** pour tenir compte du déplacement relatif des demi-boîtes. Si l'on doit le faire, il faut tenir compte du frottement du sol sur le métal des demi-boîtes.

En reproduisant l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale $\boldsymbol{\sigma}$, on peut construire point par point la courbe intrinsèque.

II.7 Essais de cisaillement direct alterné à la boîte :

Les essais de cisaillement direct alterné à la boîte ont été dérivés des essais de cisaillement direct à la boîte pour caractériser le frottement sur les surfaces de rupture dans les pentes naturelles, dans le cas où les deux massifs de sol en contact ont subi un déplacement relatif important.

Essais effectués à la boîte de cisaillement		
Type de sol	**Type d'essai**	**Vitesse des essais**
Tous les sols, pulvérulents ou cohérents	Essais drainés	Rapide ou lente suivant la perméabilité du sol
Sols cohérents ou fins de très faible perméabilité	Essais non drainés	Rapide

Tableau (1) les types des essais effectués à la boite de cisaillement

II.7.1 Appareillage :

Le matériel nécessaire à l'essai comporte :

- ✓ une boîte de cisaillement de forme carrée, Comme l'essai est lonet n'est réalisée que sur des sols argileux, la bonne saturation de l'éprouvette nécessite que la boîte soit immergée dans une enceinte pleine d'eau,
- ✓ une machine de cisaillement, assurant les fonctions suivantes :
- ✓ transmission de l'effort normal vertical **N** par un système de poids et leviers ou au moyen d'un vérin,
- ✓ déplacement horizontal alterné de la demi-boîte inférieure à vitesse constante,
- ✓ liaison de la demi-boîte supérieure avec le bâti de la machine par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure de l'effort de cisaillement **T**.

II.7.2 Procédure d'essai et résultats :

L'essai est effectué sur des éprouvettes saturées, dans des conditions drainées, c'est-à-dire avec une vitesse de déplacement relatif des demi- boîte très faible, adaptée à la perméabilité du sol. Il comporte deux phases :

- ✓ Une phase de consolidation sous l'effort normal **N**.
- ✓ Puis une phase de cisaillement alterné d'amplitude constante, prolongée jusqu'à ce que l'effort de cisaillement **T** se stabilise.

Pour chaque sol testé, on exécute au moins trois essais, pour trois valeurs de l'effort normal ***N***.

L'exploitation des résultats est identique à celle de l'essai de cisaillement direct à la boîte : on reporte sur un diagramme de Mohr (**σ, τ**) les valeurs des contraintes normale et tangentielle déduites des valeurs de ***N*** et ***T*** en fin d'essai :

σ = N/A

τ = T /A

Avec **A** aire de la section de l'éprouvette, sans correction pour tenir compte du déplacement.

II.8 conclusion

Les essais mécanique (l'essai oedométrique et l'essai de cisaillement direct à la boite de casagrand), nous à permet d'établir des lois de comportement du sol nécessaire de rédiger un manuel de calcul.

III.1 Introduction :

Le sol peut exister comme matériel naturel dans son état calme, ou comme matériel compact. La technologie géotechnique implique la compréhension et la prévision du comportement du sol. Comme d'autres matériaux de construction, le sol possède les propriétés mécaniques liées à la force, à la compressibilité, et à la perméabilité. Il est important de mesurer ces propriétés pour prévoir comment le sol se comportera sous le chargement de champ pour la conception sûre des structures de sol (par exemple remblais, barrages, recouvrements de rebut de retenue, cours bas de route, etc.), aussi bien que d'autres structures qui excessivement le sol. La quantification des propriétés mécaniques du sol est exécutée dans le laboratoire en utilisant les essais en laboratoire normalisés.

Les objectifs principaux d'un cours de laboratoire de mécanique de sol sont présenter des techniques de laboratoire de mécanique de sol aux étudiants d'étudiant préparant une licence de génie civil, et de familiariser les étudiants avec des méthodes d'essai, des normes d'essai, et la terminologie géotechniques communes. Les procédures pour tous les essais décrits en ce manuel sont écrites selon les normes françaises. Il est important d'être au courant de ces normes pour comprendre, interprète, et applique correctement des résultats de laboratoire obtenus en utilisant une méthode normalisée.

III.2 teneur en eau :

III.2.1 Norme Applicable :

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

III.2.2 but de l'essai :

La mesure de contenu d'humidité est principalement employée pour exécuter des calculs de poids-volume dans les sols. Le contenu d'humidité est également une mesure de rétrécir-gonfle et de caractéristiques de force des sols cohérents comme démontré dans l'essai de limite de liquidité et de limite de plasticité [1].

III.2.3 définitions et théorie :

♦ **Teneur en eau pondérable d'un matériau W** : rapport de la masse d'eau évaporée lors de l'étuvage M_W sur la masse des particules solides M_s, exprimé en pourcentage.

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_S} \text{ .....(III.1)}$$

♦ **Teneur en eau naturelle d'un matériau Wnat** : teneure en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation n'ont n'entraine aucune modification de celle-ci.

III.2.4 l'équipent et les matériaux :

* Etuve de dessiccation : une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à $105C^0$ et à $50C^0$.

* **Balance** : une balance doit être précise au centigramme ou à 0,1% de la masse de l'échantillon à analyser.

* **Capsule :** ou boites de pétri.

* **Spatule** : une spatule ayant une lame rigide et inoxydable ; d'une longueur d'environ 75mm et d'une largeur d'environ 20mm

* Des pèse filtres en aluminium (tare) pour la conservation des échantillons avant leur pesée et la détermination des teneurs en eau.

III.2.5 mode opératoire :

-Peser une tare vide, sèche et propre puis noter la masse M_t

-Prendre un peu d'échantillon est mettre dans la tare M_t identifie par un code propre. Peser à nouveau et noter la masse $M_{h.t}$

-Placer le récipient avec l'échantillon dans l'étuve à une température de $110 \pm 5C^0$ et laisser jusqu'à masse constante (lorsque deux pesées séparée par un étuvage d'un intervalle de temps t, sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve. Conventionnellement l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse de la prise d'essai n'a pas varié de plus de 2/1000 entre des deux pesées).

-Après la période de séchage, retirer la tare de l'étuve et peser. Noter la masse M_{st} Calculer la teneur en eau W(%)

-Recommencer l'opération au moins 3 fois la teneur en eau finale est la moyenne des 3 mesures. Elle exprime en % arrondi au nombre entier le plus proche, l'écart entre deux valeurs ne doit pas excéder 3 %. [1]

III.2.6 Expression des résultats :

En sols grenus tels que des sables et des graviers, W peut s'étendre de quelques pour cent dans des sols plus secs à 20% fini dans les sols saturés. En sols fins tels que des vases et des argiles, la gamme possible dans W est due beaucoup plus haut à la capacité des minerais d'argile d'adsorber des molécules d'eau. Le contenu d'humidité en sols fins peut être aussi bas que quelques pour cent, à plus de 100% en argiles de haute plasticité.

Les résultats sont présentés dans l'exemple de procès-verbal d'essai suivant.

TENEUR EN EAU					
Projet: …… Origine de l'échantillon : …… Description de l'échantillon :……			Laboratoire:……... Date:…….. Essai N^0 :…….. Réalise par :……..		
Essai N^0:	1	2	3	4	5
Tare N°					
M_t (g)					
$M_{(h+t)}$ (g)					
$M_{(s+t)}$ (g)					
M_W (g)					
M_S (g)					
Teneur en eau W%					

Tableaux (1) tableaux des résultats pour la teneur en eau

III.3 Essai de limite d'atterberg :

III.3.1 Norme Applicable :

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

III.3.2 But de l'essai :

Les essais de limite de liquidité et de limite de plasticité fournissent des informations concernant l'effet de la teneur en eau (w) sur les propriétés mécaniques du

sol. Spécifiquement, les effets de la teneur en eau sur le changement de volume et l'uniformité de sol sont adressés. Les résultats de cet essai sont employés pour classifier les sols.

II.3.3 Définitions et théorie :

- **Limite de liquidité (W_L) :** teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique. Cette limite est atteinte lorsque le sol se referme une longueur de 12 à13 mm après être tombé 25 fois, dans une coupelle prévue à cet effet, à une fréquence de deux chutes par secondes et d'une hauteur de 1cm.
- **Limite de plasticité (W_p) :** teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide. Cette limite et atteinte lorsqu' un rouleau de sol de 3mm de diamètre commence à se fendiller à la manipulation.
- **Indice de plasticité (I_p) :** fourchette des teneurs en eau à l'intérieure de laquelle le sol demeure plastique ou malléable, soit :

$$\mathbf{Ip = W_l - W_p} \quad \text{……(III.2)}$$

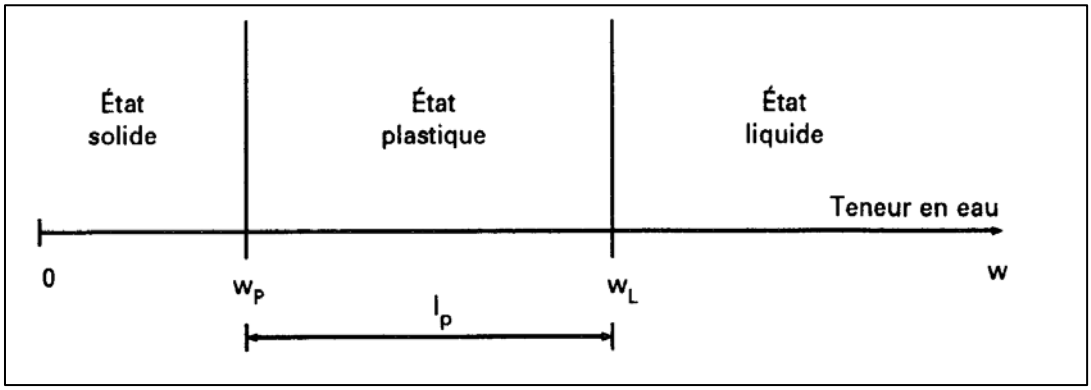
- **Indice de liquidité (I_l) :** Indice qui permet de situer le sol à sa teneure en eau naturelle par rapport à son comportement sous contrainte, soit semi-solide, plastique ou liquide.

L'indice de liquidité se définit comme suit :

$$I_I = \frac{W - W_P}{I_P} \quad \text{……..….(III.3)}$$

- **Indice de consistance (I_C) :** quotient de la différence entre la limite de liquidité et la teneure en eau naturelle par l'indice de plasticité :

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_P} \quad \text{…….……(III.4)}$$



(Figure III.1) Représentation des limites d'atterbarg

III.3.4 L'équipent et les matériaux :

III.3.4.1 Matériel pour la préparation du sol :

Un récipient d'au moins 2L

Un bac de dimensions minimales de 30*20*8cm^3

Un tamis à maille carrée de 400 µm d'ouverture.

III.3.4.2 Matériel pour la détermination de la limite de liquidité :

APPAREIL DE CASAGRANDE : L'appareil représenté par la figure ci- dessous se compose :

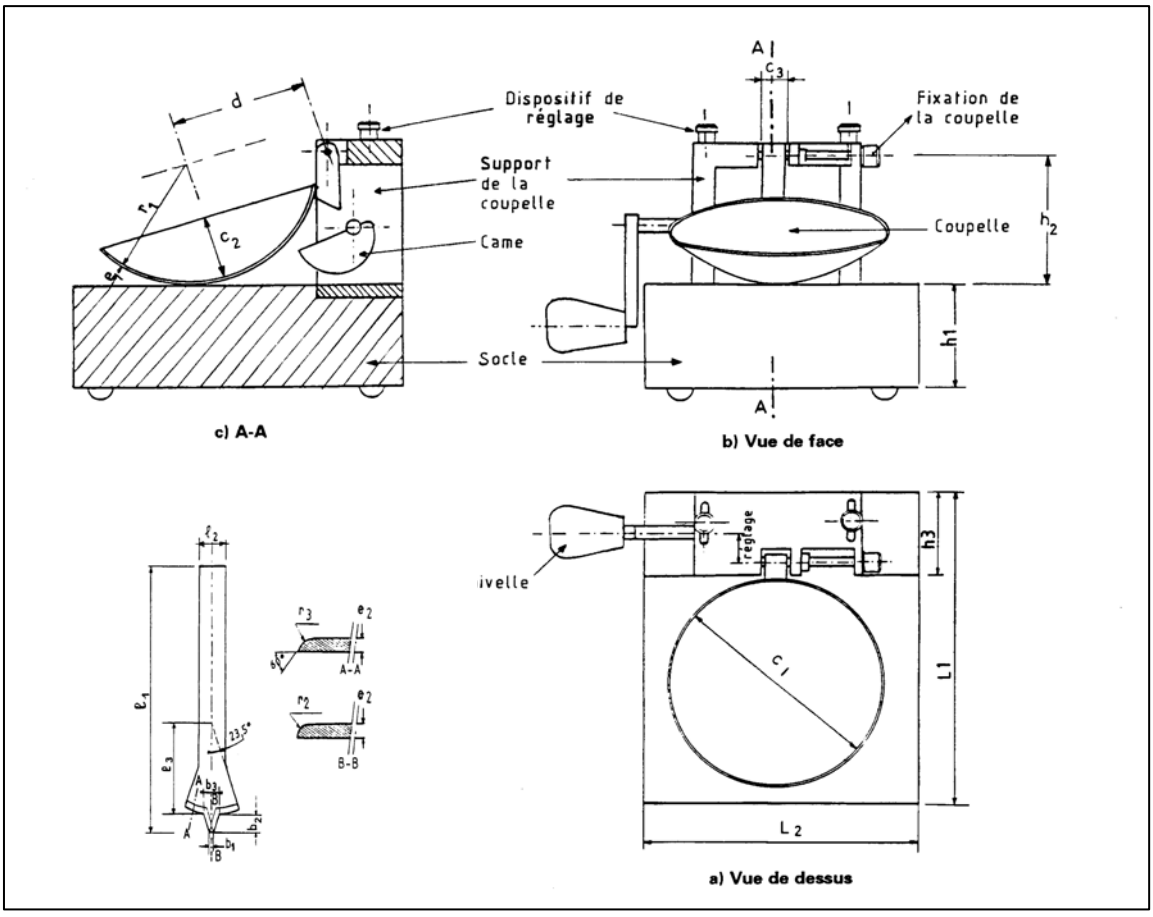
-d'un socle, en bois de masse volumique comprise 1250et 1300 kg/m^3, monté sur quatre pieds en caoutchouc ;

-D'un support métallique portant une coupelle et une came actionnée par une manivelle pour soulever la couple de 10 mm au-dessus du socle;

-D'une coupelle de masse 165 ± 10g qui a la forme d'une portion de sphère ;

-D'un outil à rainurer

-D'une cale de 10 mm d'épaisseur.



(Figure III.2) le martiale pour déterminer limite de liquidité

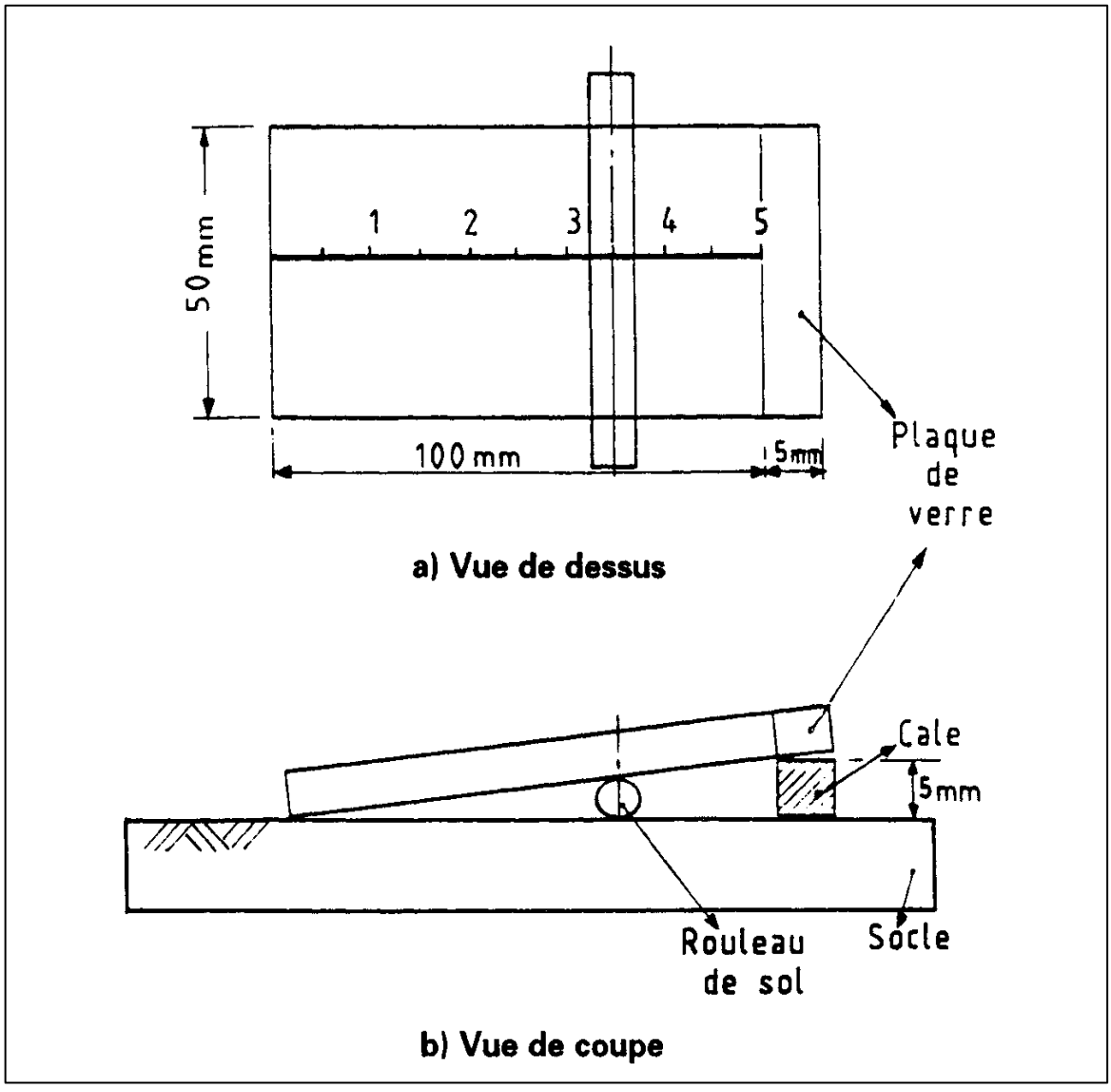
III.3.4.3 Matériel pour la détermination de la limite de plasticité:

-Une plaque en verre de mesure 300*300mm servant de support pour la confection des rouleaux.

