

M/624.787

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Mastère

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie

Département de : "Génie Civil"

Domaine: "Sciences et Technologie"

Spécialité : "Génie Civil", " Option : STRUCTURES et 3C "



Présenté par :

- LEGHRIB YOUCEF
- SEHAILIA HAMMADI
- HAMEL SOFYANE

**Thème : Essais standards dans un projet de route et étude
de formulation d'un béton bitumineux**

Sous la direction de:

Mr. LAFIFI BRAHIM

Juin 2013

Remerciement



Nous tenons plus particulièrement

Adresse nos sincères

Remerciements

A notre encadreur Mr : LAFIFI BRAHIM

Ainsi qu'aux enseignants de notre département de génie civil

Qui nous ont dirigés conseillé

Durant la réalisation de ce Modest travail

Nous exprimant notre gratitude a toutes les

Personnes qu'ont apportées des prés

Ou de loin leur soutien à la

Finalisation de ce projet.

Youcef, Hammadi et Sofyane

Liste des figures	Page
Figure I-1-1 : Photo d'une tamiseuse électrique.	06
Figure I-1-2 : Lavage et tamisage de l'échantillon.	07
Figure I-1-3 : Classification normalisé des granulats	09
Figure I-3-1 : Balance.	13
Figure I-4-1 : Appareillage utilisé dans l'essai équivalent de sable.	17
Figure I-4-2 : Agitation de l'éprouvette.	19
Figure I-4-3 : Mesure et calcul des résultats.	20
Figure I-5-1 : Balance.	21
Figure I-6-1 : Appareillage utilisé dans l'essai bleu méthylène.	24
Figure I-6-2 : Exécution de l'essai bleu méthylène.	26
Figure I-6-3 : résultat du test.	27
Figure I-7-1 : Représentation des limites d'Atterberg.	29
Figure I-7-2 : Appareil de Casagrande.	30
Figure I-7-3 : Outils à rainurer.	30
Figure I-7-4 : Remplissage de la coupelle et réalisation de la rainure.	31
Figure I-7-5 : Fermeture de la rainure.	32
Figure I-7-6 : Exécution de l'essai.	33
Figure I-7-7 : Classification des sols (diagramme de plasticité).	34
Figure II-1-1 : Machine Los Angeles.	37
Figure II-1-2 : Exécution de l'essai	38
Figure II-2-1 : Appareil Micro-Deval	40
Figure II-2-2 : Déroulement de l'essai.	42
Figure II-2-3 : Echantillon après séchage et écrêtage à 1.6 mm.	42
Figure III-1-1 : Modalité d'exécution des essais.	47
Figure III-1-2 : Distribution de nombres de coups suivants type de moule.	49
Figure III-2-1 : Matériel de confection des éprouvettes et de poinçonnement.	53
Figure III-2-2 : Exécution du poinçonnement.	56
Figure III-2-3 : Imbibition et gonflement.	57
Figure III-3-1 : pénétromètre.	59

Figure III-3-2 : Aiguille de pénétration.	59
Figure III-4-1 : Anneau.	63
Figure III-4-2 : Plaque de coulage.	63
Figure III-4-3 : Dispositif de centrage des billes.	63
Figure III-4-4 : Porte-anneau.	63
Figure III-4-5 : Dispositif de montage pour deux anneaux.	64
Figure III-5-1 : Principe de l'essai de compression.	65
Figure III-5-2 : Corps de moule, hausse, base.	66
Figure III-5-3 : Exemple de piston extracteur.	66
Figure III-5-4 : Exemple de dame de compactage.	66
Figure III-5-5 : Mâchoires d'écrasement.	67
Figure III-5-6 : Appareillage Marshall.	67
Figure III-7-1 : Cartouche.	71
Figure III-7-2 : L'appareil de Kumagawa.	72
Figure I-1 : Appareil gamma densimètre.	98
Figure I-2 : Appareillages.	99
Figure I-3 : Utilisation de l'appareille.	105
Figure II-1 : Utilisation de l'appareille.	106
Figure II-2 : Modèles des pieds.	107

Introduction générale

Dans tous les secteurs du Génie civil et en travaux publics, l'ingénieur s'assure avant, l'ord et après la réalisation d'un projet que les résultats des essais effectués soit en concordance avec les matériaux utilisé et l'ouvrage lui-même, afin d'assurer un bon fonctionnement de ce dernier.

Notre travail se présente en quatre chapitres et une annexe organisé comme suit:

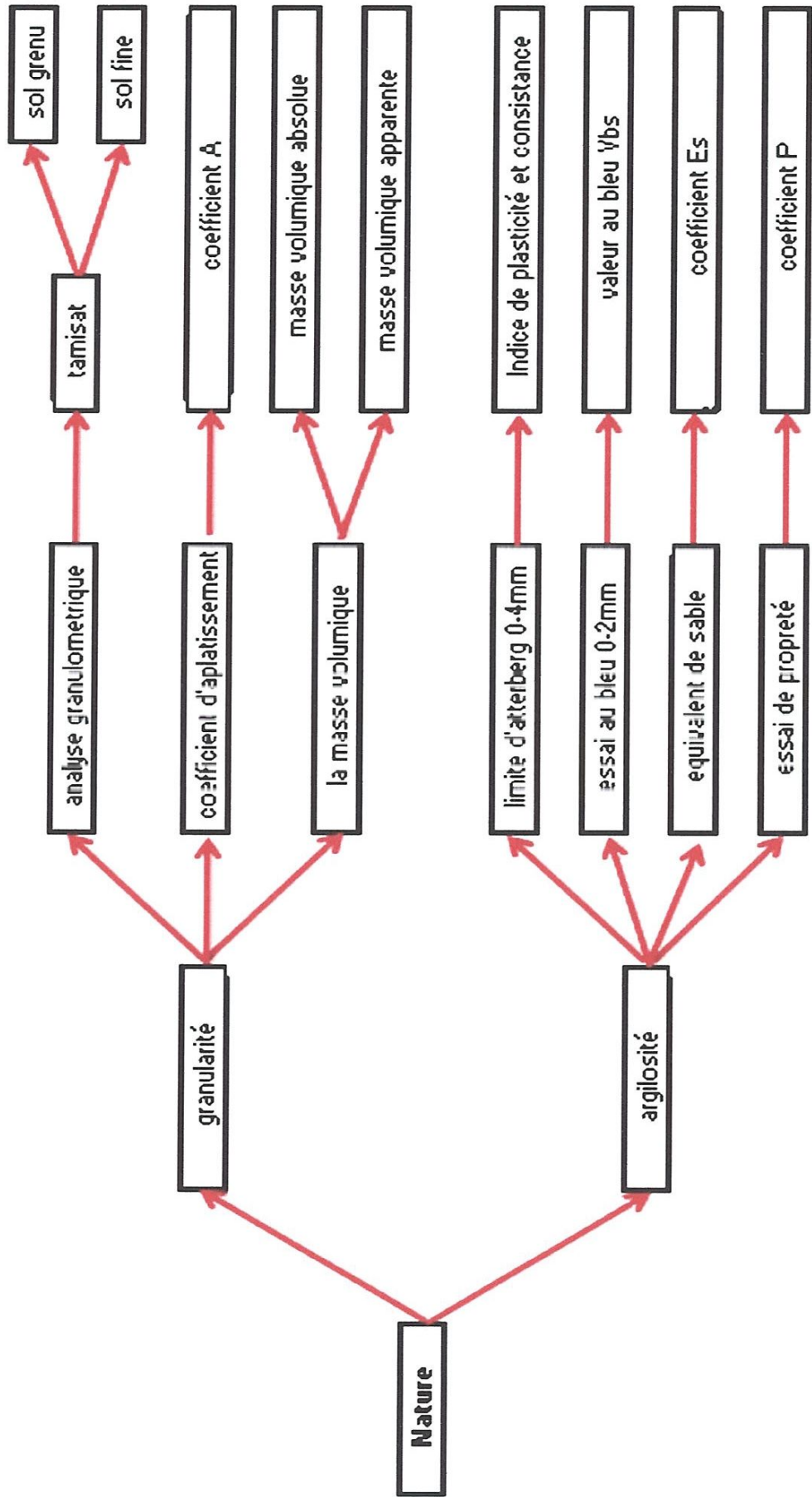
Le premier chapitre a pour objet d'identifier la nature du matériau et de donner des renseignements sur son comportement physique (forme et propreté).

Le chapitre deux regroupe les essais de mesure de la résistance à la fragmentation et la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. L'essai d'amélioration du comportement mécanique (teneur en eau optimum), l'essai de caractérisation du liant bitume (pénétration, point de ramollissement et teneur en bitume) et l'essai de détermination de la résistance du matériau enrobé (essai Marshall), font l'objet du troisième chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous présentons deux applications pratiques, basées sur les essais définies aux chapitres précédents. Dans la première application, nous présentons la méthode d'identification d'un matériau granulaire (tout venant naturel) et dans la seconde, une approche très utilisée dans les laboratoires (étude de formulation d'un béton bitumineux) sera exposée.

Ce travail, termine par l'exposé des essais in situ pour la vérification de la qualité des matériaux mises en place dans un projet de route (essai Gamma densimètre et essai chargement à la plaque), avec une application pratique sur le matériau T.V.N.

CHAPITRE I : CLASSIFICATION SELON LA NATURE



Essais de Granularité

I-1 Analyse granulométrique

I-1-1 But et domaine d'application

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). Les dimensions d et D sont choisies dans la série suivante :

0 - 0,063 - 0,08 - 0,1 - 0,125 - 0,16 - 0,2 - 0,25 - 0,315 - 0,4 - 0,5 - 0,63 - 0,8 - 1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80

I-1-2 Mode opératoire :

I-1-2-1 Appareillage

- Appareillage spécifique : Bacs, brosses, pinceaux.
- 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 $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- Un dispositif de lavage.
- série des tamis



Figure I-1-1 : Photo d'une tamiseuse électrique.

I-1-2-2 Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions citées en dessus. 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.

I-1-2-3 Exécution de l'essai

I-1-2-3-1 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 maille décroissante.



Figure I-1-2 : Lavage et tamisage de l'échantillon.

I-1-2-3-2 Pesées

- Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : 100 g si $d < 1$ mm, 200 g si d compris entre 1 et 4 mm et 700 g si $d > 4$ mm.
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R_1 la masse de ce refus.
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à R_1 et peser l'ensemble. Soit R_2 la masse des deux refus cumulés.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés $R_3, R_4, \dots, R_i, \dots, R_n$.
- Peser s'il y en a, le tamisât au dernier tamis. Soit T_n sa masse.
- Si après essai, les résultats montrent qu'un (ou plusieurs) tamis a (ont) été surchargé(s), l'essai doit être refait manuellement à partir de ce tamis.

I-1-3 Expression des résultats

I-1-3 -1 Calculs

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

$$\frac{R_i}{M_s} 100 \quad (\text{Eq : I-1})$$

Les pourcentages de tamisât correspondants sont égaux à

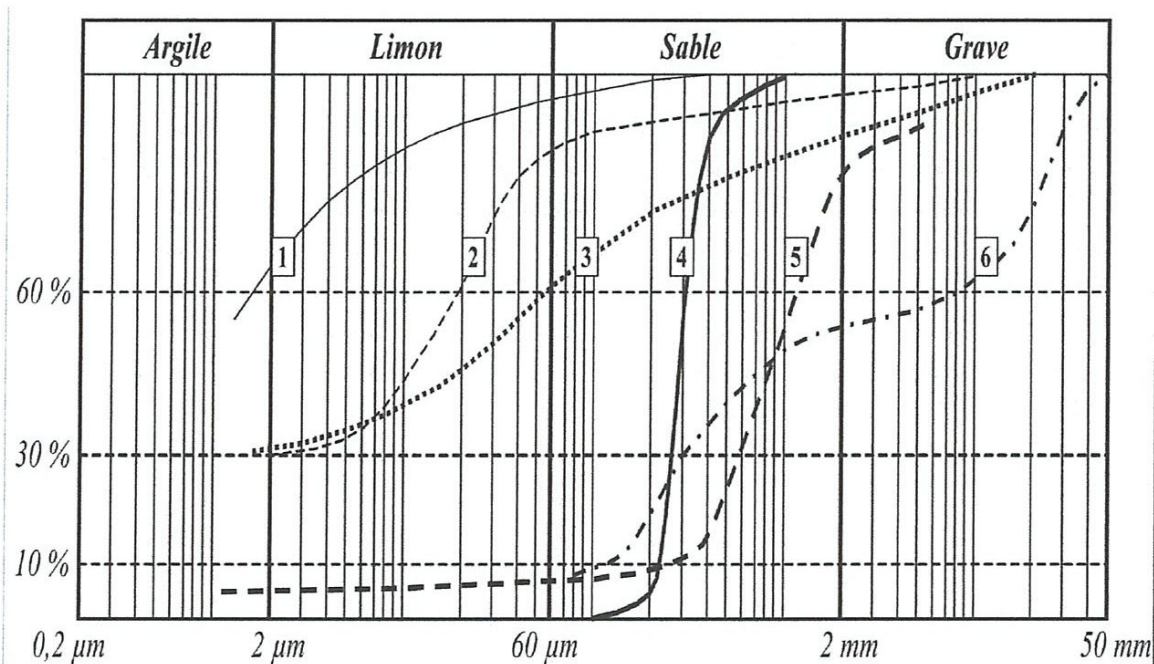
$$100 - \frac{R_i}{M_s} 100 \quad (\text{Eq : I-2})$$

I-1-3 -2 Présentation des résultats

Les pourcentages de tamisats 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 : il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats 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.



	d_{10}	C_u	C_c	Passant 2 mm	Passant 80 μm	Passant 2 μm
1 - Argile verte de Romainville (94) —	-	-	-	100 %	97 %	65 %
2 - Limon des plateaux (Beauce, 78) ----	-	-	-	95 %	88 %	30 %
3 - Argile sableuse (Carmaux, 81)	-	-	-	87 %	63 %	32 %
4 - Sable de dunes (Landes, 40) —	220 μm	1,4	1	100 %	0 %	0 %
5 - Sable alluvionnaire (Missillac, 44) --	200 μm	6	1,5	85 %	8 %	5 %
6 - Grave alluvionnaire de la Seine - - -	100 μm	80	0,1	53 %	8 %	?

Figure I-1-3 : Classification normalisé des granulats.

Tableau I-1-1 : Classification des sols grenus.

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS					
(plus de 50 % des éléments > 0,08 mm)					
Définitions		Symboles	Conditions	Appellations	
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre de > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{20} \times D_{40}}$ compris entre 1 et 3	grave propre
			(GW)		bien graduée
	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm		Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre
			(GP)		mal graduée
			GL	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave
			(GM)		limoneuse
		GA	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave	
		(GC)		argileuse	

SABLES	Plus de 50 % des éléments \wedge 0,08 mm ont un diamètre \vee 2 mm	moins de 5 % d'éléments \vee 0,08 mm	Sb (SW)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments \vee 0,08 mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
			SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux
Lorsque 5 % \leq % inférieur à 0,08 mm \leq 12 % \rightarrow on utilise un double symbole.					

Tableau I-1-2 : Classification des sols fins.

CALCIFICATION DES SOLS FINS (Plus de 50% des éléments \lt 0,008 mm)			
Limons et sols organiques	IP \lt 0.73 (LL-20) Et inférieure à 7 Et LL \lt 30	LL \lt 50	Limons Peu plastiques
		LL \gt 50	Limons très plastiques
Argiles	IP \gt 0.73 (LL-20) Et inférieure à 7 Et LL \lt 30	LL \lt 50	Argiles Peu plastiques
		LL \gt 50	Argiles très plastiques

I-2 Essai pour la détermination du Coefficient d'aplatissement

I-2-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm. Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du génie civil.

L'essai consiste à effectuer un double tamisage : Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosseur G.

Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $\frac{d}{1.58}$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage. Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

I-2-2 Mode opératoire

I-2-2-1 Appareillage

I-2-2-1-1 Appareillage d'usage courant

-La détermination des classes granulaires s'effectue sur les tamis à mailles carrées utilisés pour l'analyse granulométrique. On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de : 50 - 40 - 31,5 - 25 - 20 - 16 - 14 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 et 4 mm.

-Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on utilise une série de grilles, constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré. Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de : 31,5 - 25 - 20 - 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 et 2,5 mm.

Pour chaque grille, l'ouverture des fentes ainsi définies doivent satisfaire aux conditions suivantes ; il ne doit pas y avoir plus de 10 % de la longueur totale des fentes dont l'écartement diffère de 0,25 mm de l'écartement nominal. En aucun point des fentes, la largeur de fente ne doit s'écarter de 0,5 mm de la dimension nominale.

I-2-2-2 Préparation de l'échantillon pour essai

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2D$, avec M exprimé en kilogrammes et D , plus grande dimension spécifiée, exprimé en millimètres. L'échantillon est passé sur un tamis de 4 mm, soit M_0 la masse du refus.

I-2-2-3 Exécution de l'essai

- **Tamissage sur tamis à mailles carrées :**

Procéder au tamissage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis. Recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire.

- **Tamissage sur grilles à fentes :**

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Tableau I-2-1 : Classe granulaire en fonction de l'écartement E
(Dimensions en Millimètres).

Classe granulaire d/D	Écartement E
> 50	31,5
40 - 50	25
31,5 - 40	20
25 - 31,5	16
20 - 25	12,5
16 - 20	10
12,5 - 16(1)	8
10 - 12,5	6,3
8 - 10	5
6,3 - 8	4
5 - 6,3	3,15
4 - 5	2,5

(1) Ou 14 pour le 10 - 14 mm.

Le tamissage sur les grilles se fait manuellement. Peser le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/D.

I-2-3 Expressions des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai dont un exemple est donné en annexe A. Les notations suivantes sont utilisées :

Mg = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

M = $\sum Mg$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à Mo mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

Me = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par le tableau du paragraphe au dessus.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$\frac{M_e}{M_g} 100 \quad (\text{Eq : I-2-1})$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\sum M_e}{M} 100 \quad (\text{Eq : I-2-2})$$

Tableau I-2-2 : Caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	Spécifications	
	PL-MJA < 150	PL-MJA ≥ 150
Coefficient d'aplatissement	≤ 30	≤ 25

I-3 Essai pour la détermination de la masse volumique

I-3-1 Objet et but de l'essai

La masse volumique d'un corps se définit comme étant le rapport de la masse d'un volume donné. Comme on distingue volume absolue et volume apparent, il faut aussi distinguer de même masse volumique absolue et masse volumique apparente.

I-3-1-1 Masse volumique absolue

I-3-1-1-1 Mode opératoire

- **Appareillage d'usage courant**

Pycnomètre de 50 cm³ à 100 cm³ de capacité, Balance, Dessiccateur, Thermostat, Agitateur. Etuve ventilée réglée à 105°C ± 5°C. Eau distillée ou déminéralisée.



Figure I-3-1 : Balance.

- **Matériau soumis à l'essai**

Isoler 50 g à travers un tamis de 0,080 mm, puis les sécher à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 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 plus de 0,1%.

- **Exécution de l'essai**

Peser le pycnomètre, muni de son bouchon, soit M_p sa masse.

Introduire la prise d'essai dans le pycnomètre, peser à nouveau, soit M' cette masse. La masse de la prise d'essai est la suivante : $M = M' - M_p$.

Ajouter dans le pycnomètre de l'eau distillée jusqu'aux $2/3$ de sa hauteur. Agiter pendant 1 h. Mettre le pycnomètre sous vide, tout en l'agitant pendant 1 h (table vibrante ou barreau magnétique). Laisser reposer quelques heures pour que le liquide surnageant ne présente qu'un léger trouble. Compléter lentement le remplissage du pycnomètre, poser le bouchon et éliminer le liquide en trop. Placer le pycnomètre dans le thermostat réglé de 2°C à $5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la température ambiante. Quand il n'y a plus de liquide qui s'échappe du capillaire, sortir le pycnomètre et l'essuyer soigneusement. Peser le pycnomètre, soit M_1 cette masse.

Vider le pycnomètre, le nettoyer, le sécher, le remplir avec de l'eau distillée, selon le processus précédent. Peser cette masse, soit M_2 .

Soit ρ la masse volumique de l'eau distillée à la température du thermostat, en tonnes par mètre cube (voir tableau I-3-1).

I-3-1-1-2 Expression des résultats

La masse volumique absolue ρ_a exprimée en tonnes par mètre cube est donnée par la formule :

$$\rho_a = \frac{M}{M_1 + M_2 - M_1} \rho \quad (\text{Eq : I-3-1})$$

Effectuer trois mesures psychométriques sur l'échantillon. Le résultat de la masse volumique du matériau soumis à l'essai est la moyenne des résultats obtenus sur les trois mesures.

Tableau I-3-1 : masse volumique de l'eau en fonction de la température.

Température °C	Masse volumique t/m ³
15 à 16	0,999
17 à 21	0,998
22 à 25	0,997
26 à 29	0,996
30	0,995

I-3-1-2 Masse volumique apparente**I-3-1-2-1 Mode opératoire**

- prendre le granulat dans les deux mains formant entonnoir.
- peser le récipient vide soit P1
- remplir le récipient de volume connu (volume apparent) jusqu'à ce qu'il déborde tout autour on formant un cône.
- arasé au régule.
- peser le contenu, soit P2

I-3-1-2-2 Expression des résultats

La masse volumique apparente ρ exprimée en tonnes par mètre cube est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{\text{volume apparent}} \quad (\text{Eq : I-3-2})$$

Effectuer trois mesures psychométriques sur l'échantillon. Le résultat de la masse volumique apparent du matériau soumis à l'essai est la moyenne des résultats obtenus sur les trois mesures.

Essais d'Argilosité

I-4 Essai pour la détermination de l'équivalent de sable

I-4-1 Objet et but de l'essai

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée. Le présent essai a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée «équivalent de sable» et de fixer la méthode permettant de déterminer cette caractéristique.

I-4-2 Mode opératoire

I-4-2-1 Appareillage et produits utilisés

- **Appareillage d'usage courant**

- Tamis de 5mm d'ouverture de mailles avec fond.
- Spatule et cuillère.
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200 ml.
- 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 %.
- Chronomètre donnant la seconde.
- Regel 500mm gradué en millimétré.
- Goupillon pour le nettoyage des éprouvettes.
- Bacs pour tamisage.
- Éprouvettes cylindriques et transparentes en matière plastique
- L'éprouvette est fermée par un bouchon de caoutchouc
- Un piston taré
- un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique
- une machine d'agitation, manuelle ou électrique, capable d'imprimer à

l'éprouvette un mouvement horizontal, rectiligne et périodique de $20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ d'amplitude et de période $1/3$ seconde.

