

Limites d'Atterberg

Limite de liquidité - Limite de plasticité

MÉTHODE D'ESSAI LPC
n° 19

Février 1987

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



AVERTISSEMENT

Les *Projets de méthode d'essai* sont mis en application et diffusés, à titre expérimental, par les chefs de division ou de service du LCPC, après examen par la Direction des programmes et applications (Délégation à la qualité des essais, la normalisation et la réglementation technique).

Au bout d'une période dont la durée est normalement d'un an, les Projets de méthode d'essai sont réexaminés pour tenir compte des observations émises par leurs utilisateurs et, éventuellement, des résultats d'études complémentaires (essais interlaboratoires, qualification des matériels d'essais...).

Selon l'importance des modifications à apporter, ils sont alors soit reconduits à titre de Projet pour une nouvelle période d'essai, soit transformés en Méthodes d'essai LPC ou proposés à l'AFNOR comme projet de norme.

Les *Méthodes d'essai LPC* sont approuvées par le Directeur du LCPC après qualification par la Délégation à la qualité des essais, la normalisation et la réglementation technique, et diffusées par la Section des publications du Service de l'information scientifique et technique.

Limites d'Atterberg

Limite de liquidité - Limite de plasticité

MÉTHODE D'ESSAI LPC

n° 19

Le texte de cette Méthode d'essai LPC est la reproduction sans modification du Mode opératoire G.-4 publié chez DUNOD en 1970 dans la collection des « Modes Opératoires du Laboratoire central des Ponts et Chaussées »

Février 1987

SOMMAIRE

CHAPITRE 1. — GÉNÉRALITÉS	3
1-1 Définition et but de l'essai	3
1-2 Principe de la méthode	3
CHAPITRE 2. — APPAREILLAGE	4
2-1 Appareillage spécifique	5
2-2 Appareillage d'usage courant	6
CHAPITRE 3. — PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON	7
CHAPITRE 4. — EXÉCUTION DES ESSAIS ET CALCULS	8
4-1 Limite de Liquidité = W_L	8
4-1-1 Réglage de la hauteur de chute de la coupelle	8
4-1-2 Préparation de la pâte	8
4-1-3 Réalisation de l'essai	8
4-1-4 Détermination de W_L	12
4-1-5 Calculs	14
4-2 Limite de Plasticité = W_p	14
4-2-1 Réalisation de l'essai	14
4-2-2 Calculs	15
CHAPITRE 5. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	15
CHAPITRE 6. — OBSERVATIONS	16
CHAPITRE 7. — COMMENTAIRES	17
7-1 Introduction	17
7-2 Influence du matériel sur les résultats des limites	17
7-2-1 Le socle	17
7-2-2 Influence de la hauteur de chute de la coupelle	18
7-2-3 Influence de l'outil à rainurer	19
7-3 Influence du mode de préparation du mortier	21
7-4 Utilisation de la « Méthode de détermination en un point » de la limite de liquidité	24
7-5 L'essai de limite de plasticité	25
7-6 Précision des essais de limites d'Atterberg	26
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	27

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DU LOGEMENT,
DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES TRANSPORTS
LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES
58, boulevard Lefebvre, 75732 PARIS CEDEX 15
Tél. : (1) 48 56 50 00 — Télex : LCPARI 200361 F

Février 1987

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du Directeur du Laboratoire central des Ponts et Chaussées
(ou de ses représentants autorisés).

© 1987 . LCPC

ISBN 2-7208-3190-5

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

1.1 - DÉFINITION ET BUT DE L'ESSAI

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec :

- la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores,
- l'épaisseur des couches d'eau absorbée qui enrobent ses grains.

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité : w_L),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité : w_P).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec.

La différence $I_P = w_L - w_P$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité.

1.2 - PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'essai s'effectue en deux phases :

- a) Recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.
- b) Recherche de la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3 mm de diamètre.

CHAPITRE 2

APPAREILLAGE

L'ensemble de l'appareillage est montré par la figure 1.

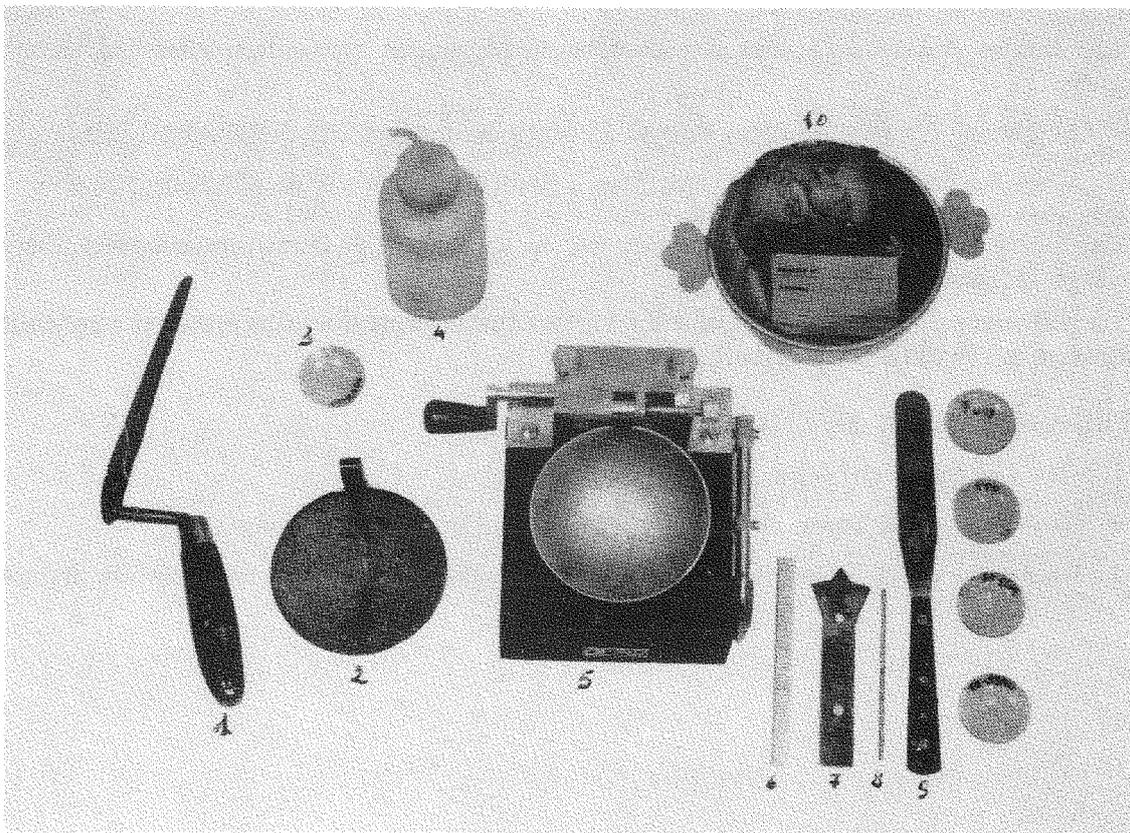
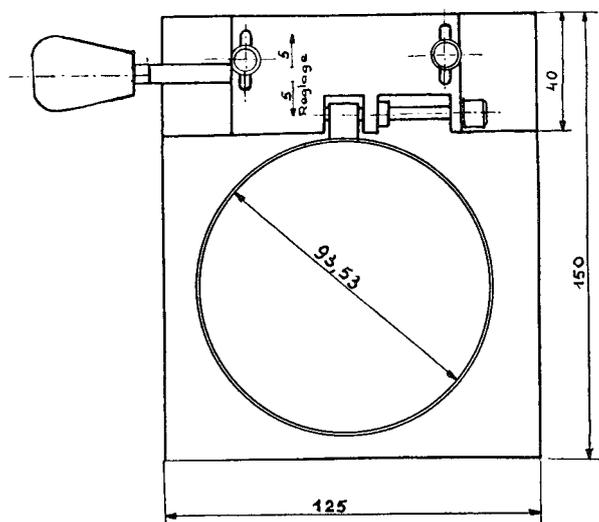
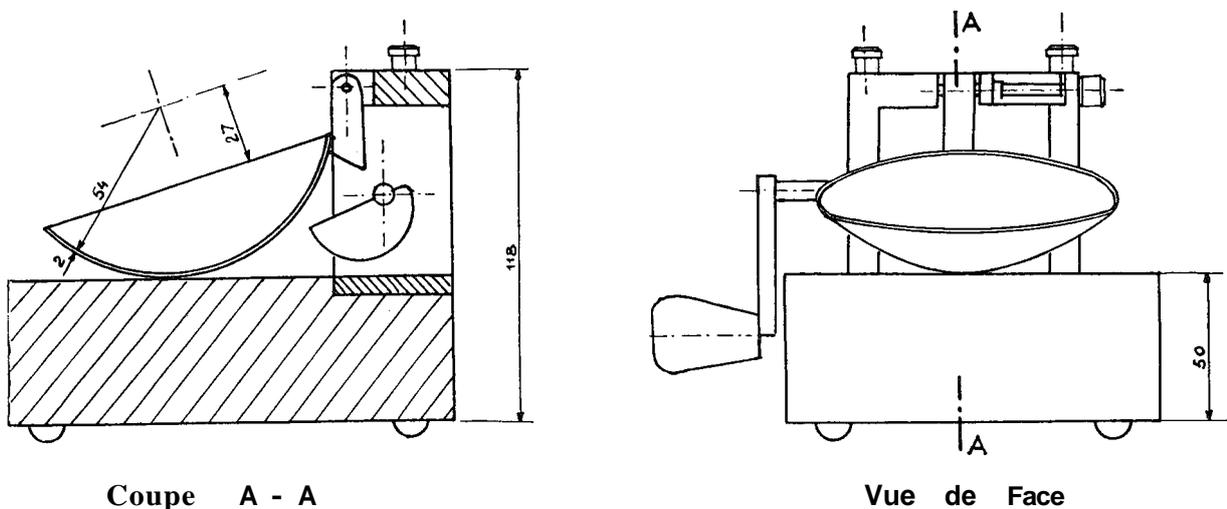