-un calibre étalon de diamètre de 3 mm servant de référence pour la dimension des rouleaux.

-Une capsule en porcelaine pour la préparation de la pate.

-Des pèse filtres en aluminium pour la conservation, des échantillons avant leur pesée et la détermination des teneurs en eau.



(Figure III.3) les martiale pour déterminer limite de plasticité

III.3.5 Mode opératoire

III.3.5.1 Préparation de l'échantillon :

- Prendre un échantillon représentatif du sol et le mettre à imbiber dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures.
- Tamiser ce matériau imbibé par voie humide sur un tamis de 400µm, l'ensemble du tamisât et des eaux de lavage étant ensuite décanté pendant 12 heures.
- L'eau claire surnageant est siphonnée en prenant garde de ne pas entraîner de particules solides fines, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à $50C^0$ jusqu' à obtenir un mortier mou.

L'échantillon ainsi préparé doit contenir environ 200g de particules solides.

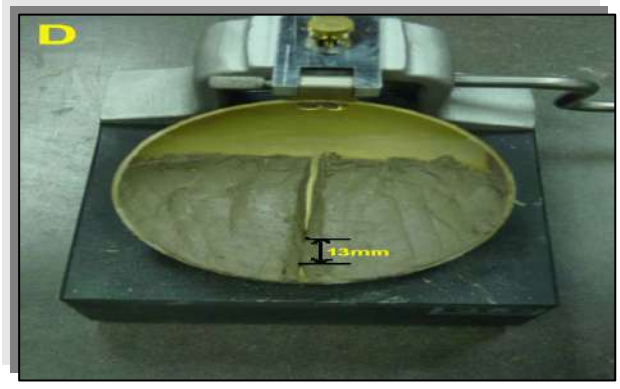
III.3.5.2 Détermination de la limite de liquidité a la coupelle de CASAGRAND :

1-Vérifier l'état de l'appareil, il faut s'assurer que :

La largeur de la pointe de l'outil à rainurer est inferieure à 2,2mm

La hauteur de chute de la coupelle est de 10mm (le réglage se fait à l'aide d'une cale de contrôle de 10mm d'épaisseur. Si nécessaire la plaque coulissante de l'appareil est déplacée de telle sorte que la hauteur de chute de la coupelle soit égale à l'épaisseur de la cale, lorsque la came, commandée par la manivelle, positionne la coupelle au point le plus haut) [2].

2- Mise en place de l'échantillon : Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ 70g de pâte. Cette pâte étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air. La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d d'environ 3mm et son épaisseur f est, centre, de l'ordre de 15 à 20mm



(Figure III.4) mise en place de l'échantillon dans la coupelle

3-En tenant l'outil à rainurer à la verticale, séparer l'échantillon en deux en son centre jusqu' au fond de la coupelle. Le mouvement doit se faire de l'arrière vers l'avant et d'un seul trait, sans hésiter.



(Figure III.5) séparation de l'échantillon en deux

4-Tourner la manivelle, de manière très régulière, à raison de deux coups par seconde, jusqu' à ce que les deux lèvres de la rainure se referment sur une distance de 12 à 13mm de longueur. (puis noter le nombre de coups nécessaire N).



(Figure III.6) prélevé d'échantillon pour déterminer la teneur en eau

5- prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, environ 10g de la pâte. Déterminer la teneur en eau $\mathbf{W_N}$

6- Recommencer l'opération 4 à 5 fois avec des teneure en eau décroissantes et telles que le nombre de choc à chaque essai soit compris entre 15 et 35 :

* Si N < 15 : laisser sécher un peu (le séchage, éventuellement, être accéléré par un malaxage sous flux d'air chaud à une température < $50C^0$)

* Si N > 15 : humidifier légèrement et bien homogénéiser le sol avant de reprendre l'essai.

7- les résultats obtenus sont représentés sur un graphe ($\mathbf{W_N}$ en fonction Log(N)). Tracer une droite approchant le plus possible l'ensemble des points.

La limite de liquidité $\mathbf{W_L}$ est déterminée à partir de la représentation graphique pour N=25 coups. Elle s'exprime en % arrondi au nombre entre le plus proche.

8- comparer cette limite $\mathbf{W_L}$ (expérimentale) avec la limite $\mathbf{W_L}$ (théorique) en un point, qui définit par la relation suivante :

Pour : 15<N<35 on a : $\mathbf{W_L = W_N * (N/25)^{0,121}}$

WL : limite de liquidité

N : nombre de chocs

W_N : la teneur en eau

L'écart de la teneur en eau entre la valeur $\mathbf{W_L}$ (expérimentale) et la valeur W_L (théorique) pour le même nombre de coups n'excède pas 3 % [2].

III.3.5.3 Déterminations de la limite de plasticité :

1-former une boulette à partir de la pâte préparée pour la détermination de la limite de liquidité.

2-Rouler cette boulette sur la plaque de façon à obtenir un rouleau qui s'amincit progressivement. Ceci doit être fait à la main, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde, le rouleau terminé doit avoir un diamètre de 3mm sur une longueur d'environ 10 à 15 cm.

***.**Si le rouleau se brise ou se fissure avant d'avoir atteint ce diamètre, la teneur en eau est trop faible ; réintégrer le rouleau à la boulette et humidifier l'ensemble.

*.S'il ne s'est pas brisé, le soulever en son milieu de 1 à 2 cm : la limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement.

* Si aucune rupture ou aucune fissure n'est constatée, réintégrer le rouleau à la boulette et sécher l'ensemble.

3-Une fois les fissures apparues, prélever la partie centrale du rouleau et la placer dans un des pèse filtres en aluminium est déterminer sa teneur en eau.

4-Effectue un 2^{éme} essai sur une autre boulette.

5-La limite de plasticité $\mathbf{W_P}$ est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir des deux essais, Elle s'exprime en % arrondi au nombre entier le plus proche, l'écart entre deux valeurs ne doit pas excéder 2 %.

III.3.6 Expression des résultats :

III.3.6.1 Limite de liquidité W_L :

La limite de liquidité $\mathbf{W_L}$ est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1cm des lèvres de la rainure après 25 chocs

Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (lg N, W)

Cette droite moyenne ne peut être déterminée sans un minimum de quatre points. La relation n'est acceptable que si l'écart de teneur en eau entre la valeur calculée pour le même nombre de coups n'excède pas 3%. S'il n'en est pas ainsi, refaire une mesure.

La limite $\mathbf{W_L}$ est obtenue pour une valeur N égale à 25. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche : l'intervalle d'arrondissage est de 1.

III.3.6.2 Limite de plasticité Wp :

La limite de plasticité WP est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment ou' son diamètre atteint 3,0mm ± 0,5mm.

WP est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de deux essais. La valeur de la limite de plasticité est exprimée en pourcentage et l'intervalle d'arrondissage est de 1.

Si les valeurs s'écartent de plus de 2% de la valeur moyenne, un nouvel essai est à effectuer.

LIMITE D'ATTERBERG				
Laboratoire :…… Date :……2011/2012…… Essai N^0 :…… Réalise par :……			Projet :…….. Origine de l'échantillon :…….. Description de l'échantillon :……	
Détermination de la limite de liquidité				
Echantillon No				
Tare N^0				
Sol humide + tare (g)				
Sol sec + tare (g)				
Eau (g)				
Tare (g)				
Sol sec (g)				
Teneur en eau (W%)				
Détermination de la limite de plasticité (W_P)				
Echantillon No				
Tare N^0				
Sol humide + tare (g)				
Sol sec + tare (g)				
Eau (g)				
Tare (g)				
Sol sec (g)				
Teneur en eau (W%)				

(Tableaux 2) tableaux des résultats pour la limite D'ATTERBERG

III.4 Analyse granulométrique par tamisage

III.4.1 Norme Applicable :

- NF P 94-056, Sols : reconnaissance et essais, Analyse granulométrique, Méthode par tamisage à sec après lavage.

III.4.2 But de l'essai :

Le but de ces essais est déterminer la distribution de grandeurs de grain (c.-à-d.; taille de grain contre des pour cent en poids) du sol, et de déterminer le pourcentage des fines (c.-à-d.; matériel passant le passoir 80µm dans le sol. Cette information est employée pour classifier le sol selon le système de classification unifié de sol LCPC. [3]

III.4.3 Définitions et theorie :

-Granularité : distribution dimensionnelle des grains.

- Refus : sur un tamis : matériau qui est retenu sur le tamis.

-Tamisât : (ou passant) : matériau qui passe à travers le tamis.

-Courbe granulométrique : représentation du pourcentage massique des différents tamisât en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.

L´essai consiste à fractionner au moyen d´une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l´échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).



(Figure III.7) Analyse Granulométrique

III.4.4 L'équipent et les matériaux :

-Balance : dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.

- Étuve : ventilée réglée à 105 °C ± 5 °C.

Un dispositif de lavage.

- Appareillage spécifique :

Tamis dont l´ouverture est conforme à la norme NF X 11-501 et de diamètre 250 mm.

Parmi les tamis de contrôle définis dans cette norme, on utilise généralement ceux donnés par la norme NF P 18-101 pour la classification des granulats.

Le contrôle des tamis sera effectué suivant les indications données dans la norme NF P 11-504.



(**Figure III.8) les différents tamis utilise pour l'analyse granulométrie**

III.4.5 Mode opératoire :

III.4.5.1 Préparation de l'échantillon pour l'essai :

L´échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l´échantillon pour essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

III.4.5.2 Exécution de l'essai :

III.4.5.2.1 Détermination de la masse sèche de l´échantillon soumis a l´analyse granulométrique :

L´essai s´effectue sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l´analyse afin d´éviter un séchage qui présente des inconvénients : perte de temps due au

séchage avant tamisage, risque d´agglomération des particules par séchage. À partir de l´échantillon pour laboratoire, il est donc préparé deux échantillons pour essai.

L´un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l´échantillon soumis à l´analyse

Granulométrique, l´autre de masse M_h pour effectuer l´analyse granulométrique.

pesée des deux échantillons M_{1h} et M_h ; séchage à l´étuve jusqu´à masse constante (c´est-à-dire jusqu´à ce que deux pesées successives de l´échantillon, séparées d´une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %) du premier échantillon M_{1h} et pesée, soit M_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche (Ms) de l´échantillon soumis à l´analyse granulométrique est calculée de la manière suivante :

$$Ms = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h \qquad \text{……..……(III.5)}$$

III.4.5.2.2 Lavage :

Dans le cas de matériaux particulièrement argileux, l´échantillon est trempé préalablement au lavage, pendant plusieurs heures.

L´échantillon humide, avec éventuellement les eaux de trempage, est versé sur un ou plusieurs tamis de décharge protégeant le tamis de lavage. La maille du tamis de lavage correspond à la plus petite maille de la colonne utilisée lors du tamisage. On doit veiller à ce que l´eau ne déborde pas du tamis de lavage.

Cette opération peut se faire à l´aide d´un Vibro-Tamis à vibrations non verticales. On considère que le matériau est correctement lavé lorsque l´eau s´écoulant sous le tamis de lavage est claire.

- Le tamisât est :
  - Soit éliminé avec les eaux de lavage,
  - Soit éventuellement récupéré pour d´autres analyses.

Le refus est récupéré et séché jusqu´à masse constante. Soit M_{s1} la masse correspondante.

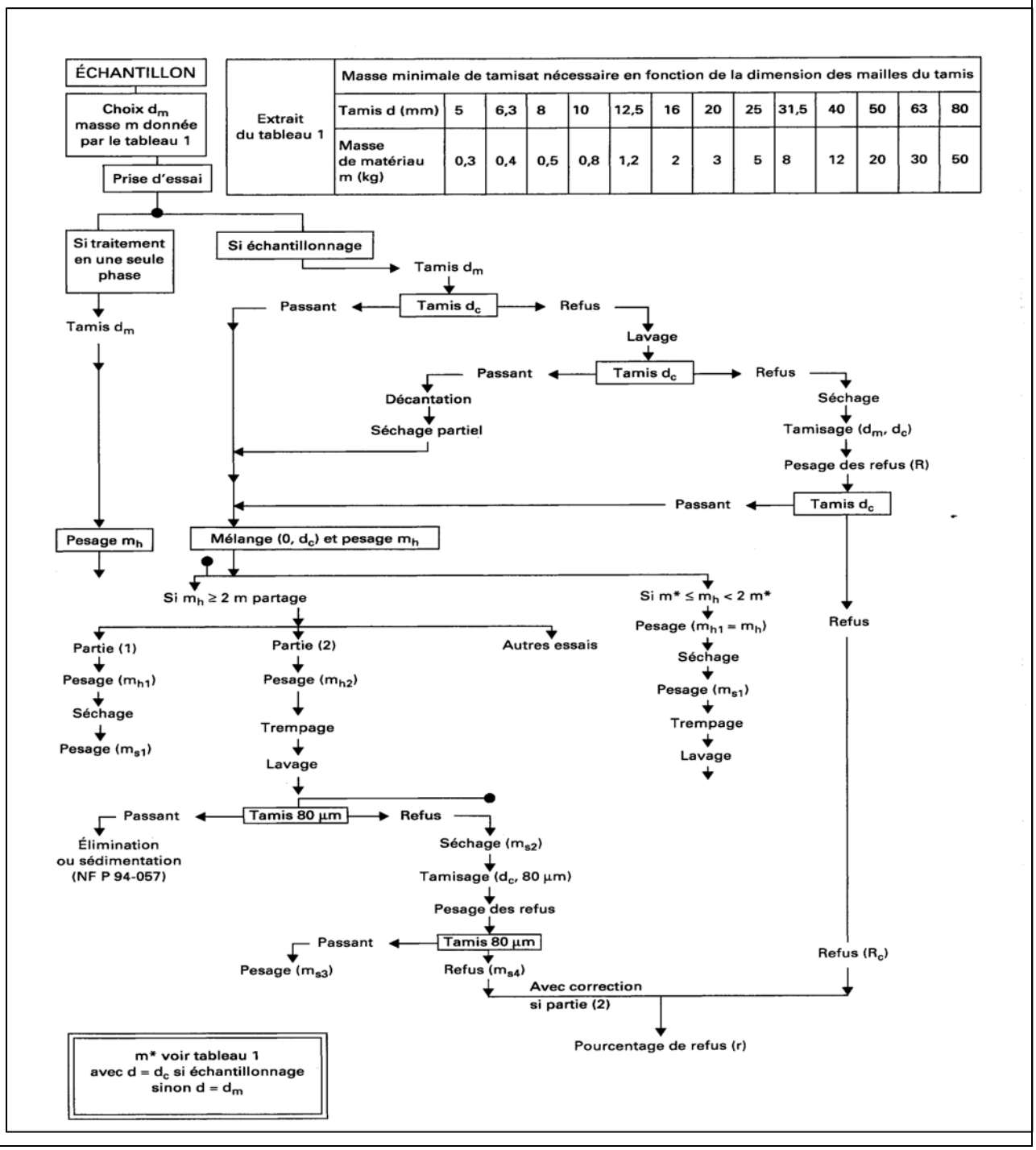
III.4.5.2.3 Tamisage :

Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par :

- L´emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l´ordre de mailles décroissantes.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond

et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D´une manière générale, on peut considérer qu´un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.

- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.



(Figure III.9) Schéma du processus opératoire de l'analyse granulométrique par tamisage

III.4.6 Expression des résultats :

III.4.6.1 Calculs :

Les résultats des différentes pesées cumulées sont portés sur une feuille d´essai dont un modèle est donné.

Les masses des différents refus cumulés Ri, sont rapportées à la masse totale calculée de l´échantillon pour essai sec Ms et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus,

$$\text{refuscumules} = \frac{R_i}{M_s}100 \qquad \text{……..……(III.6)}$$

Les pourcentages de tamisât correspondants sont égaux à :

$$\text{tamisats} = 100 - \left[\frac{R_i}{M_s}100\right] \qquad \text{……. (III.7)}$$

- **Module de finesse MF**: est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. [4]

- Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5 mm

$$MF = \frac{1}{100}\sum \text{ Refus cumulés en \% des tamis } (0.16\ 0.315\ 0.63\ 1.25\ 2.5\ 5)$$

III.4.6.2 Présentation des résultats :

Les pourcentages de tamisât cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe. Tracé de la courbe : II suffit de porter les divers pourcentages des tamisât ou des différents refus cumulés sur la feuille de papier semi-logarithmique.

- En abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique.
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière Continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Les résultats sont forme de graphiques, éventuellement accompagnés du tableau des résultats.

III.4.6.3 Tableau des résultats :

Il contient en fonction de la série de tamis utilisés : la masse des refus cumulés et le pourcentage massique de refus sur chaque tamis ainsi que le pourcentage de passant aux mêmes tamis

Analyse granulométrique par tamisage

Date: ……. Nature de l'échantillon:…… Laboratoires:……	Chantier:…… Opérateur : …… Essai N^0 :……..

Masse humide M'_1 :……Masse sèche M_1:……

M_2 :…… Masse sèche après lavage

Masse sèche des fines retirée par lavage M_1-M_2 =……

Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus R_i(g)	Masse des refus cumulés Rn (g)	Pourcentage des refus cumulés $(Rn/M_1)100$	Pourcentage des tamisât cumulés 100- ($(Rn/M_1)100$)
Fond	P =……			

Tableaux (3) tableaux des résultats pour l'analyse granulométrie

III.5 .Analyse granulométrique par sédimentation :

III.5.1 Norme Applicable :

- NF P 94-057, Sols : reconnaissance et essais — Analyse granulométrique des sols — Méthode par sédimentation.

III.5.2 But de l'essai :

L'analyse granulométrique par tamisage est applicable pour les sols pulvérulents. Lorsque les dimensions des particules des sols sont inférieures à 80µm on procède à l'analyse granulométrique par sédimentation.

