

Limites d'Atterberg – Classification d'un sol

Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon le laboratoire des Ponts et Chaussées (L.C.P.C).

Principe

Le classement d'un sol vis à vis de la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.P.C.P) se fait à partir de deux essais de laboratoire qui sont l'analyse granulométrique et la détermination des limites d'Atterberg.

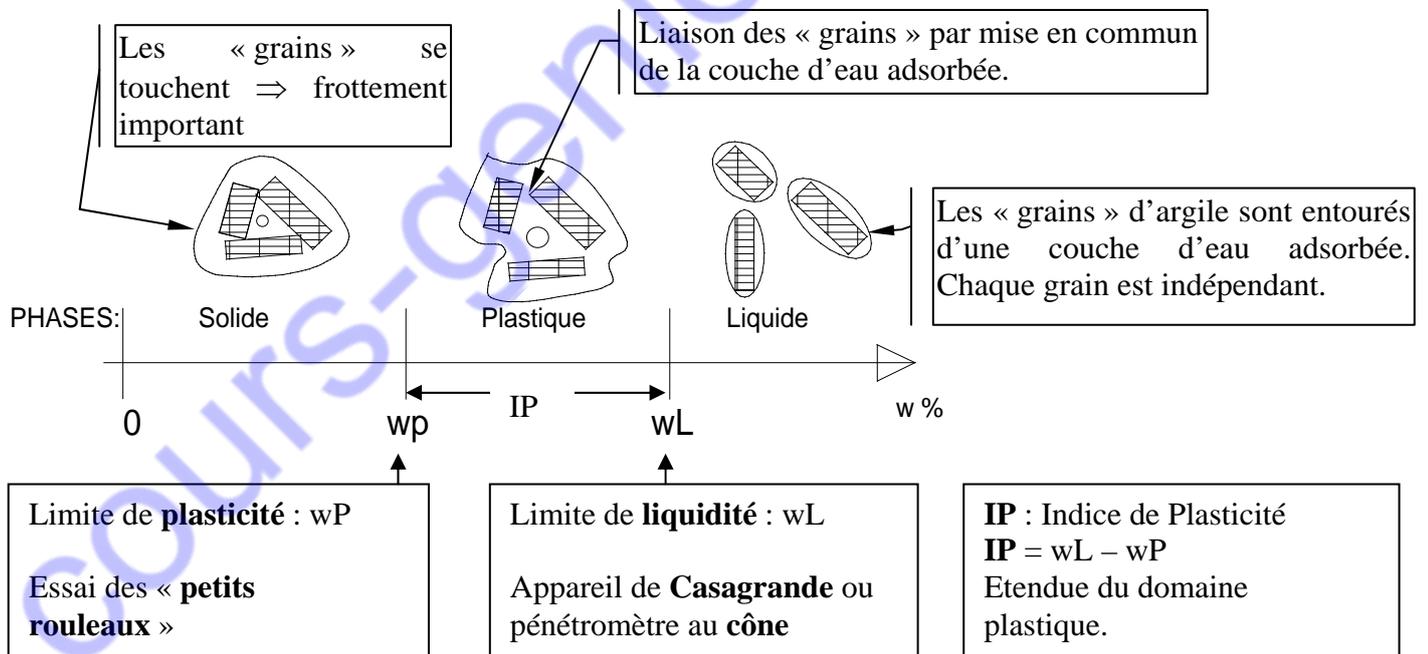
La manipulation consiste à exploiter les résultats de l'analyse granulométrique d'un sol et à définir ses limites d'Atterberg afin de le classer au sens de la classification L.C.P.C.

La particularité des sols **fins** est que, leur **consistance** varie fortement en fonction de leur **teneur en eau**. Leur état va du **solide** s'ils sont desséchés, à l'état **liquide** s'ils sont détrempés. Entre ces 2 états, il existe un état intermédiaire dit **plastique** (pâte à modeler).

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale) qui marque 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 deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification des sols. Elles s'appliquent sur la fraction de sol passant au travers du tamis de 400 μm .



Ces essais sont très empiriques mais ils ne nécessitent que peu de matériel. D'autre part, de nombreux essais ont été réalisés partout dans le monde. Aussi, des relations existent entre ces limites et les propriétés des argiles.

\Rightarrow L'application **RIGOUREUSE** du mode opératoire est particulièrement indispensable.