FIG. 1. — Présentation du matériel
1 - truelle ; 2 - coupelle rugueuse ; 3 - verres de montres tarés ; 4 - pissette ; 5 - appareil de limite de liquidité avec coupelle lisse ; 6 - cale de réglage de la hauteur de chute de la coupelle ; 7 - outil à rainurer ; 8 - rouleau de référence ; 9 - spatule ; 10 - terrain.

2.1 - APPAREILLAGE SPÉCIFIQUE

a) Appareil de Casagrande : le matériel couramment utilisé en France se compose :

- d'un socle en bois bakélinisé monté sur quatre pieds en caoutchouc,
- d'un support métallique portant la coupelle en laiton chromé et la manivelle actionnant la came qui soulève de 10 mm la coupelle au-dessus du socle.



Vue de dessus

FIG. 2. — Appareil de Casagrande

Le schéma de cet appareil est donné ci-dessus (*fig. 2*). Les cotes générales sont réalisées avec une tolérance de 1/10 de millimètre.

La coupelle, dont les cotes exactes sont données, sur le même schéma (*fig. 2*), est intérieurement soit lisse soit rendue rugueuse par projection de nickel-chrome ; elle doit peser 200 ± 10 g.

b) **Outil** a rainures.

Les détails de cet outil sont donnés par la figure 3. Cet outil doit réaliser sur le fond de la coupelle une rainure de $0,05 \pm 2$ mm de large d'après A. Casagrande.

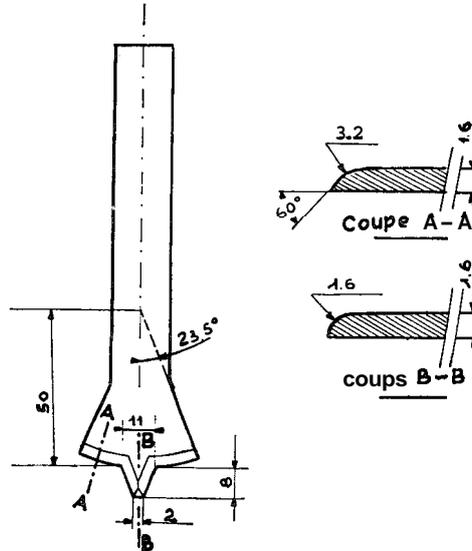


FIG. 3. — Outil a rainurer

c) *Accessoires.*

- une cale de 10 mm pour le réglage de la hauteur de chute de la coupelle,
- une plaque de bois ou de Plexiglas d'environ 6 X 10 X 2 cm pour confectionner les rouleaux,

2.2 - APPAREILLAGE D'USAGE COURANT

- spatules, truelles et un marbre pour le malaxage du mortier,
- une pissette,
- verres de montre tarés ou flacons tarés a couvercle étanche,
- une balance de précision (précision recommandée : 1 mg) de préférence automatique,
- une étuve avec thermostat permettant de la régler a 105 CC,
- un tamis d'ouverture 400 μ m (norme NF X 11-501, X 11-508).

CHAPITRE 3

PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON

L'essai des Limites d'Atterberg se fait sur la fraction du matériau appelée mortier, qui passe au tamis de 0,40 mm, [1]. L'échantillonnage se fait sur matériau non séché à l'étuve, une quantité suffisante de matériau devant être tamisée pour obtenir 150 à 200 g de mortier.

Avant tamisage le matériau doit être imbibé pendant au moins 12 heures. Cette imbibition peut être faite, soit dans des récipients faciles à nettoyer (fig. 4) soit directement dans le tamis placé dans un bac de dimensions légèrement supérieures (fig. 5).

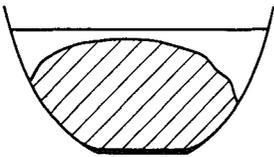


FIG. 4

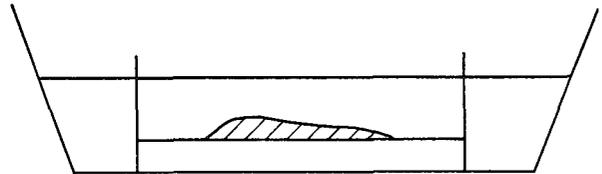


FIG. 5

Le tamisage s'effectue par voie humide :

1^o Soit manuellement, en remuant à l'aide d'un pinceau souple le matériau sur la toile tamisante. Le refus devra être parfaitement propre. Cette méthode nécessite peu d'eau de lavage.

2^o Soit au vibro-tamis placé au dessus d'un bac recueillant l'eau de lavage ; le tamisage est terminé lorsque l'eau s'écoulant du tamis est claire. Cette méthode nécessite des quantités d'eau plus importantes et, dans certains cas (matériaux très plastiques) on peut être amené à terminer le tamisage manuellement.

Après décantation de l'eau de lavage, on siphonnera avec précaution pour ne pas entraîner les éléments inférieurs à 0,40 mm, puis on évaporerà l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas 60 °C.

On recueille ensuite ces éléments inférieurs à 0,40 mm de préférence à l'état pâteux sur lesquels l'essai des Limites d'Atterberg sera effectué.

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

CHAPITRE 4

EXÉCUTION DES ESSAIS ET CALCULS

4.1 - LIMITE DE LIQUIDITÉ (w_L)

4-1-1 Réglage de la hauteur de chute de la coupelle.

Ce réglage se fait à l'aide d'une cale en déplaçant la plaque coulissante de l'appareil de Casagrande de telle sorte que la chute de la coupelle soit exactement de 10 mm lorsque la came commandée par la manivelle est dans la position adéquate.

4-1-2 Préparation de la pâte.

On s'efforcera de recueillir le mortier à une teneur en eau élevée pour pouvoir débiter l'essai de limite de liquidité. Si le matériau est humide, mais trop consistant, on peut rajouter de l'eau. Si le matériau est totalement sec, il faut le laisser imbiber pendant 12 heures au minimum.

Pour obtenir une pâte bien homogène et presque fluide, on malaxe vigoureusement la totalité du mortier à l'aide de la truelle.

4-1-3 Réalisation de l'essai.

On place environ 70 g de pâte répartie avec la spatule en plusieurs couches, de façon à former un gâteau à peu près symétrique par rapport au plan de symétrie de la coupelle (*fig. 6 et 7*). L'épaisseur du matériau au centre de la coupelle doit être de l'ordre de 15 à 20 mm.

A l'aide de l'outil à rainurer, tenu perpendiculairement à la surface de la coupelle, la partie biseautée de l'outil vers l'avant de l'appareil on partage la pâte en deux (*fig. 8 et 9*).

La coupelle fixée sur l'appareil est ensuite soumise, à l'aide de la manivelle, à une série de chocs réguliers : deux coups par seconde. On note le nombre de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur de 1 cm appréciée à l'oeil (*fig. 10 et 11*). Le nombre de coups de fermeture doit être compris entre 15 et 35. Il est recommandé, pour confirmer le nombre de chocs, de recommencer immédiatement l'essai comme décrit ci-dessus. Si les deux essais successifs ne diffèrent pas de plus d'un choc, on prélève (à l'aide de la spatule) deux échantillons de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées (*voir fig. 12*). On place les échantillons dans des verres de montre qu'on pèse immédiatement, puis on les porte à l'étuve jusqu'à dessiccation complète.