Le but de l'essai analyse granulométrique par sédimentation est Déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol.

III.5.3 Définitions et théorie :

Les particules inférieures à 80 µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculation.

Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

III.5.4 L'équipent et les matériaux :

Dans ce paragraphe, le matériel employé pour la préparation du sol est distingué du matériel utilisé pour la réalisation de l'essai.

III.5.4.1 Préparation de l'échantillon de Sol :

Les moyens suivants sont nécessaires à la préparation de l'échantillon de sol.

-Balance : Une balance dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la valeur mesurée.

-Tamis : Un tamis à maille carrée de 80 µm d'ouverture et de diamètre supérieur ou égal à 250 mm.

-Bac : Un bac non altérable et de dimensions minimales 60 cm x 40 cm x 12 cm pour recueillir le tamisât à 80 µm

-Étuve : Une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation, à température réglable à 105 °C et à 50 °C, de classe d'exactitude C comme défini dans l'annexe A de la norme NF X 15-016.

-Mortier : Un mortier de **20** cm de diamètre minimal avec son pilon en matériau souple pour séparer les particules de sol passées au tamis de 80 µm d'ouverture.

-Agitateur mécanique : Un agitateur mécanique avec son récipient. La vitesse de rotation de l'agitateur doit pouvoir être réglée jusqu'à 10 000 tr/min. Il doit être de type «plongeant», c'est-à-dire que l'arbre support de la palette rotative est introduit dans le récipient contenant la solution. Ce récipient doit avoir une contenance minimale de 600 cm^3.

-Eau distillée ou déminéralisée et dé floculant : Un mélange d'eau distillée ou déminéralisée additionnée d'un défloculation pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée et de 60 cm^3 d'une solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium (Na_6 $(P0_3)_6$,$10H_2O$) préparée et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois.



(figure III.10) Equipment de l'analyse granulométrie par sédimentation

III.5.4.2 Exécution de l'essai :

Les appareils suivants sont nécessaires à l'exécution de l'essai.

-Éprouvettes d'essai : Deux éprouvettes cylindriques en verre transparent, graduées et d'une contenance minimale de 2500 cm^3. Elles doivent avoir un diamètre intérieur de 85 mm ±5 mm, des graduations à 500,1 000,1 500 et 2 000 cm^3 au moins, et une variation de la section de l'éprouvette inférieure ou égale à 1 % de la section moyenne. [5]

-Eau distillée ou déminéralisée : Une réserve de 4 000 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée **Agitateur manuel** : Un agitateur manuel pour homogénéiser la suspension avant essai.-

-Densimètre : Le densimètre doit être tel que le mesurage soit effectué avec une exactitude de 0,000 5. La plage d'utilisation de l'instrument est de 0,995 0 à 1,030 0. Il doit être de forme Torpille. Avec un centre de poussée au voisinage du milieu du bulbe

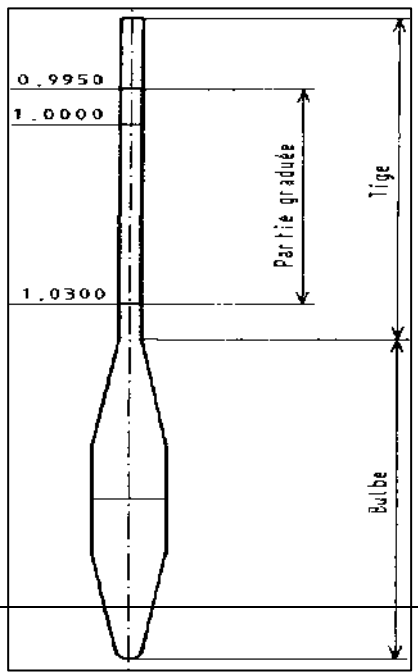


Figure III.11 Densimètre torpille

-Thermomètre : Les deux instruments de mesure de la température doivent être tels que le mesurage soit effectué avec une exactitude de 0,5 °C. La plage d'utilisation des thermomètres est de 10 à 35 °C.

-Chronomètre : L'appareil doit permettre un affichage de la mesure du temps à la seconde près.

-Thermomètre de la salle d'essai : Un thermomètre enregistreur de contrôle doit être placé en permanence dans la salle d'essai.

III.5.5.Mode opératoire :

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée :

III.5.5.1 Préparation de la prise d'essai :

III.5.5.1.1 Traitement de l'échantillon de sol :

- Le tamisât, au tamis de 80 µm, de l'échantillon de sol, préparé selon la norme NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac. Le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entraîner d'éléments fins.
- Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve.
- L'intervalle entre deux pesées est au minimum :
  de 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C,
  de 8 h dans le cas d'un étuvage à 50 °C.

Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80 g ± 10 g.

III.5.5.1.2 Imbibition de la prise d'essai :

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm^3 du mélange et garder à la température ambiante.

Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante.

III.5.5.1.3 Dispersion a l'agitateur mécanique :

La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau et de défloculation au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3 min minimum à 10 000 tr/min.

III.5.5.2 Démarrage de l'essai :

- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique.
- Rincer le récipient ainsi que l'arbre et les palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée ou déminéralisée. Le liquide de rinçage est recueilli dans l'éprouvette afin d'éviter de perdre une partie de l'échantillon de sol lors du transfert.
- Compléter par de l'eau distillée ou déminéralisée à la température ambiante jusqu'à2000 cm^3. Verser 2 000 cm^3 de la même eau distillée ou déminéralisée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres.
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre : par convention il s'agit du début de l'essai.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.

III.5.5.3 Réalisation des mesures :

Faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants en minutes : 0,5 — 1 — 2 — 5 — 10 — 20 — 40 — 80 — 240 — 1 440.

Noter à chaque lecture la densité de la solution à 0,000 1 près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin à 0,1 °C près. Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque.

Procéder aux trois premières lectures à (0,5 — 1 et 2 min), sans retirer le densimètre de la solution.

À partir de la troisième lecture, retirer le densimètre de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette d'eau distillée ou déminéralisée.

À partir de la quatrième lecture (faite au temps t = 5 min) plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure.

III.6.6 Présentation des résultats :

Pour chaque série de lectures, le pourcentage pondéral d'éléments inférieurs ou égaux à D contenues dans la suspension et le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées sont déterminés en suivant la procédure définie ci-après.

III.8.1 Pourcentage d'éléments inferieurs ou égaux a D :

Le pourcentage d'éléments inférieurs ou égaux à D contenus dans la suspension au temps t est calculé comme suit :

$$p = \frac{v_s}{m} \times \frac{p_s}{p_s - p_w} \times p_w \left[\frac{p_t}{p_w} - 1 \right] \quad \text{..... (III.12)}$$

Ou' en unités si :

P : est le pourcentage (par rapport à la masse de la prise d'essai à l'état sec) des particules de diamètre inférieur ou égal à D

V_S : est le volume de la suspension

m : est la masse de sol sec prélevée sur le tamisât à 80µm

ρ_s : est la masse volumique des particules solides

III.6.6.2 Tableau de Résultats :

Analyse granulométrique par sédimentation

Projet: …… Origine de l'échantillon : …… Description de l'échantillon : ……	Laboratoire :…… Date :…….. Essai N^0 :…… Réalise par :……

Type du densimètre :…… numerus du densimètre :……

V_d = 73 cm^3 H_1 =3,8 cm

Agent dispersant :…

Facteurs correcteurs : C_m=0,0004 C_d =0,008

Masse sèche de l'échantillon : M = ……g tamis d'écrêtement :……..mm

Densité relative du sol : G_S = ……..

Densité relative de l'eau : G_W = ……

Temps (min)	Température T (C^0)	Lecture densimètre R' (g/L)	Correction température C_t	P (%)	D µm
0,25					
0,5					
1					
2					
5					
15					
30					
60					
120					
240					
480					
1440					

Tableau (4) tableaux des résultats pour l'analyse granulométrie

III.7 L’essai de compactage ou laboratoire :(essai de Proctor) :

III.7.1 Norme applicable :

- NF P 94-049-1, Sols : reconnaissance et essais — essai de compactage ou laboratoire — essai de Proctor.

III.7.2 But de l’essai :

L’essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d’intensité, la teneur en eau la quelle le sol doit être compacté pour obtenir la densité sèche maximum, la teneur en eau ainsi déterminer est appelée, teneur en eau optimum Proctor W_{op}.

L'essai Proctor (norme NF P 94-093) a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

L'optimum Proctor Normal ou Modifié (OPN ou OPM) est la teneur en eau pour laquelle le sol atteint, pour une énergie de compactage donnée, une densité maximale.

Le principe de la méthode de cet essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier, et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe (d ; cc) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale [6].

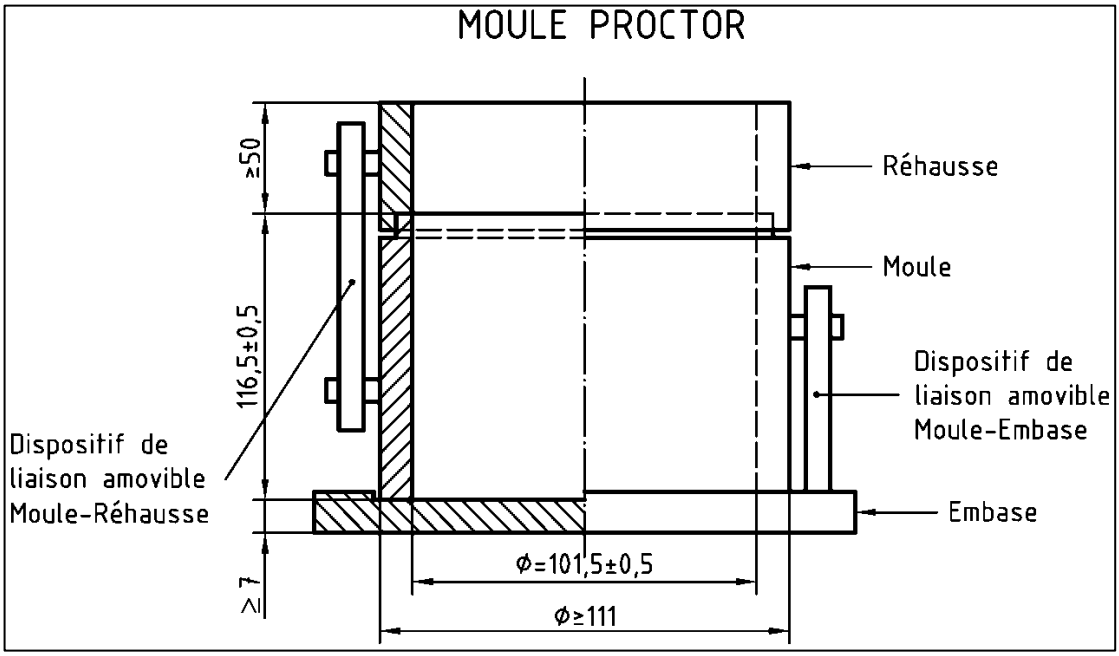
III.7.3 Définitions et théorie :

Le volume apparent d’un sol dépend de l’arrangement relatif des grains entre aux, le compactage d’un sol est l’opération qui consiste à tenter de réduire ce volume apparent, c'est-à-dire améliorer l’arrangement relatif des grains de ce sol, pour des moyens mécanique appropriés.

La densité sèche d’un sol est le poids de ses grains par unité de volume apparent, c'est-à-dire sa densité sans eau.

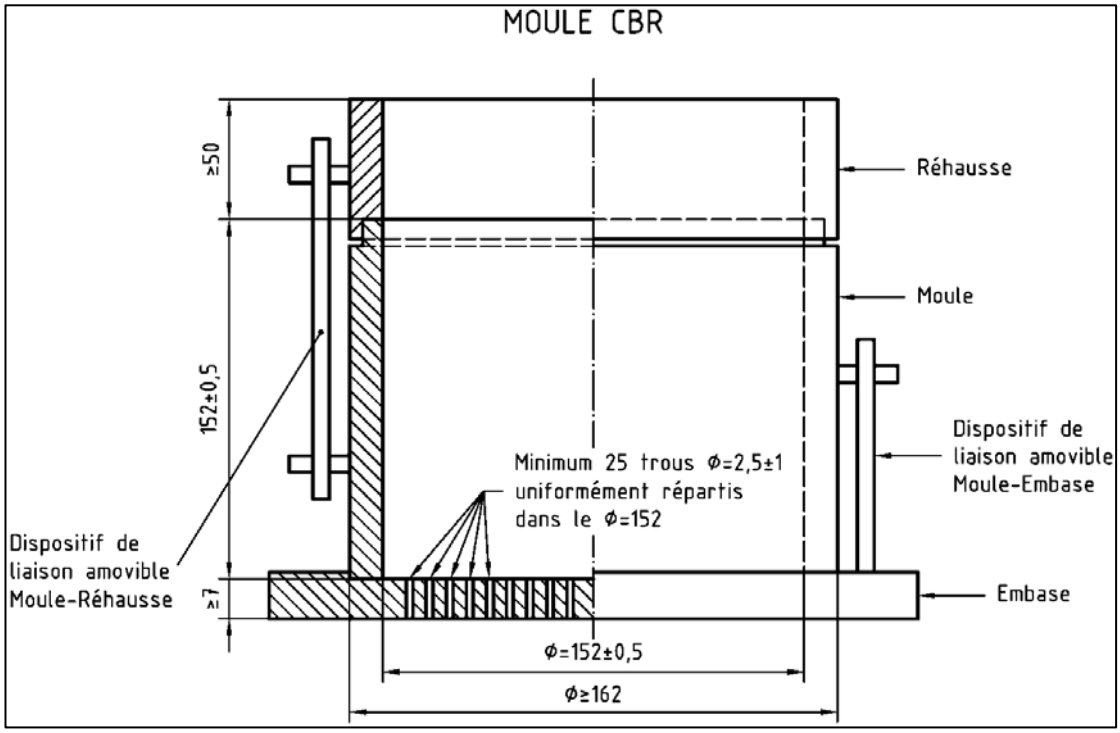
La teneur en eau d’un sol est le rapport du poids d’eau qu’il contient au poids de ses éléments secs, ce dernier est le poids après passage à étuve.

Moule Proctor : est constitue par un cylindre métallique inoxydable, de diamètre de 10.16cm et d'une hauteur de 11.7cm pourvu d'un fond et d'une hausse métallique. Ce moule est utilisé pour les sols qui ne contiennent pas d'éléments de dimension supérieure à 5mm.



(Figure III.12) moule Proctor

Moule C.B.R : est constitué par un cylindre métallique, de diamètre de 15.2cm et hauteur de 15.2cm pourvu également d'un fond est d'une hausse métallique amovible. Ce moule est utilise pour les sols qui ne contiennent pas d'éléments de dimension supérieure à 20mm.



(Figure III.13) moule CBR

Deux Dames Standards : utilisées l'une pour l'essai Proctor normal, l'autre pour le Proctor modifié. Chacune d'elles est constituée par un marteau cylindrique de 5.1cm de diamètre guidée par une tige à l'intérieur d'un tube sur une certaine longueur.

III.7.4 l'équipent et les matériaux :

III.7.4.1 Appareillage spécifique :

L'appareillage spécifique comporte :

Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm ;

Deux modèles de moules :

- moule Proctor ;
- moule CBR.

Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu. Les formes et les dimensions fonctionnelles de ces éléments doivent être conformes aux indications portées sur la figure.

Le moule CBR comporte en plus un disque d'espacement dont la forme et les dimensions sont conformes à la figure.

Deux modèles de dames de compactage manuelles :

Une règle à araser constituée par une lame en acier dont les formes et les dimensions doivent être conformes aux indications portées sur la figure ;

Les machines à compacter mécanisées peuvent avantageusement être utilisées si elles répondent aux conditions suivantes :

- les masse, diamètre, hauteur de chute du mouton, épaisseur du fourreau lorsque la machine en comporte un, sont tels que définis sur la figure ;
- le mode de répartition des coups, précisé au paragraphe 7.2, est respecté ;
- la cinématique du mécanisme permet au porte-moule d'être en appui direct sur le bâti de la machine au moment de l'impact de la dame ; si ce n'est pas le cas, il convient de vérifier pour chaque matériau que les écarts de mesure de la masse volumique maximale entre la machine et le mode manuel n'excèdent pas 1%.
- la machine est rendue solidaire d'un socle en béton dont l'épaisseur minimale est de 30cm.

III.7.4.2 Appareillage d'usage courant :

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;
- balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- une enceinte thermique ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux selon une méthode normalisée (NF P 94-049-1, NF P 94-049-2, NF P 94-050) ;
- des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
- un pulvérisateur à eau ;
- éventuellement un malaxeur désagrégation mécanique dont le volume de cuve est d'au moins 10 dm^3;
- un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule (dans le cas d'un corps de moule monobloc).
- matériels et outillages divers.

III.7.4.3 Préparation des échantillons soumis à l'essai :

III.7.4.3.1 Prise d'échantillon :

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau et suivant que l'on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son Indice CBR après immersion et/ou de son Indice Portant Immédiat. Le diagramme représenté sur la figure précise ces masses. Il s'agit de quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points [7].

III.7.4.3.2 Préparation des éprouvettes :

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50 °C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.
Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.

Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.
Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre :

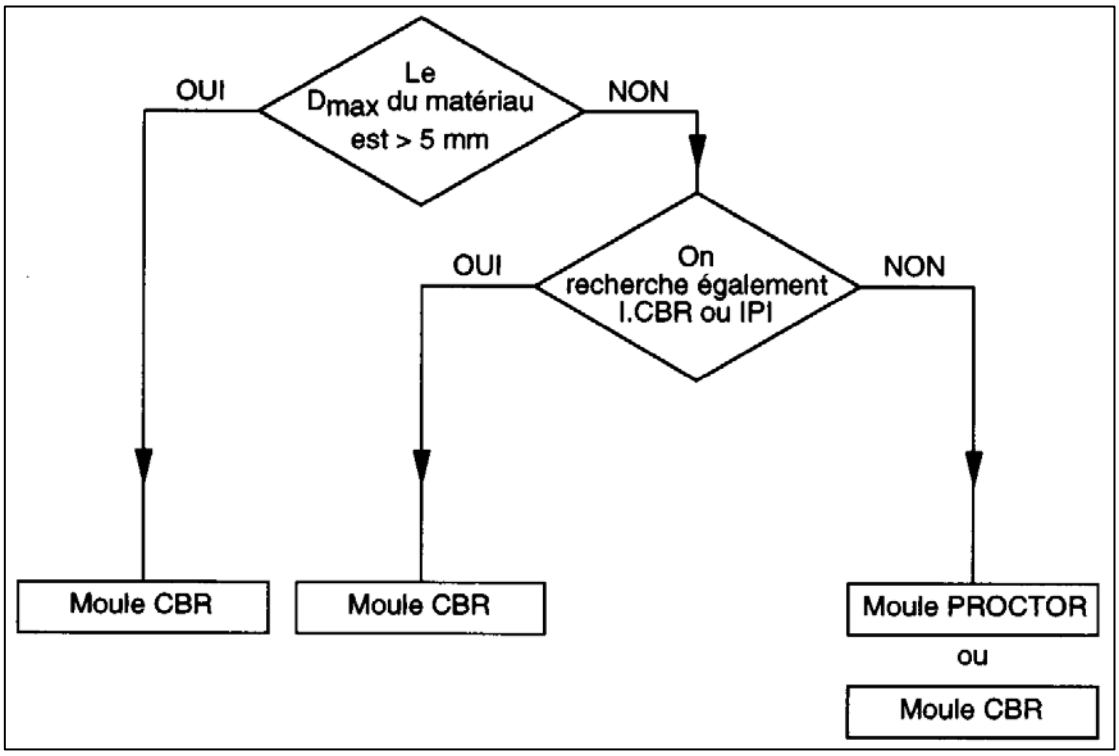
$$\mathbf{0{,}8\ W_{OPN}\ (ou\ W_{OPM})\ et\ 1{,}2\ W_{OPN}\ (ou\ W_{OPM})}$$

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau. C'est à partir de chacune de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor (et le cas échéant la détermination de l'Indice Portant Immédiat et l'Indice CBR Immédiat ou après immersion des éprouvettes aux teneurs en eau considérées).

III.7.5 Mode opératoire :

III.7.5.1 Choix du type de moule :

Il est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme.



(Figure III.14) choix du type de moule

III.7.6. Exécution de l'essai :

Les choix du type de moule et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées en respectant les modalités indiquées dans le tableau suivent.

Nature de l'essai	**Caractéristiques de l'essai**	**Moule Proctor**	**Moule CBR**
Essai Proctor Normal	Masse de la dame Diamètre du mouton Hauteur de chute Nombre de couches Nombre de coups par couche	2490g 51mm 305mm 3 25	2490g 51mm 305mm 3 56

Essai Proctor modifié	Masse de la dame Diamètre du mouton Hauteur de chute Nombre de couches Nombre de coups par couche	4535g 51mm 457mm 5 25	4535g 51mm 457mm 5 56

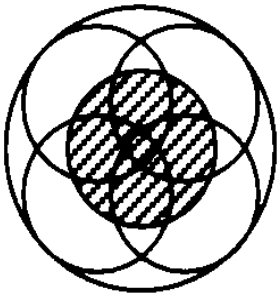
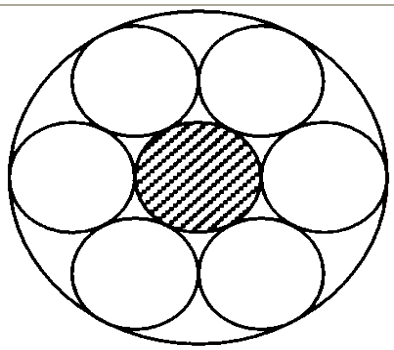
Tableau(4) Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :

- solidariser : moule, embase et rehausse ;
- lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
- placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage.

Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié.

Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 coups ou 56 coups par couche suivant le schéma suivant, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réalise

 Par couche : trois séquences de huit coups répartis, et le 25e au centre	 Par couche : huit séquences de sept coups, six approximativement tangents à la périphérie et le 7e au centre
Moule Proctor	Moule CBR

(Figure III.15) Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser. Peser l'ensemble du moule avec le matériau :

- s'il n'est pas prévu de poursuivre l'essai par la détermination des Indices CBR et/ou de l'Indice Portant Immédiat, on procède au démoulage de l'éprouvette. En extraire, ensuite, un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau ;
- si à l'inverse, on prévoit la détermination concomitante de l'Indice Portant Immédiat, on procède immédiatement après le compactage au poinçonnement de l'éprouvette (conformément à la norme NF P 94-078) puis à son démoulage et à sa dessiccation pour mesure de sa teneur en eau ;
- si on prévoit la détermination concomitante de l'Indice Portant Immédiat et de l'Indice CBR après immersion, il convient de compacter deux éprouvettes identiques, la première servant à la détermination de l'IPI et de la teneur en eau, la seconde étant mise en immersion 4 jours puis poinçonnée conformément à la norme NF P 94-078 ;

- enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'Indice CBR après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage (voir norme NF P 94-078).

La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

III.7.7 Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- la teneur en eau ;
- la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
- la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à 0,1 mm près.

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique $\rho_d = f(w\ \%)$ tel que celui présenté sur la figure. Le rapport des échelles est de 2 % de teneur en eau pour 0,1 t/m3 de masse volumique.

On trace ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux. Sauf dans le cas des matériaux très perméables, cette courbe présente un maximum dont les coordonnées sont dénommées respectivement masse volumique sèche optimum et teneur en eau Optimum Proctor Normal (ou Proctor Modifié suivant l'essai réalisé). Ce résultat est exprimé à 0,01 t/m3 près pour la masse volumique et à 0,1 point près pour la teneur en eau (exprimée en pourcentage)

III.9.5.4 Tableau de mesures:

ESSAI PROCTOR

Dossier N°: …….. Nature du matériau : ……... Date d'essai : ……
Chantier : ……. Provenance : ……. Opérateur : ……..
Client : ……. Profondeur : ……. Séchage : ……

ESSAI PROCTOR **- Modifié** ☐
- Normale ☐

Densité apparente sèche					
Echantillon N°					
Eau ajoutée (%)					
Poids total humide (P_h)					
Poids du moule vide(P_M)					
Poids du sol humide (P_{Sh})					
Poids du sol sec ($P_S=P_h/(1+w)$					
Volume du moule (V)					
D_{app} du sol ds= P_S/V					

Teneur en eau					
Tare N°					
Poids total humide (P_h)					
Poids total sec (P_S)					
Poids de la tare (P_0)					
Poids de l'eau ($P_e=P_h - P_S$)					
Poids du sol sec ($P_S=P_S- P_0$)					
Teneur en eau (%)($Wi= P_e /P_S$)					
Moyenne (%)					

-- Densité sèche maximale :…… – Teneur en eau optimal :……%

(Tableau 5) tableaux des résultats pour essai Proctor

III.8 Essai œdométrique :

III.8.1 Norme applicable :

- XP P 94-090-1, Sols : reconnaissance et essais — Essai œdométrique — Partie 1 : Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.
- XP P 94-091, Sols : reconnaissance et essais — Essai de gonflement à l'odomètre — Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes.

III.8.2 but de l'essai :

La manipulation a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement d'un massif de sol, par exemple sous une fondation superficielle Sous l'effet des charges appliquées,[8] le sol va se déformer : il va subir un tassement. Pour en évaluer l'ampleur, on reproduit le phénomène au laboratoire.

On placera l'échantillon dans une enceinte cylindrique empêchant toutes déformations latérales lors d'un chargement par pallier

On suppose donc que dans le sol, les déformations horizontales sont nulles

III.8.3 définitions et théorie :

-Œdomètre : appareil permettant de charger axialement une éprouvette de forme cylindrique placée dans un cylindre rigide (à déformation transversale nulle) et de mesurer sa variation ΔH de hauteur H. les forces supérieures et inférieures de l'éprouvette, qui est généralement submergée, sont en contact avec des disques drainants.

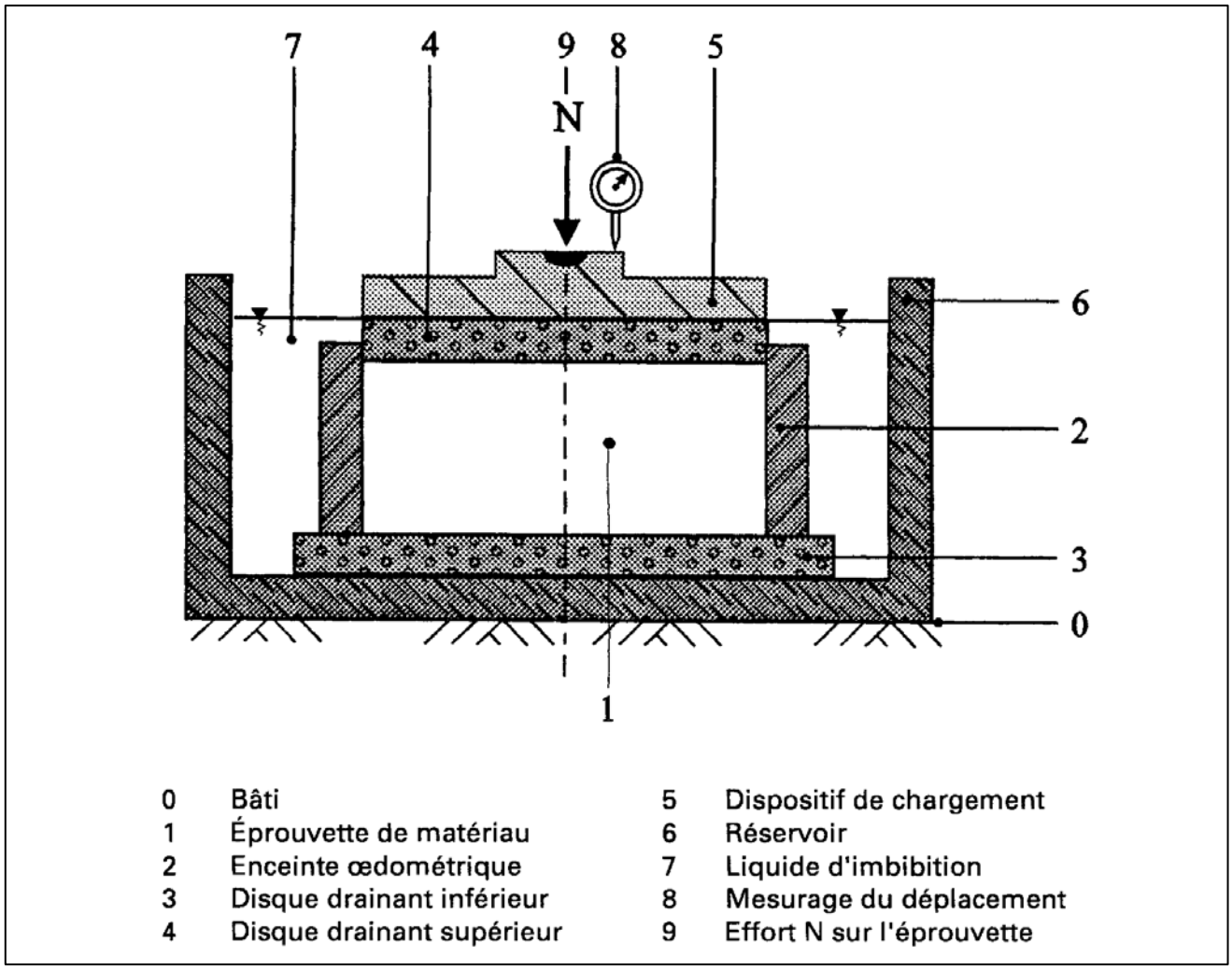
-Contrainte de chargement σ : contrainte moyenne totale **σ** obtenue en divisant l'effort axial **N** par l'aire de la section de matériau fretté latéralement.

-Déformation axiale ΔH/H : déformation qui se produit lorsqu'une contrainte axiale **σ** est appliquée à une éprouvette de matériau fretté latéralement.

-Courbe œdométrique : représentation du diagramme donnant l'indice des vides de l'éprouvette soumise à essai à la fin de chaque palier de consolidation, en fonction de la contrainte effective **(σ'_v)**, égale à la contraint totale **(σ_v)** qui lui est appliquée en début d'essai. La durée du palier est telle que la pression interstitielle est nulle dans l'éprouvette à la fin de la consolidation. Une représentation dans un système de coordonnées semi-logarithmique est généralement choisie : **$e = f(\lg \sigma'_v)$.**

-Courbe de consolidation : variation de hauteur (tassement) de l'éprouvette en fonction du temps t sous l'effet d'une contraint applique au début de l'essai **σ_v** et maintenue

constante. Les représentations choisies sont soit **S** en fonction du logarithme du temps soit **S** en fonction de la racine carrée du temps.



(Figure III.16) principe de l'œdomètre

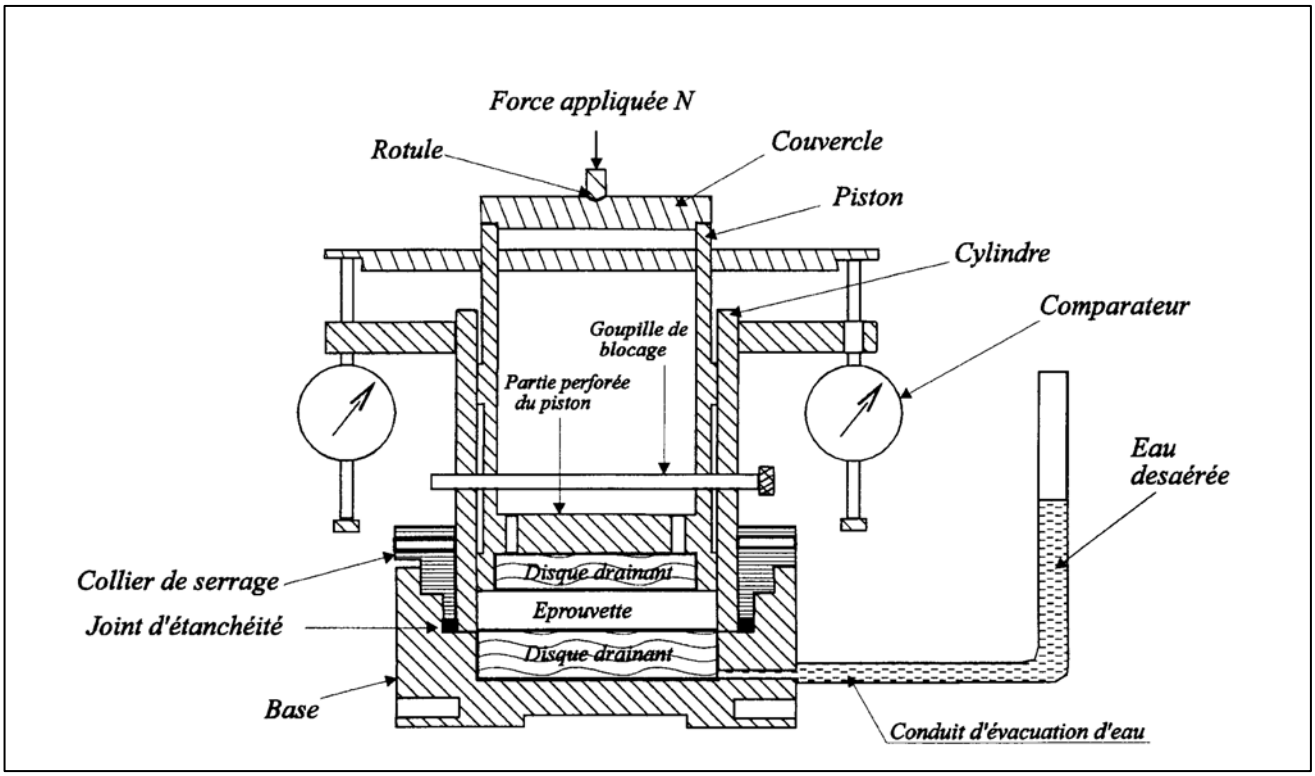
III.8.4 l'équipent et les matériaux :

III.8.4.1 Appareillage:

L'appareil spécifique à l'essai (odomètre) comprend

* le bâti permettant d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette
* la cellule œdométrique
* le dispositif d'application de la charge
* le système de mesurage

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur, la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques des échantillons de sol.



(Figure III.17) la cellule œdométrique type terzaghi [8]

Bâti :

Le bâti, quasi indéformable sous l'effet des efforts appliqués, supporte la cellule œdométrique et maintient sa base horizontale.

Cellule œdométrique : La cellule œdométrique, en matériaux inertes chimiquement vis-à-vis de l'éprouvette et des fluides qu'elle contient, comporte les éléments suivants :

- une bague œdométrique terminée par une trousse coupante ou une enceinte cylindrique rigide qui reçoit l'éprouvette de matériau. Le diamètre intérieur D de la bague doit être supérieur ou égal à 60 mm et sa hauteur telle que la hauteur initiale de l'éprouvette (H_0), exprimée en millimètres, satisfasse à la condition suivante :

$10 < Hi < 0{,}4D$

- un réservoir servant de bac d'imbibition muni d'un logement recevant la bague œdométrique ;
- un dispositif permettant de répartir l'effort appliqué sur l'éprouvette de matériau par l'intermédiaire d'un cylindre rigide de diamètre très légèrement inférieur à celui de

L’éprouvette afin de coulisser librement. Dans le cas d'utilisation d'un piston, ce dernier doit posséder en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort axial ;

- deux disques drainant rigides (pierres poreuses,...) plans et éventuellement reliés à des orifices pour la circulation des fluides.

Pour les matériaux raides à très raides, le diamètre de l'éprouvette pourra être réduit, sans être inférieur à 35 mm, afin d'atteindre des contraintes supérieures à 1,6 MPa. Le bâti doit être adapté en conséquence.

III.8.4.2 dispositif d’application de l’effort :

Le dispositif d’application de l’effort vertical doit être capable d’appliquer une force suivant la direction axiale, avec une incertitude de 2% et de la maintenir constante. Le matériel doit être conçu pour transmettre à l’éprouvette une contrainte verticale moyenne pouvant atteindre au moins 1.6 MPa à charge maximale et une contrainte inférieure à 10 KPa sous son poids propre.