Limites d'Atterberg – Classification d'un sol

☒ Intérêt en Génie Civil

- Les limites d'Atterberg servent à **classifier** les sols fins ($< 80 \mu\text{m}$).
- La position de la teneur en eau **in-situ** (w) par rapport aux limites d'Atterberg permet de prévoir la **consistance** du sol. (Indice de consistance : $I_c = \frac{wL - w}{I_p}$)
- Les limites d'Atterberg permettent de **prévoir le comportement** des sols fins pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (contrainte admissible, module d'élasticité).

✂ Matériel nécessaire :

Limite de liquidité : -appareil de Casagrande et cône de pénétration.
-outil à rainurer.
-cale d'épaisseur 10 mm.

Limite de plasticité : -plaque de marbre.
-sèche – cheveux.
-capsules de pesée.

Divers : -étuve.
-balance.
-spatule.
-pissette.
-chronomètre indiquant la seconde.

⚙ Matériaux utilisés : -échantillon argileux déjà préparé.

📖 Documents à consulter :

- Norme NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).
- Norme NF P 94-052-1 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration).
- Classification des sols L.C.P.C.

📖 Mode opératoire :

L'essai se fait en 2 phases :

- *recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle se referme sur 1 cm lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à 25 chocs répétés. (appareil de Casagrande : limite de LIQUIDITE)*
- *recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure. (« petits rouleaux » : LIMITE DE PLASTICITE)*

Essai au bleu de méthylène d'un sol V_{BS}

🔍 Principe

Le principe de la méthode consiste à contrôler l'**adsorption** du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant les **fines** de la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre.

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La **saturation des fines** en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une **auréole bleu clair** persistante autour du dépôt central.

On appelle valeur de bleu de méthylène V_{BS} , la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

📦 Intérêt en Génie Civil

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur les fines (ensemble des grains passant au tamis 80 μm) contenues dans un sol, un sable ou un gravillon dans le but de révéler leur nature argileuse et de déterminer leur concentration. Il est généralement effectué après un équivalent de sable E_s lorsque celui-ci est inférieur aux spécifications exigées.

Pour les **granulats**, il existe une valeur au bleu de méthylène V_B (NF P 18-597) dont le principe d'essai est similaire à celui de la valeur au bleu de méthylène d'un sol V_{BS} (NF P 94-068) développé dans ce TP.

La manipulation nécessite cependant beaucoup de temps mais elle permet de classer les granulats suivant la nouvelle Norme XP P 18-540 "Granulats - Définitions Conformité Spécifications".

🔧 Matériel nécessaire

- un chronomètre, précision 1 s
- une burette de 50 ml avec graduation au 1/10 ml
- un papier filtre sans cendre, grammage 95 g/cm², épaisseur 0,20 mm, vitesse de filtration 75, rétention 8 mm
- une baguette de verre
- un agitateur à ailettes tournant entre 400 et 700 tours/minute dont le diamètre des ailettes est compris entre 70 et 80 mm
- un récipient de 3 litres en matière plastique de diamètre environ 155 mm
- un tamis de maille 5 mm
- une spatule
- une pissette de 500 ml
- une balance de portée 5 kg, précision 0,1g
 - des bacs en plastique pour effectuer les essais

Travail demandé**I / MANIPULATIONS**

- 1.1- Rechercher la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande en vous aidant de l'annexe N°1. Répondre sur le document réponse N°1.
- 1.2- Rechercher la limite de liquidité avec le cône de pénétration en vous aidant de l'annexe N°2. Répondre sur le document réponse N°2.
- 1.3- Rechercher la limite de plasticité en vous aidant de l'annexe N°3. Répondre sur le document réponse N°1.
- 1.4- Rechercher la proportion de particules argileuses en réalisant un essai au bleu de méthylène sur l'échantillon de sol sableux. Vous suivrez les indications de l'annexe N°4.

2 / TRAVAIL EN SALLE**2.1- Limite de liquidité :**

- 2.1.1- Porter les couples (Nb de chocs , teneur en eau en %) du document réponse N°1 sur le quadrillage semi-logarithmique de ce même document. Tracer la droite moyenne et déterminer la valeur de la **limite de liquidité**
- 2.1.2- Porter les couples (**enfouissement, w**) du document réponse N°2 sur le repère de ce même document. Tracer la droite moyenne et déterminer la valeur de la **limite de liquidité**
- 2.1.3- Comparer les valeurs obtenues avec les deux méthodes.

2.2- Limite de plasticité :

- 2.2.1- Déterminer la **limite de plasticité** en faisant la moyenne des valeurs de teneur en eau obtenues sur le document réponse N°1.