L'opérateur se contrôlera lui-même en faisant un deuxième point à une teneur en eau plus faible. Le nombre de chocs devra augmenter de 5 unités au moins par rapport au premier essai.

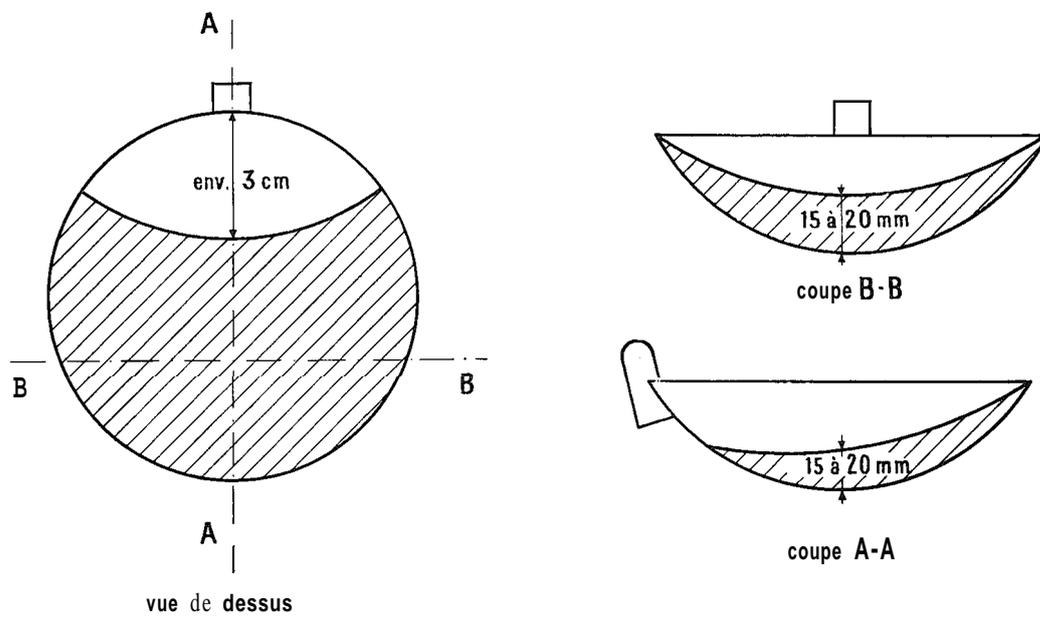


FIG. 6

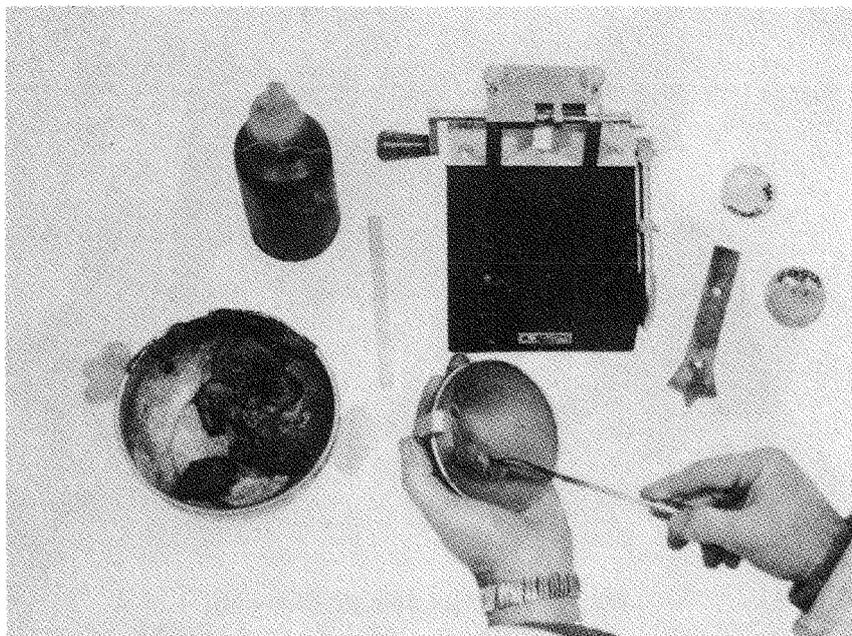


FIG. 7. — Remplissage de la Coupelle

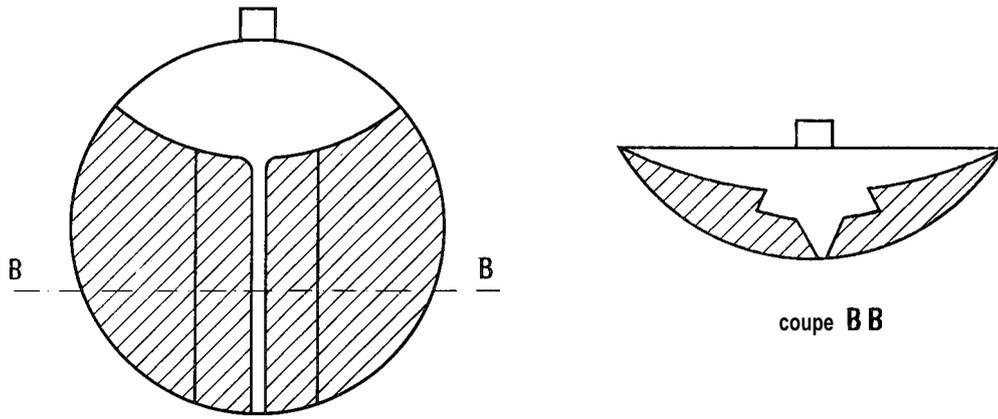


FIG. 8

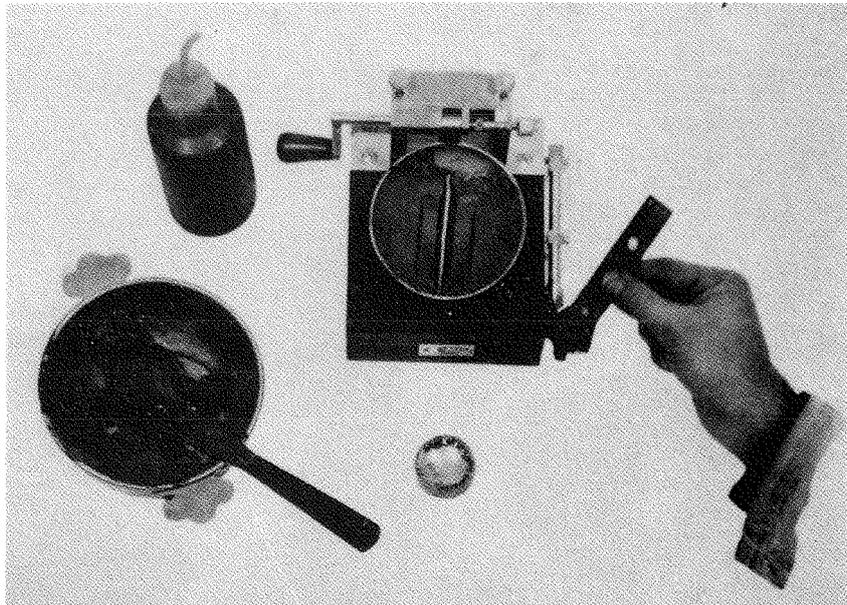


FIG. 9. — Réalisation de la rainure

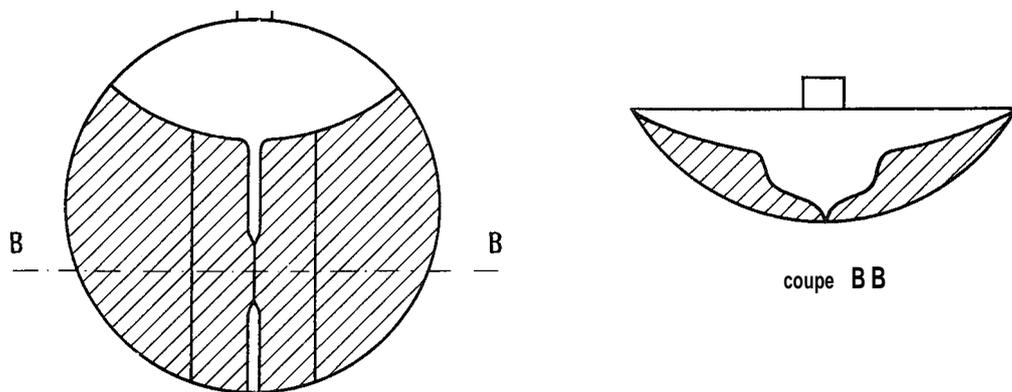


FIG. 10

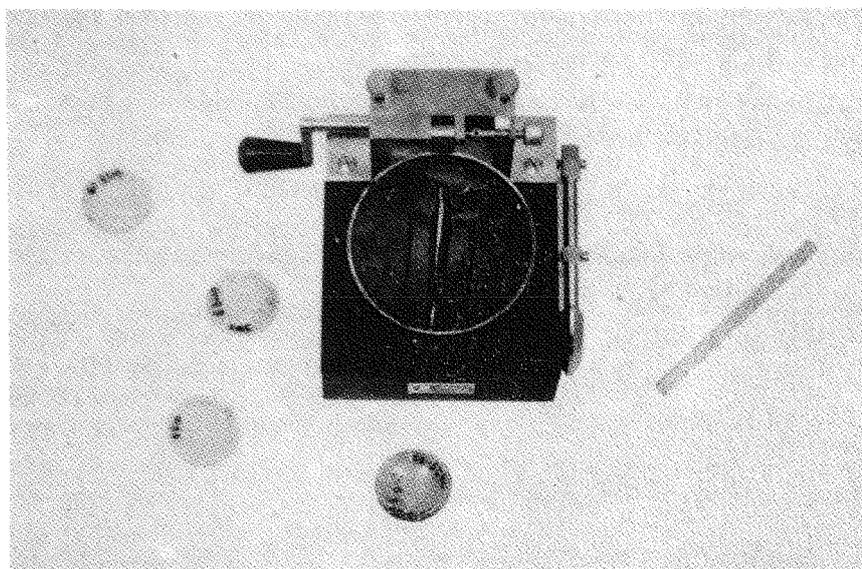


FIG. 11. — Fermeture de la rainure

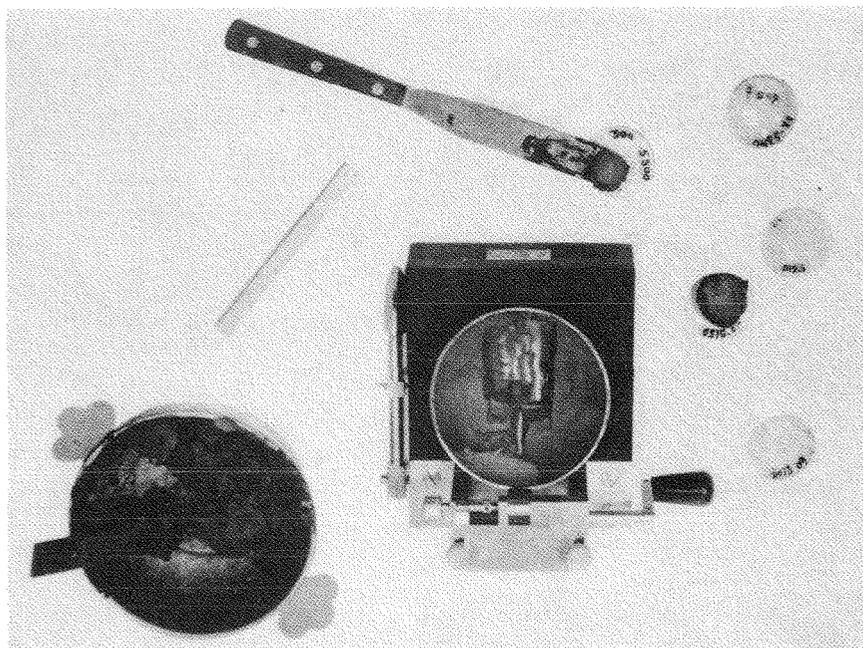


FIG. 12. — Prélèvements des teneurs en eau

Remarque : la fermeture de la rainure doit se produire par affaissement du terrain dans sa masse (cisaillement) et non par glissement sur la paroi de la coupelle.

La coupelle rugueuse a pour but d'éviter ce glissement et doit être employée quand on ne réussit pas à obtenir la fermeture autrement, par exemple pour les mortiers sableux.

Entre chaque essai il faut nettoyer la coupelle.

La coupelle rugueuse doit être lavée essentiellement à l'éponge et à l'eau. L'utilisation d'une spatule truelle, etc... pour gratter la terre doit être proscrite.