III.8.4.3 système de mesurage :

force verticale :

L’intensité de la force verticale N est déterminée avec une incertitude qui est grande des deux valeurs :

- 2% de la valeur mesurée de la force.
- 0.2 A en newtons, avec A l’aire de la section transversale de l’éprouvette, exprimée en centimètres carrés.

III.8.4.4 déplacement vertical :

Le déplacement vertical ΔH du dispositif d’application de la charge placé à la partie supérieure de l’éprouvette est mesuré suivant son axe par rapport à un repère fixe (bâti) avec une incertitude inférieure à 10µm.

III.8.4.5 caractéristiques géométriques de la bague ou de l’éprouvette :

Le diamètre intérieur et la hauteur de la bague ou de l’enceinte sont mesurés avec une incertitude de 0.1mm. L’aire de la section transversale de la bague ou de l’enceinte est déterminée par calcul.

III.8.4.6 horizontalité du bâti support de la cellule œdométrique :

La mesure doit être adaptée pour montrer que la rotation de la base support de la cellule par rapport à l'horizontale reste inférieure à 2/100 de la cours de l'essai.

III.8.4.7 Matériel complémentaire :

- une balance de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de valeur mesurée
- une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable de 50 C ^{0} à 105C^{0}.
- les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- un chronomètre donnant la seconde.
- un dessiccateur.

III.8.5 Mode opératoire :

III.8.5.1 Déformation de la cellule œdométrique sur son bâti de chargement :

Une mesure de déformation de la cellule est effectuée avec un éprouvette témoin métallique placé entre les deux disques drainant, éventuellement recouverts de papier-filtre, en passant par les mêmes paliers de chargement que pour l'essai, afin de déterminer l'amplitude des corrections à prendre en compte. Suivant les cas, cette mesure est effectuée avant ou après l'essai lui-même.

Elle reste utilisable pendant un délai maximal de six mois sans modification de matériel.

Cette mesure de déformation de l'appareillage est nécessaire en présence de sols gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à 1,6 MPa.

III.8.5.2 Préparation de l'éprouvette :

L'intérieur de la bague, de diamètre D, ou de l'enceinte œdométrique recevant l'éprouvette, est légèrement enduit de graisse non dégradable par l'eau.

L'éprouvette est carottée au moyen de la bague œdométrique, ou taillée avec soin aux dimensions de l'enceinte œdométrique dans laquelle elle est introduite. Elle est arasée sur les deux faces parallèles de la bague ou de l'enceinte puis pesée.

Compte tenu de la dimension d_{max} des particules solides qui constituent l'éprouvette, cette dernière a, une fois confectionnée, une hauteur H_I d'au moins 10 mm et telle que :

$$\mathbf{6d_{max} \leq H_I \leq 0.4\ D}$$

III.8.5.3 Déroulement de l'essai :

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette d'aire de section transversale A à une série de paliers de chargement et de déchargement d'intensité constante et à mesurer, pour chacun d'eux, la variation de hauteur ΔH de cette éprouvette au cours du temps.

Le palier de chargement de rang n correspond à une contrainte verticale moyenne $o_{v(n)}$ sous la charge $N_{(n)}$ appliquée à l'éprouvette telle que :

$$\sigma_{V(n)} = N_{(n)} / A \qquad \text{.....(III.8)}$$

D'un palier à l'autre, le taux d'accroissement de la contrainte i est défini par :

$$i = (\sigma_{v\,(n+1)} - \sigma_{v\,(n)})/\sigma_{v\,(n)} \qquad \text{..... (III.9)}$$

Selon l'objectif poursuivi et l'état de l'éprouvette soumise à l'essai, des procédures différentes sont suivies.

III.8.5.4 Procédure générale :

Deux cas sont à distinguer selon que les sols gonflent ou non en présence d'eau.

A. Préparation des disques drainant :

Pour les éprouvettes de sols non gonflants, les disques drainants sont saturés avec de l'eau. Tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Les disques sont choisis de telle façon qu'ils ne puissent pas être pollués au cours de l'essai par des éléments fins provenant de l'éprouvette, sinon ils sont protégés par un papier-filtre.

Lorsque le sol des éprouvettes est connu par ailleurs comme étant gonflant, les disques drainants sont utilisés secs.

B. Mise en place de l'éprouvette

Selon le mode de préparation, l'éprouvette, ou l'éprouvette et sa bague de découpage, de caractéristiques géométriques connues, est pesée puis introduite dans la

cellule oedométrique entre les deux disques drainants. Le dispositif de répartition de l'effort sur l'éprouvette est placé au contact de l'éprouvette et le système de mesurage de la variation de hauteur de l'éprouvette est mis en place.

Alors que l'éprouvette n'est soumise qu'à la contrainte due uniquement au dispositif d'application de la charge σ_1 le réservoir de saturation est rempli d'eau à la température ambiante et l'observation de la variation de hauteur de l'éprouvette commence.

Dès lors, la loi de chargement à adopter pour l'essai est fonction du comportement de l'éprouvette en présence d'eau :

- Si l'éprouvette à tendance à soulever le dispositif d'application de la charge, la procédure de chargement à adopter

Dans le cas contraire, la procédure à suivre est celle indiquée dans le paragraphe

III.8.5.5 Absence de gonflement de l'éprouvette à la mise en eau :

A. Éprouvette provenant d'un prélèvement de sol en place :

La loi de chargement est définie par référence à la contrainte effective verticale en place σ'_{vo} au droit de l'échantillon de sol prélevé in situ et à la contrainte verticale effective de préconsolidation σ'_p connue ou estimée avant l'essai.

Les paliers sont réalisés pour respecter les conditions suivantes ou s'en rapprocher au mieux :

- $\sigma_{v(1)}$ = contrainte due au dispositif d'application de la charge (valeur inférieure à 10 kPa)
- $\sigma_{v(2)} = 0.5\ \sigma_{v0}$
- $\sigma_{v(3)} = \sigma_{v0}$
- $\sigma_{v(4)} = 2\ \sigma_{v0}$

Si le sol est sur consolidé ($\sigma'_p > \sigma'_{v0}$), le chargement est pour suivi avec un taux d'accroissement de la contrainte choisi compris entre 0,5 et 1, jusqu'à ce que la contrainte appliquée soit supérieure à la contrainte de préconsolidation et de sorte à avoir, dans la mesure du possible, un palier avec une contrainte comprise entre σ'_{vo} et σ'_p.

Lorsque la valeur de la contrainte de préconsolidation σ'_p est inconnue au moment de l'essai, celle-ci est appréciée pendant le déroulement de l'essai à partir de l'exploitation de la courbe [ΔH, lg σ_v]. On considère que la contrainte de préconsolidation a été dépassée dès qu'une courbure marquée apparaît sur cette courbe, sous réserve que la valeur de σ'_p ainsi déterminée ne soit pas en contradiction avec les caractéristiques du sol fin et son histoire géologique.

Une fois atteint le premier palier noté n_1, pour lequel la contrainte est supérieure à la contrainte de préconsolidation ($\sigma_{v(n1)} > \sigma'_p$), on procède à un cycle de déchargement/rechargement avec les paliers de contrainte donnés dans le tableau suivent :

	Rang du palie	Contrainte σ_v appliquée sur l'éprouvette
Déchargement du Premier cycle	n_1 n_1+1 n_1+2	$\sigma_{v\,(n1)} > \sigma'_p$ $\sigma_{v\,(n1+1)}$ = compris entre 0.5 σ'_{v0} et0.75 σ'_{v0} $\sigma_{v\,(n1+2)} = \sigma_{v1}$
rechargement	n_1+3 n_1+4 n_1+5 n_1+6 n_1+7 …..	$\sigma_{v\,(n1+3)} = \sigma_{v\,(n1+1)}$ $\sigma_{v\,(n1+4)} = \sigma_{v\,(n1)}$ $\sigma_{v\,(n1+5)} = 2\sigma_{v\,(n1)} = 2\,\sigma_{v\,(n1+4)}$ $\sigma_{v\,(n1+6)} = 2\sigma_{v\,(n1+5)}$ $\sigma_{v\,(n1+7)} = 2\sigma_{v\,(n1+6)}$ ….. = 2…….

Tableau (6) Paliers de chargement déchargement

Au-delà du palier de rang (n1+ 4), l'essai est poursuivi par au moins trois paliers de chargement avec un taux d'accroissement de la contrainte i de 1.

Le dernier palier de chargement est choisi en fonction du respect des deux critères suivants, dans la limite des possibilités de l'appareillage :

- Obtention de trois points alignés de la courbe de variation de hauteur de l'éprouvette

(ΔH, lg σ_v)

- Contrainte $\boldsymbol{\sigma_v}$ du dernier palier supérieure à la contrainte effective verticale à laquelle sera soumis le sol au droit du prélèvement après construction de l'ouvrage auquel se rapporte l'étude.

Le déchargement est fait en totalité jusqu'à ce que la contrainte appliquée ne soit due qu'au seul poids mort du système d'application de la charge $\boldsymbol{\sigma_v}(1)$.

B. Éprouvette provenant d'un matériau reconstitué en laboratoire :

Les paliers de chargement $\boldsymbol{\sigma_v}$ sont choisis en fonction de l'objectif de l'essai avec un taux d'accroissement inférieur ou égal à 1.

L'essai se déroule en suivant l'évolution de la courbe donnant la variation de hauteur de l'éprouvette en fin de palier en fonction de lg $\boldsymbol{\sigma_v}$.

Le déchargement est effectué lorsqu'une forte courbure est observable sur cette courbe après le palier $\boldsymbol{\sigma_{V2}}$ Le rechargement reprend à partir de $\boldsymbol{\sigma_1}$ comme lors du premier chargement. Le dernier palier de chargement est choisi dans la limite de l'appareillage de telle sorte que trois points alignés soient obtenus sur la courbe ($\Delta\mathbf{H}$, $\mathbf{lg\ \sigma_v}$) au-delà de $\boldsymbol{\sigma_{v2}}$

III.8.5.6 Gonflement de l'éprouvette à la mise en eau :

Dans le cas de sols gonflants, l'éprouvette mise en présence d'eau a tendance à soulever le dispositif d'application de la charge. Celui-ci devra alors être maintenu dans sa position initiale par un chargement qui lui est appliqué immédiatement et progressivement jusqu'à l'apparition du premier tassement stabilisé c'est-à-dire en appliquant par exemple successivement des contraintes voisines de $\mathbf{0{,}5\ \sigma'_{v0}}$; $\mathbf{0{,}75\ \sigma'_{vo}}$; $\mathbf{\sigma'_{vo}}$; $\mathbf{1{,}5\ \sigma'_{vo}}$...

La contrainte correspondant à l'apparition du premier tassement compte tenu de la correction de la déformation propre de l'appareillage est notée : $\boldsymbol{\sigma_{v2}}$.

Le chargement est ensuite poursuivi avec un taux d'accroissement de la contrainte de chargement n'excédant pas 1 (sans déchargement intermédiaire).

Le dernier palier de ce chargement sera choisi en fonction du respect des deux critères suivants, dans la limite des possibilités de l'appareillage :

- Obtention de trois points alignés sur la courbe de variation de hauteur de l'éprouvette en fonction du logarithme de la contrainte appliquée (ΔH, lg σ_v).
- contrainte $\sigma_{v(n)}$ de ce dernier palier de chargement supérieure à la contrainte effective verticale à laquelle sera soumis le sol, au droit du prélèvement, après construction de l'ouvrage auquel se rapporte l'étude.

L'essai se termine par un déchargement comportant au moins quatre paliers, dont les deux derniers correspondent aux contraintes σ_{v2} et σ_{v1}

III.8.5.7 Procédure particulière pour les sols surconsolidés soumis à de fortes contraintes :

Cette procédure peut être substituée à la procédure générale dans certains cas particuliers (sol très surconsolidé,...).

L'éprouvette est découpée puis pesée (ou carottée au moyen de la bague de découpage de caractéristiques géométriques connues et pesée) et introduite dans la cellule œdométrique entre les deux disques drainants secs et sans papier-filtre.

Le dispositif de répartition de l'effort sur l'éprouvette est placé au contact de l'éprouvette et le système de mesurage de la variation de hauteur de l'éprouvette est mis en place.

La cellule œdométrique et le bac d'imbibition (sans eau) sont placés dans une enceinte maintenant l'éprouvette dans une atmosphère hygrométrique ment saturée.

III.8.6 Identification de l'éprouvette de sol

Peser l'éprouvette de sol immédiatement après enlèvement du dispositif de chargement et de mesurage et démontage de la cellule œdométrique.

La teneur en eau de l'éprouvette de sol avant et après essai est déterminée suivant la norme NF P 94-050.

À défaut de valeur mesurée pour la masse volumique des particules solides du sol soumis à l'essai, adopter une valeur estimée.

III.9. Essai de cisaillement à la boite de casagrande :

III.9.1 Norme applicable :

- NF P 94-071 (toutes les parties), Sols : reconnaissance et essais, Essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

III.9.2 but de l'essai :

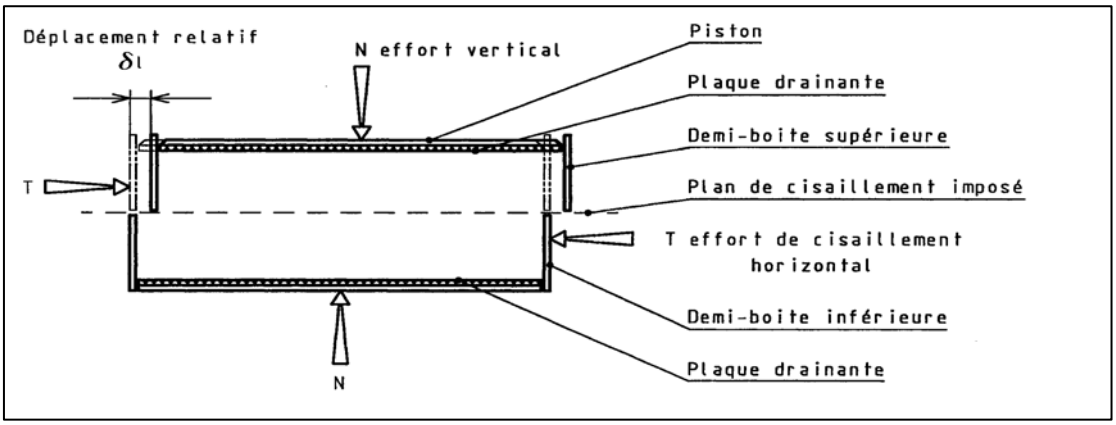
L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol place dans une boite de cisaillement constituée de deux demi-boites indépendantes.

Le plan de séparation des deux demi-boites constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à :

* Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) un maintenu constant pendant toute la durée de l'essai [7].

* produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boites l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif σ1 à vitesse constante,

* mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.



(Figure III.18) Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boite

III.9.3 définitions et théorie :

L'étude au laboratoire, des déplacements des grains d'un sol sous une fondation montre la formation d'un coin rigide sous la fondation. A l'intérieur de ce coin, les grains s'enfoncent verticalement sans mouvements des uns par rapport aux autres.

Par analogie au frottement solide-solide, nous pouvons pour une contrainte normale (σ) donnée, appliquer une contrainte tangentielle limite (τ Lim): Au-delà de cette valeur (τ >τ Lim), il y aura glissement.

La valeur de l'angle limite (β Lim) s'appelle: angle de frottement interne des grains. Il est noté: **φ**.

Cette relation s'appelle le critère de COULOMB: La courbe intrinsèque du sol représente ce critère dans le plan de MOHR [7]

L'essai de cisaillement rectiligne permet de mesurer la valeur de l'angle de frottement interne d'un sol : on impose une contrainte normale (σ) puis on cisaille le sol. La valeur de τ Lim est alors connue. La représentation dans le plan de Mohr permet de trouver la valeur de φ.

❖ **Contrainte de rupture des sols pulvérulents :**

$$qu = 1/2\ S\gamma\ B\ N\gamma\ .\ \gamma 1 + Sq\ .\ \gamma 2\ .D\ Nq$$

- ✓ B : largeur de la fondation.
- ✓ L : longueur de la fondation.
- ✓ γ1: poids volumique apparent du sol sous la fondation (sec, humide ou déjaugé).

- ✓ γ2: poids volumique apparent du sol au dessous du fond de fouille (sec, humide ou déjaugé).
- ✓ D : profondeur d'encastrement de la fondation.
- ✓ Sq = 1 et Sγ = (1 - 0,2 B/L) sont les facteurs de forme pour une fondation rectangulaire
- ✓ Nγ, Nq sont des paramètres sans dimension, dépendant de la valeur de l'angle de frottement interne du sol.

III.9.4 l'équipent et les matériaux :

Appareillage :

L'appareillage spécifique à l'essai comprend

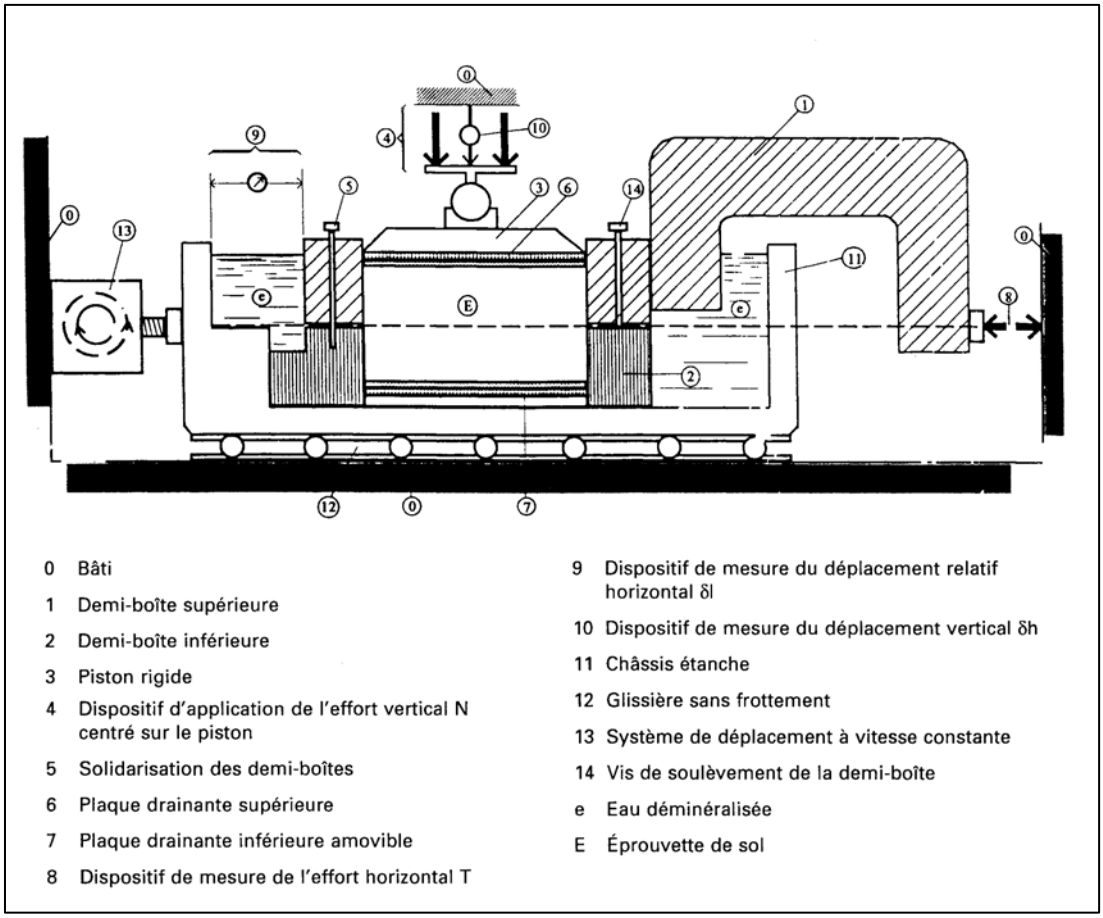
le bâti.

la boite de cisaillement.

le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette,

le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boites,

le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.