2.3- Classification du sol :

- 2.3.1- Calculer l'**indice de plasticité** de ce sol sur le document réponse N°1.
- 2.3.2- Calculer l'**indice de consistance** de ce sol dont la teneur en eau in-situ est de 18 %. Conclusion (document réponse N°1).
- 2.3.3- Utilisez le **logiciel labowin** pour éditer vos résultats.
- 2.3.4- Calculer les coefficients d'uniformité **Cu** et de courbure **Cc** en considérant que :

$$Cu = D_{60} / D_{10} \quad - \quad Cc = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$$

D_{10} , D_{30} et D_{60} représentent les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30% et 60% de tamisât.

- 2.3.5- **Classifier** le sol selon la classification L.C.P.C (Annexe N°5 et N°6)

2.4- Essai au bleu de méthylène:

- 2.4.1- Déterminer le V_{BS} de l'échantillon proposé.
- 2.4.2- Utiliser le **classement GTR** pour classer le sol. (Demander les autres caractéristiques nécessaires pour ce classement au professeur).

2.5- Conclusions.

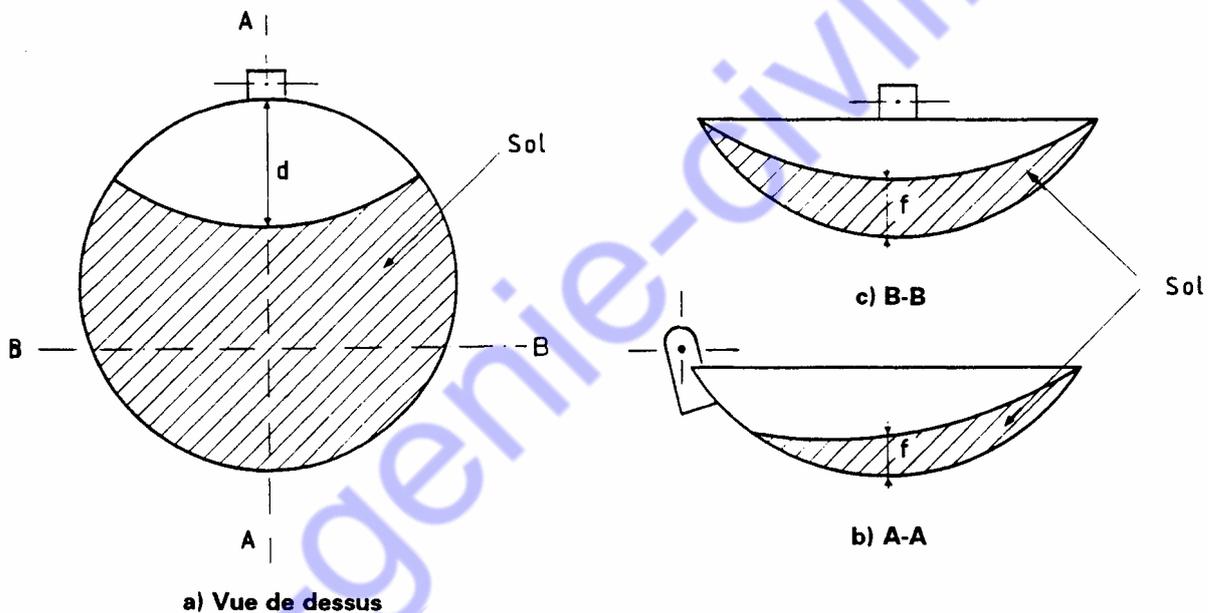
Limite de LIQUIDITE avec l'appareil de Casagrande NF P 94-051

• Réglage de l'appareil de Casagrande :

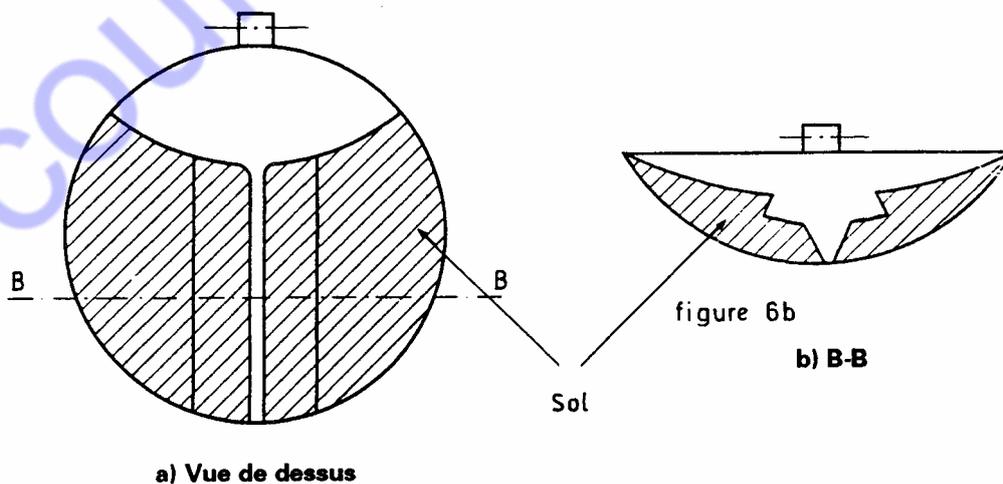
- Recueillir le matériau à une teneur en eau élevée afin de pouvoir débiter l'essai de limite de liquidité.

