

01. SOLS ET MATERIAUX DE REMBLAI

- 01.01 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS:
METHODE PAR TAMISAGE ET METHODE
AEROMETRIQUE**
- 01.03 LIMITES DE LIQUIDITE ET DE PLASTICITE DES
SOLS** (version 05/2014 + corrections 06/2014)
- 01.11 DELITEMENT DES SOLS, SABLES, MATIERES
D'AGREGATION, GRAVILLONS ET GRAVES**
- 01.12 GONFLEMENT DES SOLS, SABLES, MATIERES
D'AGREGATION, GRAVILLONS ET GRAVES**
- 01.18 TAUX DE CENDRES (EN PRESENCE DE PYRITE)
(TENEUR EN PYRITE)**
- 01.19 VITESSE SISMIQUE DANS LES SOLS COMPACTS**
- 01.24 PRELEVEMENT A LA LIVRAISON D'UN
ECHANTILLON DE MATERIAUX POUR SOUS-
FONDATION ET FONDATION DE TYPE
GRANULAIRE** (version 10/2018)
- 01.25 ESSAI DE SENSIBILITE AU GEL-DEGEL
SPECIFIQUE AUX GRANULATS DONT LA
RESISTANCE AU GEL-DEGEL EST DECLAREE F10**
(version 04/2019)

01.01 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS: METHODE PAR TAMISAGE ET METHODE AEROMETRIQUE

Référence de base:

- Mode Opérateur "Analyse granulométrique par sédimentation", CRR Bruxelles - CR6/76
- ASTM D422: "Standard Method for particle - size analysis of soils", BS 1377: "Methods of tests for soils for civil engineering purposes".

1. BUT DE L'ESSAI

Connaître une des caractéristiques permettant d'identifier un sol.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

La fraction granulométrique supérieure à 0,063 mm est déterminée par tamisage à sec, tandis que la fraction inférieure à 0,063 mm est déterminée par sédimentation continue (méthode aréométrique).

Pour le chapitre C.2.3. (Terres pour gazonnements et plantations), la fraction granulométrique retenue est 0,050 mm.

3. APPAREILLAGE ET RÉACTIFS

- Etuve réglée à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- Balances permettant de peser:
 - 100 g à 0,01 g près;
 - 1 kg à 0,1 g près;
 - 10 kg à 1 g près;
 - 50 kg à 10 g près.
- Appareils et récipient pour le fractionnement (méthode des quarts) et la dispersion des échantillons conformes à la norme ASTM D422.
- Agitateur manuel (fig. 01.01).
- Aréomètre type 151 H conforme à la norme ASTM E100: "Standard specifications for ASTM. Hydrometers".
- Série d'au moins quatre éprouvettes de sédimentation (hauteur ± 45 cm, diamètre intérieur $\pm 6,3$ cm; avec trait de repère à 1000 ml).
- Thermomètre de 10 à 40°C , gradué en $0,1^\circ\text{C}$.
- Bain thermostatique dont la température est réglée à $(25 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.
- Bêchers de 250 ml et baguettes de verre.
- Série de tamis conformes à la norme NBN EN 933-2 "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2: Détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures", à ouverture de maille de 80,0 - 40,0 - 20,0 - 10,0 - 5,0 - 2,5 - 2,00 - 1,00 - 0,500 - 0,250 - 0,125 - 0,063 mm avec fond et couvercle; les tamis sont choisis en fonction du matériau à analyser.
- Chronomètre précis à la seconde.
- Solution de défloculant récemment préparée (1 mois maximum):
 - dissoudre 40 g d'hexamétophosphate de sodium (p.a) dans un litre d'eau distillée ou déminéralisée; amener le pH entre 8 et 9 par addition de carbonate de sodium (p.a.).

4. MODE OPÉRATOIRE

4.1. Préparation des échantillons d'analyse.

4.1.1. Sols ne contenant pas de grains supérieurs à 2 mm.

L'échantillon global est traité (séchage à une température inférieure à 40°C ou humidification) de manière à pouvoir être désagrégé au moyen d'un pilon à bout caoutchouté puis réduit, par la méthode des quarts ou passages aux fusils, pour obtenir finalement un échantillon d'analyse:

- d'environ 120 g dans le cas des sols sableux et
- d'environ 70 g dans le cas des sols limoneux ou argileux
- qui est pesé à 0,01 g (masse M_1).

De l'échantillon réduit, on prélève un échantillon auxiliaire de masse M_A , pesé à 0,01 g près. Il est séché à l'étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante à 0,01 g près (M'_A).