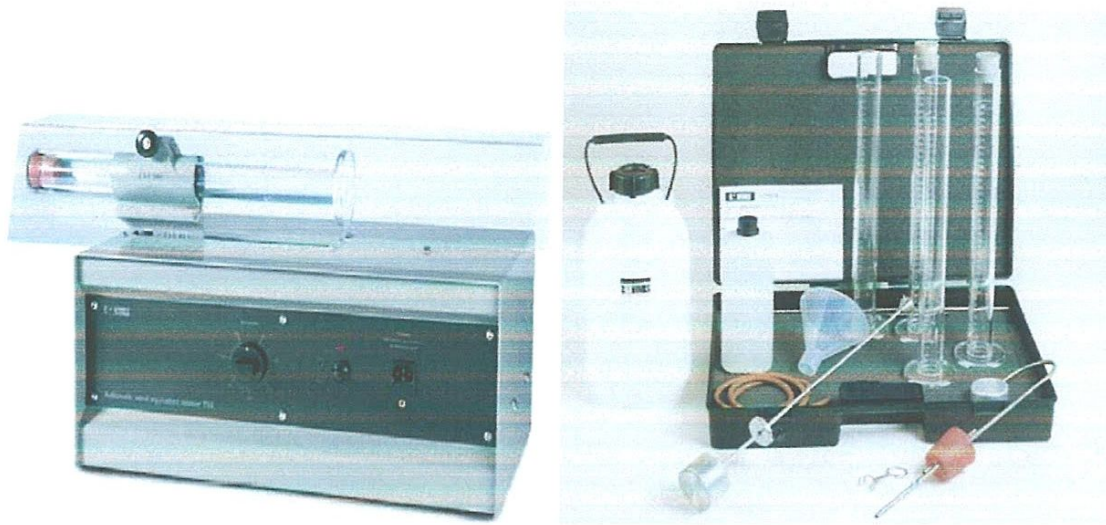


Figure I-4-1 : Appareillage utilisé dans l'essai équivalent de sable.

- **Produits utilisés**

- **Solution concentrée**

La préparation de la solution concentrée s'effectue à partir :

- de chlorure de calcium cristallisé, qualité produit pur,
- de glycérine à 99 % de glycérol, qualité pharmaceutique,
- de formaldéhyde en solution à 40 % en volume, qualité pharmaceutique,
- d'eau distillée ou déminéralisée.

Préparer un litre de solution concentrée avec :

- $111 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de chlorure de calcium anhydre,
- $480 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de glycérine,
- 12 à 13 g de la solution de formaldéhyde.

Il est recommandé de stocker la solution concentrée dans des flacons en matière plastique contenant $125 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$, pour des raisons de commodité d'emploi et de meilleure conservation de cette solution.

- **Solution lavant**

La solution lavant est préparée, en prenant $125 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$ de la solution concentrée et en diluant à $5 \text{ l} \pm 0,005 \text{ l}$ avec de l'eau distillée.

Pour la préparation de la solution lavant, à partir de la solution concentrée,

on peut se contenter sur les chantiers d'eau déminéralisée au lieu d'eau distillée et même d'eau potable. Remplacer la solution lavant au bout d'un mois, ou avant si un léger dépôt ou des troubles apparaissent. En outre, rincer et nettoyer à l'eau distillée la bonbonne de 5 l à chaque remplissage. Le mélange est vigoureusement agité avant utilisation. Dans le cas où la solution concentrée est stockée dans un flacon de 125 ml, rincer plusieurs fois le flacon et verser les eaux de rinçage dans le flacon de 5 l avant de diluer le contenu de ce dernier à 5l.

I-4-2-2 Préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions exigées. Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g. Si l'échantillon pour laboratoire n'est pas humide, l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines et la ségrégation. Sur celui-ci, procéder à la préparation d'un échantillon pour la détermination de la teneur en eau w et de deux échantillons pour essai. L'essai s'effectue sur le sable à sa teneur en eau naturelle, la masse sèche de l'échantillon pour essai doit être de 120 g

I-4-2-3 Exécution de l'essai

- **Mise en place de la première prise d'essai**

La solution lavant ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement. Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.

Laisser reposer dix minutes.

- **Agitation de l'éprouvette**

À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.

Faire subir à l'éprouvette $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycle}$ en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.



Figure I-4-2 : Agitation de l'éprouvette.

- **Lavage**

Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant. En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincé les parois de l'éprouvette avec la solution lavant, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette. Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

- **Mesures**

Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$. Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Mesurer également la hauteur h'_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette. Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette. Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.

Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir les hauteurs h_1 , h'_2 et h_2 au millimètre le plus voisin.

- Deuxièmes prises d'essai

Recommencer les mêmes opérations.

I-4-3 Expression des résultats

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$E_S = 100 \frac{h_2}{h_1} \quad (\text{Eq : I-4-2})$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_S = 100 \frac{h'_2}{h_1} \quad (\text{Eq : I-4-3})$$

Ces résultats sont donnés avec une décimale. La détermination portant sur deux échantillons, la propreté du sable est la moyenne des deux valeurs obtenues. La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

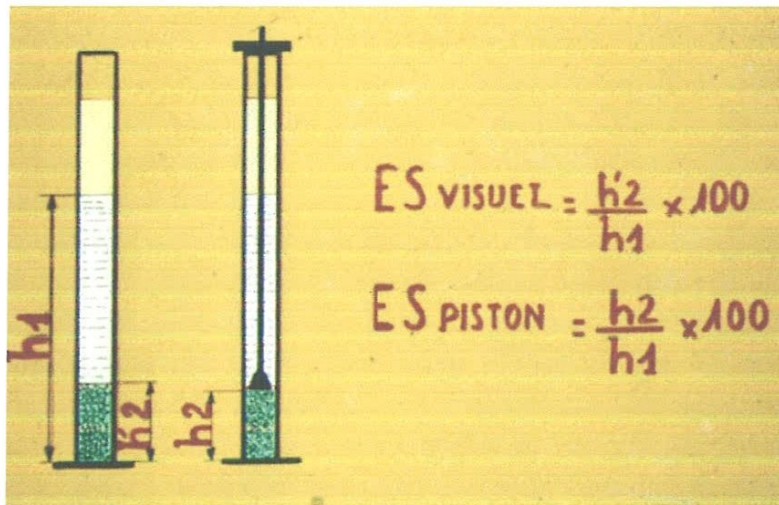


Figure I-4-3 : Mesure et calcul des résultats.

Tableau I-4-1 : caractéristiques du sable.

Caractéristiques	Spécifications		Analyse granulométrique	
	PL-MJA < 150	PL-MJA ≥ 150	Tamis	Spécifications
Équivalent de Sable (%)	≥ 60	≥ 60	5	100

Tableau I-4-1 : Valeur préconisées pour l'équivalent de sable.

Es	signification
0-20	Non significatif
20-30	médiocre
30-45	passable
45-60	moyen
60-80	propre
80-100	Très propre

I-5 Essai de propreté

I-5-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm.

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm (ou 1,6 mm pour les ballasts) mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

I-5-2 Mode opératoire

I-5-2-1 appareillage

- Tamis de 0,5 mm ou 1,6 mm.
- Éventuellement un tamis de décharge.
- 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 %.

**Figure I-5-1** : Balance.

I-5-2-2 Préparation de l'échantillon pour essai

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. Étuve ventilée réglée à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

I-5-2-3 Exécution de l'essai

Préparer deux échantillons à partir de l'échantillon pour laboratoire : l'un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai, l'autre de masse M_h pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à $0,5 \text{ mm}$ ou $1,6 \text{ mm}$ pour le ballast.

I-5-2-4 Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai

Peser les deux échantillons M_{1h} et M_h .

- Sécher le premier échantillon M_h à l'étuve à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 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.

- Le peser, soit M_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche M_s de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h \quad (\text{Eq : I-5-1})$$

I-5-2-5 Détermination de la masse sèche des éléments inférieurs à $0,5 \text{ mm}$ ou $1,6 \text{ mm}$

Effectuer l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant essai.

- Tamiser sous eau l'échantillon M_h sur le tamis de $0,5 \text{ mm}$ ou $1,6 \text{ mm}$ pour le ballast jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.

Récupérer le refus et le sécher à l'étuve à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Le tamiser à nouveau sur le tamis de $0,5 \text{ mm}$ ou $1,6 \text{ mm}$ pour le ballast pendant une minute et le peser, soit m' sa masse sèche.

La masse sèche m des éléments inférieurs à $0,5 \text{ mm}$ ou $1,6 \text{ mm}$ pour le ballast est égale à :

$$m = M_s - m' \quad (\text{Eq : I-5-2})$$

I-5-3 Expression des résultats

La propreté superficielle est donnée par :

$$P = \frac{m}{M_s} 100 \quad (\text{Eq : I-5-3})$$

Tableau I-5-1 : caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	Spécifications		Analyse granulométrique			
	PL-MJA < 150	PL-MJA ≥ 150	Tamis	3/8	8/15	15/25
	Propreté superficielle	≤ 3	≤ 2	5	–	≤ 3

I-6- Essai au bleu**I-6-1 Objet et but de l'essai**

Le présent essai décrit une méthode d'essai permettant de déterminer la valeur de bleu de méthylène de la fraction 0/2 mm dans les sables ou le tout-venant (MB).

Des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

I-6-2 Mode opératoire**I-6-2-1 Appareillage**

- **Burette**, d'une capacité de 100 ml ou de 50 ml et graduée en 1/10 ml ou 1/5 ml ou deux micropipettes, de 5 ml et 2 ml.
- **Papier-filtre**, quantitatif et sans cendres (< 0,010 %) ; 95 g/m² ; épaisseur 0,20 mm ; vitesse de filtration 75 secondes ; taille des pores : 8 μm.
- **Tige de verre**, longueur : 300 mm ; diamètre : 8 mm
- **Agitateur** à ailettes, capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre (600 ± 60) tr/min avec 3 ou 4 ailettes de (75 ± 10) mm de diamètre.
- **Balance**, précise à 0,1 % de la masse de la prise d'essai.
- **Chronomètre**, gradué en secondes.
- **Tamis**, avec des ouvertures de 2 mm avec tamis de protection (si nécessaire).

- **Bécher**, en verre ou en plastique, d'une capacité d'environ 1 l à 2 l.
- **Fiole** en verre d'une capacité de 1 l.
- **Étuve ventilée**, thermostat pour maintenir une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- **Thermomètre** gradué en degré Celsius.
- **Spatule**.
- **Dessiccateur**.



Figure I-6-1 : Appareillage utilisé dans l'essai bleu méthylène.

I-6-2-2 Exécution de l'essai

- **Préparation des prises d'essai**

Sécher le sous-échantillon à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante et le laisser refroidir. Passer le sous-échantillon séché au tamis de 2 mm, muni le cas échéant, du tamis de protection et utiliser une brosse à tamis pour s'assurer de la séparation et de la récupération de toutes les particules de la fraction 0/2 mm. Éliminer toutes les particules retenues au tamis de 2 mm et, si nécessaire, réduire la fraction passant au tamis de 2 mm pour obtenir une prise d'essai d'une masse d'au moins 200 g. La masse de la prise doit dépasser 200 g mais pas d'une valeur exacte prédéterminée. Peser la prise d'essai et noter la masse au gramme près (M_1).

- **Description du test à la tache**

Après chaque injection de colorant, le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre. La tache qui se

forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleue foncée, entouré d'une zone humide incolore. La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm

Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleue claire persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central.

NOTE L'auréole sera visible à l'approche du point final mais peut disparaître à nouveau, en raison du temps nécessaire aux matériaux argileux pour adsorber complètement le colorant. C'est la raison pour laquelle le point final doit être confirmé en répétant le test à la tache toutes les minutes pendant 5 min sans ajout de solution de colorant

• Préparation de la suspension

Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter la prise d'essai séchée en remuant bien avec la spatule. Agiter la solution de colorant (- Solution colorée de bleu de méthylène de qualité ordinaire ou technique à $(10 \pm 0,1)$ g/l. La durée maximale d'utilisation de la solution doit être de 28 jours. Elle doit être conservée à l'abri de la lumière) ou bien la mélanger uniformément. Remplir la burette de solution colorée et placer la solution restante dans un endroit sombre. Régler l'agitateur sur la vitesse de 600 tr/min et positionner les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher. Mettre en marche l'agitateur et déclencher le chronomètre, agiter le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min, puis agiter continuellement à (400 ± 40) tr/min pendant la poursuite de l'essai. Si la quantité de fines présentes dans la prise d'essai ne permet pas d'obtenir une auréole, il convient d'ajouter la kaolinite avec un supplément de solution colorée, comme suit :

- ajouter dans le bécher $(30,0 \pm 0,1)$ g de kaolinite (- Kaolinite, de valeur de bleu de méthylène connue (MBK)), séchée à (110 ± 5) °C à masse constante
- ajouter V' ml de solution colorée dans le bécher où $V' = 30 \text{ MBK}$, est le volume de solution colorée adsorbée par 30 g de kaolinite.

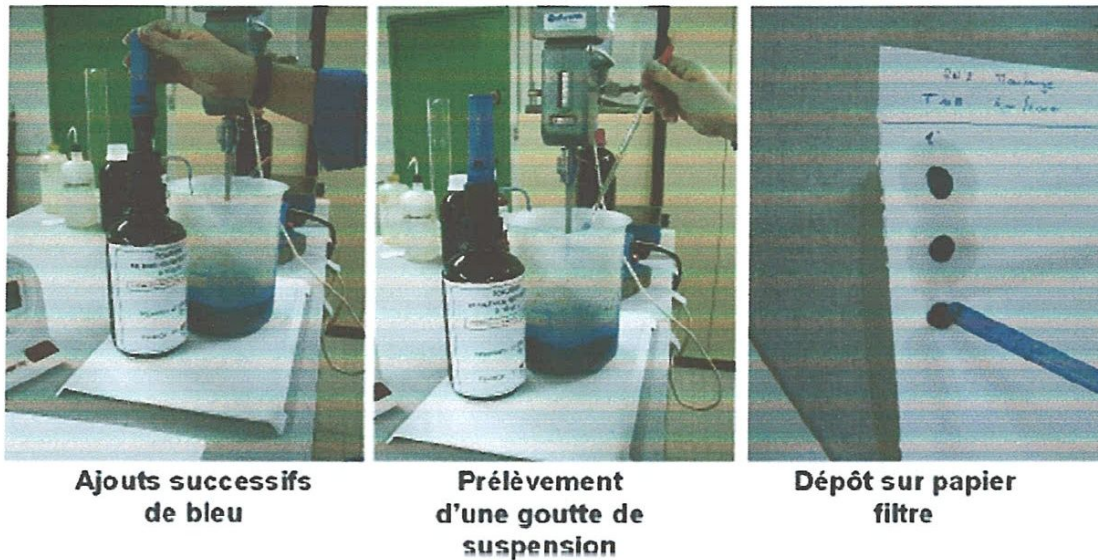


Figure I-6-2 : Exécution de l'essai bleu méthylène.

- **Détermination de la quantité de colorant adsorbée**

Poser le papier-filtre sur le dessus d'un béccher, ou d'un autre support approprié, de façon à ce que la plus grande partie de sa surface ne soit pas en contact avec du solide ou du liquide. Après une agitation de 5 min à (600 ± 60) tr/min, introduire dans le béccher une dose de 5 ml de solution de colorant; agiter à (400 ± 40) tr/min pendant au moins 1 min et effectuer un test à la tache sur le papier filtre. Si après l'ajout des premiers 5 ml de solution de colorant l'auréole n'apparaît pas, effectuer une autre addition de 5 ml de solution de colorant, continuer à agiter pendant 1 min, et faire un autre test à la tache. Si aucune auréole n'est visible, continuer à agiter, en alternant les ajouts de colorants et les périodes de mélange jusqu'à apparition d'une auréole. Lorsque ce stade est atteint, continuer à agiter et sans autre ajout de solution de colorant, effectuer des tests à la tache toutes les minutes. Si l'auréole disparaît durant les quatre premières minutes, ajouter une autre dose de 5 ml de solution de colorant. Si l'auréole disparaît à la cinquième minute, ajouté seulement 2 ml de solution de colorant. Dans tous les cas, continuer l'agitation et les tests à la tache jusqu'à ce qu'une auréole reste visible pendant 5 min. Enregistrer le volume total de solution de colorant, V_1 , ajouté pour obtenir une auréole qui est restée visible pendant 5 min, à 1 ml près.

Note il convient de nettoyer les récipients précautionneusement avec de l'eau dès que les essais sont finis. Il convient d'éliminer toutes les traces de détergent utilisé pour nettoyer par un rinçage soigneux. Il est recommandé que les récipients utilisés pour l'essai au bleu

de méthylène soient réservés spécifiquement à cet essai

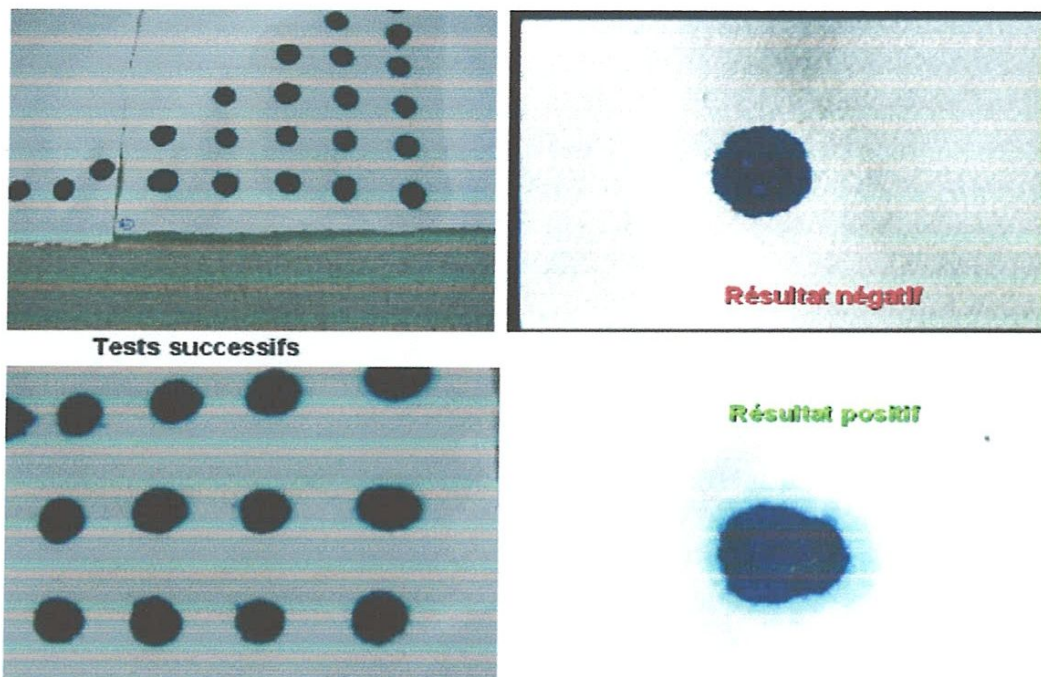


Figure I 6 3 : résultat du test.

I-6-3 Expression des résultats

La valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$MB = \frac{V_1}{M_1} 10 \quad (\text{Eq : I-6-1})$$

où :

M_1 est la masse de la prise d'essai, en grammes ;

V_1 est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres

Tableau I-6-1 : caractéristiques du sable.

Caractéristiques	Spécifications		Analyse granulométrique	
	PL-MJA < 150	PL-MJA ≥ 150	Tamis	Spécifications
Valeur au bleu de méthylène VB (g/Kg)	≤ 1	≤ 1	0,08	10-22

Tableau I-6-2 : Valeur préconisées pour bleu méthylène.

VBs	Signification
0-0.1	Sol insensible à l'eau
0.1-0.2	Sensible à l'eau à vérifier
0.2-1.5	Sol sensible à l'eau Sol sable-limoneux
1.5-2.5	Limons peu plastiques Sable-argileux Graves-argileuses
2.5-6	Sable fine argileuses Limons Limons Très plastiques
6-8	Argiles
>8	Argiles Très plastiques

I-7 Essai pour la détermination des Limites d'Atterberg

I-7-1 Objet et but de l'essai

Cet essai destiné à la détermination des deux limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 µm.

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance.

Limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) : Teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

WL - limite de liquidité : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

WP - limite de plasticité : Teneur en eau d'un soi remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

IP - indice de plasticité : Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique (voir Figure I-7-1).

$$I_p = W_L - W_P \quad (\text{Eq : I-7-1})$$

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

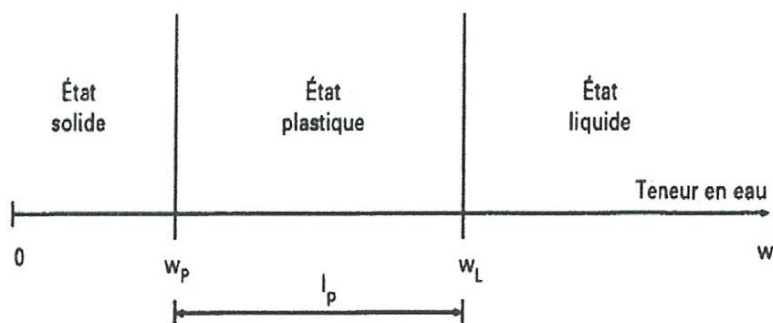


Figure I-7-1 : Représentation des limites d'Atterberg.

I_C indice de consistance : Rapport défini par la formule suivante :

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P} \quad (\text{Eq : I-7-2})$$

w est la teneur en eau du sol dans son état naturel et ne comportant pas d'éléments supérieurs à 400 μm .

Principe de détermination des limites d'Atterberg L'essai s'effectue en deux phases :

- recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure

I-7-2 Mode opératoire

I-7-2 -1 Appareillage

Le matériel nécessaire à la préparation du sol est distingué du matériel utilisé pour la détermination des limites. Matériel pour la préparation du sol

- un récipient d'au moins 2 l,
- un bac de dimensions minimales en centimètres 30*20*8
- un tamis à maille carrée de 400 μm d'ouverture.
- Un appareil de Casagrande



Figure I-7-2 : Appareil de Casagrande.