• Essai avec l'appareil de Casagrande : Recherche des couples de points (w , Nombre de chocs)

Etape 1 : Remplir la coupelle :
(caractéristiques normalisées)



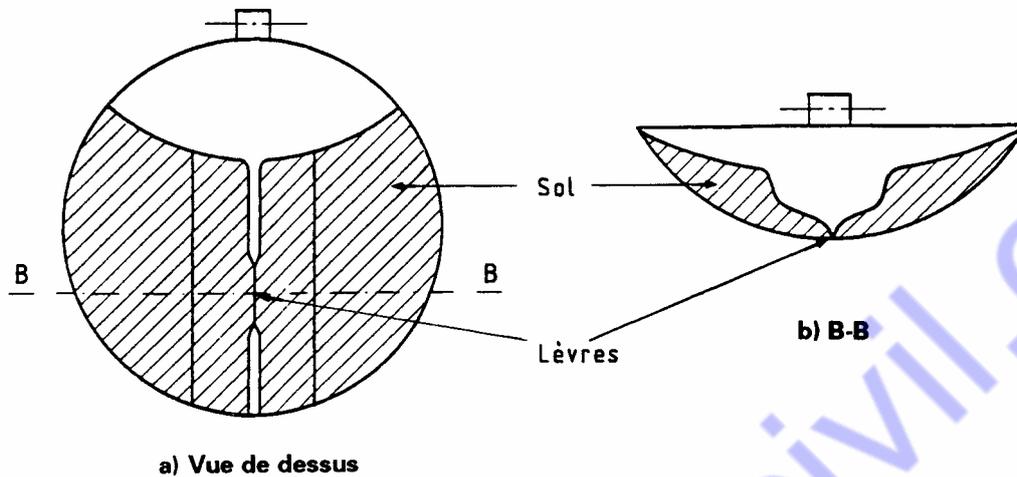
Etape 2 : Partager la pâte en 2 :



Annexe N°1

Etape 3 :

- Soumettre la coupelle à une série de **chocs réguliers** (2 coups /s).
- Noter le nombre de coups (N) pour que la rainure se referme sur 1 cm apprécié à l'œil. $15 < N < 35$



- Prélever à l'aide de la spatule 2 échantillons au voisinage de l'endroit où la rainure s'est refermée.
- Mesurer la **teneur en eau** de ces échantillons.

Etape 4 :

- **Sécher** le sol entre 2 essais en le malaxant sur le marbre et en l'étalant.

Etape 5 :

- Refaire un nouvel **essai** comme indiqué à l'étape 1. Il faut avoir au moins 4 points différents.
- NOTA** : Pour un gain de temps vous réaliserez seulement 2 essais du moment que les valeurs obtenues encadre la valeur de référence 25 : $N_1 < 25 < N_2$

La limite de liquidité (w_L) est la teneur en eau qui correspond à une fermeture de la rainure sur 1 cm après 25 chocs.

Elle est **calculée** à partir de l'équation de la **droite moyenne** ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ($\log N, w$). La valeur obtenue est arrondie au nombre entier le plus proche.

Limite de LIQUIDITE avec le cône de pénétration NF P 94-052-1

- Essai avec le cône de pénétration : Recherche des couples de points (w%, enfoncement du cône en 5s)

Etape 1 :

- régler l'horizontalité du socle.
- nettoyer la pointe du cône.