4-1-4 Méthode de détermination de w_L .

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

Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, il existe une relation permettant de trouver w_L à partir d'un seul essai pourvu que le nombre de coups de fermeture soit compris entre 15 et 35.

Cette relation s'écrit :

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

où w_L est la limite de liquidité,

w la teneur en eau du mortier au moment de l'essai,

N le nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1 cm dans la coupelle.

Pour faciliter son emploi, cette relation a été traduite en un nomogramme qu'on trouvera au dos des feuilles d'essais (*fig. 13*).

NOMOGRAMME W.E.S.

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

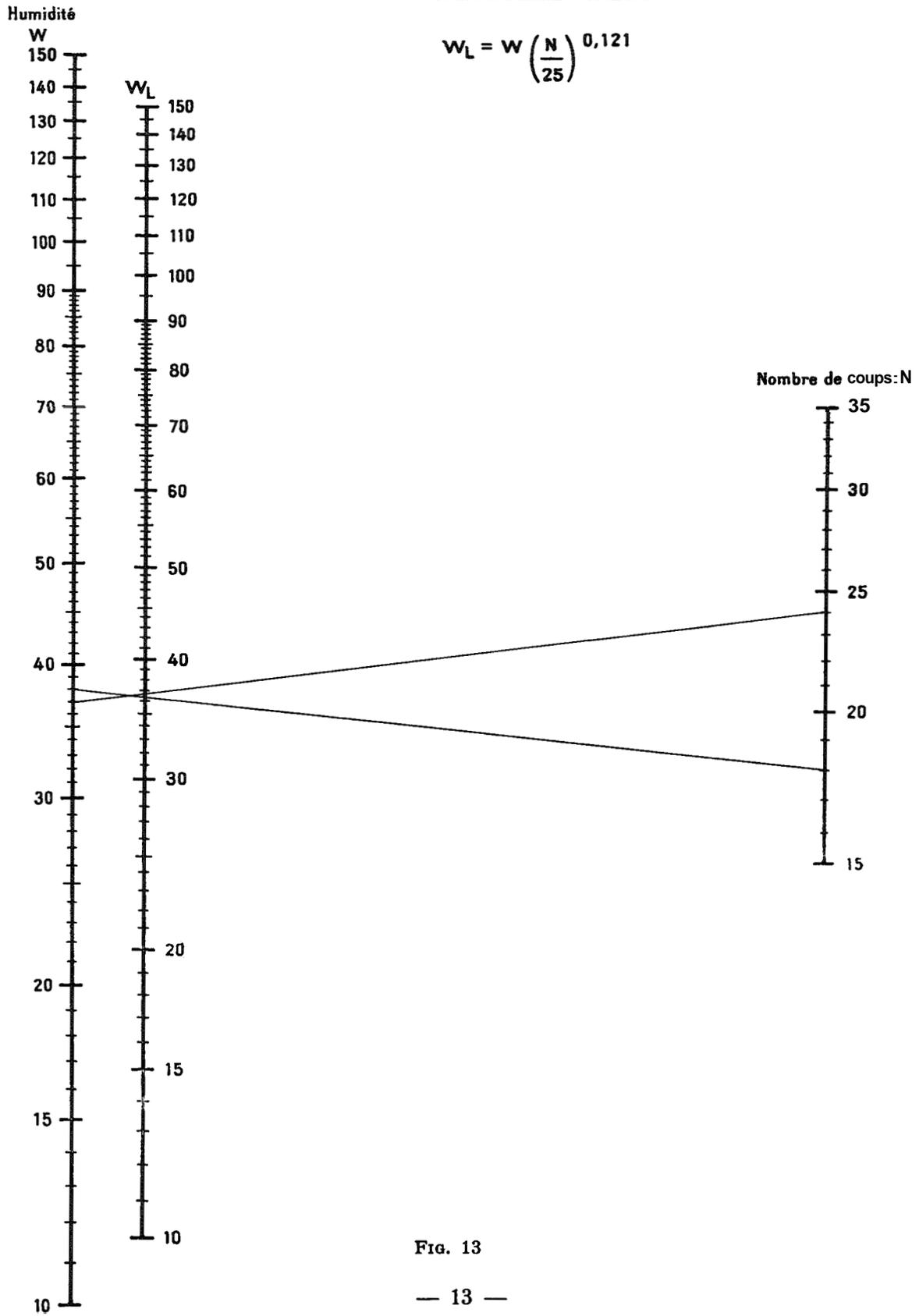


FIG. 13

4-1-5 Calculs.

Pour chacun des deux essais de limite de liquidité, on calcule la moyenne des teneurs en eau qui permettent, à l'aide du nomogramme, de déterminer w_L .

Les deux limites de liquidité ainsi obtenues ne doivent pas différer de plus de 2,5 % en plus ou en moins. Si cette condition n'est pas remplie on refait un troisième essai.