Matériel pour la détermination de la limite de plasticité :

- une plaque lisse en marbre ou en matériau équivalent pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol,
- des capsules ou boîtes de pétri, des spatules,
- une balance et une étuve

Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement.

I-7-2 -2 Préparation du sol

Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage, une masse de matériau m est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24 h. Cette masse m , exprimée en grammes, elle doit être telle que le tamisât au tamis de 400 μm donne au moins 200 g de particules solides. Après une durée de décantation d'au moins 12 h, sans aucun additif destiné à accélérer le dépôt ni sans utilisation d'un procédé quelconque de centrifugation, l'eau claire du bac est siphonnée sans entraîner de particules solides. L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50 °C.

I-7-2 -3 Détermination de la limite de liquidité

❖ Contrôle du fonctionnement de l'appareil

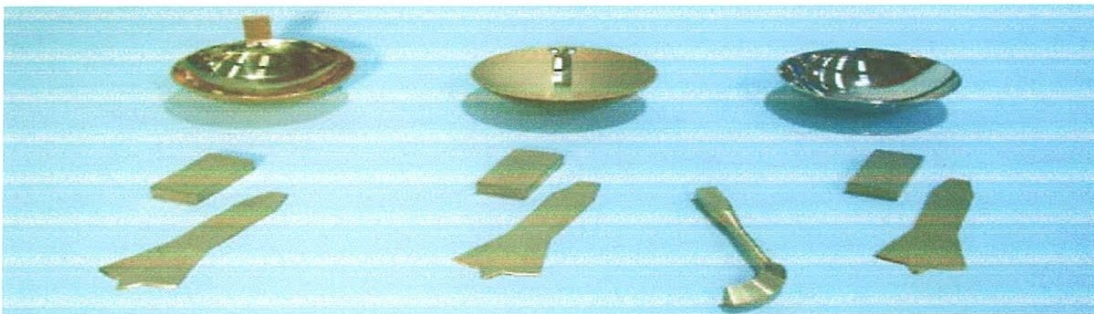


Figure I-7-3 : Outils à rainurer.

- la hauteur de chute de la coupelle est de 10 mm.

Le réglage se fait à l'aide d'une cale de contrôle de 10 mm d'épaisseur. Si nécessaire la plaque coulissante de l'appareil de Casagrande 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.

❖ Préparation de l'échantillon du sol soumis à l'essai

La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

❖ Réalisation de l'essai

Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ 70 g de pâte. Cette pâte étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique. La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d'environ 3 cm et son épaisseur, de l'ordre de 15 à 20 mm. Partager la pâte en deux, au moyen de l'outil à rainurer, en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle et en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement. Comme représenté sur la figure I-7-4.



Figure I-7-4 : Remplissage de la coupelle et réalisation de la rainure.

Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande.

Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à la cadence de 2 coups par seconde ($2 \pm 0,25$) coups par seconde en cas d'utilisation d'un moteur).

Noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se

rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm comme représenté sur la Figure I-7-5.

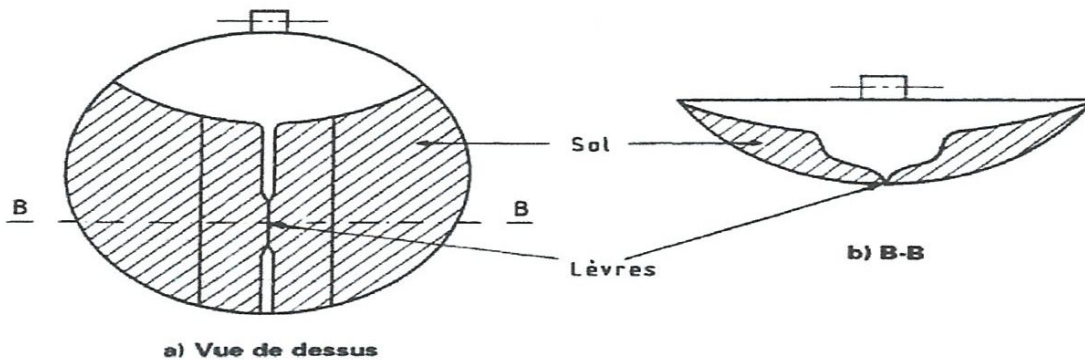


Figure I-7-5 : Fermeture de la rainure.

La fermeture de la rainure doit se produire par affaissement de la pâte dans sa masse et non par glissement sur la paroi de la coupelle. La coupelle rugueuse a pour but d'éviter ce glissement. Elle doit être employée lorsque le phénomène se produit (avec les pâtes sableuses par exemple). Si N est inférieur à 15, le processus est recommencé avec un matériau plus sec et homogénéisé à nouveau (le séchage peut, éventuellement, être accéléré par un malaxage sous flux d'air chaud à une température inférieure à 50°C).

Si N est supérieur à 35, l'opération est renouvelée sur un prélèvement de pâte auquel a été ajouté un peu d'eau distillée ou déminéralisée. L'essai n'est poursuivi que lorsque N est compris entre 15 et 35. Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, environ 5g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées, afin d'en déterminer la teneur en eau. Le prélèvement est placé dans une capsule ou boîte de Pétri de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccation.

I-7-2 -4 Détermination de la limite de plasticité

Former une boulette à partir de la pâte préparée. Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre.

si l'écart de teneur en eau entre la valeur mesurée et 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 WL est obtenue pour une valeur N égale à 25.

I-7-3-2 Limite de plasticité

La limite de plasticité WP est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm ± 0.5 mm. 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. Si les valeurs s'écartent de plus de 2 % de la valeur moyenne, un nouvel essai est à effectuer.

I-7-3-3 Indice de plasticité

IP est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité :

$$IP = WL - WP \quad (\text{Eq : I-7-1})$$

Tableau I-7-1 : Classification du sol en fonction de IP .

0	12	25	40
Faiblement argileux	Moyennement argileux	Argileux	Très argileux

Tableau I-7-1 : Etat de sol selon Ic

Etat solide	Etat plastique	Etat liquide
Ic > 1	0 < Ic < 1	Ic < 1

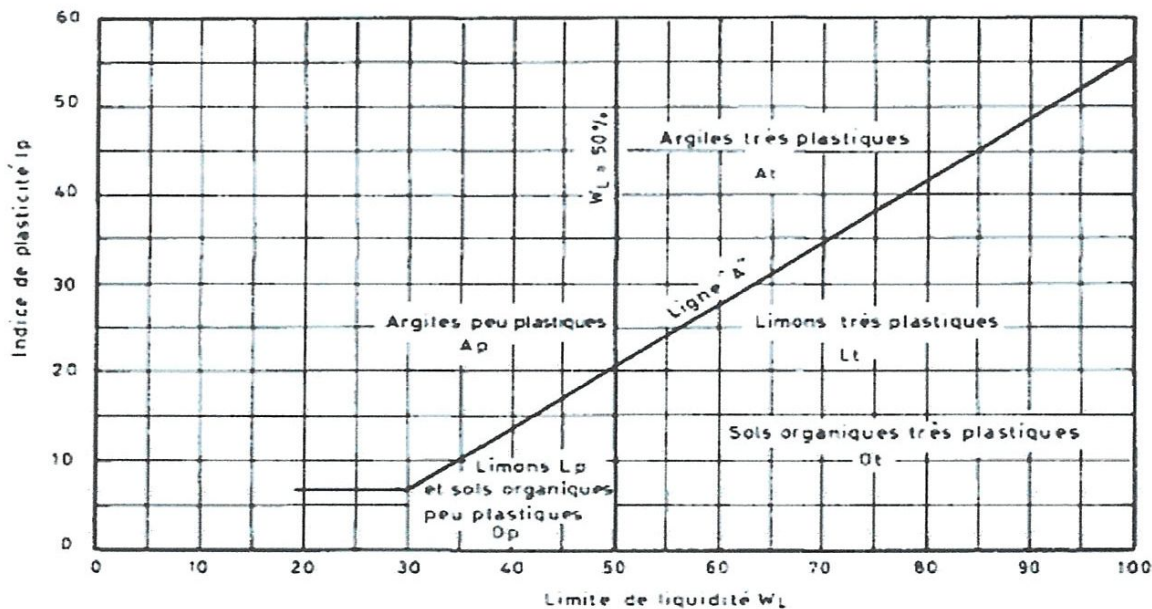
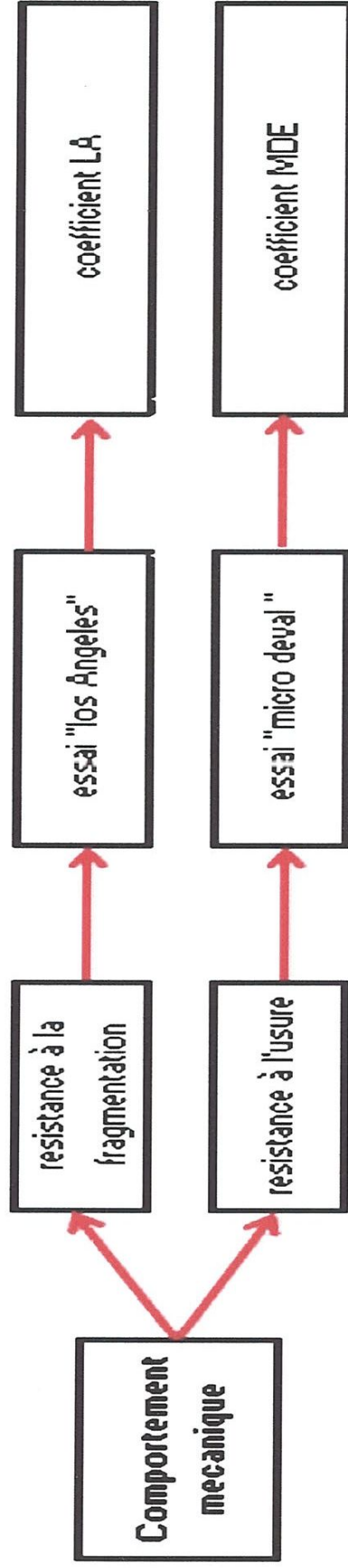


Figure I-7-7 : Classification des sols (diagramme de plasticité).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE



II-1 Résistance à la fragmentation « essai Los Angeles »

II-1-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai a pour objet de définir le mode opératoire pour la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

II-1-2 Mode opératoire

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles, telle qu'elle est décrite dans la présente norme.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires 4 0,3 mm ; 0,3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; 16-31,5 mm ; 25-50 mm, de la granularité du matériau, tel qu'il sera mis en œuvre. La classe 10-25 mm doit contenir 60 % de 10-16 mm, la classe 16-31,5 mm 60 % de 16-25 mm et la classe 25-50 mm 60 % de 25-40 mm. La masse de la charge de boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M est la masse du matériau soumise à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$100 \frac{m}{M}$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau (LA).

II-1-2-1 Appareillage

• Appareillage d'usage courant

-Tamis de 1,6-4-6,3-10-14-16-20-25-31,5-40 et 50 mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm. Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage.

La machine Los Angeles comporte :

-Un cylindre creux en acier de 12 mm \pm 0,5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités.

-Charge de boulets : la charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm \pm 1 mm de diamètre et pesant entre 420 et 445 g, en acier Z 30 C 13.

Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière.

Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tr/min.

Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.

Un compte-tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

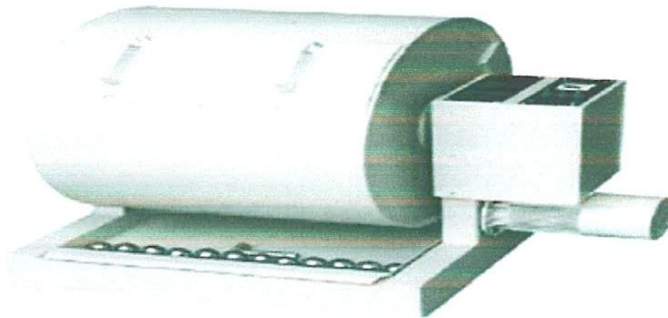


Figure II-1-1: Machine Los Angeles

II-1-2-2 Matériau soumis à l'essai

•Prise d'échantillon

La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire sera au moins égale à 15 kg.

•Préparation de l'échantillon pour essai

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105 °C, 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 %. La masse de l'échantillon pour essai sera de 5 000 g ± 5 g.

II-1-2-2 Exécution de l'essai

Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

Tableau II-1-1 : Masse de boulets correspondant à la classe granulaire.

Classe Granulaires mm	Nombre de boulets	Masse totale de charge g
4 - 6,3 6.3 - 10 10 - 14	7 9 11	+ 20 à -150
10 - 25 16 - 31.5 25- - 50	11 12 12	+ 20 à -150

Faire effectuer à la machine 500 rotations, à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33 tr/min.

Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau. Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

Laver le refus au tamis de 1,6 mm. Égoutter et sécher à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante. Peser ce refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée.

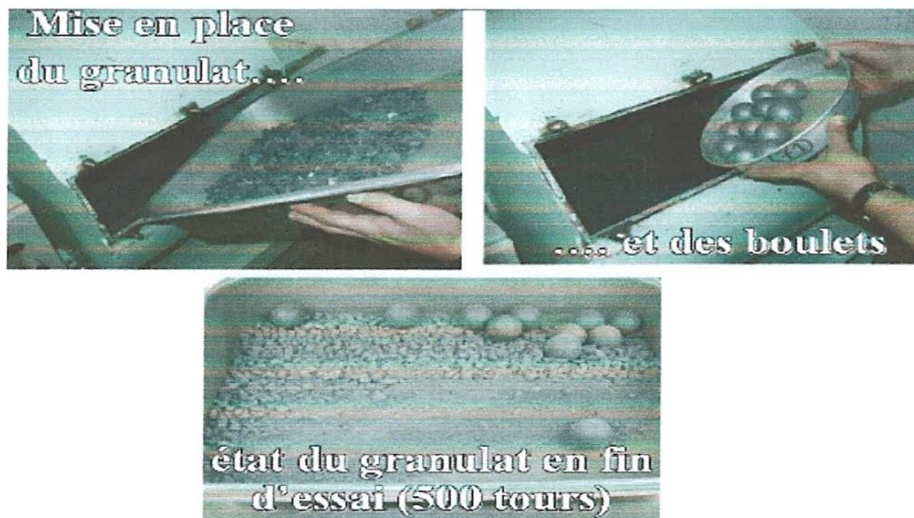


Figure II-1-2: Exécution de l'essai

II-3 Expression des résultats

Le coefficient Los Angeles (L_A) est, par définition, le rapport

$$100 \frac{m}{5000} \quad (\text{Eq : II-1-1})$$

Où :

$m = 5000 - m'$; est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en grammes.

Tableau II-1-2 : Caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	Spécifications	
	PL-MJA < 150	PL-MJA ≥ 150
Coefficient Los Angeles	≤ 30	≤ 25

II-2 Résistance à l'usure « Essai Micro Deval »

II-2-1 Objet et but de l'essai

Le présent document a pour objet de définir le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats.

L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau. L'essai consiste à mesurer l'usure des granulats produite par frottements réciproques dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires: 4-6,3 mm, 6,3-10 mm, 10-14 mm et 25-50 mm.

Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm une charge abrasive est utilisée. Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité : $100 \frac{m}{M}$

Par définition, cette quantité sans dimension, est appelée, suivant la méthode employée:

- Coefficient micro-Deval sec du granulat (MDS),
- Coefficient micro-Deval en présence d'eau du granulat (MDE)

II-2-1-2 Mode opératoire

II-2-1-2-1 Appareillage

- **Appareillage d'usage courant**

Jeu de Tamis de 1, 64-6, 3-8-10-14-25-40 et 50 mm, le diamètre des montures ne devant pas être inférieur à 200 mm.

Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage.

L'appareil micro-Deval est conforme aux caractéristiques essentielles suivantes, il comporte un à quatre cylindres creux, fermés à une extrémité. Le contrôle du diamètre des billes peut se faire rapidement en les faisant passer sur deux barreaux parallèles, d'écartement 9,5 mm, ou par pesée de lots de 10 billes usagées dont la masse ne doit pas être inférieure à 34 g.

Un moteur (environ 1 kW) doit assurer aux cylindres une vitesse de rotation régulière de $100 \text{tr/min} \pm 5 \text{tr/min}$. Un dispositif doit permettre d'arrêter automatiquement le moteur à la fin de l'essai.

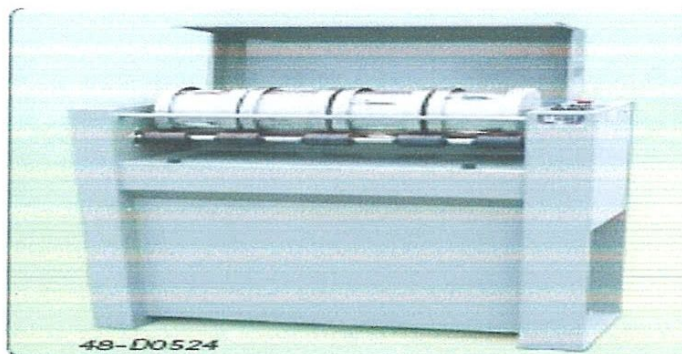


Figure II-2-1: Appareil Micro-Deval

II-2-1-2-2 Préparations de l'échantillon pour essai

- **Prise d'échantillon**

La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire est au moins égale à 2 kg pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm et 40 kg pour les 25-50 mm.

- **Préparation de l'échantillon pour essai**

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des classes granulaires types. Les 25-50 mm doivent

contenir 60 % de 25-40 mm. Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °C, 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 %. Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.

La masse de l'échantillon pour essai est de 500g pour les 4-14 mm.

II-2-1-2-3 Exécution de l'essai

- **Essai sur les gravillons compris entre 4 et 14 mm**

Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive, puis les 500 g de matériau préparé. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après

Tableau II-2-1 : Charge abrasive correspondant à la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 - 6,3	2 000 ± 5
6.3-10	4 000 ± 5
10 - 14	5 000 ± 5

Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoute 2,5 l d'eau.

Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de 100 tr/min ± 5 tr/min pendant 2 h ou 12 000 t. Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat.

Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre, en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées. Tamiser le matériau dans le bac sur le tamis de 1,6 mm; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm.

Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple). Procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération.

Sécher le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante.

Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.



Figure II-2-2: Déroulement de l'essai.

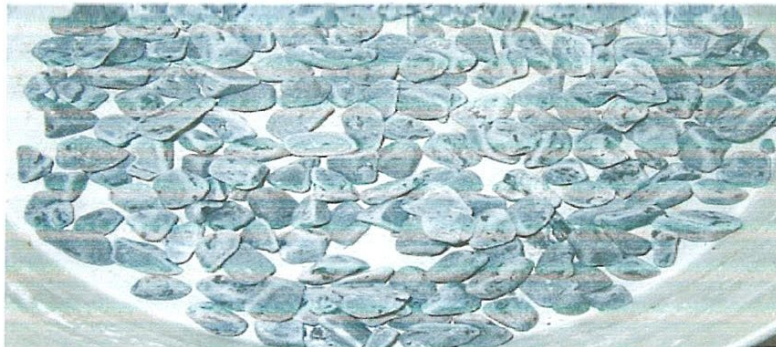


Figure II-2-3: Echantillon après séchage et écrêtage à 1.6 mm.

II-2-3 Expression des résultats

Le coefficient micro-Deval MDE ou MDS est par définition le rapport :

$$100 \frac{m}{M} = 100 \frac{M - m'}{M} \quad (\text{Eq : II-2-1})$$

où :

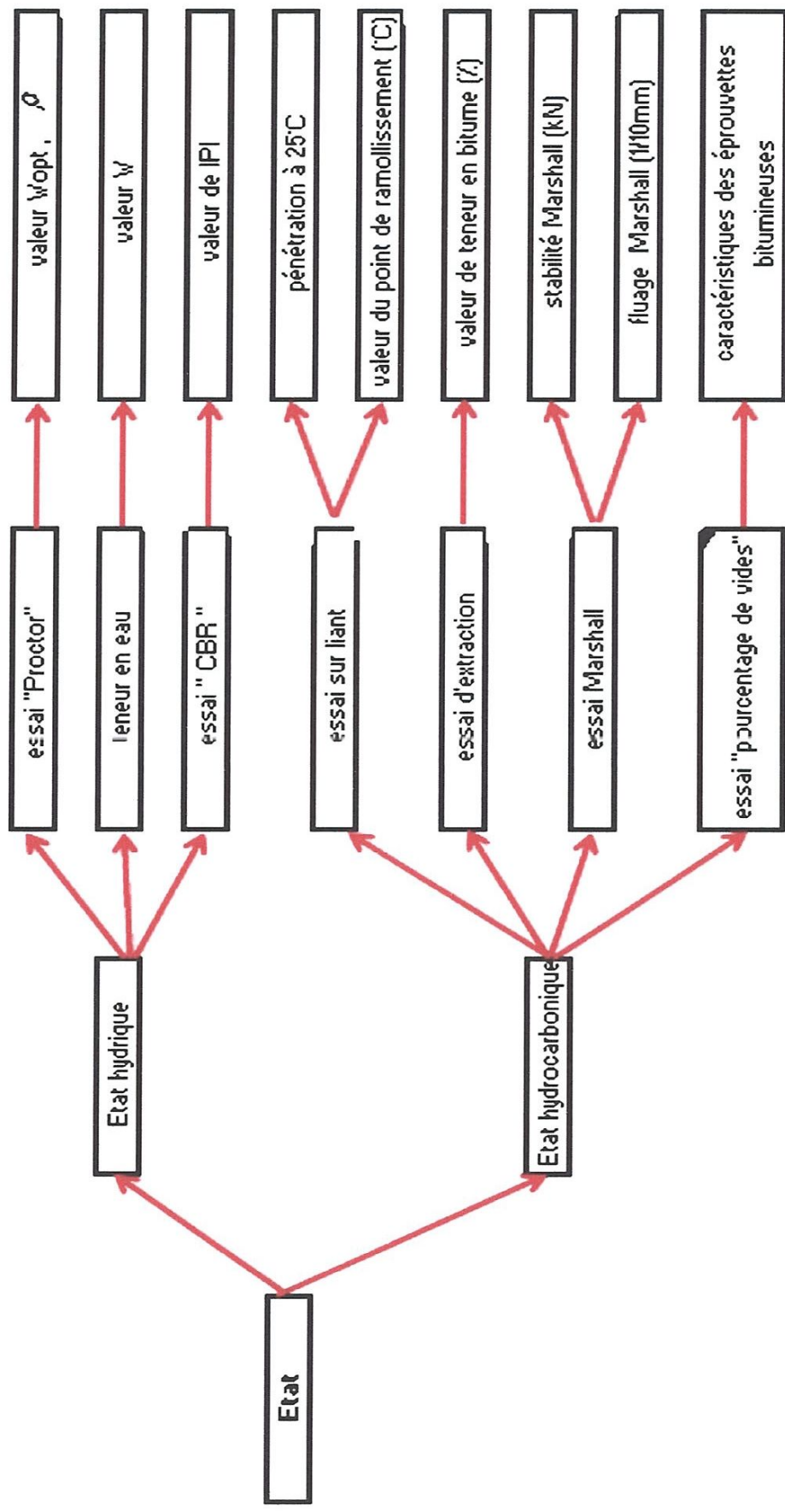
M : est la masse sèche de l'échantillon pour essai (500 g),

$m = M - m'$: est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm.