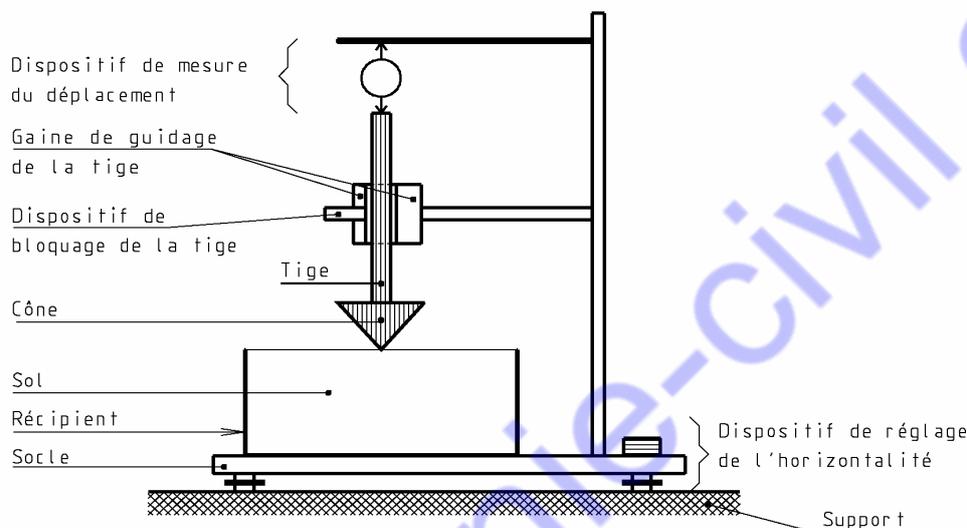
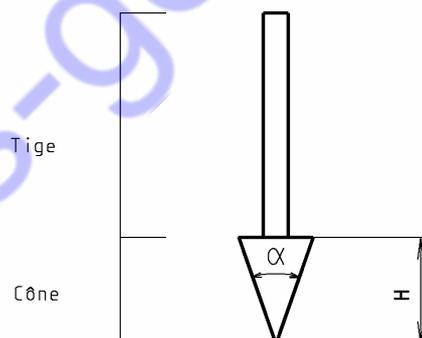


Figure 2 : Schéma de l'appareillage



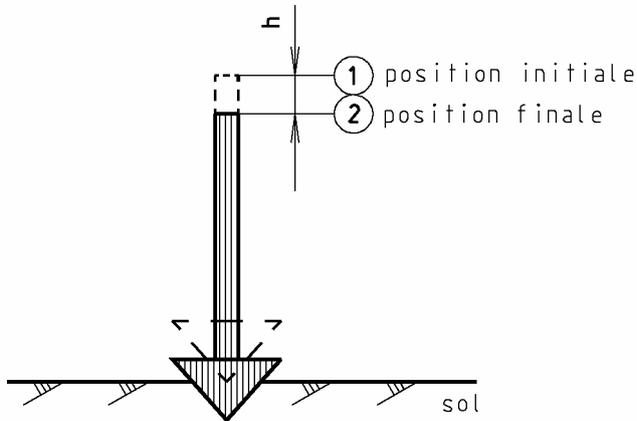
Etape 2 :

- malaxer la pâte sur la plaque lisse pour obtenir une pâte homogène presque fluide.
- remplir le récipient normalisé avec une spatule de cette pâte. (attention aux bulles d'air)
- araser afin d'obtenir une surface lisse et plane.
- ajuster la pointe normalisée à peu près au centre du récipient et pour qu'elle affleure la surface du sol. (légère trace lorsqu'on déplace le récipient)

Annexe N°2

Etape 3 :

- repérer la position du cône.
- libérer le cône et le laisser s'enfoncer dans le sol pendant $5s^{\pm 1s}$.
- noter sa nouvelle position. L'enfoncement h doit être compris entre 12 et 25 mm.



Etape 4 :

- enlever le cône.
- faire un prélèvement et mesurer sa teneur en eau.

Etape 5 :

- recommencer les opérations au moins 4 fois avec des teneurs en eau différentes.

NOTA : Pour un gain de temps vous réaliserez seulement 2 essais du moment que les valeurs obtenues encadre l'enfoncement de référence 17mm : $h_1 < 17 < h_2$

La limite de liquidité (w_L) est la teneur en eau qui correspond à un enfoncement de **17 mm** du cône. Elle est **calculée** à partir de l'équation de la **droite moyenne** ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (**enfoncement, w**). La valeur obtenue est arrondie au nombre entier le plus proche.