4.2 - LIMITE DE PLASTICITÉ (w_p)

4-2-1 Réalisation de l'essai.

La mesure de limite de plasticité se faisant après celle de la limite de liquidité, on a souvent un échantillon trop humide qu'on dessèche en le malaxant et en l'étalant sur le marbre. On peut accélérer le séchage au moyen d'un ventilateur en malaxant constamment afin d'éviter la formation d'une pellicule sèche.

On forme une boulette de l'échantillon et, à l'aide d'une plaque ou à la main, on roule l'échantillon sur le marbre de façon à former un rouleau qu'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il ait atteint 3 mm de diamètre (*fig. 14*).

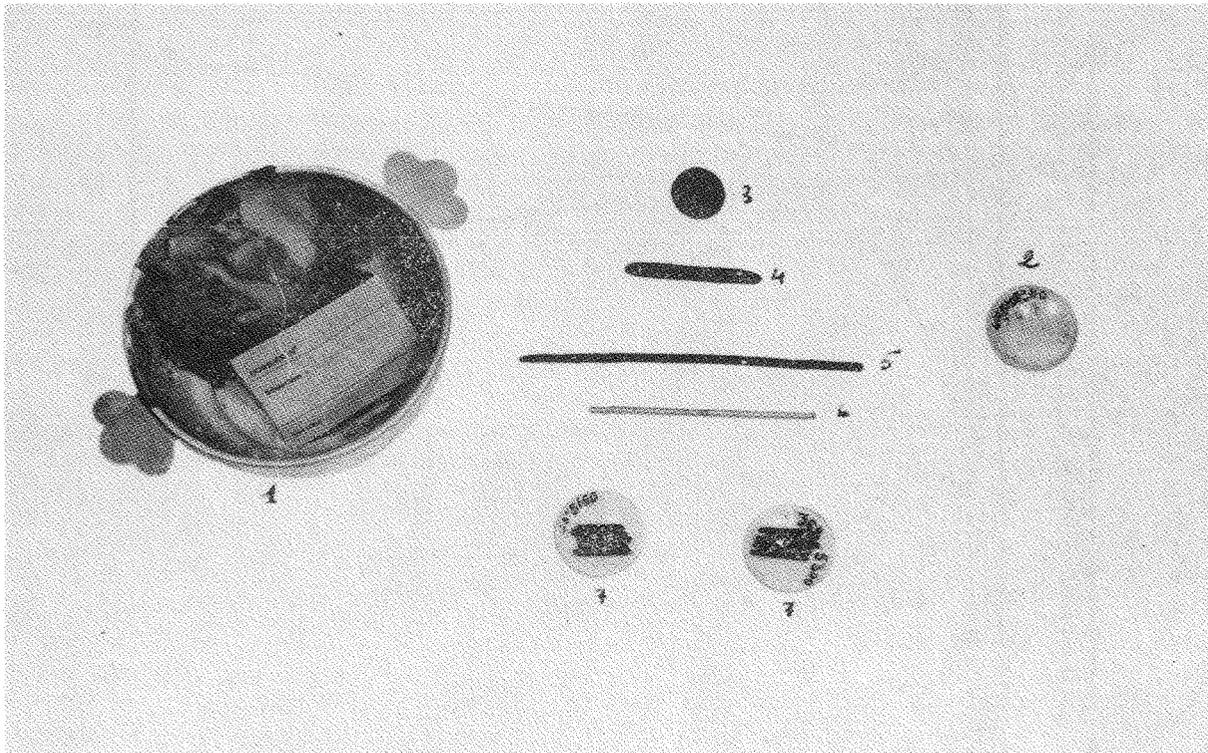


FIG. 14. — Limite de plasticité

1 - échantillon de terrain ; 2 - verres de montres tarés ; 3 - 4 - 5 - différentes étapes de l'amincissement du rouleau ; 6 - rouleau de référence ; 7 - détermination des teneurs en eau.

Cette opération doit être menée avec les précautions **suivantes** :

- une cadence du mouvement de la main de 60 à 80 allers et retours par minute est recommandée,
- l'amincissement du rouleau doit se faire en une seule fois ; en particulier celui-ci ne doit jamais être aminci en le coupant, à l'aide de la spatule, dans le sens de la longueur,
- le rouleau arrivé à **3** mm de diamètre doit avoir 10 à 15 cm de longueur et ne doit pas être creux,
- la limite de plasticité est atteinte lorsqu'en soulevant de 1 à **2** cm le rouleau de **3** mm en son milieu, il se fissure,
- si le matériau contient trop d'eau, on reforme une boulette qu'on malaxe pour la sécher et on recommence l'opération jusqu'à ce que la limite de plasticité soit atteinte,
- on prend alors le rouleau qu'on place dans un flacon taré à couvercle étanche ou dans un verre de montre,
- on effectue un deuxième essai à partir d'une autre boulette du même mortier ; après rupture on place le second rouleau dans un autre verre.
- on pèse les deux verres.

Remarque : si l'on utilise des verres de montre, il faut peser immédiatement après chaque essai.

Par définition : la limite de plasticité d'un mortier est la teneur en eau exprimé **en % du poids du matériau sec du rouleau qui se brise au moment où son diamètre atteint 3 mm.**

4-2-2 Calculs.

Les deux verres contenant les rouleaux sont pesés à la balance de précision avant et après leur passage à l'étuve. Chaque teneur en eau ainsi déterminée est donnée avec une décimale ; il ne faut pas que les deux valeurs diffèrent entre elles de **2 %** en plus ou en moins. Après avoir fait la **moyenne** de ces résultats on arrondit le chiffre obtenu à l'unité la plus voisine

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

On trouvera ci-dessous un modèle de feuille de travail, avec un exemple de calcul.

Les trois valeurs de w_L , w_P et I_P doivent être arrondies à l'unité la plus voisine.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES		LIMITES D'ATTERBERG				
Dossier : mode opératoire Echantillon :		$w_L = 37$ Résultats $I_P = 16$ $w_P = 21$				
Date :	S.8 — LIMITE DE LIQUIDITÉ				S.9 — LIMITE DE PLASTICITÉ	
Opérateur :						
	18		24		1 ^{er} essai	2 ^e essai
Nombre de coups					23	5
N° de la tare	30	36	1	32		
Poids total humide	13,855	18,075	13,360	16,626	7,137	9,085
Poids total sec	11,450	15,020	11,156	13,432	6,666	8,705
Poids de la tare	5,143	7,020	5,145	4,690	4,470	6,800
Poids de l'eau	2,405	3,055	2,204	3,194	471	380
Poids du sol sec	6,307	8,000	6,011	8,742	2,196	1,905
Teneur en eau %	38,2	38,1	36,7	36,5	21,5	20
Moyenne	38		37		Limite de Plasticité : 21	

CHAPITRE 6

OBSERVATIONS

Les limites d'Atterberg sont insuffisantes pour caractériser un matériau dont l'indice de plasticité $I_P = w_L - w_P$ se trouve à la limite entre le mortier non-plastique et le mortier limoneux, c'est-à-dire quand $5 < I_P < 10$. Dans cet intervalle, les résultats entre deux essais peuvent être assez dispersés suivant la préparation et suivant l'opérateur. Il faut donc tenir compte dans ce cas précis de l'analyse granulométrique complète et de l'équivalent de sable pour caractériser le matériau.

En dessous de 5, l'indice de plasticité perd toute signification. Faire l'essai d'équivalent de sable.

CHAPITRE 7

COMMENTAIRES

7.1 - INTRODUCTION

Les Limites d'Atterberg sont probablement les essais les plus anciens et les plus répandus utilisés pour l'identification des sols cohérents.

Malheureusement, il s'agit d'essais très empiriques dont les résultats peuvent être fortement influencés par le facteur personnel de l'opérateur, la qualité et l'usure du matériel, le mode de préparation de l'échantillon soumis aux essais.

L'application *rigoureuse* du mode opératoire est donc particulièrement indispensable si l'on veut obtenir des résultats comparables d'un laboratoire à l'autre.

C'est en 1911 que M. ATTERBERG, agronome suédois, a présenté un rapport sur la plasticité des sols argileux [1]. Il définissait alors six limites — d'un sol — dont deux ont essentiellement été retenues :

- la limite de liquidité w_L
- la limite de plasticité w_P .

La limite de retrait w_s , bien que représentant une caractéristique très importante, n'est que très rarement recherchée pour les sols français. Ceci provient de ce que le domaine de variation de cette limite est très restreint, en même temps que le facteur personnel de l'opérateur joue un grand rôle, de sorte qu'il est difficile d'accorder une grande confiance aux résultats trouvés sur les sols français.

C'est A. CASAGRANDE qui a ensuite en 1932[2] étudié les limites d'Atterberg et a mis au point l'essai de limite de liquidité, tel qu'il est pratiquement encore réalisé aujourd'hui.