Tableau II-2-1 : Caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	Spécifications	
	PL-MJA < 150	PL-MJA \geq 150
Coefficient Micro Deval	≤ 25	≤ 20

CHAPITRE III : CLASSIFICATION SELON L' ETAT



Classification selon l'état hydrique

III-1 Essai Proctor

III-1-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai permettant de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié qui conduisent à des couples de valeurs différents, dont la dimension des plus gros éléments (D_{\max}) ne dépasse pas 20 mm, qu'ils soient naturels ou traités avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques. Lorsque ces matériaux comportent une proportion inférieure ou égale à 30 % d'éléments excédant 20 mm, il est encore possible de déterminer leurs caractéristiques de compactage moyennant l'application d'une correction apportée aux caractéristiques mesurées sur la fraction 0/20.

Lorsque la proportion des éléments > 20 mm dépasse 30 %, l'essai peut être réalisé sur la fraction 0/20, mais son interprétation est alors limitée à l'évaluation de son état hydrique. Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent:

W : est la teneur en eau, exprimée en pourcentage.

ρ_s : est la masse volumique des particules solides du sol, exprimée en tonnes par mètre cube.

ρ_d : est la masse volumique du sol sec, exprimée en tonnes par mètre cube.

ρ_w : est la masse volumique de l'eau, exprimée en tonnes par mètre cube égale conventionnellement à une tonne par mètre cube.

S_r : est le degré de saturation exprimé en pourcentage

$$S_r \% = \frac{W}{\rho_w \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right)} \quad (\text{Eq : III-1-1})$$

I.CBR : est l'indice portant CBR après immersion, exprimé en pourcentage.

IPI : est l'indice portant immédiat, exprimé en pourcentage.

Dmax : est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. La présence d'un ou quelques gros éléments épars ne doit pas conduire à considérer leurs dimensions comme le Dmax du sol.

$$\text{energie de compactage (exprimée en kNm/m}^3\text{)} = \frac{N \times H \times m \times g}{V} \quad (\text{Eq : III-1-2})$$

où :

N : est le nombre total de coups ;

H : est la hauteur de chute de la dame ;

m : est la masse de la dame ;

g : est l'accélération de la pesanteur ;

V : est le volume du matériau compacté dans le moule

III-1-2 Mode opératoire

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée. Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

III-1-2-1 Appareillage

- deux modèles de moules :
- moule Proctor.
- moule CBR.
- une règle à araser.
- deux modèles de dames de compactage manuelles.
- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm
- balances
- matériels et outillages divers.
- des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons

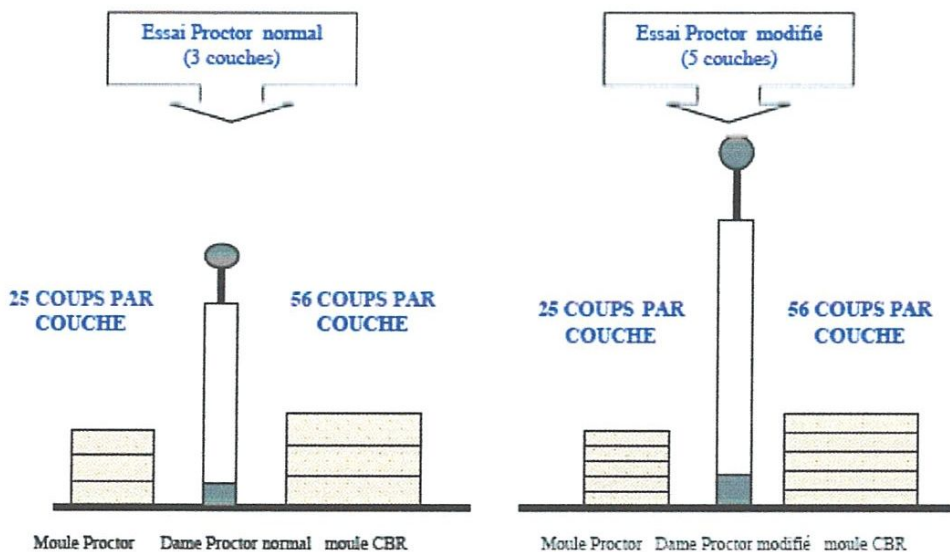


Figure III-1-1: Modalité d'exécution des essais.

III-1-2-2 Préparation des échantillons soumis à l'essai

• 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.

- **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.

III-1-2-3 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 les tableaux suivants :

Tableau III-1-1 : Modalité d'exécution des essais Proctor normal.

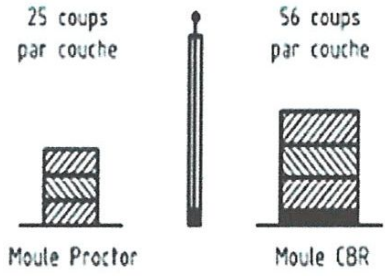
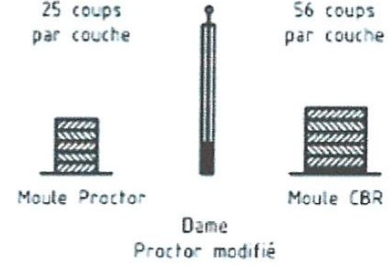
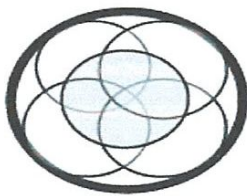
Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	3 couches, à raison de :
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	25 coups par couche
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	56 coups par couche
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	Moule Proctor Dame Proctor normal Moule CBR

Tableau III-1-2 : Modalité d'exécution des essais Proctor modifié.

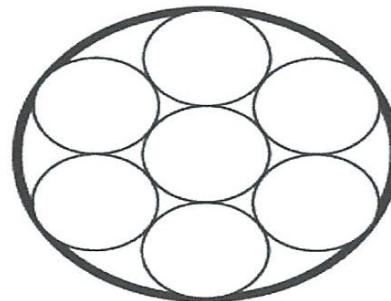
Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor Dame Proctor modifié Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

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 réaliser.



MOULE PROCTOR : 3 coups répétés 8 fois et le 25^{ème} coup au centre



MOULE CBR : 6 coups tangents et le 7^{ème} au centre répétés 8 fois

Figure III-1-2 : Distribution de nombres de coups suivants type de moule.

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 puis à son démoulage et à sa détermination 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.

- enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'Indice CBR après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage. La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

III-1-3 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 utiliser.

- **Formules de correction**

Ces formules sont les suivantes :

- pour la teneur en eau :

$$W' = W - \alpha W$$

$$\alpha W = \frac{m}{100} W \quad (\text{Eq : III-1-3})$$

où :

w' : est la teneur en eau OPN cherchée du matériau 0/D, exprimée en pourcentage.

w est la teneur en eau OPN déterminée sur la fraction 0/20, exprimée en pourcentage

m est la proportion de la fraction 20/D dans le matériau, exprimée en pourcentage.

- pour la masse volumique sèche

$$\rho'_d = \frac{\rho_d}{1 + \frac{m}{100} \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 \right)} \quad (\text{Eq : III-1-4})$$

où :

ρ'_d est la masse volumique sèche OPN (ou OPM) du matériau 0/D, exprimée en tonnes par mètre cube ;

ρ_d est la masse volumique sèche OPN (ou OPM) déterminée sur la fraction 0/20, exprimée en tonnes par mètre cube ;

ρ_s est la masse volumique des particules élémentaires du sol, exprimée en tonnes par mètre cube.

m est la proportion de la fraction 20/D dans le matériau, exprimée en pourcentage.

III-2 Essai CBR

III-2-1 Objet et but de l'essai

Le présent document décrit l'appareillage spécifique, et les modalités du processus opératoire des essais permettant la détermination :

- de l'indice Portant immédiat(IPI)
- de l'indice CBR immédiat;
- de l'indice CBR après immersion

d'un sol ou d'un matériau granulaire utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées.

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat : Grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.

Indice Portant Immédiat : Grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantiers

III-2-2 Mode opératoire

III-2-2-1 Appareillage

-Matériel de confection des éprouvettes, il comprend :

-le moule CBR.

-les dames ou machines de compactage Proctor normal et Proctor modifié.

-l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser,...)

-le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs,...).

-Matériel de poinçonnement, il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm.

-Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement, il est constitué :

-d'un ou plusieurs bacs de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète des éprouvettes.

- d'un disque, dit «de gonflement», métallique ou en matière plastique de 150 mm de diamètre et d'un poids n'excédant pas 300 g environ perforé sur toute sa surface par au moins 25 trous de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre, uniformément répartis. Ce disque comporte, perpendiculairement en son centre, une tige de hauteur réglable, permettant de réaliser la mise à zéro du dispositif de mesure du gonflement, avant la mise en immersion ;
- d'une série d'au moins trois surcharges constituées chacune d'un disque de $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre extérieur comportant un évidement central cylindrique de $54 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ permettant le passage aisé du poinçon. La masse de chaque surcharge doit être de $2,3 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$.
Les surcharges peuvent être réalisées en deux pièces par sectionnement du disque défini précédemment suivant un plan diamétral afin de faciliter leur mise en place sur l'éprouvette et autour du poinçon.
- d'un dispositif permettant la mesure du gonflement avec une incertitude absolue maximum de 0,01 mm ; la plage de mesure doit être de 20 mm minimum.



ESSAI CBR

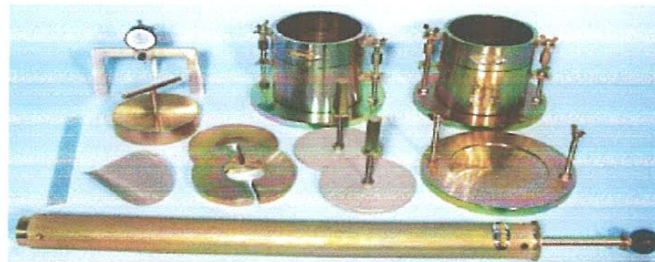


Figure III-2-1 : Matériel de confection des éprouvettes et de poinçonnement.

III-2-2-2 Principe de l'essai

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces appliquées sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés :

On calcule les valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{19,93} \times 100$$

- L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs
- Si nécessaire, faire une correction d'origine

L'indication de toute valeur d'un indice CBR ou IPI d'un matériau n'a donc de sens que si elle est assortie des caractéristiques d'état du sol prises en considération dans la confection de l'éprouvette c'est-à-dire :

- sa masse volumique à l'état sec ρ_d exprimée en pourcentage de la valeur de $\rho_{d\text{ OPN}}$ ou $\rho_{d\text{ OPM}}$ du sol sa teneur en eau exprimée en pourcentage de la valeur de W_{OPN} ou W_{OPM} du sol ; son état de saturation défini qualitativement par le fait que l'éprouvette est poinçonnée.

- soit immédiatement, après sa confection, et l'on parle alors d'indice CBR immédiat ou IPI, suivant le processus opératoire suivi :

- soit après avoir été immergée durant quatre jours et l'on parle alors d'I.CBR après immersion. Pour ce qui concerne l'indice CBR de dimensionnement d'une chaussée, le concepteur doit choisir les caractéristiques d'état du sol qu'il entend prendre en considération en fonction des particularités du projet. A titre indicatif, on peut rappeler que les caractéristiques suivantes sont souvent retenues :

-teneur en eau : W_{OPM} ;

-masse volumique sèche : ρ_d OPM ;

-état de saturation : celui obtenu après quatre jours d'immersion.

Pour ce qui concerne l'IPI, on retient comme caractéristiques d'état :

-la teneur en eau (ou la plage de teneur en eau) pour laquelle on veut évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins ;

-la masse volumique du sol sec correspondant à la valeur obtenue lorsqu'on compacte le matériau à la teneur en eau considérée, à l'énergie Proctor normal dans le cas d'un sol et à l'énergie Proctor modifié dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.

III-2-2-3 Exécution de l'essai

• Confection des éprouvettes

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation), pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm, l'intégralité du sol est soumise à l'essai. Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm dans une proportion inférieure à 30 %, ils sont éliminés par tamisage. L'essai est alors réalisé sur la fraction restante. Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer, 5,5 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'I.CBR immédiat ou l'IPI et 7 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'I.CBR immersion.

On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites dans le chapitre Proctor. Dans le cas où l'on détermine l'I.CBR immersion, la teneur en eau de confection de l'éprouvette est déterminée à partir du surplus de matériau, selon une des méthodes normalisées. Le moule contenant l'éprouvette est ensuite désolidarisé de sa plaque de base, retourné pour que la face supérieure de l'éprouvette se retrouve en contact avec l'embase. Celle-ci est alors à nouveau solidarisée avec le moule. Procéder à l'extraction du disque d'espacement puis à l'exécution du poinçonnement ou à la mise en immersion selon l'indice recherché.

- **Exécution du poinçonnement**

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine L'IPI, l'ICBR immédiat ou l'ICBR immersion.

-Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI, placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante :

mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;

-initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;

-exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$.

-établir la courbe effort-déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1,25 mm ; 2 mm ; 2,5 mm ; 5 mm ; 7,5 mm et 10 mm

-déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

-Si l'objet de l'essai est la détermination de l'I.CBR immédiat, interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse. Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.

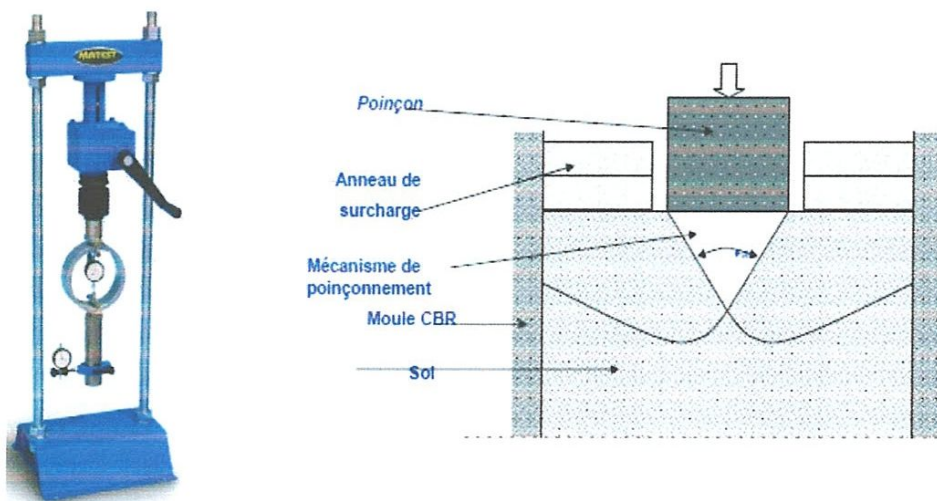


Figure III-2-2 : Exécution du poinçonnement.

- Si l'objet de l'essai est la détermination de l'I.CBR immersion :
- positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment.
- mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement.
- immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente sous le moule. Après quatre jours d'immersion (± 2 h), relever la valeur de gonflement total atteint. Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le Poinçonnement comme indiqué précédemment.

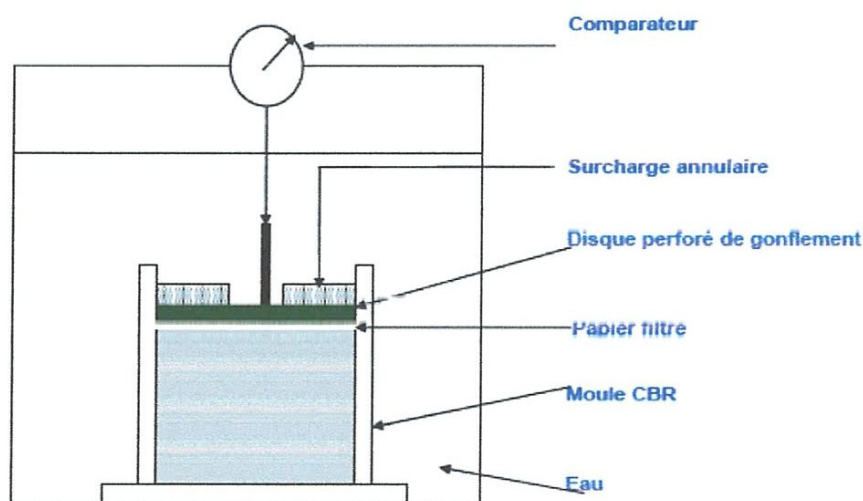


Figure III-2-3 : Imbibition et gonflement.

III-2-3 Expression des résultats

Tableau III-2-1: Classification selon indice CBR.

Indice de CBR	Qualité de la portance
3	Très faible à nulle
6	faibles
10	moyennes
20	bonnes
	Très bonne à excellente

Classification selon l'état hydrocarbonique

Essais sur liant

III-3 Essai de Pénétration

III-3-1 But et domaine d'application

Le présent essai définit une méthode pour la détermination de la consistance des bitumes et des liants bitumineux. S'applique pour les pénétrations inférieures ou égales à 500 x 0,1 mm. Pour les pénétrations supérieures à cette valeur, des conditions opératoires différentes sont prévues. Pénétrabilité d'un liant bitumineux, consistance exprimée comme la profondeur, en dixièmes de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

III-3-2 Mode opératoire

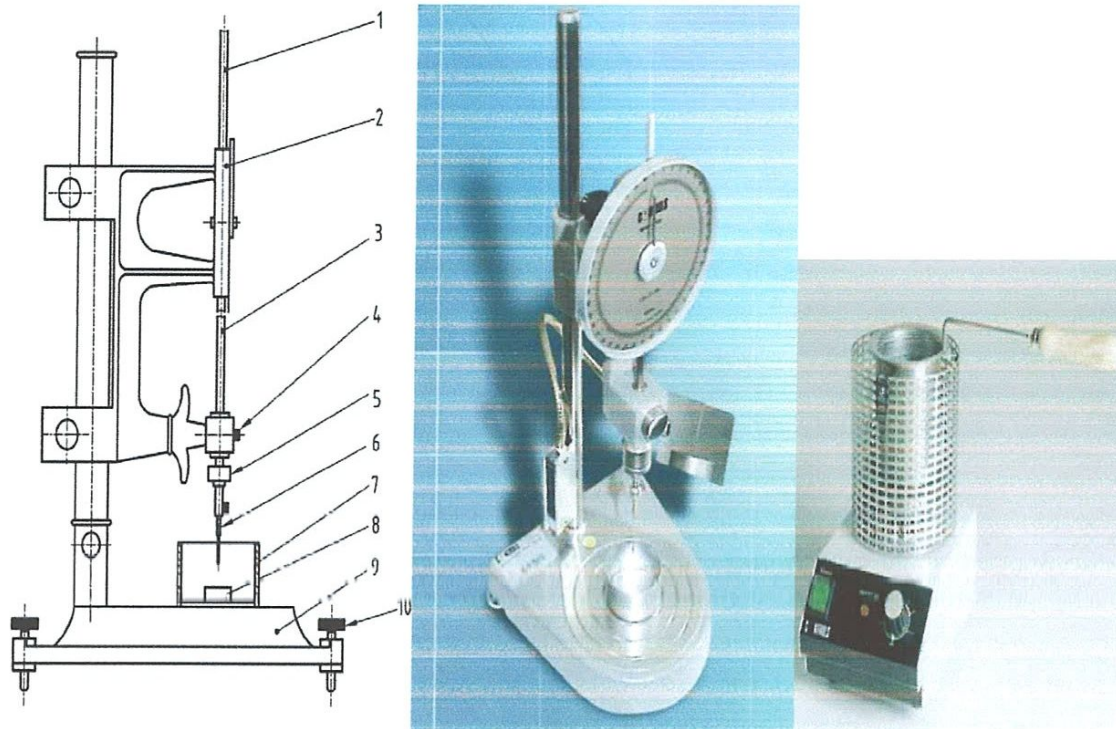
On mesure la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné. Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à 500 x 0,1 mm, sont : température 25 °C, charge appliquée 100 g, durée d'application de la charge 5 s. Pour les pénétrations supérieures à cette limite, la température d'essai doit être de 15°C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

III-3-2-1 Appareillage

Matériel et verrerie courants de laboratoire, ainsi que :

❖ pénétromètre

Dispositif permettant au porte-aiguille de se déplacer verticalement sans frottement mesurable, et permettant la détermination de la pénétration de l'aiguille au dixième de millimètre près. Le porte-aiguille doit pouvoir se démonter facilement du dispositif, et peser $47,50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$. Il faut prévoir une masse additionnelle de $50,00 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$ pouvant se fixer sur le porte-aiguille si elle n'existe pas déjà. Le socle sur lequel repose le récipient contenant l'échantillon, ou la cuvette de transfert, doit être plat et horizontal. La surcharge de 50 g doit être positionnée au dessous du guide (figure III-3-1)



Légende

- 1 Tige
- 2 Support gradué
- 3 Porte-aiguille
- 4 Système de blocage
- 5 Masse de 50 g
- 6 Aiguille de fourreau
- 7 Cuve de transfert à fond plat
- 8 Récipient d'échantillon d'essai
- 9 Socle
- 10 Écrou de mise à niveau

Figure III-3-1 : pénétromètre.

- **Aiguille de pénétration:** en acier inoxydable trempé à cœur, revenu et poli (figure III-3-2).