Limite de PLASTICITE NF P 94-051

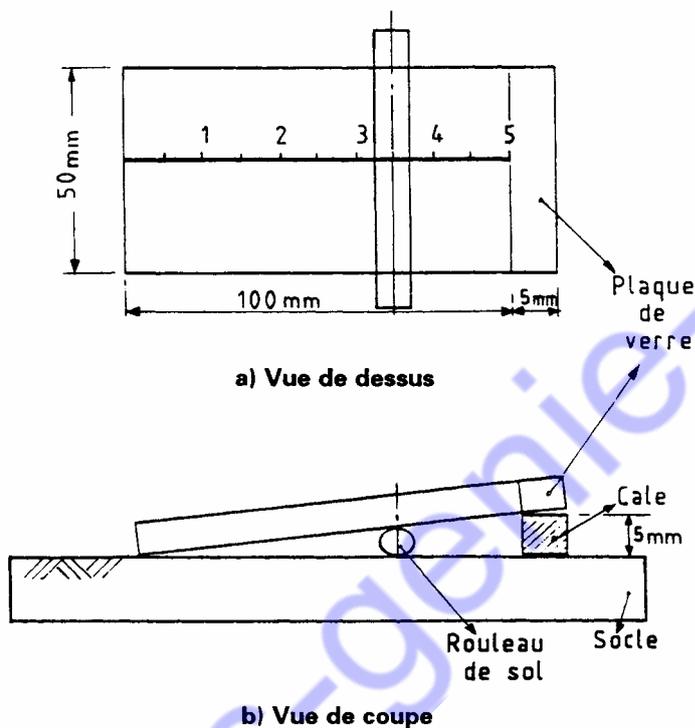
La mesure de la limite de plasticité se fait après celle de la limite de liquidité.

Etape 1 :

- **Sécher** le sol en le malaxant sur le marbre et en l'étalant.

Etape 2 :

- Former une **boulette** avec une partie de l'échantillon puis roulez-la à la main sur le marbre de façon à former un rouleau qu'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il ait atteint **3** mm de diamètre.



Remarques :

1-Opérer assez lentement de façon que l'amincissement soit bien régulier et surtout afin d'éviter la formation de petits cylindres creux.

2-Les petits rouleaux doivent avoir une longueur de 10 à 15 cm.

Etape 3 :

- Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée tout en la séchant légèrement.
- La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint $3 \text{ mm}^{\pm 0.5 \text{ mm}}$

Etape 4 :

- Effectuez une mesure de teneur en eau.

Etape 5 :

- Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

Essai au bleu de méthylène d'un sol NF P 94-068

⚙ Matériaux utilisés

- une solution de bleu de méthylène de qualité pharmaceutique à 10 g/litre
 - de l'eau déminéralisée ou distillée
 - un sol de dimension 0/50 mm
- Utiliser des sols préalablement échantillonnés.

📖 Mode opératoire

Préparation de l'échantillon:

- séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5 mm contenue dans l'échantillon
- déterminer la proportion pondérale C de la fraction sèche 0/5 mm contenue dans le matériau. Cette proportion peut être lue sur la courbe granulométrique du matériau si elle est connue par ailleurs ou sinon déterminée sur un autre échantillon représentatif du matériau
- déterminer la teneur en eau w %

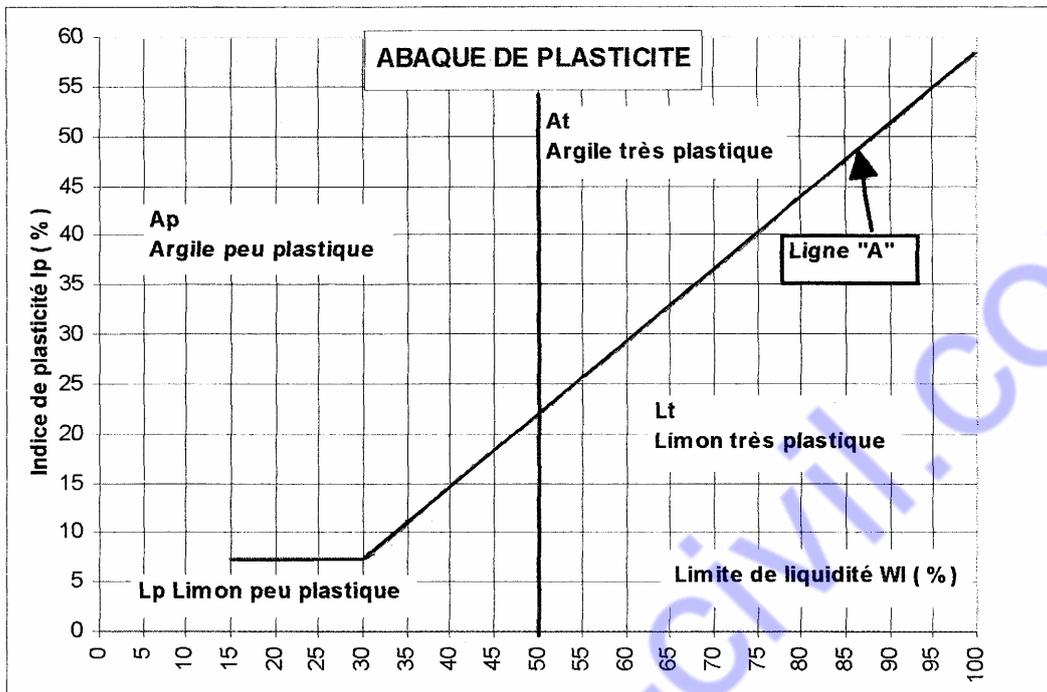
Rappel: teneur en eau = $w = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}}$ en %