(Figure III.19) Schéma de la boite de cisaillement exemple avec la demi-boite inférieure mobile

Le bàti :

Le bati indéformable sous l'effet des efforts appliqués supporte la boite de cisaillement et son chassis et les maintient horizontalement avec une tolérance $\pm 1^0$.

La boite de cisaillement :

Une boite de cisaillement comoprte les élement suivente :

* deux demi-boite (l'une inférièure et l'autre supérieure), cylindrques intérieurement, de même section droite, carrée ou circulaire (L=60mm±0,1mm ou 100mm±0,1mm).

* la demi-boite supérieure est équipée de vis permettant un léger soulévement.

* un blocage ou une solidarisation des deux demi-boite de telle façon qu'elles aient le même axe de sysétrie intérieur .

* un chàssis étanche support de la demi-boite inférieure.

* une plaque drainante à la base de la demi-boite inférieure

* un piston rigide muni à sa base d'une plaque drainate, l'ensemble glissant librement dans la demi-boite supérieure. Ce piston posséde en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort vertical[7].

Les plaque drainantes (pierres poreuses,….) sont planes et reliées à des orifices pour lacirculation des fluides.

Les matériaux utilisés sont inertes chimiquement vis-à-vis du sol et des fliuides qu'il contient. La surface de contact entre les deux demi-boites est plane et lisse.

Dispositif de production du déplacement :

Le déplacement possible des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre, est d'au moins 5 mm à une vitesse compatible avec la vitesse maximale. Cette vitesse est maintenue constante pendant l'essai avec une incertitude qui est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- 10 % de la valeur lue, ou 0,5 µm/min.

➢ Système de mesure :

- **Force verticale :**

L'intensité de la force verticale constante (N) est connue avec une incertitude de 1/100 de sa valeur.

- **Effort de cisaillement :**

La mesure de l'effort horizontal (T) s'effectue au moyen d'un capteur avec une incertitude de 1/100 de la valeur maximale lue au cours de l'essai.

- **Déplacements :**

♦ Le déplacement vertical δ_v, dans l'axe du piston placé à la partie supérieure de l'éprouvette, est mesuré par rapport à un repère fixe avec une incertitude de 0,05 mm.

♦ Le déplacement horizontal δ_h des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre est mesurée au moyen d'un capteur avec une incertitude de 0,05 mm.

➢ Matériel complémentaire :

Il comprend :

* une balance de portées maximale et minimale compatible avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ; une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 50°C et à 105 °C.

* les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes

* un chronomètre donnant la seconde.

III.9.5 Mode opératoire :

III.9.5.1 -Préparation des plaques drainant :

Les plaques sont saturées avec de l'eau désaérée et tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Elles sont recouvertes d'un papier-filtre lorsque des particules de sol risquent de migrer vers les pores des plaques drainant.

III.9.5.2. Préparation des éprouvettes :

La hauteur des éprouvettes, une fois confectionnées, est telle que :

$$6d_{max} \leq h \leq \frac{L}{2} \qquad \text{.....(III.10)}$$

Dans ces conditions, le matériau essayé a des éléments dont la dimension maximale est :

$d_{max} < 5$ mm dans le cas de la boîte de 60 mm de côté,

et $d_{max} < 8$ mm dans le cas de la boîtede100 mm de côté.

III.9.5.3 Sols cohérents ou reconstitués après compactage :

Tailler les éprouvettes de telle sorte que les dimensions de la section droite de l'éprouvette soient ajustées au mieux à celles de la boîte et que la hauteur (h) en millimètres soit telle que :

$$20 \leq h \leq \frac{L}{2} \qquad \text{……(III.11)}$$

Peser l'échantillon et mesurer sa hauteur. Placer une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure. Introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes solidarisées au préalable.

L'éprouvette est calée dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.

III.9 .5.4 Sols pulvérulents :

Après solidarisation des deux demi-boîtes et après avoir mis en place une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure, le matériau est compacté directement dans la boîte qui servira au cisaillement.

La masse de sol à introduire dans la boîte est déterminée pour obtenir, après compactage, une éprouvette de masse volumique choisie et pour que le plan de cisaillement se trouve sensiblement à mi-hauteur de l'éprouvette.

III.9.6 Réalisation de l'essai :

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisaillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents.

III.9.6.1 Choix de l'effort vertical à appliquer :

L'effort vertical (N) est déterminé pour chaque éprouvette en fonction des contraintes normales fixées par le géotechnicien responsable.

La contrainte verticale maximale appliquée à la série d'éprouvettes doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après la réalisation de l'ouvrage.

Si aucune spécification n'est fournie, choisir les valeurs à partir des indications données dans le tableau et en respectant la condition précédente.

σ'_{v0} (kPa)	< 100	≥ 100
N/A	50	0,5 σ'_{v0}
	100	σ'_{v0}
	200	2 σ'_{v0}

Tableau (7) contrainte verticale maximale appliquée à la série d'éprouvettes

III.9.6.2 Essais sur sols cohérents :

Dès que l'éprouvette a été mise en place, les opérations suivantes se déroulent sans interruption.

Mise en place:

La boîte de cisaillement contenant l'éprouvette est placée dans le châssis étanche fixé sur le bâti. Tout en maintenant la solidification des deux demi-boîtes:

* placer le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette.

* noter, après fixation du système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T), et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort (T).

* régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et noter la valeur d'origine ;

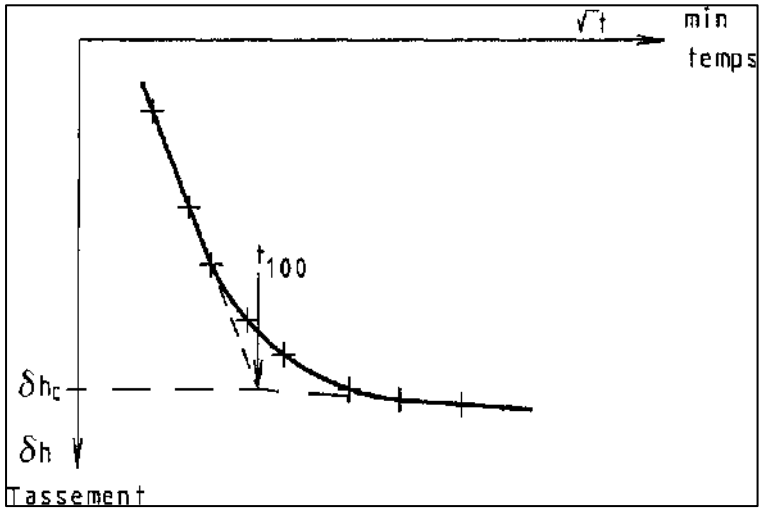
* positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine ;

* appliquer l'effort (N) sur la partie supérieure du piston ;

* mesurer le déplacement vertical du piston δ_v en fonction du temps.

Saturation et consolidation :

Remplir le châssis contenant la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée. Mesurer le déplacement vertical 8h du piston en fonction du temps pendant 1 h au moins et jusqu'à stabilisation. La stabilisation est considérée comme obtenue dès que les mesures permettent de déterminer une direction asymptotique. Cette figure montre également la mode de détermination du déplacement vertical δ_v en fin de consolidation [7].



(Figure III.20) Détermination de la fin de consolidation d'une éprouvette dans la boîte de cisaillement

III.9.7 Expression des résultats :

III.9.7.1 Pour chaque éprouvette :

Calculer :

la contrainte normale effective σ' à partir de l'expression :

$$\sigma' = \frac{N}{A} \qquad \text{.....(III.12)}$$

L'effort normale est éventuellement corrigé du poids du piston si sa valeur est su périeure à

Dans les conditions de l'essai, la contrainte normale σ est la contrainte effective en fin de consolidation.

-la contrainte de cisaillement τ, par la relation :

$$\tau = \frac{T}{A} \qquad \text{……..(III.13)}$$

Les corrections dues à la variation de l'aire de la section cisaillée et au frottement du sol sur le métal de la boite ne sont pas prises en compte dans la présentation des résultats.

-la teneur en eau du sol avant essai et en fin de cisaillement.

-la masse volumique sèche γ_d de l'éprouvette avant essai, après stabilisation de l'évolution de son épaisseur δh_c sous l'effort appliqué N.

Le volume de l'éprouvette à une étape donnée est :

V = A (h- δh)

-l'indice des vides et le degré de saturation avant essai à partir de la masse volumique ρ_s

Le calcul implique la connaissance de la masse volumique des particules solides ρ_s si celle-ci n'a pas été mesurée.

Tracer les courbes suivantes en utilisant les mêmes échelles pour toutes les éprouvettes :

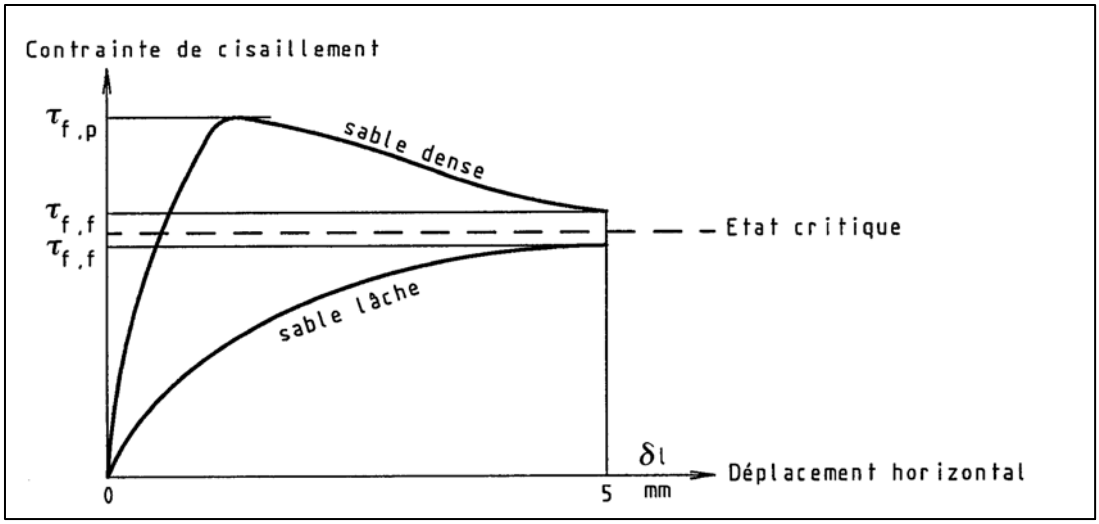
-de la contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement horizontal δ_h

-du déplacement vertical δ_v du piston en fonction du déplacement horizontal δ_h

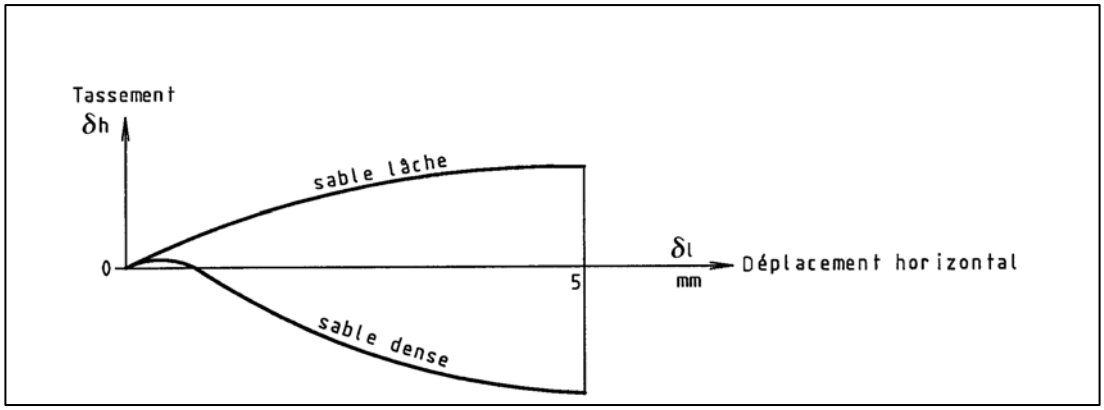
Déterminer les paramètres de cisaillement :

$\boldsymbol{\tau}_{f,p}$: valeur correspondant au critère de rupture : pic de la courbe $\boldsymbol{\tau = f(\delta_h)}$ lorsque cette courbe présente un pic[7].

$\boldsymbol{\tau}_{f,f}$: valeur correspondant au critère de rupture à l'état final de la courbe,



(Figure III.21) Courbe de contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal



(Figure III.22) Courbe de tassement en fonction du déplacement dans le plan de cisaillement

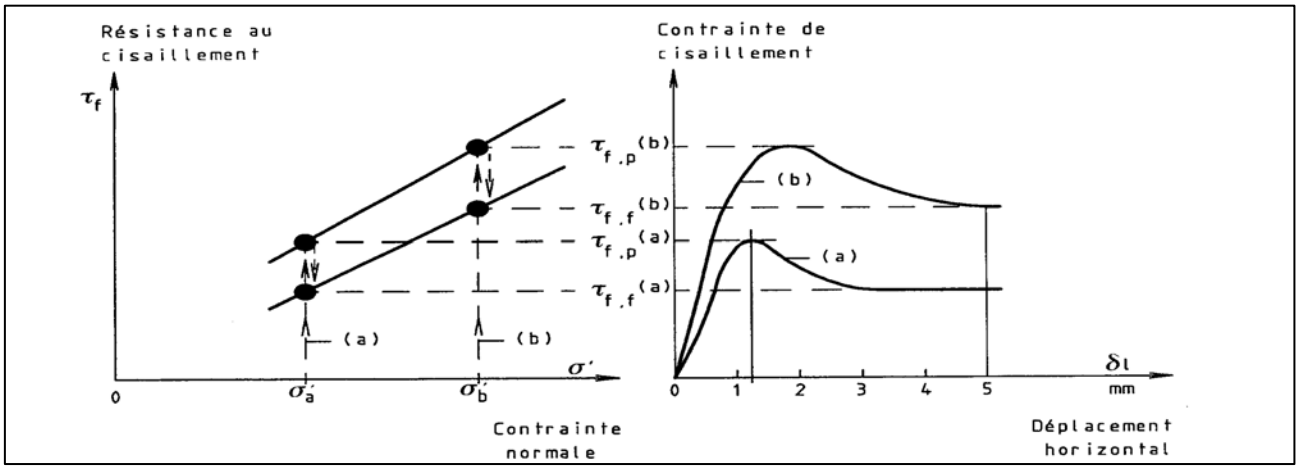
III.9.7.2 Pour l'ensemble des éprouvettes :

Représenter dur un même graphique (σ'-τ_f) (même échelle pour σ'et pour τ) les couples de points (σ'-$\tau_{f,p}$) et (σ'-$\tau_{f,f}$).

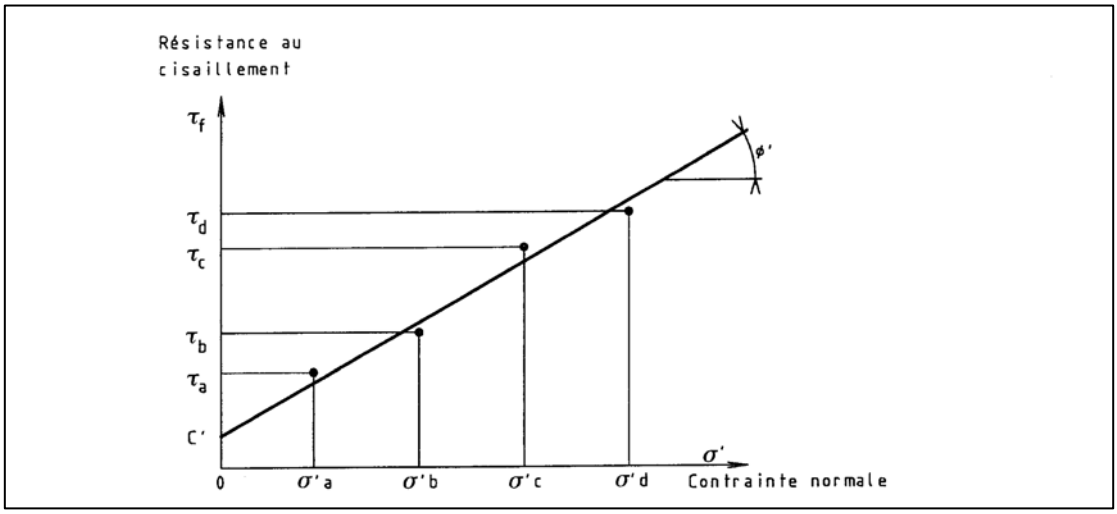
Déterminer par un ajustement linéaire l'équation de la droite correspondant à chaque critére de rupture (pic, état final). Les paramètres de résistance au cisaillement rectiligne sont obtenus :

-à partir de la pente des droites pour les angles $ø'_p$ et $ø'_f$

-à partir de l'ordonnée à l'origine des droites et négative, reprendre la calcul en faisant un ajustement linéaire sur les couples de points et leurs symétriques par rapport à l'origine des axes de coordonnées.