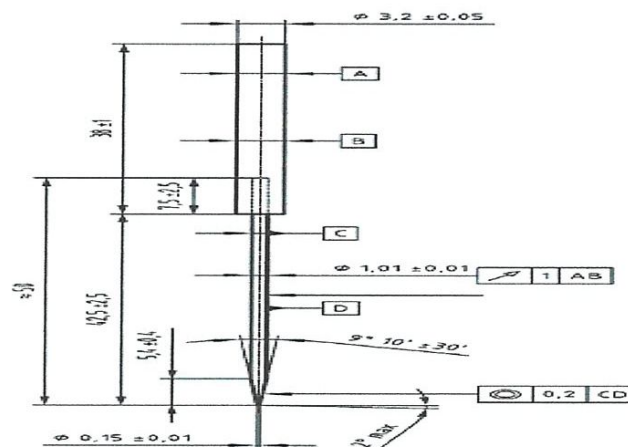


Figure III-3-2 : Aiguille de pénétration.

- **Réceptacle d'échantillon d'essai** : cylindrique, à fond plat, en verre ou en métal. La profondeur interne du réceptacle doit être supérieure d'au moins 10 mm à la pénétration attendue et elle ne doit pas être inférieure à 35 mm. Son diamètre intérieur doit être au moins de 55 mm et au plus de 70 mm.
- **Bain-marie**: D'une capacité d'au moins 10 l, et capable d'assurer la stabilité de la température de l'échantillon d'essai dans une plage de $\pm 0,1$ °C.

Note : L'utilisation d'eau distillée ou déminéralisée est fortement conseillée pour le bain-marie.

- **Cuve de transfert** : Pour les essais conduits en-dehors du bain-marie.

Cette cuve doit avoir une capacité minimale de 350 ml et être suffisamment profonde pour permettre au réceptacle d'échantillon d'essai d'être complètement recouvert d'eau.

Note : Pour des températures inférieures à 25 °C, une cuve de transfert ayant une capacité de 1,5 l est mieux adaptée.

- **Dispositif de chronométrage** : précis à 0,1 s.
- **Thermomètres** : à tige solide pour mesurer la température.

III-3-2-2 Échantillonnage

- Prélever au minimum 100 g de l'échantillon de laboratoire, en utilisant une lame chauffée, si nécessaire, et les transférer dans un réceptacle adéquat.
- Chauffer le matériau à la température requise, c'est-à-dire 80 °C à 90 °C au-dessus du point de ramollissement attendu et remplir un réceptacle d'échantillon propre (exempt de toute trace de poussière, de graisse, de rouille, etc.). La profondeur soit supérieure d'au moins 10 mm à la profondeur de pénétration d'aiguille attendue.

- Laisser les échantillons refroidir à la température ambiante, entre 15 °C et 30°C ; pour les échantillons jusqu'à 45 mm de profondeur, laisser refroidir pendant 60 min à 90 min et pour les échantillons de 45 mm à 60 mm de profondeur.

III-3-2-3 Mode d'emploi

- **Essais effectués dans le bain à température constante**

Si les essais sont conduits avec le pénétromètre installé dans le bain à température constante, placer le réceptacle d'échantillon directement sur le socle immergé du

pénétrromètre. Maintenir le récipient d'essai complètement recouvert par l'eau du bain.

- **Essais effectués en dehors du bain à température constante**

Si les essais sont conduits avec le pénétromètre en dehors du bain, placer le récipient d'échantillon dans la cuve de transfert qui doit avoir été conservée dans le bain avec les échantillons, recouvrir complètement le récipient d'échantillon avec l'eau du bain à température constante, et placer la cuve de transfert sur le socle du pénétromètre. Pour les essais de référence, les pénétrations à des températures autres que 25 °C doivent être effectuées sans retirer les échantillons du bain, à moins que la cuve de transfert soit contrôlée séparément afin d'assurer une température correcte.

- **Détermination de la pénétrabilité**

Premières déterminations :

L'un des récipients d'échantillons étant en place, abaisser lentement l'aiguille jusqu'à ce que sa pointe coïncide avec son image réfléchiée par la surface de l'échantillon. S'assurer que la position zéro de l'aiguille est bien repérée, puis libérer rapidement le porte-aiguille pendant le laps de temps prescrit. Si le récipient bouge pendant la détermination, interrompre l'essai. Régler l'appareil de façon à déterminer la pénétration de l'aiguille dans l'échantillon exprimée en dixièmes de millimètre.

Note : Un bon éclairage peut aider au positionnement adéquat de l'aiguille, par l'emploi par exemple, d'un tube fluorescent au méthacrylate de méthyle ou d'une lentille.

Répétition de l'essai. Effectuer au moins trois déterminations validées avec trois aiguilles différentes sur des points de la surface de l'échantillon situés à au moins 10 mm du bord du récipient, et à au moins 10 mm les uns des autres. Employer une aiguille propre pour chaque détermination. Si la pénétration est supérieure à 100 x 0,1 mm, laisser toutes les aiguilles dans les échantillons jusqu'à ce que toutes les déterminations aient été effectuées. Si lorsque l'essai est conduits en dehors du bain, les trois déterminations ne sont pas effectuées dans un délai de 2 min, remettre l'échantillon et la cuve de transfert dans le bain et répéter la/les

détermination(s).

Pour les essais menés dans les conditions d'une température de 25 °C, une charge appliquée de 100 g et un temps de charge de 5 s,

III-3-3 Expression des résultats

Tableau III-3-1: Spécification selon La Classe du Bitume

Classe du Bitume	20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilités à 25°C	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100

III-4 Essai pour la détermination du point de ramollissement

III-4-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai prescrit une méthode de détermination de la température de ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage des températures de 30°C à 150°C. Cette méthode peut également s'appliquer pour les liants bitumineux extraits d'enrobés bitumineux.

Température de ramollissement : Température à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance.

III-4-2 Mode opératoire

III-4-2-1 Appareillage

- **Appareillage bille et anneau :**

- Anneaux, au nombre de deux, en laiton, à épaulement, et dont les dimensions sont données dans la figure III-4-1.

- Plaque de coulage, métallique, plate et uniforme d'environ 50 mm x 75 mm, et d'une épaisseur comprise entre 1,5 mm et 2,0 mm, avec les rebords tournés vers le bas (figure III-4-2).

- Billes, au nombre de deux, en acier, de 9,50 mm \pm 0,05 mm de diamètre et d'une masse de 3,50 g \pm 0,05 g.

- Dispositifs de guidage des billes, en laiton, et au nombre de deux, permettant de centrer les billes d'acier, un pour chaque anneau.

Note : On trouvera en figure III-4-3 un exemple d'appareillage dont la forme générale et les dimensions conviennent.

- Porte-anneaux et assemblage, support en laiton (A) pouvant soutenir les deux anneaux en position horizontale (figure III-4-4).

-Bain, un bécber en verre pouvant être chauffé, d'un diamètre intérieur d'au moins 85 mm et d'une profondeur d'au moins 120 mm à partir du fond du bécber (figure III-4-5).

-Thermomètres.

-Agitateur, soit un agitateur magnétique chauffant muni d'un barreau aimanté revêtu de manière appropriée, d'une longueur d'environ 40 mm et d'un diamètre de 8 mm, pour assurer l'uniformité de la distribution de chaleur dans le bain.

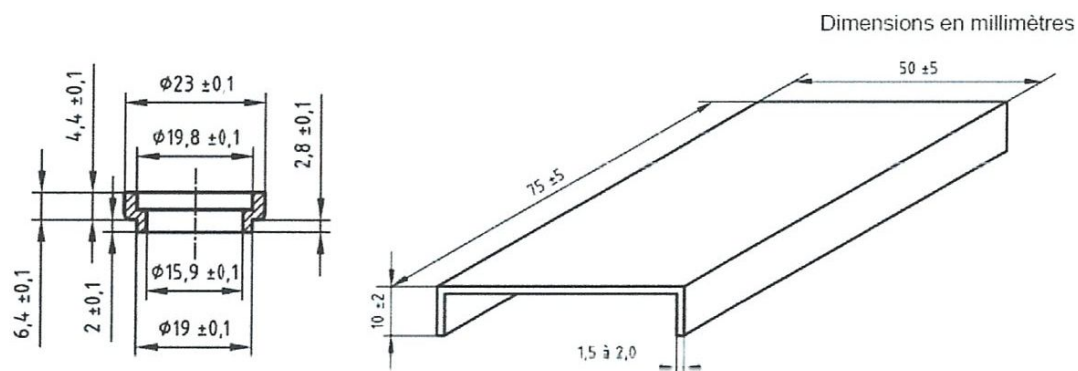


Figure III-4-1 : Anneau.

Figure III-4-2 : Plaque de coulage.

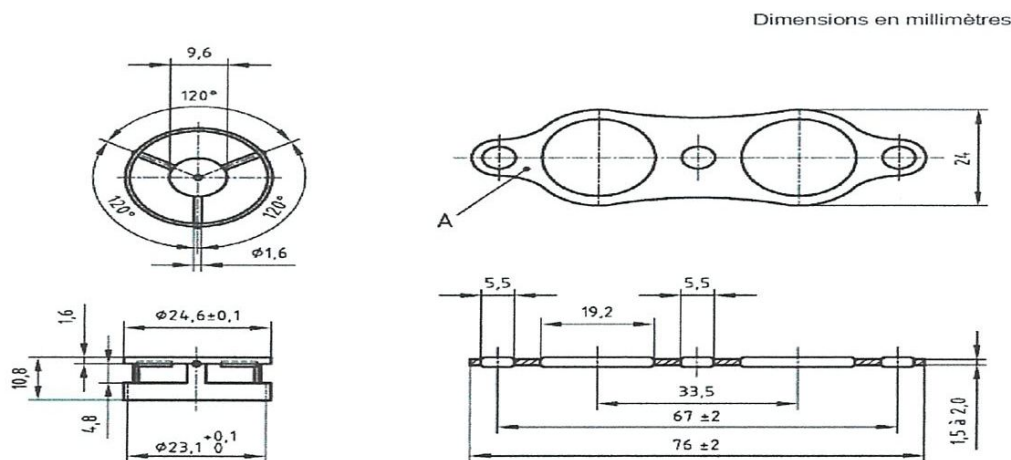


Figure III-4-3 : Dispositif de centrage des billes.

Figure III-4-4 : Porte-anneau.

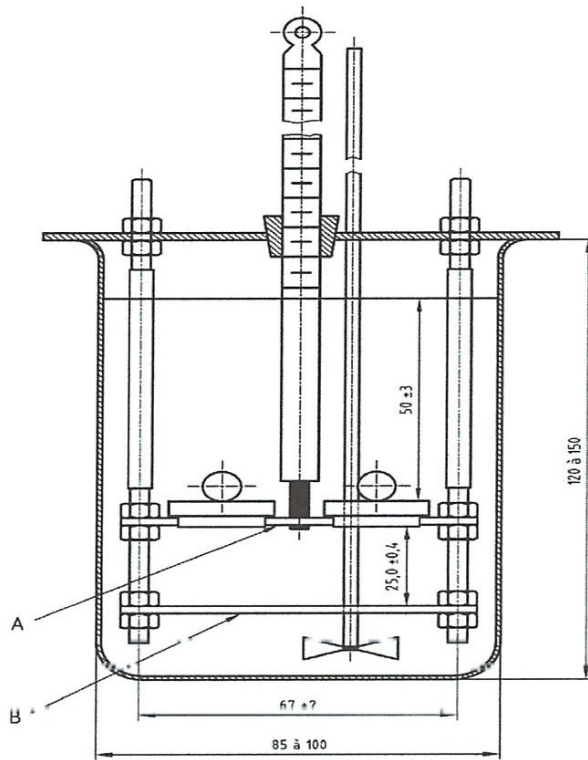


Figure III-4-5 : Dispositif de montage pour deux anneaux.

Liquides pour bains :

-Glycérol, de masse volumique de $1\,250\text{ kg/m}^3 \pm 10\text{ kg/m}^3$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$, soit une pureté de 99 % (m/m).

-Eau distillée fraîchement bouillie ou eau déminéralisée.

-Agent antiadhésif, mélange à parts égales de glycérol et de dextrine ou de talc minéral, pour éviter l'adhésion du liant bitumineux à la plaque de coulage pendant le moulage des disques.

Préparation de l'essai :

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de $25,0\text{ mm} \pm 0,4\text{ mm}$.

III-4-3 Expression des résultats

Tableau III-4-1 : les caractéristiques des bitumes.

Classe du Bitume	40/50	80/100	60/70
Point de ramollissement ° c	52 à 57	41 à 47	47 à 52

III-5 Essai Marshall

III-5-1 Objet et But de l'essai

Le présent essai spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, une température et une énergie de compactage donné, le pourcentage de vides, la «stabilité» et le «fluage» dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

L'essai Marshall s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave-bitume, bétons bitumineux, autres mélanges hydrocarbonés à chaud) de dimension D, inférieure ou égale à 20 mm, utilisés dans le domaine des travaux publics.

III-5-2 Mode opératoire

III-5-2-1 Appareillage

- Appareillage spécifique

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies (figure III-5-1).

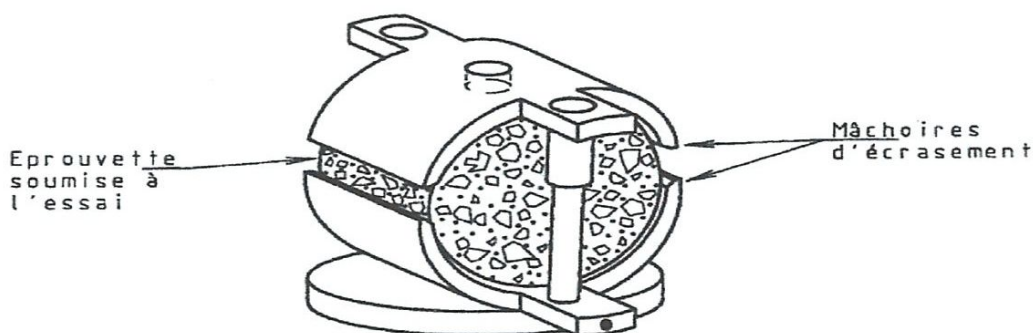


Figure III-5-1 : Principe de l'essai de compression.

Au moins trois moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, une hausse : la base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps de moule. Le diamètre intérieur du moule doit être de $101,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ (Figure III-5-2). Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule (Figure III-5-3). Dimensions en millimètres.

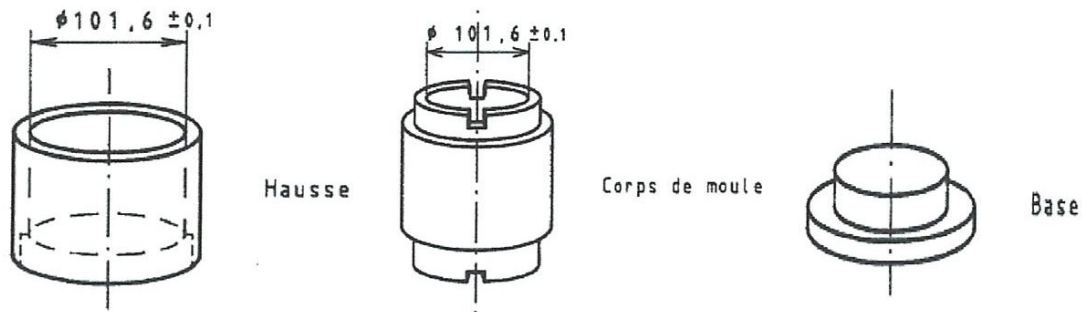


Figure III-5-2 : Corps de moule, hausse, base.

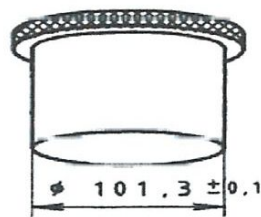


Figure III-5-3 : Exemple de piston extracteur.

Une dame de compactage comportant un marteau pesant $4\,536 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$. Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de $457 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ sur la base de la dame (figure III-5-4).

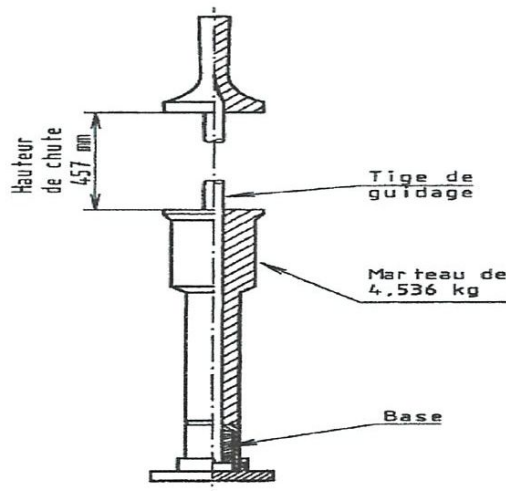


Figure III-5-4 : Exemple de dame de compactage.

Un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm. Ce bloc est muni de deux boulons servant pour le calage du moule. Au moins trois mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi-mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre 50,9 mm et 51 mm (figure III-5-5).

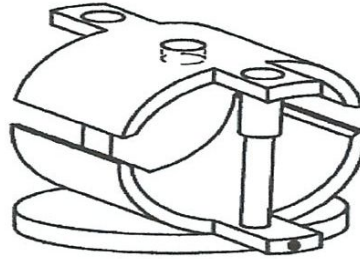


Figure III-5-5 : Mâchoires d'écrasement.

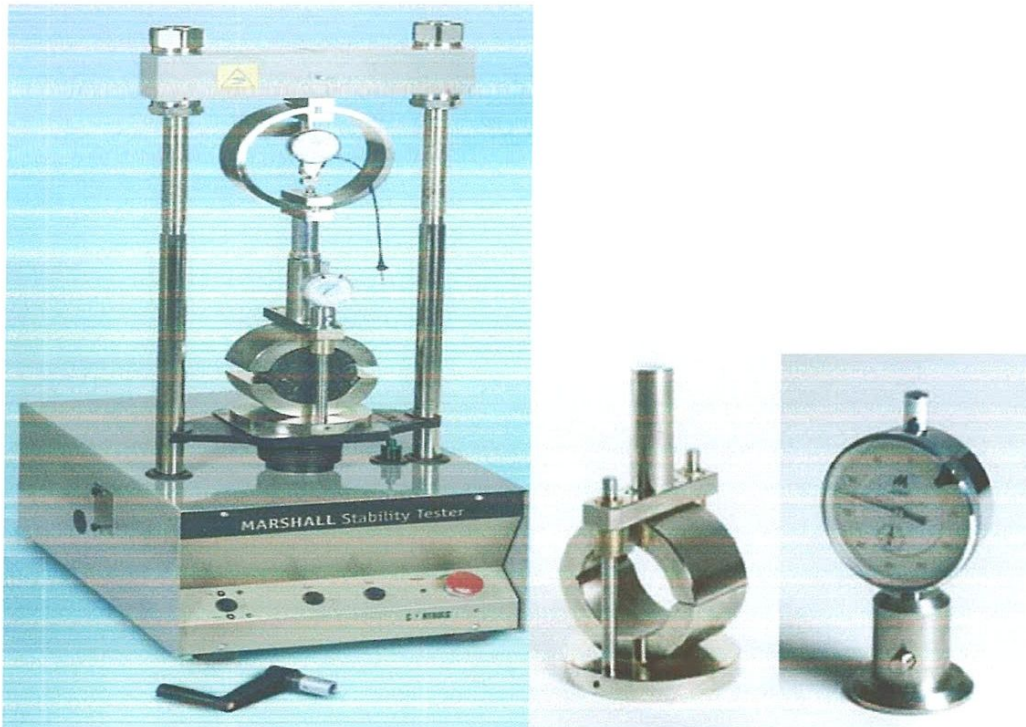


Figure III-5-6 : Appareillage Marshall.

• Préparation des éprouvettes

Le mode de préparation du mélange hydrocarboné doit être indiqué sur la feuille d'essai. Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit :

- bitume 80/100 140 °C ± 5 °C

- bitume 60/70 150 °C ± 5 °C
- bitume 40/50 160 °C ± 5 °C
- bitume 20/30 180 °C ± 5 °C

- **Détermination préalable de la masse des éprouvettes**

La masse des éprouvettes est déterminée par confection d'un éprouvette témoin, d'une masse indicative de 1200 g, compactée dans les mêmes conditions que les éprouvettes d'essai. À partir de six mesures de la hauteur réparties sur le pourtour de l'éprouvette témoin, la masse m correspondant à une éprouvette de hauteur théorique de 63,5 mm est calculée.

- **Remplissage des moules et compactage**

Peser la quantité m de mélange hydrocarboné. après avoir placé un disque de papier en fond de moule et mis en place la hausse, introduire le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéринé. Un disque de papier est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné. Les moules sont remplis successivement.

Un des moules contenant le mélange hydrocarboné est fixé sur le socle en bois.

L'éprouvette n°1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans une étuve à la température de référence. La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en $55 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$. Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage.

L'opération précédente est renouvelée. La durée de compactage ne doit pas excéder 3 min. L'éprouvette n° 2 est compacté $5 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$ après l'éprouvette n° 1 et ainsi de suite. Le moule est placé, pendant au moins 15 min, sous un jet circulaire d'eau froide maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'éprouvette. Le moule est conservé 1 h au moins à température ambiante (15 à 25 °C) avant démoulage. Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

- **Vérification des éprouvettes**

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1 g près, soit m_i . Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées à 0,1 mm près, en six zones différentes

pour la hauteur et trois pour le diamètre. La masse volumique apparente MVa est calculée à partir des mesures géométriques. Si la MVa d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2 \%$, la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des six mesures de hauteur doit être comprise entre 62,5 et 65 mm, avec une tolérance pour chaque mesure de $\pm 1,5$ mm par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée. Les éprouvettes sont conservées 5 h au moins à température ambiante après leur compactage.

- **Essai de stabilité et de fluage Marshall**

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$. Compte tenu de la durée de l'essai il est nécessaire d'échelonner les mises en immersion des éprouvettes, toutes les 5 min.

Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $0,85 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute. La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette. Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical, au moment de la rupture (ou à l'instant où on atteint le maximum de la charge).

III-5-3 Expression des résultats

La stabilité Marshall est exprimée en décanewtons et représente la moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes.

Le fluage Marshall, exprimé en dixièmes de millimètre, représente la moyenne des affaissements d'au moins trois éprouvettes.