- préparer une masse humide de sol Mh comprise entre 30 et 60 g pour un sol argileux et entre 60 et 120 g pour un sol peu argileux

Exécution de l'essai:

- introduire Mh dans le récipient de 3 litres et ajouter 500 ml d'eau déminéralisée ou distillée
- agiter l'ensemble à l'aide de l'agitateur à ailettes à une vitesse de 700 tr/min pendant au minimum 5 minutes et positionné à 5 mm environ du fond du récipient.
- agiter ensuite de manière permanente l'ensemble eau + sol à 400 tr/min
- injecter 5 ml de solution de bleu de méthylène à l'aide de la burette
- au bout de 1 minute, effectuer le test de la tache sur papier filtre de la manière suivante :
 - prélever à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre
 - observer la tache formée qui se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu sombre, entouré d'une zone humide incolore
 - la goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre 8 et 12 mm
 - le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante
 - le test est dit négatif si l'auréole est incolore : il faut alors rajouter 5 ml de solution de bleu de méthylène
- lorsque le test est positif, laisser s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée, tout en effectuant des tests de minute en minute sans ajout de solution
- si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième minute, procéder à de nouvelles injections de solution de bleu de 2 ml
- chaque addition est suivie de tests effectués de minute en minute
- renouveler l'opération jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives : le dosage est alors terminé
- noter V le volume de solution de bleu de méthylène adsorbé