(Figure III.23) Résistance au cisaillement et contrainte de cisaillement en fonction du Contrainte normale et déplacement horizontal



(Figure III.24) Paramètres de résistance au cisaillement pour un critère de rupture défini

III.10 conclusion

Un recul des donnés nécessaires facilité l'exécutions d'un manuel des essais.

La bonne présentation de manuel nous va permettre d'élaboration un logiciel de calcul bine précis.

IV .1 Introduction

Dans ce chapitre, on doit se consacrer à la partie logicielle, en utilisant le Visual basic.6 pour l'élaboration d'un logiciel qui se base sur un programme ; qui permet l'automatisation des différents essais de laboratoire

IV.2présentation du langage de programmation utilisé :

Visual basic 6.0 est parmi les versions les plus performantes Visual basic de Microsoft. Le VB est l'outil le plus rapide et le plus facile à utiliser pour créer des applications Microsoft Windows. Que vous soyez un programmeur professionnel ou que vous découvriez la programmation sous Windows, Visual basic vous offre une gamme complète d'outils qui simplifient et accélèrent le développement d'applications.

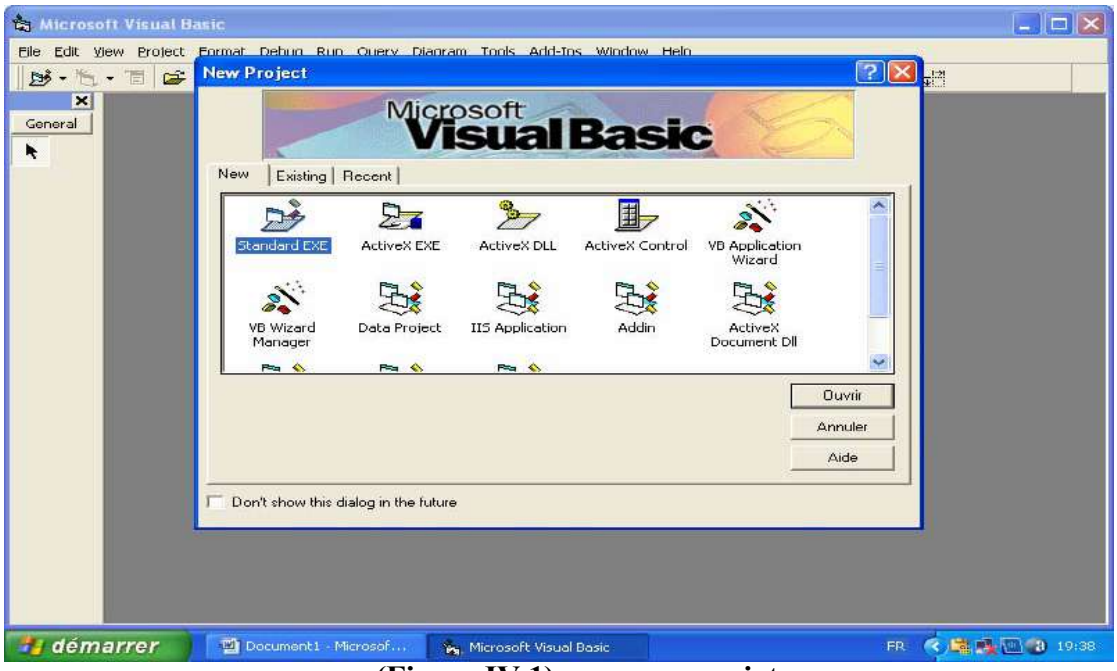
Visual basic constitue une évolution par rapport au langage BASIC initial et comporte aujourd'hui plusieurs centaines d'instructions, de fonction et de mots clés, dont un grand nombre font directement référence à l'interface graphique utilisateur (GUI) de Windows.
La Visual basic met à disposition tous les outils nécessaires.

- Les fonctions d'accès aux données nous permettent de créer des bases de données, des applications frontales et des composants coté serveur évolutifs pour les formats de base de données les plus utilisés, tels que Microsoft SQL server et d'autres bases de données à l'échelle de l'entreprise.
- La technologie active X^{TM} nous permet l'utilisation des fonctionnalités offertes par d'autres applications, telles que le traitement de texte Microsoft Word, le tableur Microsoft Excel et d'autres applications Windows. Nous pouvons même automatiser les applications et objets créés à l'aide de l'édition professionnelle ou de l'édition entreprise de Visual basic.
- Les fonctionnalités Internet facilitent l'accès, à partir de votre application, aux documents et applications se trouvant sur internet ou intranet, en simplifient la création d'application serveur internet.
- Votre application finale est un véritable fichier.exe qui utilise une machine virtuelle Visual basic que vous étés libre de distribuer.

IV .3 l'environnement de Visual basic :

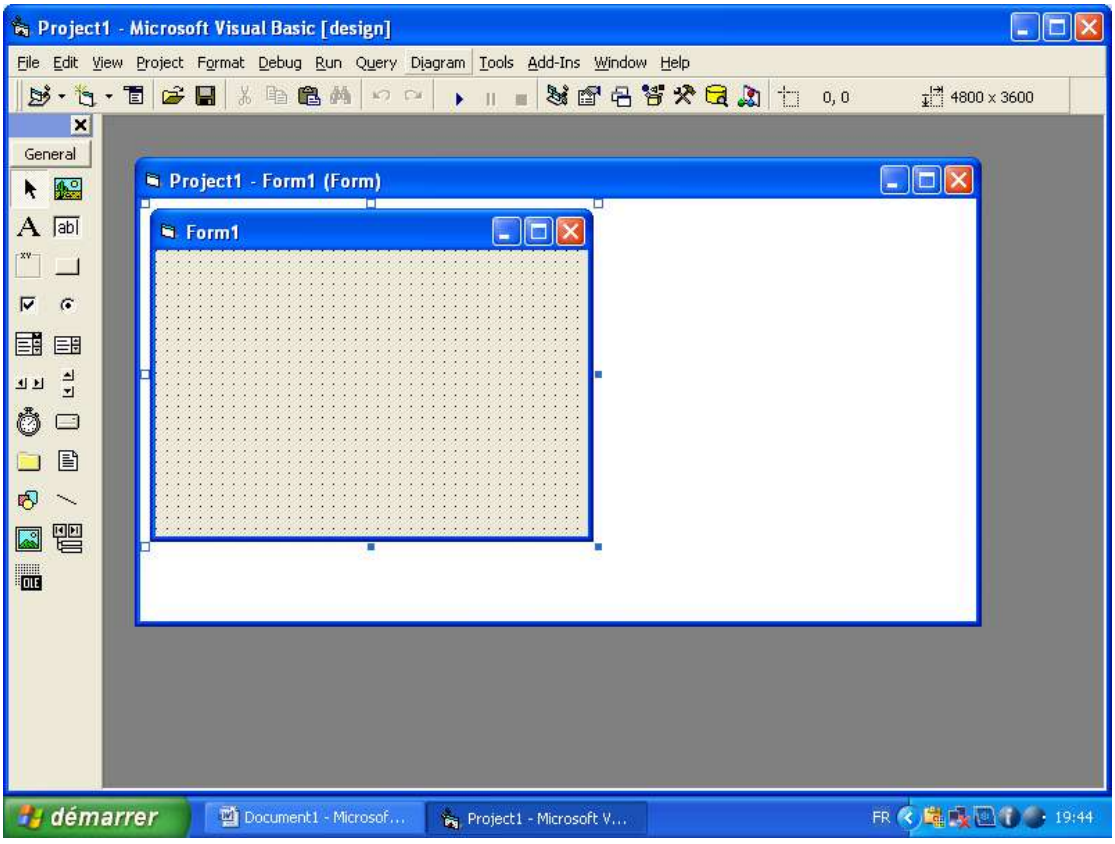
IV.3.1 l'écran de travail :

Lorsque vous démarrez Visual Basic 6.0, vous verrez apparaitre la fenêtre nouveau projet de la figure



(Figure IV.1) nouveau projet

Double cliquez sur l'icône EXE-standard pour faire apparaitre l'écran de travail de Visual basic 6.0



(Figure IV.2) écran de Visual basic 6.0

IV.3.2 barre de titre :

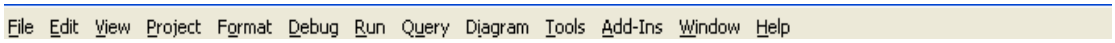
Affiche le nom du projet actuellement ouvert. Lorsque vous démarrez Visual basic 6.0, le nom du projet qui s'affiche par défaut est le projet1.



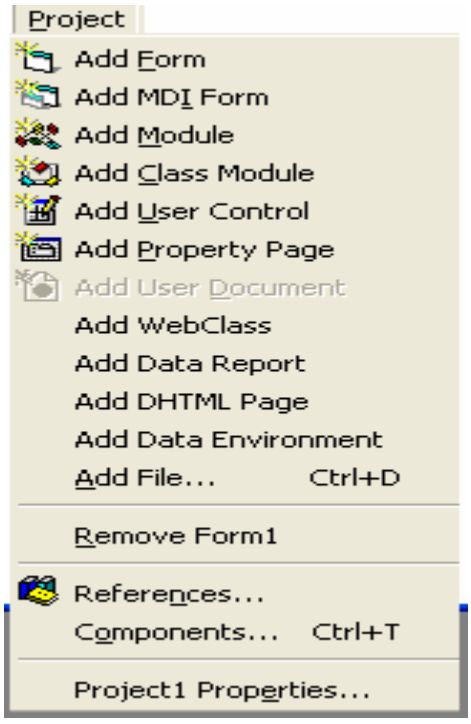
Barre de titre

IV.3.3 la barre des menus :

Elle fonctionne selon le même principe que toutes les applications Windows courantes. Par exemple, le menu projet comporte toutes les fonctions qui nous permettront d'ajouter certains composants au projet : une feuille, une feuille MDI, un module, etc.



Barre des menus de Visual basic6



(Figure IV.3) Le menu projet

IV.3.4 la barre d'outils :

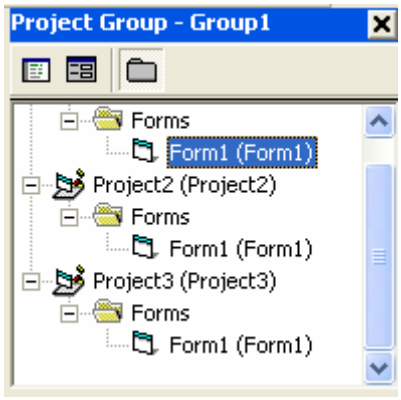
La barre d'outils comporte un certain nombre de boutons qui nous facilitent la sélection de commandes courantes telles que : ouvrir un projet 

Enregistrer le projet  …etc.

La barre d'outils

V.2.5 l'explorateur de projet :

L'explorateur de projet contient la liste des feuilles (form) et des modules (des programmes en basic) qui composent le projet



(Figure IV.4) L'explorateur de projet

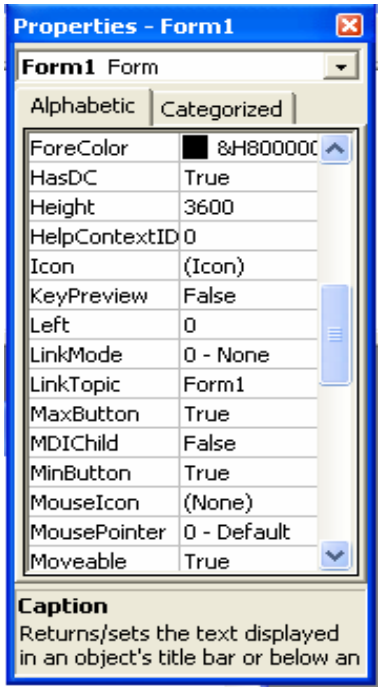
IV.3.5 la boite à outils :

Contient les objets (ou contrôles) pour l'affichage ou la saisie des données du projet. On peut la compléter avec des objets installés par d'autres applications ou réalisées par l'utilisateur.

IV.3.6 la fenêtre des propriétés :

La fenêtre des propriétés affiche les caractéristiques de l'objet sélectionné.

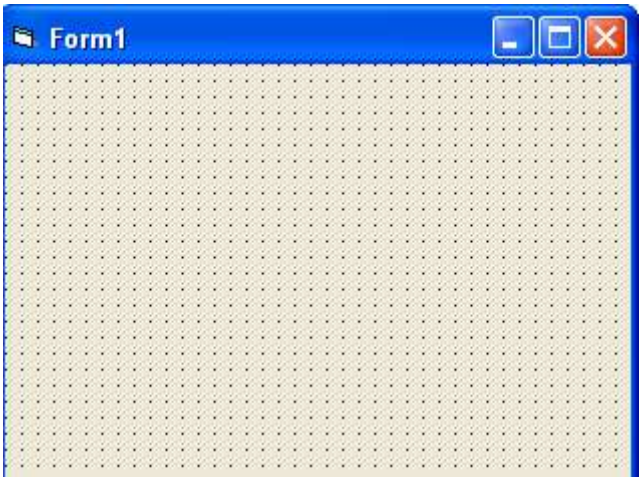
La description de la propriété sélectionnée apparait en bas de la fenêtre.



(Figure IV.5) La fenêtre des propriétés

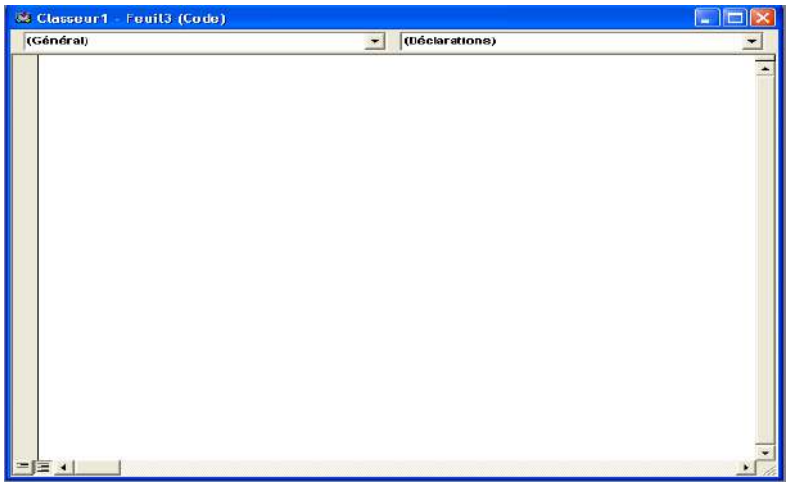
IV.3.7 la feuille de projet :

Par défaut, une feuille de projet est affichée. Elle porte le nom form1. Cette feuille contiendra les objets nécessaires au projet



IV.3.8 La fenêtre de code :

En arrière plan de l'écran de travail se trouve la fenêtra de code (ou de programmation) associée à la feuille de projet. Double cliquez sur le fond de la feuille active pour faire apparaitre la feuille de code associée



(Figure IV.7) La fenêtre de code

IV.4 Application :

Dans notre travail, les résultats des essais sont les suivent :
Premier essai (limite d'atterberg):

limite d'atterberg (NF P 94-051)

projet : proposition d'un manuel des essais de laboratc laboratoire : uni-médéa
Analysé par : laissaoui et moukli ##########
proposé par : Dr Djillali amar bouzid Anneé : 2012/2013

détermination de la limite de liquidité (Wp)

Echantillon N	1	2	3	4
tare N	1	2	3	4
tare (g)	4,00	4,00	4,05	4,10
sol humide+ tare (g)	23,00	23,50	23,96	23,85
sol sec + tare (g)	19,20	19,92	20,30	20,50
Nombre de coup N	15,00	20,00	28,00	35,00
eau (g)	3,80	3,58	3,66	3,35
sol sec (g)	15,20	15,92	16,25	16,40
teneur en eau (W%)	**25,00**	22,49	22,52	20,43

Afficher le graphe ...