Tableau III-5-1 : Performances mécaniques des bétons bitumineux 0/14.

caractéristiques	Classe de bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	min	Max	min	Max	Min	max	min	max
Stabilité Marshall (KN)	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
Fluage Marshall (mm)	-	4	-	4	-	4	-	4

III-6 Essai pour la détermination de pourcentage de vides

III-6-1 Objet et But de l'essai

Le présent essai décrit la procédure permettant de calculer deux caractéristiques volumétriques d'une éprouvette bitumineuse compactée : le pourcentage de vides (V_m) et le pourcentage de vides du squelette granulaire comblés par le liant (VFB). Cette méthode peut être utilisée pour les éprouvettes compactées en laboratoire ou les carottes prélevées dans la chaussée après répandage et compactage.

Ces caractéristiques volumétriques peuvent être employées comme critères de formulation ou comme paramètres d'évaluation du mélange après son répandage et son compactage dans la chaussée.

III-6-2 Calcul du pourcentage de vides (V_m)

III-6-2-1 Principe

Le pourcentage de vide d'une éprouvette bitumineuse est calculé en utilisant la masse volumique réelle du mélange et la masse volumique apparente de l'éprouvette.

III-6-2-2 Calcul

Le pourcentage de vides doit être calculé au 0,1 % (v/v) le plus proche comme suit :

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \left(\frac{V}{V'} \right) \quad (\text{Eq : III-6-1})$$

où

V_m est le pourcentage de vides du mélange, à 0,1 % près (v/v).

ρ_m est la masse volumique réelle du mélange, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3).

ρ_b est la masse volumique apparente de l'éprouvette, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3).

Tableau III-6-1 : Performances des enrobés.

Désignation	BB 0/14	
% Vides	3	5

III-7 Essai d'extraction

III-7-1 Objet et but de l'essai

Le présent essai décrit une méthode permettant de récupérer du bitume des matériaux enrobés prélevés sur la chaussée sous une forme se prêtant à des essais complémentaires. La procédure convient à la récupération de bitume routier.

III-7-2 Mode opératoire

L'extraction pose un problème particulier : en règle générale, un solide ne se laissera pas traverser par un liquide. Il est donc nécessaire de réaliser un grand nombre d'extractions successives.

- le montage est assemblé et fixé aux points indiqués
- peser la cartouche vide.
- chauffer l'enrobé à 150 °C
- rempli la cartouche de l'enrobé.
- le solide est placé dans la nacelle, elle-même insérée dans l'extracteur.
- le système de chauffage est mis en marche (de préférence un bain d'huile assurant un chauffage homogène).

III-7-2-1 Appareillage

L'appareil est constitué :

- un appareil (l'extracteur proprement dit KUMAGAWA).
- un réfrigérant à eau permettant de condenser les vapeurs de solvant dans la cartouche poreuse.
- Cartouches : en pure cellulose de coton, très résistantes, neutres et sans graisse.

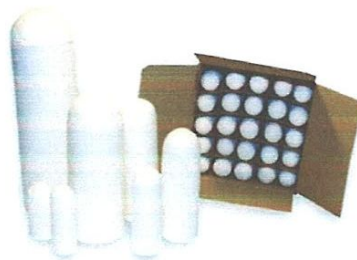


Figure III-7-1 : Cartouche.



Figure III-7-2 : L'appareil de Kumagawa.

III-7-3 Expression des résultats

Tableau III-7-1 : Formulaire.

TEMPERATURE DE MISE EN ŒUVRE	$T(^{\circ}\text{C})$
POIDS DE LA CARTOUCHE	$P_c(\text{g})$
POIDS CARTOUCHE + ENROBE	$P_{c+e}(\text{g})$
POIDS DE L'ENROBE	$P_e(\text{g}) = P_{c+e}(\text{g}) - P_c(\text{g})$
POIDS CARTOUCHE + AGREGATS	$P_{c+a}(\text{g})$
POIDS DES AGREGATS	$P_a(\text{g}) = P_{c+a}(\text{g}) - P_c(\text{g})$
POIDS BITUME	$P_B(\text{g}) = P_e(\text{g}) - P_a(\text{g})$
TENEUR EN BITUME	$T_B(\%) = P_B(\text{g}) / P_a(\text{g})$

L'écart maximum admis, en plus ou en moins, entre la teneur en liant fixée dans la composition proposée et les teneurs moyennes et individuelles en liant obtenues est de cinq pour cent ($\pm 5\%$) en valeur relative.

- Exemple d'un essai d'extraction

Tableau III-7-2 : Résultats d'un essai d'extraction

TEMPERATURE DE MISE EN ŒUVRE	150 °C
POID DE LA CARTOUCHE	31,8 g
POIDS CARTOUCHE + ENROBE	297,7 g
POIDS DE L'ENROBE	265,9 g
POIDS CARTOUCHE + AGREGATS	283,5 g
POIDS DES AGREGATS	251,5 g
POIDS BITUME	14,4 g
TENEUR BITUME	5,73%

Tableau III-7-3 : Résultats de l'essai granulométrique sur granulats.

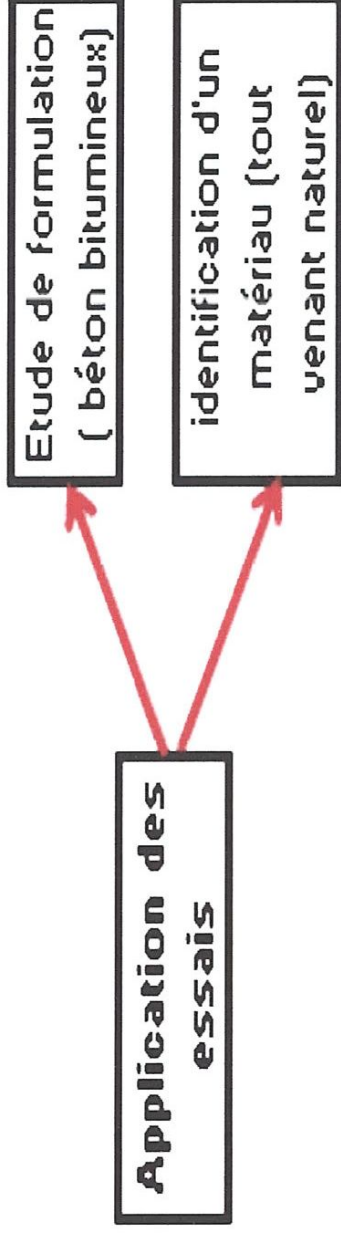
$$\% \text{ PASSANT} = (M_i/M_t) \cdot 100 - 100 \quad ; \quad M_t = 251,5 \text{ g}$$

TAMIS	REFUS PARTIEL	REFUS CUMULE	% REFUS	% PASSANT
14		-		100
10		50,3		80
8		75,5		70
6,3		90,5		64
4		130,8		48
2		166		34
1		186,1		26
0,500		203,7		19
0,200		221,3		12
0,080		233,9		7

Tableau III-7-4 : Composition granulométrique du mélange.

TAMISAT	BB 0/14 (%)
20	-
14	94-100
10	72-80
6,3	50-66
2	28-40
0,08	7-10

CHAPITRE IV :APPLICATION DES ESSAIS



IV-1 Identification d'un matériau (tout venant naturel)**IV-1-1 Introduction**

Le présent exemple a pour objet d'identifier l'échantillon de tout venant naturel (TVN) serait destiné pour remblais.

IV-1-2 Nature des essais :

L'échantillon de (TVN) prélevé a été soumis aux essais de laboratoire suivants :

- Granulométrie.
- Equivalent de sable.
- Limites d'Atterberg.
- Proctor modifié.

IV-1-3 Résultats des essais

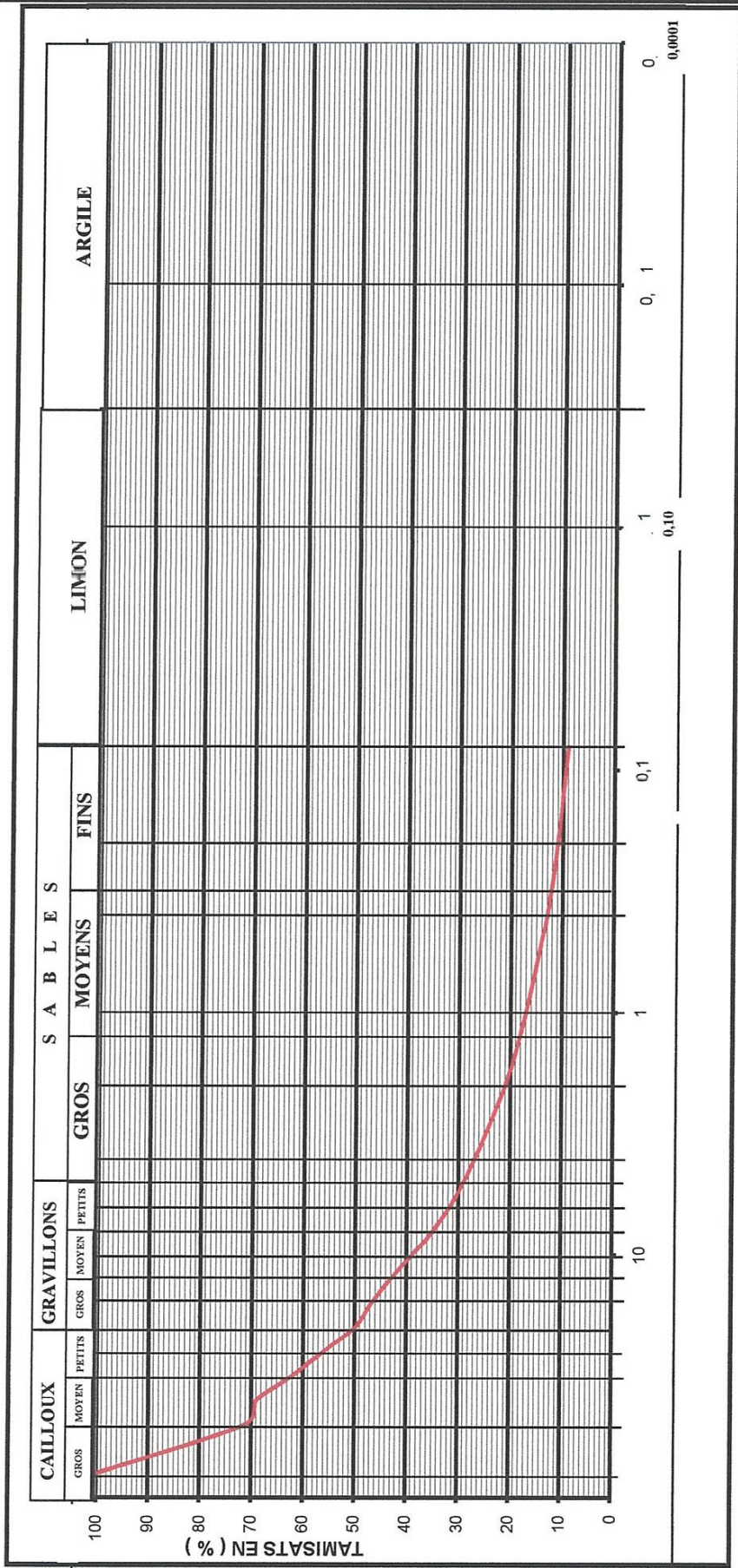
- Essai Granulométrie

Tableau IV-1-1 : Résultat de l'essai.

$$\% \text{ PASSANT} = (M/Mt) * 100 - 100 ; Mt = 3000 \text{ g}$$

TAMIS	REFUS CUMULE	% PASSANT
80	0	100
50	870	71
40	930	69
31,5	1140	62
25	1320	56
20	1500	50
16	1590	47
12,5	1710	43
10	1830	39
8	1950	35
5	2130	29
2	2370	21
1	2490	17
0,5	2580	14
0,4	2610	13
0,2	2670	11
0,08	2730	9

COURBE GRANULOMETRIQUE : MATERIAU NATUREL



PROVENIENCE	Equivalent de Sable ES	Valeur au bleu de méthylène	% < 80 µm	LIMITES D'ATTERBERG		NATURE	OBSERVATIONS
				W/L	IP		
	23%		9%	29.3%	8.07%		

- Essai équivalent de sable

Tableau IV-1-2 : Résultat de l'essai.

Nature	Equivalent de sable
T V N	23%

- Essai limites d'Atterberg :

Tableau IV-1-3 : Résultat de l'essai.

Echantillon T V N		
Limite de Liquidité	Limite de Plasticité	Indice de Plasticité
WL = 29.8	WP = 21.73	IP = 8.07

- Essai Proctor modifié

Tableau IV-1-4 Résultat de l'essai

poids d'eau ajouté	6%		8%		10%	
poids total humide (g)	15612		15831		15826	
poids du moule (g)	11145		11145		11145	
poids du sol humide (g)	4467		4686		4681	
poids du sol sec						
volume du moule	2076		2076		2076	
densité sèche (T/m ³)	2,03		2,09		2,05	
N° de la tare	K1	K2	T1	T2	M1	M2
poids total humide (g)	443,1	432,3	387,7	384,4	351,7	337,5
poids total sec (g)	420,8	410,6	368,5	365,3	334,5	321
poids de la tare (g)	35,7	36,7	37,1	35,9	37,1	35,9
poids de l'eau	22,3	21,7	19,2	19,1	17,2	16,5
poids du sol sec (g)	385,1	373,9	331,4	329,4	296,1	284,1
teneur en eau (%)	5,8	5,9	7,68	7,94	9,71	9,85
moyenne (%)	5,85		7,81		7,81	

ESSAI PROCTOR

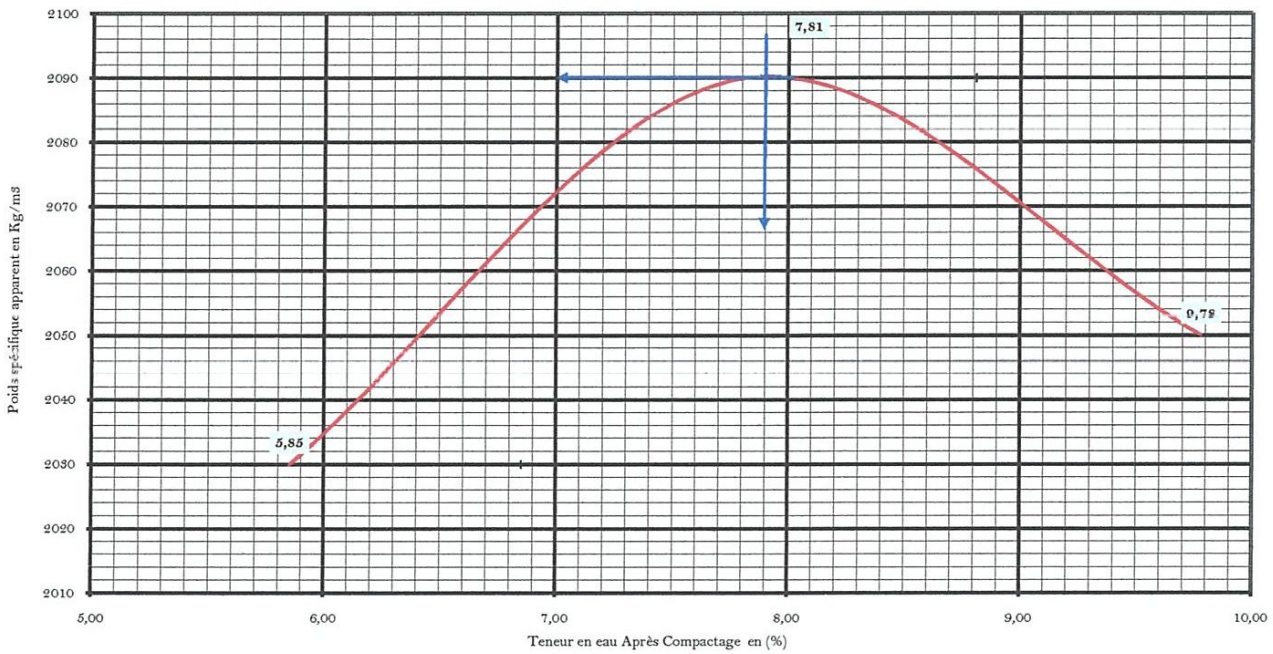
ENERGIE:

Normal
Modifié

MOULE:

Proctor
CBR

Teneur en eau après compactage en %	Teneur en eau avant compactage en %	Poids spécifique apparent sec en kg/m ³
5,85	6	2030
7,81	8	2090
9,78	10	2050



$$\rho'_d = \frac{\rho_d}{1 + \frac{m}{100} \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} - 1 \right)}$$

Teneur en eau optimal : 7,90 %
 Densité sèche max : 2,09 t/m³
 Densité corrigé : 2,33 t/m³

IV-1-4 Conclusion

L'échantillon de (TVN) après analyse ; a donné des résultats probants qui montrent que c'est un matériau graveleux caillouteux sableux, avec une courbe granulométrique étalée et continue, les particules fines représentent 9% et un IP jugé acceptable.

IV-2 Etude de formulation**IV-2-1 Identification d'agrégats et bitume**

Trois fractions granulaires : 0/3- 3/8 - 8/15. Ainsi que le bitume de classe 40 / 50

- **Essais réalisés**

Après identification visuelle les essais ci après ont été réalisés conformément aux modes opératoires

- * **Essais sur granulats**

- Analyse granulométrique
- Densité apparente et absolue
- Essai de propreté
- Essai Los Angeles
- Essai coefficient d'aplatissement
- Essai d'équivalent de sable

- * Essai sur liant:

- Essai de pénétration à 25 °c sur liant
- Essai point de ramollissement sur liant

- Résultats des essais:

- **Essai bleu de méthylène**

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10$$

(Eq : IV-2-1)

Tableau IV-2-1 : Résultats de l'essai.

Masse de la prise d'essai(g)	volume total de solution de colorant injectée (ml)	valeur de bleu de méthylène, MB
M ₁ =214.00	15.00	0.70

- **Essai détermination de la propreté**

$$m = M_s - m' \quad (\text{Eq : IV-2-2})$$

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} \times M_h \quad (\text{Eq : IV-2-3})$$

$$P = \frac{m}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq : IV-2-4})$$

Tableau IV-2-2 : Résultats de l'essai (classe granulaire 3/8).

Masse d'échantillon $M_h(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_{1h}(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_{1s}(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_s(\text{g})$	Masse des refus (1.6 mm) $m'(\text{g})$	Masse du passant (1.6 mm) $m(\text{g})$	Propreté (%)
1884	1866	1870	1888	1875	13	0.69

Tableau IV-2-3 : Résultats de l'essai (classe granulaire 8/15).

Masse d'échantillon $M_h(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_{1h}(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_{1s}(\text{g})$	Masse d'échantillon $M_s(\text{g})$	Masse des refus (1.6 mm) $m'(\text{g})$	Masse du passant (1.6 mm) $m(\text{g})$	Propreté (%)
3150	3200	3140	3090	3057	33	1.07

- **Essai équivalent de sable**

L'équivalent de sable est donné par la formule : $E_s = 100 \frac{h_2}{h_1}$ (Eq : IV-2-5)

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_s = 100 \frac{h_2^2}{h_1} \quad (\text{Eq: IV-2-6})$$

Tableau IV-2-4 : Résultats de l'essai.

H1(cm)	H'2(cm)	H2(cm)	ESV(%)	ESP(%)
14.6	10.5	10.4	71.92	71.23
14.7	10.6	10.4	72.11	70.75
14.5	10.5	10.3	72.41	71.03
moyenne			72	71
Es moyenne			72	

- **Essai « MicroDeval »**

Poids de l'échantillon : $M = 500\text{g}$

Type d'essai : micro deval en présence de l'eau :

$$\text{MDE} = 100 \frac{m}{M} = 100 \frac{M-m'}{M} \text{ (Eq : IV-2-7)}$$

où :

M : est la masse sèche de l'échantillon pour essai (500 g),

$m = M - m'$: est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm.

Tableau IV-2-5 : Résultats de l'essai.

Classe granulaire (cm)	Charge abrasive (g)	Masse sèche des refus au tamis 1.6mm m' (g)	Masse sèche des passants au tamis 1.6mm m (g)	MDE (%)	MDE Moyen (%)
10/14	5000	403	97	19.4	19%
		407	93	18.6	

- **Essai « Los Angeles »**

Le coefficient Los Angeles (LA) est, par définition, le rapport $LA = 100 \frac{m}{5000}$

Où :

$m = 5000 - m'$ est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en grammes.

Poids de l'échantillon : 5000 g

Tableau IV-2-6 : Résultats de l'essai.

Classe granulaire (cm)	Nombre de boulets	Masse sèche des refus au tamis 1.6mm m' (g)	Masse sèche des passants au tamis 1.6mm m (g)	LA (%)	LA Moyen (%)
10/14	11	3824.5	1175.5	23.51	23%
		3867.2	1132.8	22.66	

- **Essai « coefficient d'aplatissement »**

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D , en grammes.

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par le tableau du paragraphe au dessus.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$A = \frac{M_e}{M_g} 100 \quad (\text{Eq : IV-2-8})$$

Tableau IV-2-7 : Résultats de l'essai (classe granulaire 3/8).

Masse des granulaire Mg(g)	Masse des éléments passant Me(g)	coefficient d'aplatissement A(%)
1830	256.2	14

Tableau IV-2-7 : Résultats de l'essai (classe granulaire 8/15).

Masse des granulaire Mg(g)	Masse des éléments passant Me(g)	coefficient d'aplatissement A(%)
3120	249.6	8

- **Essai pour la détermination de la masse volumique absolue**

$$\rho_a = \frac{P_2}{P_2 + P_1 - P_3} \rho \quad (\text{Eq: IV-2-8})$$

Tableau IV-2-8 : Résultats de l'essai (fraction 0/3)

La masse de récipient plein d'eau P ₁ (g)	La masse de l'échantillon P ₂ (g)	La masse de récipient rempli de l'échantillon et de l'eau P ₃ (g)	La masse volumique d'eau à 15 °C (t/m ³)	La masse volumique absolue (t/m ³)
100	50	131.4	0.999	2.68

Tableau IV-2-9 : Résultats de l'essai (fraction 3/8 et 8/15).