7.2 - INFLUENCE DU MATÉRIEL SUR LES RÉSULTATS DES LIMITES

7-2-1 Le socle.

CASAGRANDE demande qu'on utilise pour le socle un matériau, type ébonite, qui permette un resurfaçage aisé lorsque la coupelle a réussi à creuser le socle à l'emplacement de sa chute. Par ailleurs, ce socle doit être réalisé dans un matériau présentant toujours la même dureté. Les appareils commercialisés en France comportent des socles en bois bakélinisé. Ce matériau présente une résistance au choc minimale de 11 kJ et maximale de 17 kJ, l'essai étant réalisé selon le schéma ci-dessous (*fig. 15*) :

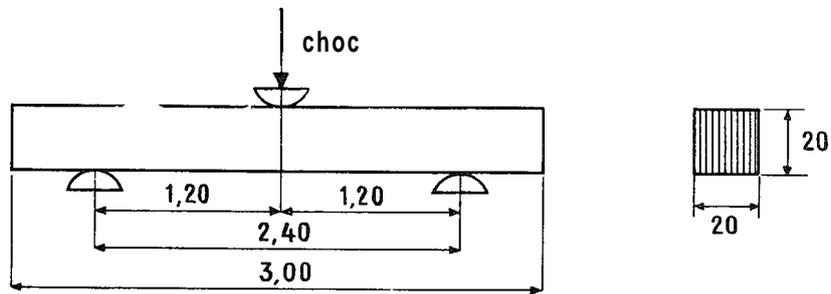


FIG. 15

Par ailleurs, la dureté du même matériau est au moins de 50 et au plus de 60 ; l'essai étant réalisé selon le schéma ci-dessous (fig. 16) :

$$\text{dureté } d = \frac{P}{f \times 200}$$

ou f = profondeur de pénétration du cylindre en mm dans le matériau à essayer.

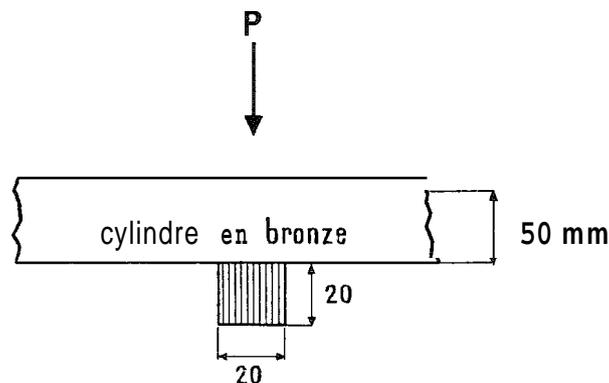


FIG. 16

7-2-2 Influence de la hauteur de chute de la coupelle.

La hauteur de chute doit toujours être soigneusement réglée. Le graphique (fig. 17) montre les variations de la limite de liquidité w_L en fonction de la hauteur de chute et ce, pour un matériau de $w_L = 96$.

Un écart de ± 1 mm sur la hauteur de chute peut entraîner une erreur de 7 à 8 points sur w_L .

Il en résulte que le socle doit être resurfacé lorsque la coupelle l'a creusé sur 0,5 mm de profondeur, soit un diamètre d'empreinte de 8 mm environ (fig. 18). Le contrôle du diamètre de l'empreinte est important car on ne tient pas compte au moment du réglage de la hauteur de chute, du supplément de hauteur entraîné par le creux réalisé par la coupelle dans le socle.

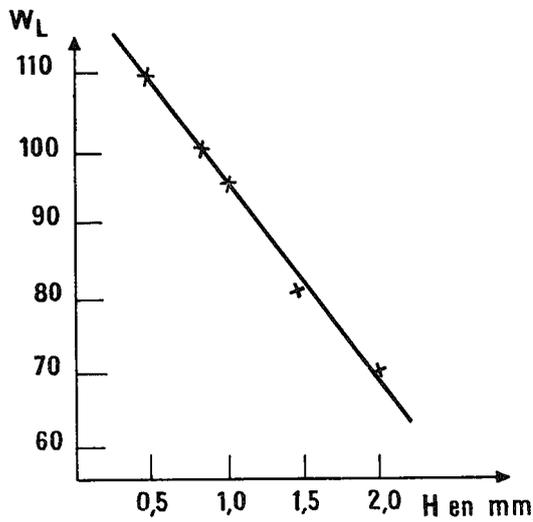


FIG. 17

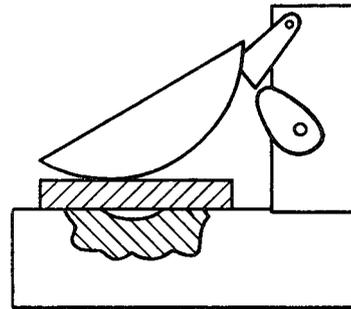


FIG. 18

7-2-3 Influence de l'outil à rainurer.

A. CASAGRANDE demande que l'outil produise une rainure de $2 \pm 0,05$ mm. Des essais effectués au Laboratoire Central ne font pas apparaître de différence sur la limite de liquidité aussi longtemps que l'usure de l'outil est inférieure à 0,2 mm. On réformera donc l'outil à rainurer lorsque sa pointe atteint 2,2 mm de large.

En ce qui concerne l'outil du type A.S.T.M. (fig. 19) son emploi est déconseillé, il faut lui préférer l'outil de Casagrande représenté (fig. 20).

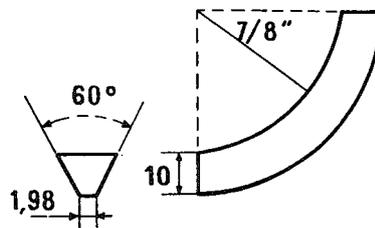


FIG. 19

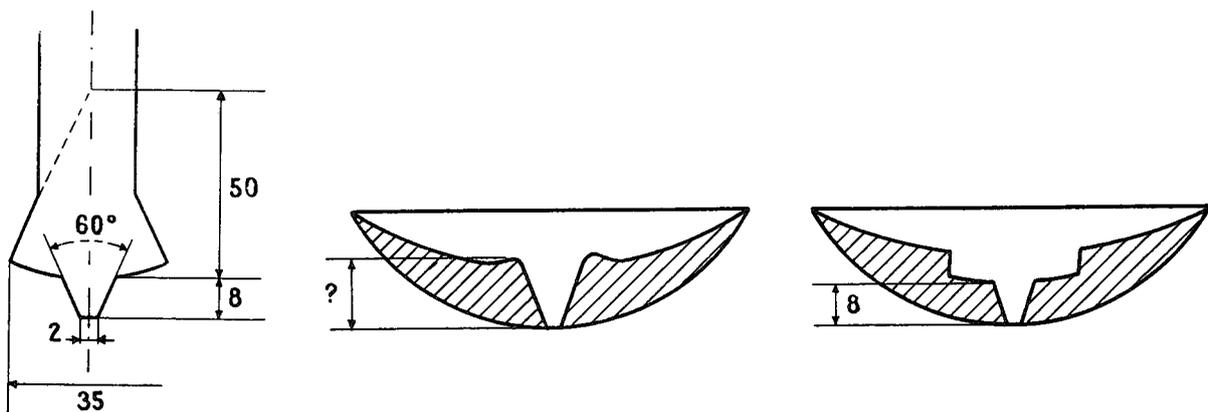


FIG. 20

L'angle que font les lèvres des rainures effectuées avec ces deux outils est le même (60°) mais la profondeur est différente (8 mm pour l'outil de Casagrande, contre 10 mm). De plus, l'outil A.S.T.M. présente l'inconvénient de produire une rainure dont la profondeur est fonction de l'épaisseur du matériau placé dans la coupelle, épaisseur qu'il surélève encore en repoussant latéralement le matériau. Ceci n'est pas le cas avec l'outil de Casagrande qui « rectifie » même l'épaisseur de matériau et donne donc toujours une rainure de même profondeur (fig. 20).

Ce fait prend son importance lorsqu'on se dit, qu'en réalité, l'essai de limite de liquidité est un essai de cisaillement du sol à une certaine teneur en eau. C'est d'ailleurs de là que sont partis quelques auteurs qui tentent de remplacer la détermination classique de w_L par une mesure directe de cisaillement (par exemple pénétromètre à cône de Uppal et Aggarwal aux Indes [3] ou balancier à cône de Vasiljev en U.R.S.S.).

Il en résulte que, plus la rainure est profonde, plus la résistance au cisaillement durant l'essai de limite de liquidité est faible. C'est ce que montrent les essais comparatifs réalisés en utilisant les deux outils à rainurer, essais récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau indiquant les différences sur w_L observées en utilisant les outils à rainurer A.S.T.M. et Casagrande (extrait de A.S.T.M. Special Technical, Publication n° 254 fragment).