Annexe N°5

CLASSIFICATION DES SOLS FINS
Plus de 50 % des éléments < 0.08mm

CLASSIFICATION DES SOLS grenus
Plus de 50 % des éléments > 0.08mm

CLASSIFICATION LCPC

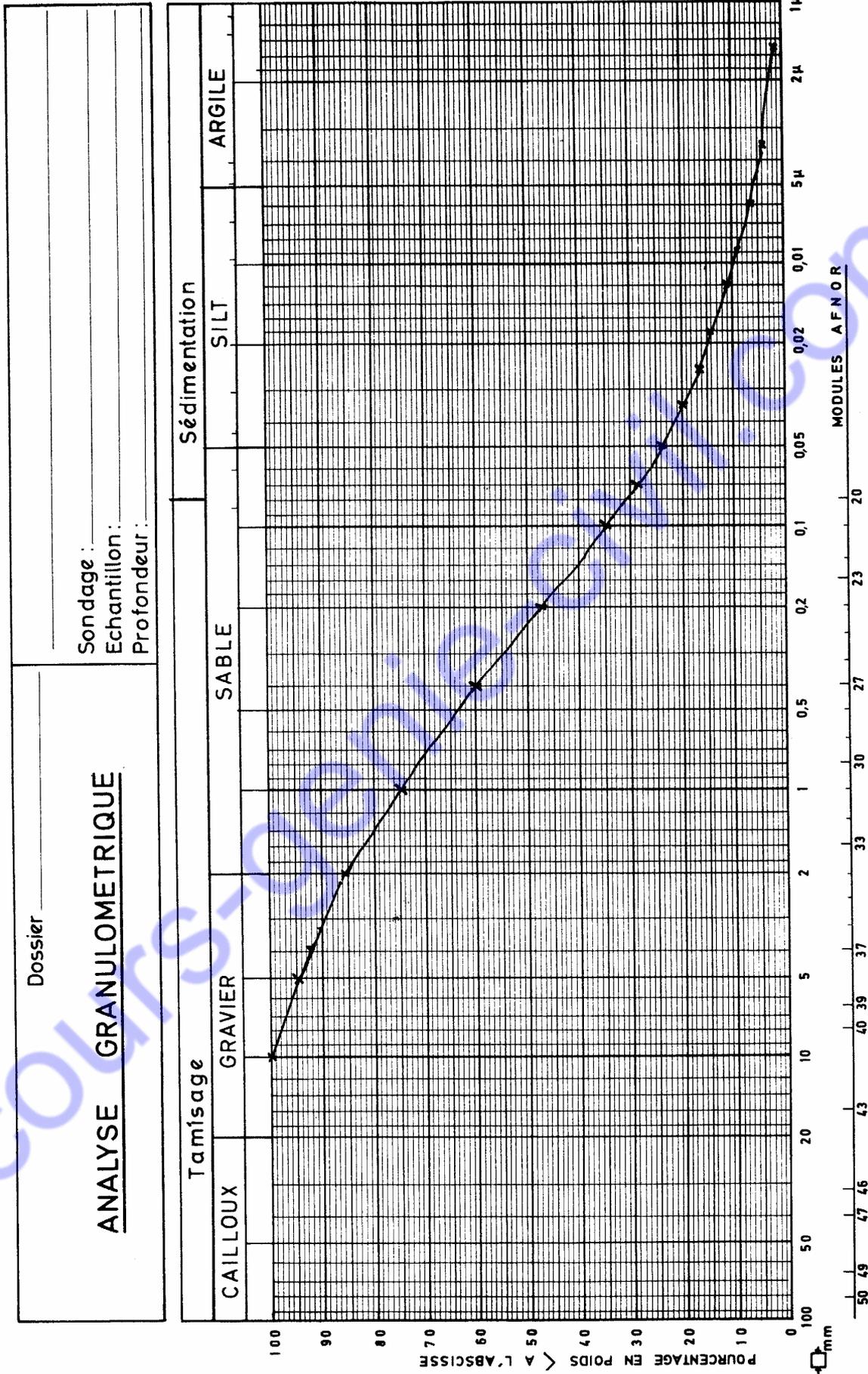
SOLS GRENUS				
Définitions	Conditions			Appellations
+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm sont retenus au tamis de 2 mm Sols grenus	GRAVE	- de 5 % des éléments < 0.08 mm et examiner la courbe granulométrique (1)	Cu > 4 et 1 < Cc < 3	Grave bien graduée (Gb)
			Cu < 4 ou Cc > 3 ou Cc < 1	Grave mal graduée (Gm)
		+ de 12 % des éléments < 0.08 mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer ω_l et ω_p et situer le point I_p, ω_l (1)	Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité	Grave limoneuse (GL)
			Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité	Grave argileuse (GA)
	SABLE	- de 5 % des éléments < 0.08 mm et examiner la courbe granulométrique (1)	Cu > 6 et 1 < Cc < 3	Sable bien gradué (Sb)
			Cu < 6 ou Cc < 1 ou Cc > 3	Sable mal gradué (Sm)
	+ de 12 % des éléments < 0.08 mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer ω_l et ω_p et situer le point I_p, ω_l (1)	Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité	Sable limoneux (SL)	
		Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité	Sable argileux (SA)	

(1) entre 5 et 12 % d'éléments < à 0.08 mm : cas limite nécessitant le double symbole adapté aux caractéristiques de la courbe granulométrique et de plasticité

$$\text{Coefficient d'uniformité : } Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} ; \text{ Coefficient de courbure : } Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

D10, D30, et D60 représentent les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30% et 60% de tamisât.

Annexe N°6



Document réponse N°1

Firme :	PROCES-VERBAL D'ESSAI DETREMINATIONDES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NF P 94-051		
Site :	Méthode de prélèvement : carottier	Dossier n° :	
		Sondage :	
	Date :	Profondeur :	

Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3	4
Nombre de coups N				
Teneur en eau (%)				



Teneur en eau de plasticité (%)	W =	W =	W _P =
	W =	W =	
Limite de liquidité : W _L =%	Indice de plasticité I _P =		
Limite de plasticité : W _P =%			
Teneur en eau du sol : W <u>18</u> %	Indice de consistance I _C =		

Document réponse N°2

Organisme :	PROCÈS-VERBAL D'ESSAI — Limite d'Atterberg Détermination de la limite de liquidité — Méthode du cône conforme à la norme NF P 94-052-1			
SITE :	PRÉLÈVEMENT			Dossier n° :
	Méthode :			Sondage :
	Date :			
MESURES	1	2	3	4
Enfoncement mm				
Teneur en eau %				
<p style="text-align: center;">Teneur en eau en %</p> <p style="text-align: right;">Enfoncement du cône en mm</p> <p style="text-align: right;">h</p>				
Observations :			Établi par :	
Teneur en eau du sol $w = \%$		Limite de liquidité $w_L =$		