La masse de récipient plein d'eau P ₁ (g)	La masse de l'échantillon P ₂ (g)	La masse de récipient rempli de l'échantillon et de l'eau P ₃ (g)	La masse volumique d'eau à 15 °C (t/m ³)	La masse volumique absolue (t/m ³)
100	50	131.44	0.999	2.69

- **Essai pour la détermination de la masse volumique apparente**

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{\text{volume apparent}} \quad (\text{Eq : IV-2-9})$$

Tableau IV-2-10 : Résultats de l'essai(fraction 0/3).

volume de récipient V(cm ³)	La masse de l'échantillon P ₁ (g)	La masse de récipient rempli de l'échantillon P ₂ (g)	La masse volumique apparente (t/m ³)
60	50	149	1.65

Tableau IV-2-11 : Résultats de l'essai(fraction 3/8).

volume de récipient V(cm ³)	La masse de l'échantillon P ₁ (g)	La masse de récipient rempli de l'échantillon P ₂ (g)	La masse volumique apparente (t/m ³)
60	50	131.6	1.36

Tableau IV-2-11 : Résultats de l'essai(fraction 8/15).

volume de récipient V(cm ³)	La masse de l'échantillon P ₁ (g)	La masse de récipient rempli de l'échantillon P ₂ (g)	La masse volumique apparente (t/m ³)
60	50	134,6	1.41

IV-2-2 Récapitulatif et spécification

- **Analyse granulométrique:**

les courbes granulométriques des trois fractions sont continues.

Mailles mm	Classes granulaires		
	8 / 15	3 / 8	Sable
25	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
14	72	100	100
10	25	100	100
8	5	92	100
6,3	1	60	100
4	0	4	95
2	0	1	69
1	0	0	48
0,500	0	0	36
0,315	0	0	30
0,200	0	0	24
0,080	0	0	17

- **Densités apparentes et absolues (T/M3) :**

Fractions	0/3	3/8	8/15
d/ apparentes	1,65	1,36	1,41
d/absolues	2,68	2,69	2,69

- **Essai« Propreté »**

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0.5 mm d'après la norme (NFP 18-591)

Fractions	3/8	8/15
Tamisât à 0.5mm	0,69%	1,07%
Spécification	≤ 2%	

- **Essai « Los Angeles »**

La résistance aux chocs des gravillons a été testée par l'essai d'après la norme (NFP 18-573) sur la fraction 10/14 et la fraction 4/ 6.3

Fractions	8/15
Los Angeles	23
Spécification	≤ 25

- **Essai« Micro Deval »**

La résistance aux chocs des gravillons a été testée par l'essai d'après la norme (NFP 18-572) sur la fraction 10/14

Fractions	8/15
MDE	19
Spécification	≤ 25

- **Essai« Coefficient d'aplatissement »**

Fractions	3/8	8/15
Forme	14	8
Spécification	≤ 25	

- **Essai« Equivalent de sable »**

Es piston =72% Spécification ≥ 60%

- **Essai « bleu de méthylène » VB**

Désignation	VB	Spécification
Essai au bleu de méthylène	0,7	≤ 1

- Essais sur liant :

- Essai de pénétration à 25 °C

Désignation	Résultats	Spécification
Essai De Pénétration A 25 °C	46	40-50

- Point de Ramollissement sur liant :

Désignation	Résultats	Spécifications
Point De Ramollissement	54	47-60

IV-2-3 Calcul les pourcentages des fractions granulaires

Mailles	t 2 i	t 3 i	t 4 i
mm	8 / 15	3 / 8	sable
25	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
14	72	100	100
10	25	100	100
8	5	92	100
6,3	1	60	100
4	0	4	95
2	0	1	69
1	0	0	48
0,500	0	0	36
0,315	0	0	30
0,200	0	0	24
0,080	0	0	17

- Refus de chaque Tamis=100 -%passant de chaque Tamis (Eq : IV-2-10)

Exemple : Refus=100-0=100

• Mélange = $\sum (\%0/3 + \%3/8 + \%8/15)$

(Eq : IV-2-11)

Exemple : Mélange = 100+96+5=201

8 / 15	3 / 8	Sable	Mélange
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
28	0	0	28
75	0	0	75
95	8	0	103
99	40	0	139
100	96	5	201
100	99	31	230
100	100	52	252
100	100	64	264
100	100	70	270
100	100	76	276
100	100	83	283
100	100	100	300

SI (test logique ; valeur si vrai ; valeurs faux)

8 / 15	3 / 8	cablo	mélange
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
28	0	0	28
75	0	0	75
95	8	0	103
99	40	0	139
0	96	5	101
0	99	31	130
0	0	52	52
0	0	64	64
0	0	70	70
0	0	76	76
0	0	83	83
0	0	0	0
297	243	381	921
$\Sigma=297$	$\Sigma=243$	$\Sigma=381$	$\Sigma=921$
32,25	26,38	41,37	100,00

Le % de chaque fraction = $(\sum \% \text{ du fraction} / \sum \text{Mélange}) * 100$

(Eq : IV-2-12)

Exemple : Le % de fraction = $(297/921) * 100 = 32.25\%$

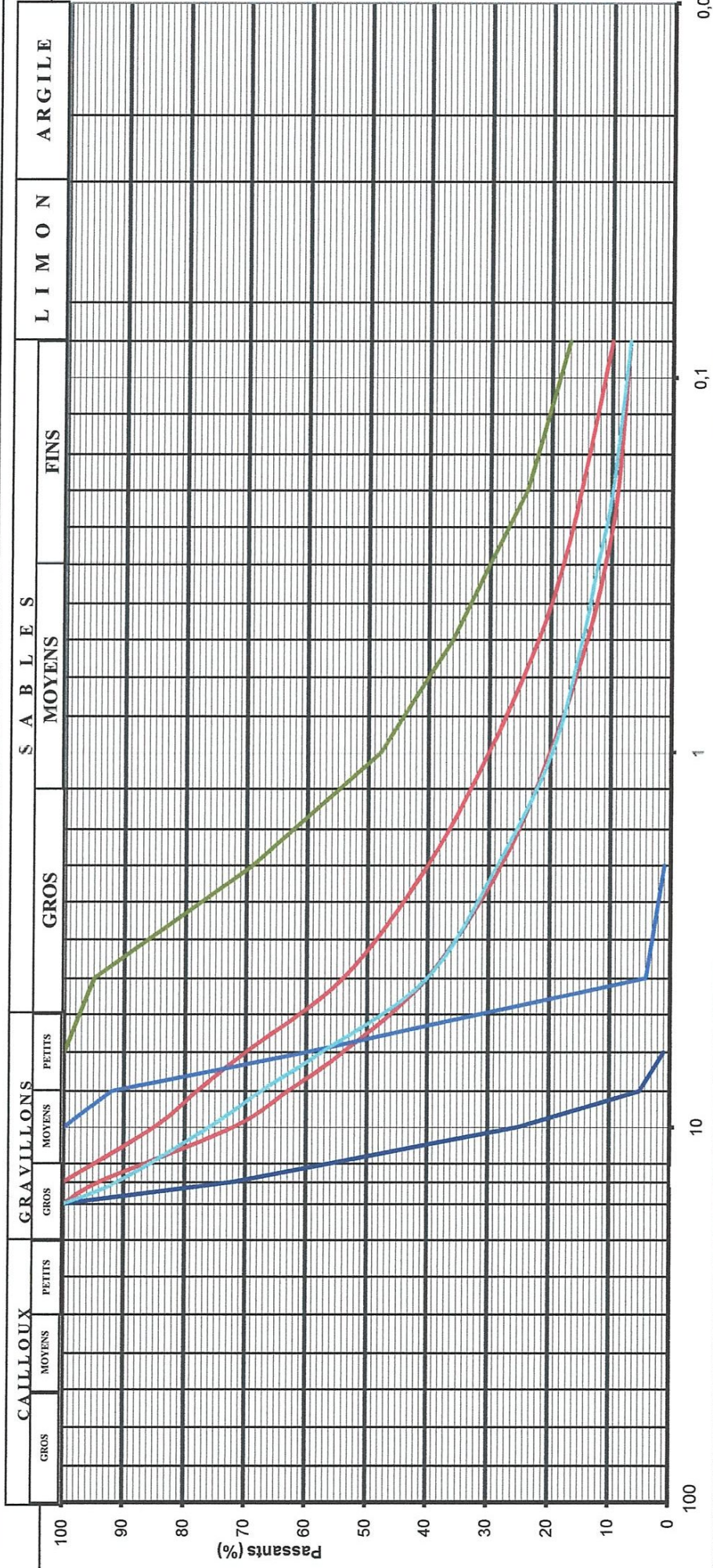
Tableau IV-2-12 : Calcul de la courbe du mélange (méthode matricielle).

Mailles mm	8 / 15		3 / 8		Sable		Courbe Calculée 100,00	Fuseau 0 / 14	
	Proportion %	32	Proportion %	27	Proportion %	41		Maxi	Mini
25	100	32	100	27	100	41	100	100	100
20	100	32	100	27	100	41	100	100	100
16	100	32	100	27	100	41	100	100	100
14	72	23	100	27	100	41	91	100	94
10	25	8	100	27	100	41	76	85	72
8	5	2	92	25	100	41	67	78	63
6,3	1	0	60	16	100	41	58	70	54
4	0	0	4	1	95	39	40	54	40
2	0	0	1	0	69	28	29	40	28
1	0	0	0	0	48	20	20	30	20
0,500	0	0	0	0	36	15	15	22	14
0,315	0	0	0	0	30	12	12	18	11
0,200	0	0	0	0	24	10	10	15	9
0,080	0	0	0	0	17	7	7	10	7
% refus de chaque Tamis par rapport au % de chaque fraction = (% passant * % fraction) / 100							$\Sigma = \Sigma \% \text{refus de chaque Tamis par rapport au \% de chaque fraction}$		

ANALYSE GRANULOMETRIQUE : BETON BITUMINEUX 0 / 14

IDENTIFICATION

FRACTIONS	% GRANULAT		D/ apparentes	D/ absolue	PROPRETE	LA	CA	ES	MDE	VB
	Sable	% Bitume								
3/8	41%	5,75%	1,65	2,68	---	---	---	72%	---	0,21
8/15	27%		1,36	2,69	0,69%	---	---	---	---	
	32%		1,41	2,69	1,07%	23%	8%	---	20	



IV-2-4 Teneur en liant

$$\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f \quad (\text{Eq : IV-2-13})$$

G : est la proportion pondérale des éléments > 6,3

S : est la proportion pondérale des éléments compris entre 6,3 et 0,315

s : est la proportion pondérale des éléments compris entre 0,315 et 0,08

f : est la proportion pondérale des éléments passants au tamis de 0,08

La teneur en liant " t " peut être appréciée à l'aide de la formule suivante :

$$t = \alpha K \sqrt[5]{\Sigma} \quad (\text{Eq : IV-2-14})$$

Mailles	Courbe Calculée
mm	100
25	100
20	100
16	100
14	91
10	76
8	67
6,3	58
4	40
2	29
1	20
0,500	15
0,315	12
0,200	10
0,080	7

G = 0,420

S = 0,460

s = 0,050

f = 0,070

$\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f =$	11,213
--	--------

Masse volumique réelle des granulats $\tau_G =$	2,69
---	------

$\alpha = 2,65 / \tau_G$	0,98513
--------------------------	---------

τ_G est la masse volumique des granulats

Module de richesse K = 3,45 à 3,9

Module de richesse K	3,45	3,6	3,75
$\alpha =$	0,99	0,99	0,99
$\Sigma =$	11,21	11,21	11,21
Teneur en liant t	5,51	5,75	5,99

MARSCHALL 1

EPROUVETTE N°	1		2		3		4		5		MOYENNES
	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	
HAUTEUR DE L'EPROUVETTE en mm	63,20	63,42	62,90	62,94	63,10	62,90	63,20	63,58	62,70	62,52	
	63,90		63,50		62,50		63,60		61,70		
	62,50		62,70		62,40		64,90		63,20		
	63,70		62,20		62,90		63,60		62,60		
	63,80		63,40		63,60		62,60		62,40		
POIDS DE L'EPROUVETTE en g	1203,20		1208,8		1205,5		1203,7		1211,23		
DIAMETRE DE L'EPROUVETTE en mm	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	
	101,5	101,60	101,6	101,67	101,2	101,47	101,6	101,70	101,6	101,80	
	101,7		101,6		101,5		101,7		101,9		
101,6	101,8		101,7		101,8		101,9				
VOLUME DE L'EPROUVETTE en cm ³	513,906		510,686		508,355		516,217		508,609		511,554
DENSITE PAR MENSURATION	2,341		2,367		2,371		2,332		2,381		2,359
DENSITE PAR PESEE HYDROSTATIQUE	Carotte N°		5		=> Densité =		2,417				
STABILITE MARSCHALL A 60 ° C en KN	9,312		10,433		8,875		7,787				9,102
COEFFICIENT DE CORRECTION	1,00		1,00		1,00		1,00				1,000
STABILITE MARSCHALL CORRIGEE en KN	9,31		10,43		8,88		7,79				9,102
FLUAGE EN MILLIMETRES	3,231		2,560		2,093		3,745				2,907

MARSCHALL 2

EPROUVETTE N°	6		7		8		9		10		MOYENNES
	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	
HAUTEUR DE L'EPROUVETTE en mm	64,40	65,58	64,00	63,60	54,30	64,48	63,90	64,08	65,30	64,78	
	65,70		55,00		63,50		64,10				
	67,20		54,20		65,00		64,50				
	65,70		54,20		64,00		65,50				
	64,90		54,70		64,00		64,50				
POIDS DE L'EPROUVETTE en g	1203,20		1208,8		1205,5		1203,7		1211,23		
DIAMETRE DE L'EPROUVETTE en mm	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	
	101,6	101,91	101,5	101,87	101,5	101,70	101,5	101,77	101,3	101,63	
	101,8		102		101,7		101,9		101,7		
	102,4		102,1		101,9		101,9		101,9		
<i>Volume de 524,545 litres</i>	534,901		518,073		523,524		520,959		525,270		524,545
<i>Volume de 2,302 litres</i>	2,264		2,327		2,313		2,310		2,298		2,302
DENSITE PAR PESEE HYDROSTATIQUE	Carotte N° 7 => Densité = 2,38										
STABILITE MARSCHALL A 60 ° C en KN	10,636				11,749		11,189		11,633		11,302
COEFFICIENT DE CORRECTION	0,96				0,95		1,00		0,96		0,970
STABILITE MARSCHALL CORRIGEE en KN	10,21				11,28		11,19		11,17		10,962
FLUAGE EN MILLIMETRES	2,993				2,66		3,048		2,159		2,995

Account	Balance	Debit	Credit	Balance	Account	Balance
10100	1000			1000	10100	1000
10200		500		500	10200	500
10300			300	300	10300	300
10400		100		100	10400	100
10500			200	200	10500	200
10600		100		100	10600	100
10700			100	100	10700	100
10800		100		100	10800	100
10900			100	100	10900	100
11000		100		100	11000	100
11100			100	100	11100	100
11200		100		100	11200	100
11300			100	100	11300	100
11400		100		100	11400	100
11500			100	100	11500	100
11600		100		100	11600	100
11700			100	100	11700	100
11800		100		100	11800	100
11900			100	100	11900	100
12000		100		100	12000	100
12100			100	100	12100	100
12200		100		100	12200	100
12300			100	100	12300	100
12400		100		100	12400	100
12500			100	100	12500	100
12600		100		100	12600	100
12700			100	100	12700	100
12800		100		100	12800	100
12900			100	100	12900	100
13000		100		100	13000	100
13100			100	100	13100	100
13200		100		100	13200	100
13300			100	100	13300	100
13400		100		100	13400	100
13500			100	100	13500	100
13600		100		100	13600	100
13700			100	100	13700	100
13800		100		100	13800	100
13900			100	100	13900	100
14000		100		100	14000	100
14100			100	100	14100	100
14200		100		100	14200	100
14300			100	100	14300	100
14400		100		100	14400	100
14500			100	100	14500	100
14600		100		100	14600	100
14700			100	100	14700	100
14800		100		100	14800	100
14900			100	100	14900	100
15000		100		100	15000	100

Account	Balance	Debit	Credit	Balance	Account	Balance
10100	1000			1000	10100	1000
10200		500		500	10200	500
10300			300	300	10300	300
10400		100		100	10400	100
10500			200	200	10500	200
10600		100		100	10600	100
10700			200	200	10700	200
10800		100		100	10800	100
10900			200	200	10900	200
11000		100		100	11000	100
11100			100	100	11100	100
11200		100		100	11200	100
11300			100	100	11300	100
11400		100		100	11400	100
11500			100	100	11500	100
11600		100		100	11600	100
11700			100	100	11700	100
11800		100		100	11800	100
11900			100	100	11900	100
12000		100		100	12000	100
12100			100	100	12100	100
12200		100		100	12200	100
12300			100	100	12300	100
12400		100		100	12400	100
12500			100	100	12500	100
12600		100		100	12600	100
12700			100	100	12700	100
12800		100		100	12800	100
12900			100	100	12900	100
13000		100		100	13000	100
13100			100	100	13100	100
13200		100		100	13200	100
13300			100	100	13300	100
13400		100		100	13400	100
13500			100	100	13500	100
13600		100		100	13600	100
13700			100	100	13700	100
13800		100		100	13800	100
13900			100	100	13900	100
14000		100		100	14000	100
14100			100	100	14100	100
14200		100		100	14200	100
14300			100	100	14300	100
14400		100		100	14400	100
14500			100	100	14500	100
14600		100		100	14600	100
14700			100	100	14700	100
14800		100		100	14800	100
14900			100	100	14900	100
15000		100		100	15000	100

ASSETS

Account Name	Code	Balance	Debit	Credit	Balance
General Ledger	1000	1000			1000
Accounts Payable	2000		2000		2000
Accounts Receivable	3000	3000			3000
Inventory	4000		4000		4000
Fixed Assets	5000		5000		5000
Equity	6000	6000			6000
Liabilities	7000		7000		7000
Income Statement	8000		8000		8000
Balance Sheet	9000		9000		9000
Summary					
Total		10000	10000	10000	10000

2024-12-31

MARSCHALL 3

EPROUVETTE N°	11		12		13		14		15		MOYENNES
	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	Lectures	Moy	
HAUTEUR DE L'EPROUVETTE en mm	63,40	63,08	62,70	63,14	62,40	62,30	62,60	62,52	62,50	62,72	
	62,20		63,70		62,60		63,70				
	62,60		63,10		63,00		62,00		62,70		62,70
	63,40		62,50		61,50		62,50		62,40		62,40
	63,80		63,70		62,00		62,80		62,30		62,30
POIDS DE L'EPROUVETTE en g	1207,90		1201,4		1201,8		1199,2		1202,5		
DIAMETRE DE L'EPROUVETTE en mm	101,6	101,63	101,6	101,73	101	101,50	101,6	101,77	101,6	101,67	
	101,6		101,7		101,7		101,9		101,8		101,8
	101,7		101,9		101,8		101,8		101,6		101,6
VOLUME DE L'EPROUVETTE en cm ³	511,486		512,980		503,837		508,276		508,900		509,096
DENSITE PAR MENSURATION	2,362		2,342		2,385		2,359		2,363		2,362
DENSITE PAR PESEE HYDROSTATIQUE	Carotte N° 5 ⇔ Densité = 2,417										
STABILITE MARSCHALL A 60 ° C en KN	8,173		7,658				9,220		8,147		8,300
COEFFICIENT DE CORRECTION	1,00		1,00				1,04		1,04		1,020
STABILITE MARSCHALL CORRIGEE en KN	8,17		7,66				9,59		8,47		8,473
FLUAGE EN MILLIMETRES	3,135		3,992,1				2,170,1		2,123,8		2,525

IV-2-5 Masse volumique des enrobés

Granulats N°	1	2	3
Désignation de la classe granulaire	Sable	3 / 8	8 / 15
Pourcentage en masse du granulat P_i	41	27	32
Masse volumique réelle des granulats MVR_{gi}	2,680	2,690	2,690
Teneur en liant en % P_l	5,51	5,75	5,99
Masse volumique réelle des granulats (moyenne)	$MVR_g = 2,686$		
Masse volumique réelle du liant MVR_l (spécification MVR_l 40/50 = 1,00 à 1,10)	1,02		
Masse volumique réelle de l'enrobe MVR	2,47	2,47	2,46
Masse volumique apparente de l'enrobe	MVA (mesurée) = 2,38		
Compacité %	C =		96,48
Pourcentage des vides résiduels %	V_r -		3,52

- $MVR = (100 + \% \text{ teneur en liant}) / (\% \text{ fraction } 0-3 / MVR_{gi} + \% \text{ fraction } 3-8 / MVR_{gi} + \% \text{ fraction } 8-15 / MVR_{gi})$ (Eq : IV-2-15)
- $Compacité = MVA / MVR$ (Eq : IV-2-16)
- $Pourcentage \text{ des vides} = 100 - Compacité$ (Eq : IV-2-17)

Tableau IV-2-13 : Récapitulatif général

Sable	41%			
3 / 8	27%			
8 / 15	32%			
Classe du liant	Liant (40 / 50)			Spécifications
Formulations	1	2	3	
Teneur en Liant (%)	5,51	5,75	5,99	
Module de Richesse (K)	3,45	3,60	3,75	
Masse volumique Apparente de l'éprouvette (g/cm ³) Pesées hydrostatiques : (MVA)	2,417	2,380	2,449	
Masse volumique Réelle des granulats : (MVRg) (g/cm ³)	2,686			
Masse volumique Réelle de l'enrobé : (MVR) (g/cm ³)	2,475	2,467	2,459	
Pourcentage des vides (%)	2,33	3,52	0,40	3 < v < 5%
Stabilité Marshall (Sm) à 60° c à la vitesse de 0,85 mm/sec	9,102	11,302	8,300	Min 10,50
Conservées après 24 heures à l'air (phase de maturation) en Kn				
Fluage Marshall (Fm) (mm)	2,907	2,595	2,925	Max 4mm
Compacité Absolue En %	97,67	96,48	99,60	92% < C < 98%

IV-2-6 Conclusion

En se référant aux résultats d'identification nous pouvons conclure ce qui suit:

- Les classes granulométriques des différents granulats sont acceptables dans l'ensemble et répondent aux spécifications pour la fabrication des enrobés.
- L'équivalent de sable est admissible.
- La résistance des agrégats à l'usure ou l'abrasion est acceptable.
- L'essai de pénétration montre que le bitume est de la classe **(40/50)**

ANNEXE: ESSAI IN SITU

I Essai « Gamma densimètre »

I-1 Objet et But de l'essai

Cet appareil gamma densimètre permet d'effectuer avec rapidité et précision des mesures d'humidité et de densité de divers sols, terrassements, granulats, bétons et enrobés bitumineux sans avoir recours à des prélèvements ou à d'autres méthodes destructives. En effectuant des mesures soit par transmission directe, soit par réflexion, le densimètre-humidimètre gamma densimètre permet de déterminer la masse volumique des matériaux grâce aux compteurs photons émis par une source radioactive (césium 137). Des compteurs Geiger situés à la base de l'appareil détectent les photons gamma et un microprocesseur convertit leurs relevés en des valeurs correspondantes de masse volumique.