A.S.T.M.	Casagrande
18,6	19,1
22,0	22,4
26,7	28,0
30,1	32,3
31,6	32,0
40,0	41,6
47,5	47,8
22,1	22,6
24,8	26,7
27,3	29,3
28,4	29,2
52,8	54,7

L'utilisation de l'outil A.S.T.M. peut paraître plus commode et plus correcte dans le cas de matériaux sableux. Il n'en est rien en réalité, car cet outil peut provoquer des glissements des deux moitiés du mortier dans la coupelle dont l'opérateur ne s'aperçoit pas.

L'outil de Casagrande, dans le cas des mortiers sableux, est aussi d'un emploi très délicat ; on peut réussir à tracer une rainure correcte en enlevant progressivement, en plusieurs fois, du matériau mais l'outil proposé par HOVANÏI [4] qui « découpe » la rainure est d'un emploi plus correct et plus aisé (fig. 21).

On trouvera ci-dessous des résultats comparés entre les outils de Casagrande et Hovanyi.

Tableau extrait de A.S.T.M. Special Technical, Publication n° 254.

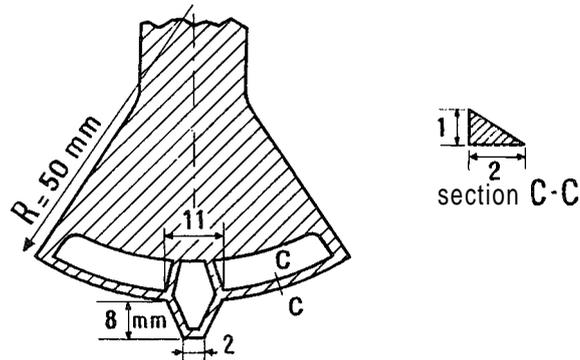


FIG. 21

Casagrande	Hovanyi
19,6	19,6
13,8	13,7
29,8	29,4
29,2	29,2
54,7	54,4
35,3	35,5
49,0	49,0

La correspondance entre les deux outils est excellente, qu'il s'agisse de mortier sableux ou plus argileux.

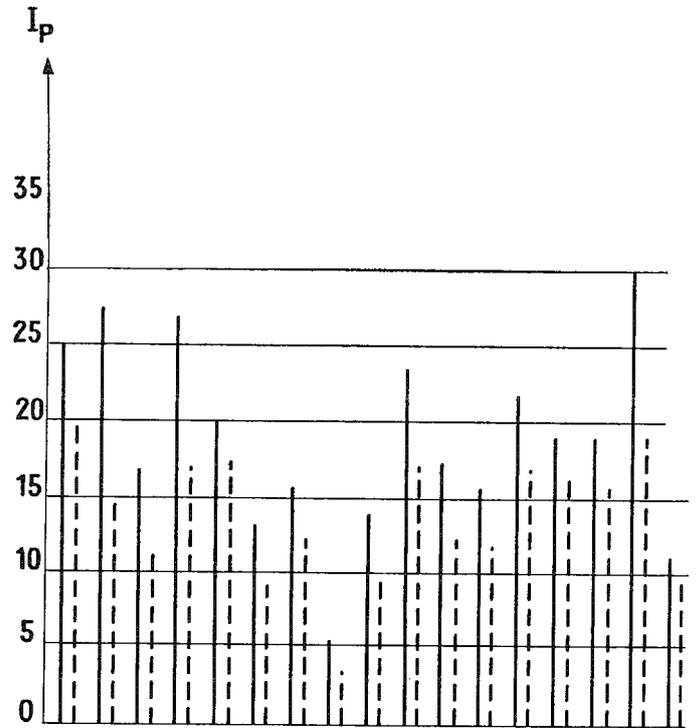
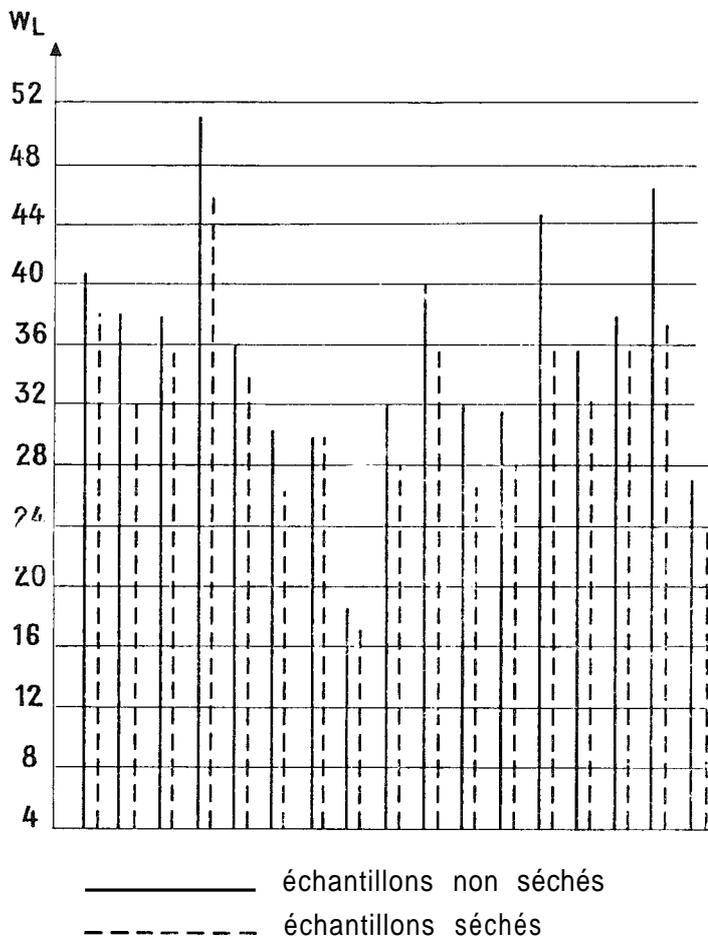
7.3 - INFLUENCE DU MODE DE PRÉPARATION DU MORTIER

Le séchage à l'étuve, même à faible température, par exemple 60 °C peut modifier les particules argileuses d'un sol. Les graphiques ci-dessous (*fig. 22*) indiquent les différences observées sur la limite de liquidité et l'indice de plasticité $I_P = w_L - w_P$ en préparant le mortier :

1° par tamisage humide suivi d'un séchage complet à l'étuve ;

2° par tamisage humide suivi d'un séchage partiel permettant de recueillir le matériau à l'état de boue, comme recommandé dans le mode opératoire.

On constate que les différences sont très importantes et que le non respect de ce point du mode opératoire influence beaucoup plus les résultats que le matériel par exemple.



(extrait du bulletin H.R.B. n° 122)

FIG. 22

On trouvera ci-après un tableau indiquant :

- le temps de préparation du mortier ;
- les résultats d'essais.

En employant les deux méthodes de préparation des échantillons, mentionnées ci-dessus.

Pour les cinq types de sols utilisés on constate :

1° Que le délai de préparation est toujours nettement plus court en prélevant le mortier à l'état pâteux.

2° Que les indices de plasticité sont très sensiblement différents. Incontestablement l'opération du séchage complet a pour conséquence la diminution de l'indice de plasticité, la différence provenant surtout de la limite de liquidité w_L .

Ce tableau permet lui aussi de dire qu'il faut absolument retenir la méthode sans séchage complet pour la préparation du mortier.

LIMITES D'ATTERBERG

PREPARATION AVEC ET SANS SECHAGE TOTAL DU MORTIER

(Temps comparés en heures et minutes)

Sols		Argile de Provins		Limon d'Orly		Limon		Argile sableuse		Sable argileux	
Poids de l'échantillon avant tamisage		750 g	750 g	750 g	750 g	600 g	600 g	500 g	500 g	550 g	550 g
Modedepréparation		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Temps opératoire	Imbibition préalable		12 h		12 h		12 h		12 h		12 h
	Tamisage à 0,42 mm	15'	45'	5'	4'	10'	5'	10'	12'	4'	4'
	Décantation	24 h		12 h		12 h		12 h		12 h	
	Siphonnage	5'		2'	2 4 h	5'	2 4 h	5'	2 4 h	2'	2 4 h
	Evaporation a l'air libre		48 h								
	Séchage étuve 75°	24 h		12 h		12 h		12 h		12 h	
	Imbibition avant essai	24 h		24 h		24 h		24 h		24 h	
Temps total approximatif		72 h	60 h	48 h	36 h	48 h	36 h	48 h	36 h	48 h	36 h
Résultats d'essai	w_L	75	81	32	35	35	38	38	44	29	30
	w_P	30	29	20	20	18	20	22	22	16	15
	I_P	45	52	12	15	17	18	16	22	13	15

(1) Tamisage, rinçage abondant, décantation, siphonnage, séchage total du matériau.