La Limite de liquidité WL = 23430,00 %

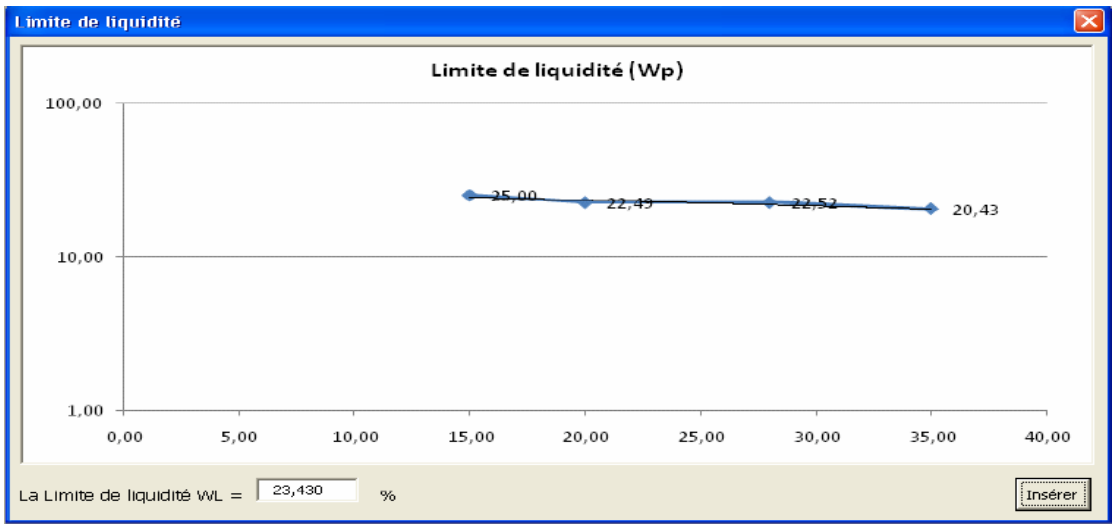
détermination de la limite de plasticité (Wl)

echantillon N	1	2	3	4
tare N	1	2	3	4
tare (g)	4,00	4,00	4,05	4,10
sol humide + tare (g)	18,00	23,50	23,96	23,85
sol sec + tare (g)	19,00	19,95	20,00	20,00
eau (g)	-1,00	3,55	3,96	3,85
sol sec (g)	15,00	15,95	15,95	15,90
teneur en eau (W%)	-6,67	22,26	24,83	24,21
Teneur en eau moy (Wp %)	16,16			

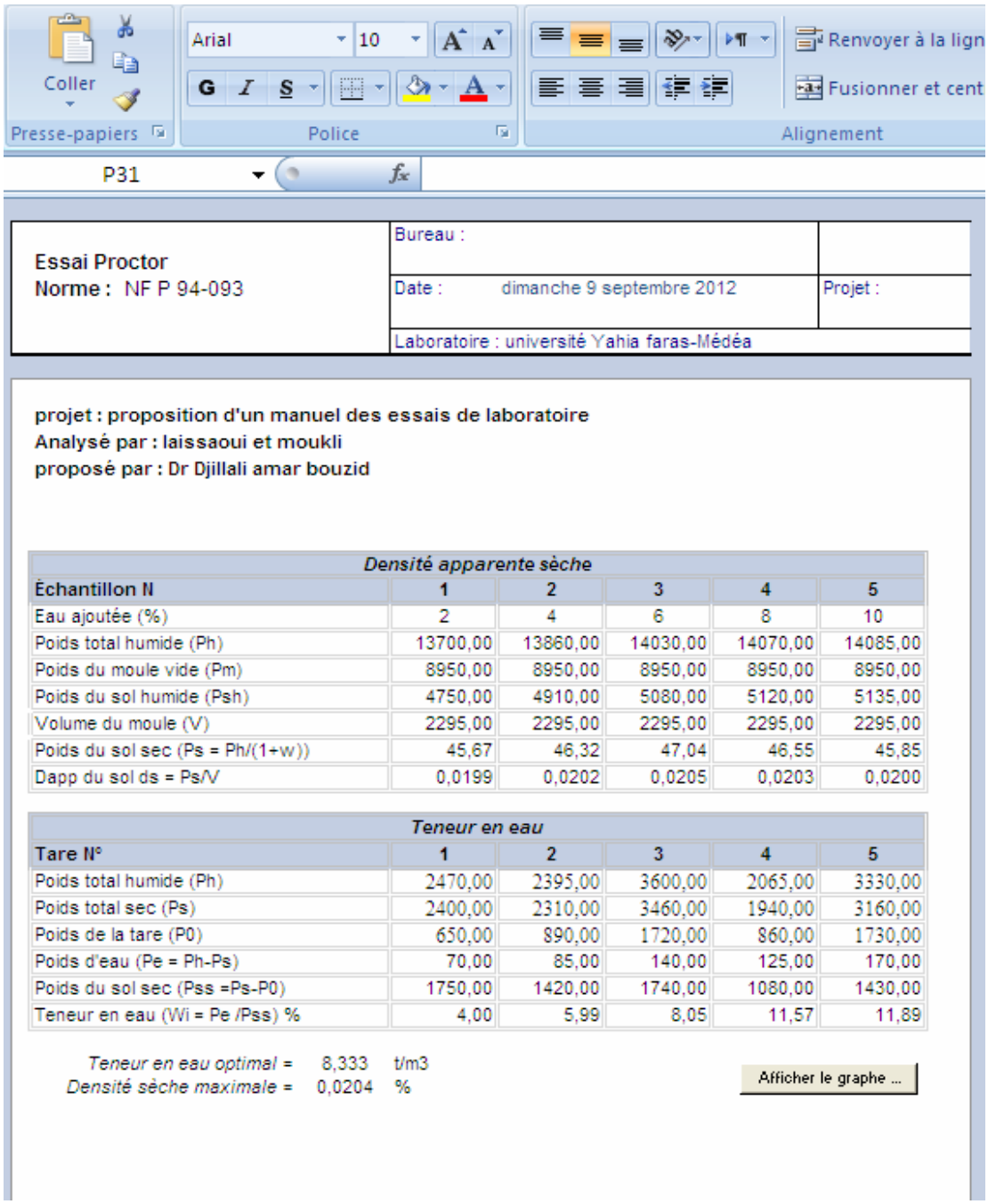
Indice de plasticité Ip = 23413,84
Indice de consistance Ic = 1,00
Indice de liquidité IL = 0,00

Donnés concernent l'essai de limite d'atterberg

Graphe de limite d'atterberg



Deuxième essai (essai Proctor) :



Essai Proctor **Norme :** NF P 94-093	Bureau :	
	Date : dimanche 9 septembre 2012	Projet :
	Laboratoire : université Yahia faras-Médéa	

projet : proposition d'un manuel des essais de laboratoire
Analysé par : laissaoui et moukli
proposé par : Dr Djillali amar bouzid

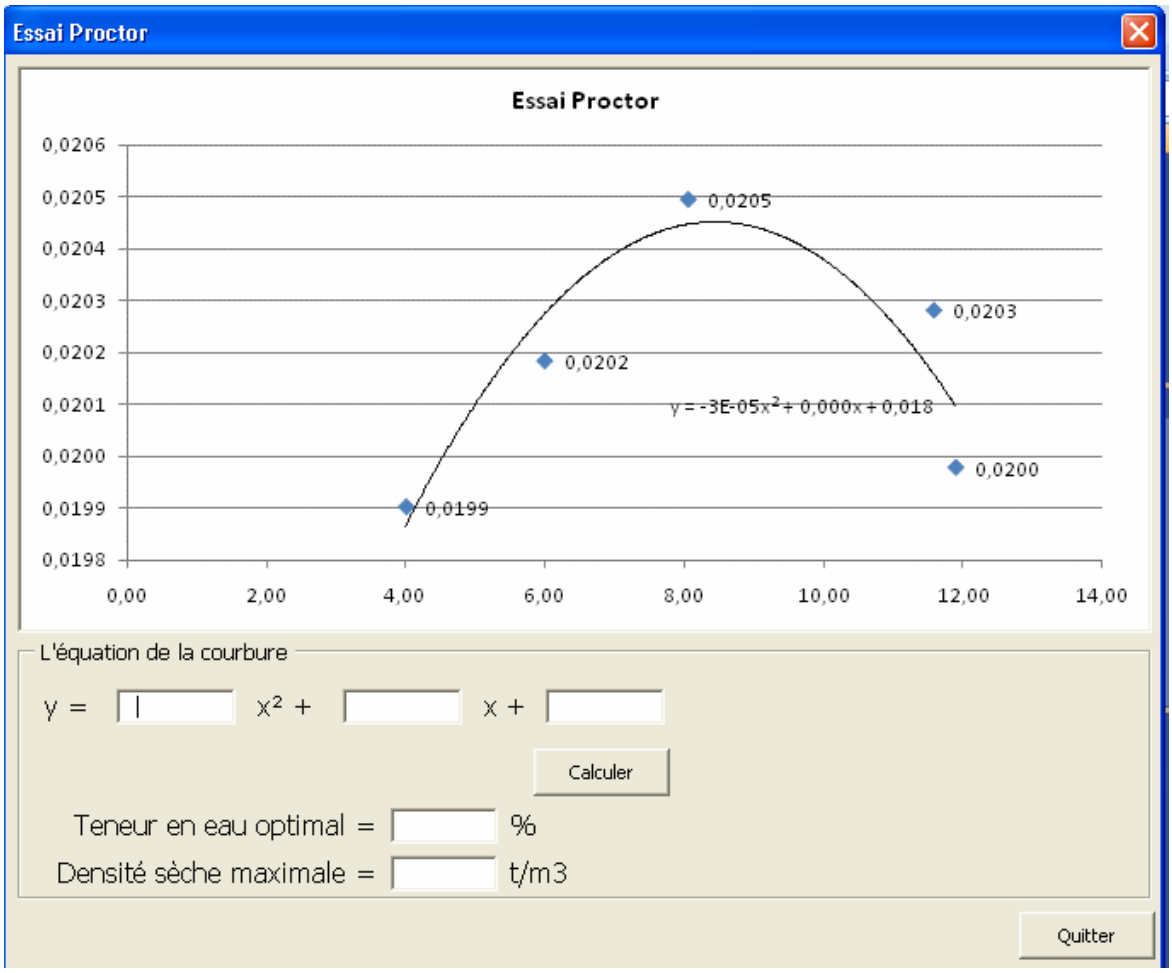
Densité apparente sèche					
Échantillon N	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Eau ajoutée (%)	2	4	6	8	10
Poids total humide (Ph)	13700,00	13860,00	14030,00	14070,00	14085,00
Poids du moule vide (Pm)	8950,00	8950,00	8950,00	8950,00	8950,00
Poids du sol humide (Psh)	4750,00	4910,00	5080,00	5120,00	5135,00
Volume du moule (V)	2295,00	2295,00	2295,00	2295,00	2295,00
Poids du sol sec (Ps = Ph/(1+w))	45,67	46,32	47,04	46,55	45,85
Dapp du sol ds = Ps/V	0,0199	0,0202	0,0205	0,0203	0,0200

Teneur en eau					
Tare N°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Poids total humide (Ph)	2470,00	2395,00	3600,00	2065,00	3330,00
Poids total sec (Ps)	2400,00	2310,00	3460,00	1940,00	3160,00
Poids de la tare (P0)	650,00	890,00	1720,00	860,00	1730,00
Poids d'eau (Pe = Ph-Ps)	70,00	85,00	140,00	125,00	170,00
Poids du sol sec (Pss =Ps-P0)	1750,00	1420,00	1740,00	1080,00	1430,00
Teneur en eau (Wi = Pe /Pss) %	4,00	5,99	8,05	11,57	11,89

Teneur en eau optimal = 8,333 t/m3
Densité sèche maximale = 0,0204 %

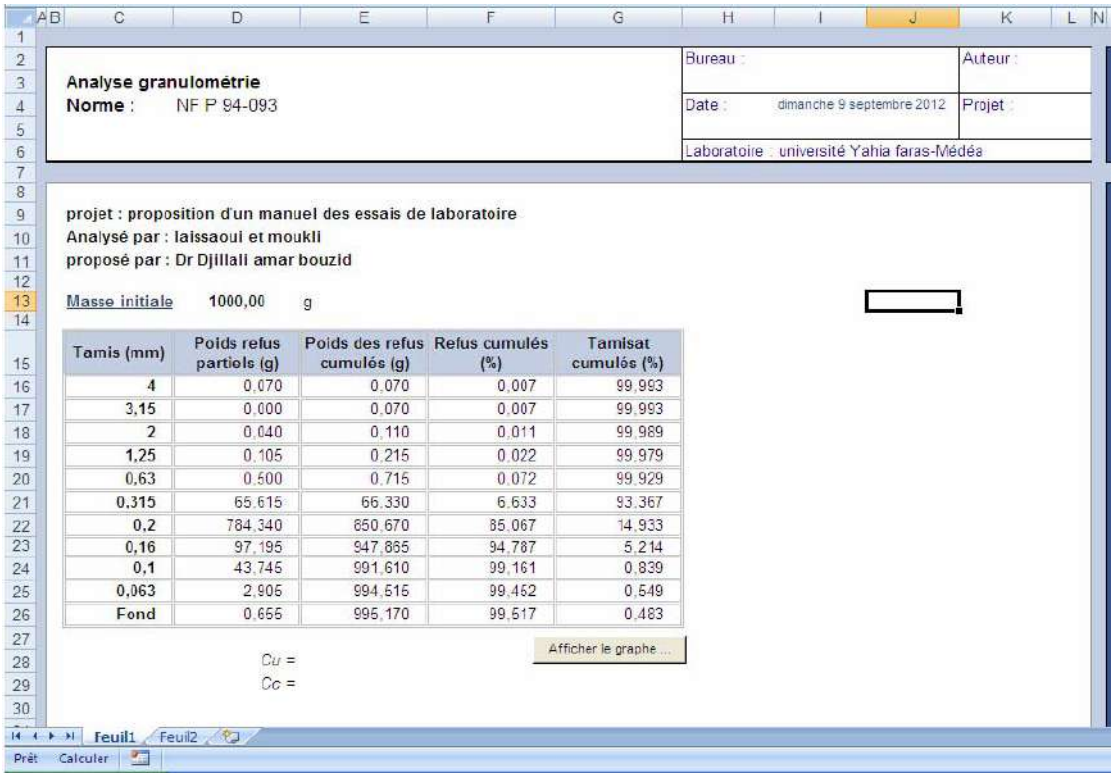
Afficher le graphe ...

Donnés de l'essai Proctor



La courbe essai Proctor

Troisième essai (essai granulométrie):



Analyse granulométrie
Norme : NF P 94-093

Bureau :
Auteur :
Date : dimanche 9 septembre 2012
Projet :
Laboratoire : université Yahia faras-Médéa

projet : proposition d'un manuel des essais de laboratoire
Analysé par : laissaoui et moukli
proposé par : Dr Djillali amar bouzid

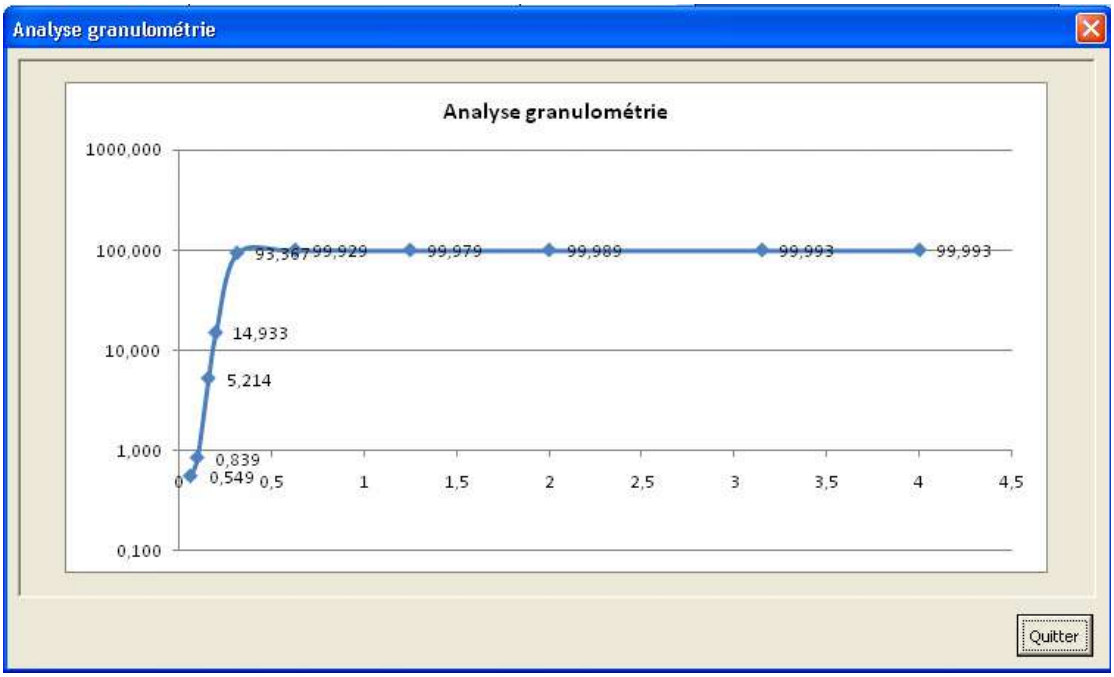
Masse initiale 1000,00 g

Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisat cumulés (%)
4	0,070	0,070	0,007	99,993
3,15	0,000	0,070	0,007	99,993
2	0,040	0,110	0,011	99,989
1,25	0,105	0,215	0,022	99,979
0,63	0,500	0,715	0,072	99,929
0,315	65,615	66,330	6,633	93,367
0,2	784,340	850,670	85,067	14,933
0,16	97,195	947,865	94,787	5,214
0,1	43,745	991,610	99,161	0,839
0,063	2,905	994,515	99,452	0,549
Fond	0,655	995,170	99,517	0,483

Afficher le graphe ...

Cu =
Cc =

Feuil1 Feuil2
Prêt Calculer



Courbe granulométrie

II. Conclusion générale :

Ce mémoire de fin d'études avait pour objectif la réalisation d'un logiciel de dépouillement de certains essais de laboratoire en mécanique des sols. On à analysé la plupart des essais de laboratoire en géotechnique.

On a examiné les essais d'identification, en l'occurrence les essais d'analyse granulométrique par tamisage et par hydromètre, et les essais de consolidation oedométrique, essai de cisaillement a la boite de casagrand.

La seconde partie de ce mémoire avait pour objectif présentation du manuel de laboratoire, cette manuel contient tous les essais de laboratoire (les essais d'identification et les essais mécanique suivent les normes française).

La dernier parte de ce mémoire si réalisation d'un logiciel de dépouillement de certains essai

A travers ce mémoire on a pu comprendre la mécanique des sols a travers ses essais de laboratoire. L'interprétation des résultats et les corrélations que l'on peut établir entre les différents paramètres issus de chaque essai.

Ce travail nous a permis également d'effectuer un travail d'investigation modeste qui pourra constituer une assise pour des travaux de recherches futures.

Par ailleurs, ce mémoire a permis la compréhension du logiciel Visual basic qui nous à été complètement inconnu.

Bibliographie :

[1] NF P 94-050, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

[2] NF P 94-051, Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg- Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

[3] NF P 94-056, Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique -Méthode par tamisage à sec après lavage.

[4] Essais de laboratoireet en placede mécanique des solsaide-mémoirejuin 1973

[5] NF P 94-057, Sols : reconnaissance et essais -Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

[6] NF P 94-093, Sols : reconnaissance et essaisdétermination des référencesde compactage d'un matériauessai Proctor normal - essai Proctor modifie

[7] NF P 94-071 (toutes les parties), Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

[8] NF P 94-090-1, Sols : reconnaissance et essais - Essai oedométrique- Partie 1 : Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.

[9] Cven365 introduction to geotechnical engineering laboratory manualgiovannabiscontintexasa&m university January 19, 2007.

[10] Introduction to soil méchanics laboratory testing. Dante frtta. Jennifieraguettant. Lynne roussel – smith

[11] Manual on test sieving méthods guidelines for establishing sieve analysis procedures. LAWENCE R .POPE, CHARLES W .WAR, 4th edition