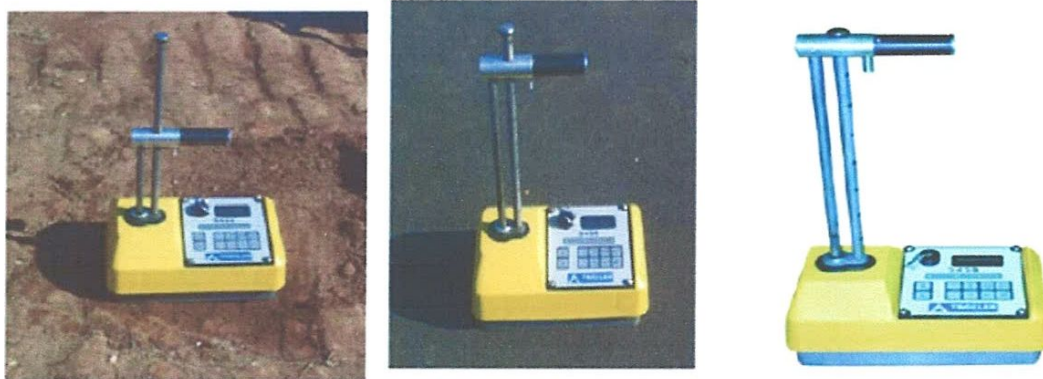


Figure I-1: Appareil gamma densimètre.

I-2 Mode opératoire

I-2-1 Appareillage

- Le densimètre –humidimètre même est un appareil portable contenant tous les modules électroniques, les accumulateurs, les compteurs ainsi que les sources radioactives.
- Le bloc de référence constitue un élément uniforme de comparaison permettant d'ajuster le gamma densimètre en fonction de la décroissance d'activité de la source.
- Le grattoir/guide de perçage peut être employé à la fois pour préparer le sol à l'endroit du point de mesure et pour guider la tige de perçage.

-La tige de perçage sert à préparer le trou devant accueillir la « tige porte –source » du gamma densimètre pour une mesure par transmission directe. N'utilisez jamais la tige porte- source à cette fin.

Un raccord et un chargeur sont aussi fournis, le premier pour un branchement sur une source d'alimentation en courant continu de 12 volts, le second pour une alimentation en courant alternatif de 115/230 volts (50/60 Hz).

Un boîtier supplémentaire pour piles est également compris, il est destiné à recevoir des piles alcalines (non fournies)

Le coffret de transport est prévu pour pouvoir contenir l'appareil et ses accessoires.

La l'extracteur permet d'extraire la tige de perçage du sol.

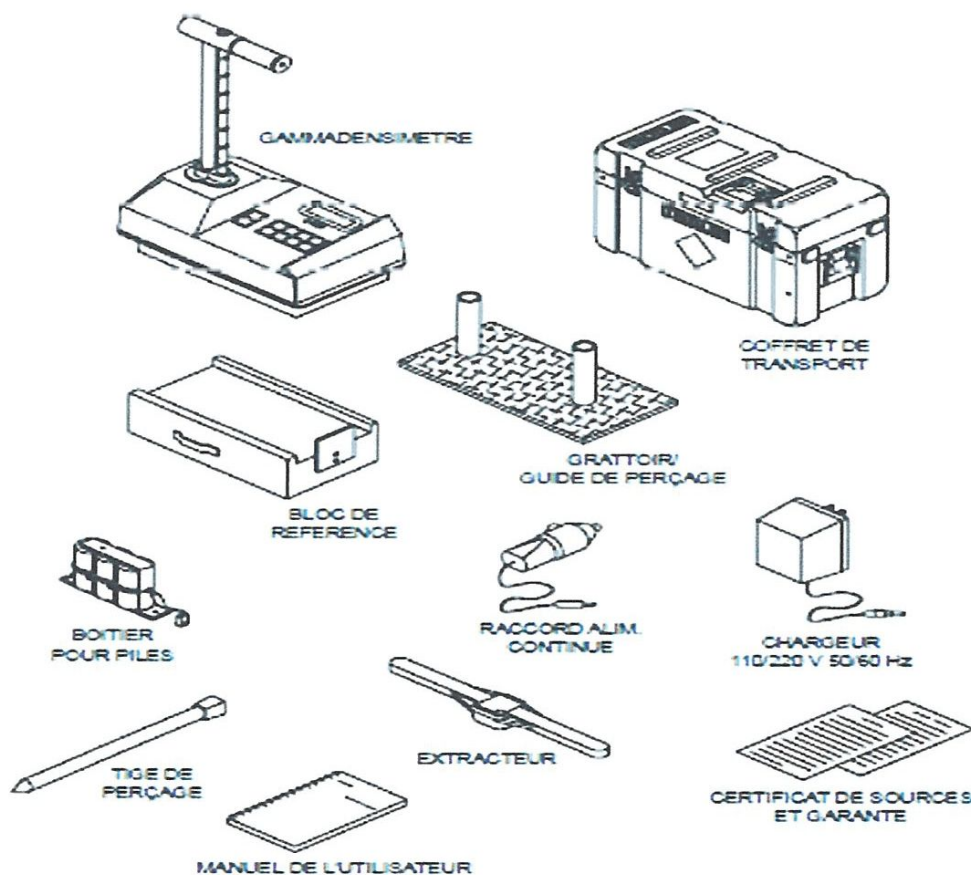


Figure I-2: Appareillages.

I-2-2 Mesure de densité

Le gamma densimètre peut fonctionner selon deux modes différents M mode en transmission directe (la tige porte-source contenant la source radioactive pénètre alors le matériau à analyser) ou mode par rétro- diffusion. Ces deux modes sont illustrés sur les figures de la page suivante. Dans le mode en transmission directe, la tige porte-source contenant le césium 137 (296 MBq/ 8 mCi) est introduite dans le matériau à la profondeur voulue. Les détecteurs (compteurs Geiger) situés à la partie inférieure du densimètre mesurent alors directement les photons gamma en provenance de la source. Avant d'atteindre ces capteurs, les photons gamma émis par cette source entrent en collision avec les électrons au sien du matériau. Plus ce dernier est dense, plus le nombre de collisions sera élevé et, par conséquent, plus le nombre de photons reçus par les compteurs sera faible. Ainsi, moins le nombre de photons reçus est grand, plus forte est la densité du matériau. Dans le mode par rétro - diffusion, les photons gamma doivent être réfléchis au moins une fois pour pouvoir atteindre les compteurs du densimètre. Quand la tige porte -source demeure relevée et se situe au cran juste inférieur à celui de la position de « SECURITE », la source radioactive et les compteurs sont alors sur un même niveau horizontal. Les photos émis par cette source pénètrent le matériau à analyser et une partie d'entre eux sera détectée. Un filtrage ayant lieu entre source et compteurs permet de réduire fortement le nombre de photons reçus en ligne directe.

I-2-3 Mesure d'humidité

L'appareil gamma densimètre est aussi un humidimètre capable, grasse à sa source neutrons de 40 mCi (1,48GBq) américium 241 : béryllium, de mesure la teneur en hydrogène (est conséquent la teneur en eau) d'un matériau

I-2-4 Présentation du clavier

Le clavier du modèle 3430 se compose de 10 touches, deux d'entre elles étant séparées et marquées respectivement <MARCHE/OUI > et <ARRET/NON >. Les touches ne sont validées que lorsqu'un bip sonore accompagne leur enfoncement. si aucun son n'est émis, il vous faudra alors ré appuyer sur la touche voulu <MARCHE/OUI > et

<ARRET/NON > sont employées à la fois pour allumer ou pour éteindre l'appareil et pour répondre aux questions pouvant s'afficher sur l'écran LCD (cristaux liquides).

Les touches de déplacement vers le haut ou vers le bas servent à faire défiler l'affichage du densimètre. Vous trouverez à la page suivante une description plus détaillée de chacune de ces touches ainsi que la référence de la page du manuel correspondant à leurs fonctions particulières. L'appareil gamma densimètre est aussi un humidimètre capable, grâce à sa source neutrons de 40 mCi (1,48 GBp) américium 241M béryllim, de mesurer la teneur en hydrogène (et par conséquent la teneur en eau) d'un matériau. Le modèle 3430-m contient quant à lui une source de 60 microcuries (2,22 MBp). Les neutrons émis par cette source Am241 : Be pénètrent le matériau en y subissant le phénomène de thermalisation : les particules sont ainsi ralenties à un point tel que de nouvelles collisions restent sans effet sur leur vitesse.

Le densimètre-humidimètre 3430 contient un compteur à l'hélium 3 qui est sensible aux neutrons thermalisés. Ce compteur ne détecte pas les particules « rapides » et, par conséquent, les relevés obtenus sont directement proportionnels à la teneur en hydrogène/eau du matériau testé.

- **Réglage de la durée de comptage**

Plus la durée de comptage est grande, plus la mesure sera précise.

Appuyez sur la touche <DUREE> pour voir s'afficher le message

Durée : ++ Sec.
(↓↑OU ENTREE)

Les touches de défilement vers le haut ou vers le bas peuvent être employées pour accéder aux durées disponibles. Pour valider celle affichée, appuyez sur <ENTREE>.

- **Réglage de la profondeur**

Pour pouvoir modifier la profondeur de mesure, appuyez sur la touche <PROF>

Prof. : xx mm.
(Changement : ↓ ↑)

Les touches de défilement vers le haut ou vers le bas peuvent être employées pour accéder aux profondeurs disponibles. Pour valider la profondeur affichée, appuyez sur<ENTREE>.

- **Référence Marshall/Proctor**

Le gamma densimètre peut être employé sur terrassement, sur chaussée ou sur béton .Vous sélectionnez le mode terrassement en introduisant ou en activant une valeur Proctor .vous choisirez le mode chaussée (asphalte) avec une valeur Marshall. Vous ne pourrez enregistrer dans le densimètre qu'une valeur Marshall et qu'une valeur Proctor à la fois

- **Mises en marche**

L'alimentation de l'appareil est assurée par des accumulateurs au nickel-cadmium (NiCd) (fournis). Lors de la première mise en marche, le panneau de commande affiche un ensemble de caractères pour vérification puis effectue le test automatique.

➤ **Remarque**

Si l'appareil s'éteint après avoir été mis en marche, il est probable que les accumulateurs ne soient pas assez chargés ou encore que l'intérieur du densimètre soit humide

Pour allumer le densimètre, appuyez sur la touche « MARCHE »

Le message suivant s'affiche alors sur l'écran LCD :

Test Ecran LCD
0123456789 ABCDEF

Une fois terminé le test automatique d'une durée de 300 secondes, le densimètre se met en mode Disponible .Vous pouvez alors accéder à toutes ses fonctions.

Pour vous avertir de cet état Disponible, le message suivant s'affichera :

**« PRET » xx min.
Prof: xx mm**

La première ligne de cet affichage correspond à la durée de comptage.

La seconde ligne indique la profondeur de mesure sélectionnée.

- **Configuration de paramètres**

Après le déballage, puis la mise en marche du densimètre, il vous faudra procéder à la configuration de différents paramètres, Une fois leurs valeurs fixées, elles le seront en général de façon permanente.

Ces paramètres incluent les unités de mesure ainsi que la durée de comptage.

- **Choix des unités de mesure**

Le densimètre peut être programmé pour des relevés en unités du système Métrique ou en unités américaines. Pour pouvoir faire votre choix, passez d'abord en mode Spécial en appuyant sur la touche correspondante « SPECIAL ».

**- RAPPEL -
(↓↑OU ENTREE)**

Puis enfoncez sept fois la touche de défilement vers le bas jusqu'à faire apparaître le message suivant :

**- CHOIX UNITES -
(↓↑ OU ENTREE)**

Pour sélectionner la fonction choix unités, appuyez sur « ENTREE »

- Unités : Kg/m³ -
(↓↑OU ENTREE)

Les touches de défilement vers le haut ou vers le bas peuvent être employées pour accéder aux différentes unités disponibles. Pour valider l'unité affichée, appuyez sur « ENTREE ».

➤ **Remarque**

Pour analyser du béton, les deux modes précédents peuvent être sélectionnés. S'il s'agit d'une mesure de densité, choisissez alors le mode terrassement. Pour une mesure d'humidité, faites appel au mode chaussée (enrobés).

Pour introduire ou pour activer une valeur Marshall ou Proctor, servez-vous de la touche « MA/PR » du clavier. Le message affiché sera alors soit :

MA : ■ ■ ■ (↓↑)
Chg valeur MA?

Soit :

PR ■ ■ (↓↑)
Chg valeur PR?

Pour passer d'une valeur Marshall à une valeur Proctor, ou vice-versa, faites appel aux touches de défilement (flèches).

Pour valider la valeur affichée, enfoncez la touche «NON ».

Pour modifier la valeur affichée, appuyez sur la touche «OUI ».

Le premier chiffre de cette valeur se mettra alors à clignoter. Pour accéder aux différentes options possibles (0-9 et.), utilisez alors les touches de défilements. Une

fois votre choix fait, validez-le avec « ENTREE ». Répétez ensuite cette étape avec le chiffre de droite le plus proche du précédent. Une fois la valeur introduite entièrement, l'appareil l'enregistrera et retournera au mode Disponible.

I-3 Expression des résultats

Tableau I-1 : Performances des enrobés

Désignation	BB 0/14
Compacité (%)	92 à 98



Figure I-3: Utilisation de l'appareille.

II Essai « chargement de plaque »

II -1 Objet et but de l'essai

Sols : reconnaissance et essais

Portance des- plates formes

Module sous chargement statique à la plaque (EV2)

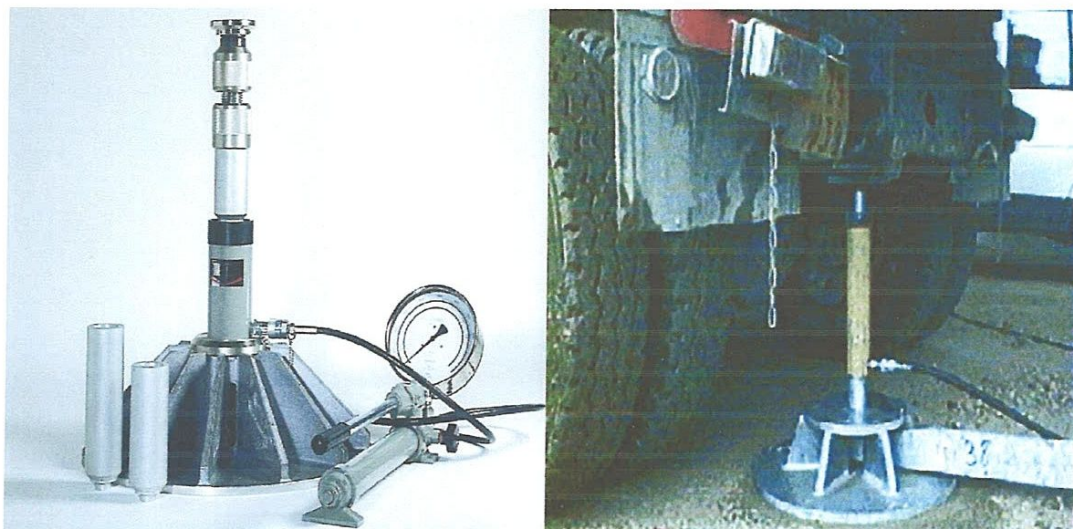


Figure II-1: Utilisation de l'appareille

L'essai s'applique aux- plates formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement destinées à la construction d'infrastructures routiers, ferroviaires, aéroportuaires. L'exception de ceux comportant des éléments dont le D_{max} excède 200 mm.

La valeur maximale du module pouvant être mesurée par cet essai est de 250 MPa. Le « Module sous chargement statique à la plaque » ne caractérise pas l'état de compacité des sols situés sous la- plate forme auscultée.

Cet essai consiste à mesurer les tassements d'une plaque circulaire sous l'action d'une charge croissante et de définir des modules de déformation pour des cycles de chargement -déchargement. Pour une application de contrôle de compactage, l'essai permet de déterminer «le module de déformation statique à la plaque » d'une- plate forme. L'essai consiste à charger une plaque circulaire rigide à l'aide d'un vérin qui, généralement, prend réaction sur un véhicule lesté. L'enfoncement de la plaque est mesuré par trois comparateurs non influencés par le mouvement du sol.

II -2 Mode opératoire

II -2-1 Appareillage

Plaque : diamètre 600 mm.

La mesure peut être réalisée :

- soit en un point seulement, situé à moins de 2 cm du centre de la plaque ;
- soit en trois points sur la périphérie de la plaque disposés à $120^\circ \pm 10^\circ$ et à égale distance du centre de la plaque (à $\pm 5\text{mm}$).

II -2-2 Principe de l'essai

- On applique une pression de 0.25 MPa, puis on mesure l'enfoncement de la plaque dans le sol par l'intermédiaire des comparateurs. Soit $Z'0$.
- On annule ensuite la charge ;
- On recharge pour appliquer une pression de 0.20 MPa puis on mesure l'enfoncement de la plaque dans le sol. Soit $Z'1$
- On annule de nouveau la charge

II -3 Expression des résultats

$$E_{v2} > 50 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad K = \frac{E_{v2}}{E_{v1}} \leq 2 \quad (\text{Eq : II -2-1})$$

Le module de déformation (en MPa) à la plaque est donné par la formule :

$$E_{vi} = \frac{\mu(1-\mu^2)q\phi}{4.Z_i} = \frac{0.74.\phi.q}{Z_i} \quad (\text{Eq : II -2-2})$$

Avec Z_i = déformation du sol (en m), moyenne des lectures sur les trois comparateurs.

- ◆ μ : Coefficient de Poisson pris égal à 0.25.
- ◆ ϕ : Diamètre de la plaque en m.
- ◆ q : contrainte appliquée (MPa)

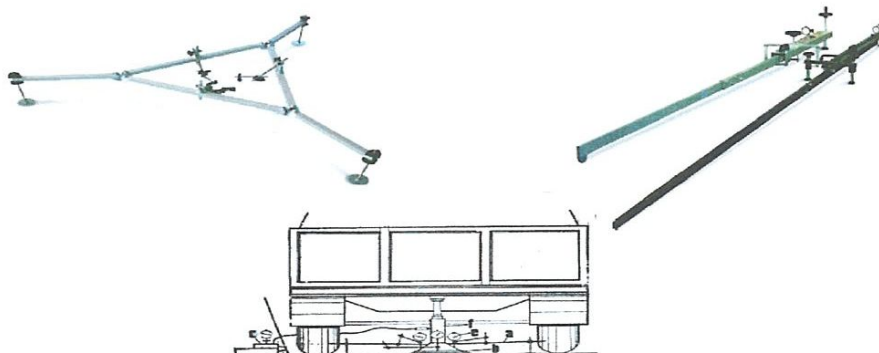


Figure II-2: Modèles des pieds.

EXEMPLE DE COMPACITE POUR " MATERIAUX TVN "

1^{er} COUCHE DE REMBLAI EN TVN (Ep=0,3m)

POINTS	REFERENCE PROCTOR			DENSITE INSITU	W % INSITU	TAUX DE COMPACITE
	γ_{opm} t/m ³	W opm%	γ_{opm} t/m ³ corrigée			
1	2,09	7,90	2,33	2,22	5,2	95%
2	2,09	7,90	2,33	2,23	5,7	96%
3	2,09	7,90	2,33	2,25	6,1	97%
4	2,09	7,90	2,33	2,24	4,9	96%

2^{eme} COUCHE DE REMBLAI EN TVN (Ep=0,25m)

POINTS	REFERENCE PROCTOR			DENSITE INSITU	W % INSITU	TAUX DE COMPACITE
	γ_{opm} t/m ³	W opm%	γ_{opm} t/m ³ corrigée			
1	2,09	7,90	2,33	2,26	5,4	97%
2	2,09	7,90	2,33	2,24	5,5	96%
3	2,09	7,90	2,33	2,24	5,4	96%
4	2,09	7,90	2,33	2,25	5,1	97%

EXEMPLE D'ESSAI CHARGEMENT A LA PLAQUE

couche testé

COUCHE DE REMBLAIS EN TVN (E=0,55m)

Temps :

FAVORABLEPLAQUE : 60TEMPERATURE : 28 C°

$E_{vi} = 0.74 \times \Phi \times q / Z_i$	<i>S. TASSEMENTS MOYENS DE LA PLAQUE</i>		<i>OBSERVATION</i>
	<i>1^{ER} CYCLE</i>	<i>2^E CYCLE</i>	
	<i>MM</i>	<i>MM</i>	
<i>2,5</i>	<i>1,68</i>	<i>1,24</i>	<i>Les Résultats Sont Conformés</i>
<i>2,0</i>	<i>1,16</i>	<i>0,52</i>	
<i>EV1</i>	<i>660,71</i>	<i>601,55</i>	
<i>EV2</i>	<i>765,52</i>	<i>990,46</i>	
$K = EV_2 / EV_1$	<i>1,16</i>	<i>1,65</i>	

Bibliographie

- ✓ Normes européenne **AFNOR 1999-2005**
- ✓ Cahier des prescriptions spéciales (Applicable à l'entretien des routes nationales)
Ministère Des Travaux Publics
- ✓ Protocole de contrôle béton bitumineux **Ministère Des Travaux Publics**
- ✓ Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées **janvier 1995**
- ✓ Eléments De Matériaux De Construction Et Essais **Dr Cherait Yacine**
et Nafa Zahredinne D.P.U.G
- ✓ Manuel Du Laboratoire Routier **Dunos**