(2) Tamisage dans peu d'eau et prise du mortier a l'état pâteux.

7.4 - UTILISATION DE LA « MÉTHODE DE DÉTERMINATION EN I POINT » DE LA LIMITE DE LIQUIDITÉ

Cette méthode est basée sur le fait que la droite de liquidité pour un mortier — obtenue en portant dans un graphique semi-logarithmique le nombre de coups (log) en fonction de la teneur en eau — peut s'exprimer par la relation :

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{\text{tg} \beta}$$

où :

w_L est la limite de liquidité ;

w la teneur en eau du mortier pour N chocs ;

$\text{tg} \beta$ la pente de la droite de liquidité, c'est-à-dire si on prend 10 coups et 30 coups de la coupelle :

$$\text{tg} \beta = \frac{\log w_{10} - \log w_{30}}{\log 30 - \log 10}$$

On admet, par ailleurs, que $\text{tg} \beta$ reste constant, pour les différents matériaux, donc que les droites de liquidité sont parallèles. De nombreuses études statistiques ont été effectuées pour déterminer la valeur de $\text{tg} \beta$; les ingénieurs canadiens ont tendance à retenir $\text{tg} \beta = 0,108$, les ingénieurs du Road Research Laboratory anglais [5], par contre trouvent $\text{tg} \beta = 0,092$. L'armée américaine à l'origine de la formule a proposé $\text{tg} \beta = 0,121$ et finalement Olmsted et Johnston [7] ont proposé la formule ci-dessous :

$$w_L = \frac{w}{1,419 - 0,3 \log N}$$

qui peut être réduit à :

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0,135}$$

avec $\text{tg} \beta = 0,135$.

La Section des Sols et des Pierres a retenu la valeur $\text{tg} \beta = 0,121$ proposée par le Waterways Experiment Station. Cette valeur a donné d'excellents résultats comparée à la méthode classique de détermination de w_L en cinq points.

On peut d'ailleurs s'assurer que les variations de $\text{tg} \beta$ n'ont qu'une faible influence sur la détermination de w_L . Si $\text{tg} \beta$ varie de $\pm 0,05$, le résultat n'est influencé que de moins de 1 %.

Pour la valeur 0,121, on a constaté que 99 % des résultats présentent, par rapport à la méthode classique en 5 points, des erreurs inférieures à ± 2 % sur w_L mais uniquement si le nombre de coups N est maintenu entre 20 et 30.

Le mode opératoire autorisant que N soit compris entre 15 et 35, on évitera des erreurs plus importantes en répétant l'essai, comme préconisé, pour une teneur en eau plus faible.

Les seules difficultés qu'on peut rencontrer dans l'application de cette méthode de détermination en un point de la limite de liquidité proviennent des sols organiques. On peut avoir intérêt, dans ce cas, à effectuer l'essai pour 4 à 5 teneurs en eau différentes — permettant de se contrôler — et à tracer la droite de liquidité en portant dans un graphique semi-logarithmique le nombre de coups de fermeture (log) en fonction de la teneur en eau.

7.5 - L'ESSAI DE LIMITE DE PLASTICITÉ

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

L'opérateur constate facilement, en soulevant délicatement de 15 à 20 mm en son milieu le rouleau si celui-ci se fissure franchement ou non.

En ce qui concerne l'appréciation du diamètre du rouleau sur le résultat de w_P , le Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Alger a mis au point un appareil simple permettant très rapidement de connaître le diamètre exact du rouleau.

Il s'agit d'une plaque de verre de 10 x 5 cm dont une arête est surélevée de 5 mm. Cette plaque est graduée en 1/10 de millimètre de 0 à 5 mm, à l'échelle 20, parallèlement à son grand axe. Il suffit d'amener cette plaque délicatement sur le rouleau jusqu'à ce qu'il soit au contact du verre, pour lire directement son diamètre (voir fig. 23).

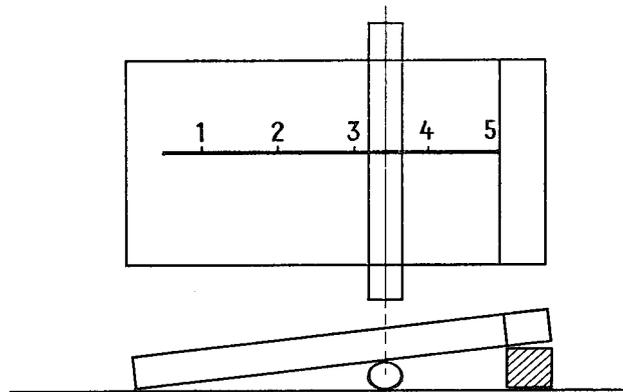


FIG. 23

La mesure du diamètre du rouleau étant rendue ainsi très précise, il faut obtenir la fissuration du rouleau pour un diamètre de $3 \pm 0,5$ mm.

Cette dernière condition est facile à satisfaire, l'erreur commise sur w_P étant pratiquement toujours inférieure à ± 1 point.

Cette méthode du rouleau reste toujours plus précise que la méthode dite du « cube » qu'on pourra éventuellement utiliser pour les déterminations rapides de w_P , sur chantier par exemple. Dans cette méthode w_P est apprécié par l'écrasement entre deux doigts ou entre la spatule et la table d'un cube d'environ 20 mm de côté. Si le matériau s'effrite dans cette opération on considère que w_P est atteint. Des mesures effectuées par A. EDWARD et ABDUN-NUR [83] aboutissent à un coefficient de corrélation de $0,97 \pm 0,006$ entre les deux méthodes (rouleau et cube), ce qui est très bon, et permet de dire que les deux essais atteignent la même caractéristique du sol.

7.6 - PRÉCISION DES ESSAIS DE LIMITES D'ATTERBERG

Dans le mode opératoire il a été indiqué qu'un même opérateur doit trouver, en répétant tant l'essai de limite de liquidité que de limite de plasticité, des résultats qui ne diffèrent pas de plus de 2 % en plus ou en moins. Si cette limite n'était pas respectée, il est demandé que l'opérateur fasse un essai supplémentaire.

Une telle précision n'est évidemment plus possible en ce qui concerne les résultats sur un même matériau entre plusieurs opérateurs. En règle générale, on peut accepter des résultats qui ne diffèrent pas entre eux de ± 5 % sur les limites de liquidité et de plasticité. En ce qui concerne l'indice de plasticité on acceptera donc des résultats tels que $I_P \pm 10$ %, soit par exemple :

$$I_P = 10 \pm 1$$

$$I_P = 40 \pm 4$$

Les nombreux essais d'étalonnage faits entre les différents Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées et le Laboratoire central montrent qu'il n'est guère possible d'espérer mieux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. ATTERBERG, 1911 *Über die Physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Fone*. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, Vol. 1.
- [2] A. CASAGRANDE, Research on the Atterberg limits of Soils, Public Roads Vol. 13, n° 2 oct. 1932, p. 121-136.
- [3] H.L. UPPEL and H.R. AGGERWAL, A New Method of Determining Liquid Limit of Soils, Road Research Bulletin, the Indian Roads Congress New Delhi, n° 4 (1957).
- [4] P. HOVANYI, A new grooving Tool. Geotechnique, Vol. VIII (1958), page 78 bis.
- [5] L.E.J. NORMAN, The One-Point Method of Determining the volve of the liquid limit of a Soil. Geotechnique, Vol. 9, n° 1 (1959).
- 6] U.S. WATERWAY EXPERIMENT STATION, Simplification of the liquid limit Test Procedure, Technical Memorandum n° 3, Vicksburg Miss. p. 286 (1949).
- [7] F. R. OLMSTEED and C.M. JOHNSTON, Rapid Methods of Determining Liquid Limits of Soils. Bulletin n° 95, Highway Research Board Washington, p. 27 (1955).
-] 8] « Symposium on Atterberg Limits » A.S. T.M. Special Technical Publication n° 254 (1959) publié en juin 1960.
- [9] A.S. T.M. Standards 1961. D 423 - 61 T page 1286 et D 424 - 59 page 1291.
- [10] A. CASAGRANDE, Notes on the Design of the Liquid Limit Device. Geotechnique, Vol. VIII (1958), pages 84 à 91
- [11] R. PELTIER, Manuel du Laboratoire Routier, Dunod (1959) pages 100 à 107.
- [12] *Soil Mechanics for Road Engineers*, Road Research Laboratory her Majesty's Stationery Office, London.
- [13] Projet de norme DIN 4016 feuilles 3. « Limites d'Atterberg » édition juin (1958).
- [14] H.R.B. n° 122.