4.1.2. Sols contenant des grains supérieurs à 2 mm.

L'échantillon global est traité (séchage à une température inférieure à 40°C ou humidification) de manière à pouvoir être désagrégé au moyen d'un pilon à bout caoutchouté ou d'un rouleau métallique sur une feuille de caoutchouc puis réduit, par la méthode des quarts, pour obtenir un échantillon dont la masse minimale est conforme au tableau ci-dessous:

Dimension maximale des grains	Masse minimale de l'échantillon réduit		
Fraction à analyser	2 mm	10 mm	20 mm
≤ 2 mm	120 g (sable) 70 g (argile, limon)		
> 2 mm		500 g	5 kg

L'échantillon réduit est alors versé dans un récipient et recouvert d'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à ce que les agglomérats formés lors du séchage soient devenus friables, puis on tamise sous eau sur le tamis à ouverture de maille de 2 mm.

Le refus de ce tamisage est séché à l'étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante à 0,1 % près (masse M).

Les eaux de lavage provenant du tamisage humide et contenant la fraction passant au tamis à ouverture de maille de 2 mm sont évaporées au bain-marie, puis le résidu ainsi formé est séché à l'air à une température inférieure à 40°C jusqu'à ce qu'il puisse être désagrégé au pilon à bout caoutchouté. On le pèse ensuite à 0,1 % près de sa masse (M_1).

De ce passant de masse M_1 , on prélève un échantillon d'analyse de (80 à 100) g (sols sableux) ou de (40 à 60) g (sols limoneux ou argileux), le solde constituant un échantillon auxiliaire pesé à 0,01 g près (masse M_A) est alors séché à l'étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante à 0,01 g près (masse M'_A).

4.2. Réalisation des essais.

4.2.1. Tamisage des grains supérieurs à 2 mm.

Celui-ci est réalisé conformément à la méthode décrite dans la norme NBN EN 933-1 "Essais pour déterminer les propriétés géométriques des granulats: partie 1: détermination de la granularité: analyse granulométrique par tamisage"

Le refus de masse sèche M obtenu du tamisage humide sur le tamis à ouverture de maille de 2 mm (§ 4.1.2.) est directement tamisé sur les tamis prescrits au § 3, placés par ordre décroissant d'ouverture de maille de 80 à 2 mm.

L'usage d'un secoueur mécanique peut faciliter l'opération, mais, il faut obligatoirement terminer le tamisage à la main, pour chaque tamis.

On pèse cumulativement, à 0,01 % près de la masse M , les refus sur les tamis successifs, soient R_1, R_2, \dots, R_7 , les masses cumulées sur les différents tamis.

Le passant au tamis à ouverture de maille de 2 mm doit être inférieur à 1 % de la masse M . Si cette condition n'est pas remplie, l'essai doit être recommencé.

4.2.2. Mise en suspension de l'échantillon soumis à la sédimentation.

Dans certains cas, un prétraitement est nécessaire (réaction chimique).

Ce fait doit être mentionné dans le rapport d'essais.

L'échantillon destiné à l'analyse granulométrique de la fraction inférieure à 2 mm, obtenu selon les § 4.1.1. ou 4.1.2. est versé dans un bécher de 250 ml, recouvert par 125 ml de la solution de défloculant puis mélangé avec une baguette de verre et laissé au repos pendant au moins 16 heures.

Après ce temps, il est transvasé quantitativement dans le récipient de dispersion prévu par la norme ASTM D422. Cet échantillon est porté à la moitié du volume dudit récipient avec de l'eau distillée ou déminéralisée puis agité pendant une minute.

Lorsque l'agitation est terminée, la mise en suspension est transférée quantitativement dans l'éprouvette de mesure et le niveau du liquide est porté au trait de 1000 ml avec de l'eau distillée ou déminéralisée.

L'éprouvette est alors bouchée, retournée 60 fois sens dessus-dessous et placée dans le bain thermostatique.

Dès que la mousse formée à la surface du liquide a disparu, on introduit l'agitateur manuel dans l'éprouvette et on agite vigoureusement la suspension par une quinzaine de mouvements rapides et verticaux de l'agitateur.

4.2.3. Mesures à l'aréomètre.

Dès que l'agitateur manuel est retiré de la suspension après la dernière agitation, on démarre le chronomètre et on immerge doucement l'aréomètre dans l'éprouvette de mesure.

(Remarque: Au moins 12 heures avant la première mesure, on introduit l'aréomètre dans une seconde éprouvette, dite éprouvette d'attente, placée dans le bain thermostatique et contenant 125 ml de solution de défloculant et 875 ml d'eau distillée ou déminéralisée).

On effectue les lectures de masse volumique relative à 0,001 près (L) après 30 secondes, 1 minute et 2 minutes, puis on replace l'aréomètre dans l'éprouvette d'attente et on fait une lecture (L') avec la même précision que précédemment.

On fait de nouvelles lectures (L) après 5, 15, 30 minutes, 1 heure, 4 heures et 24 heures de sédimentation, l'aréomètre étant dans l'éprouvette d'attente après chaque lecture.

4.2.4. Tamisage des grains supérieurs à 0,063 mm.

Après la dernière mesure à l'aréomètre, le contenu de l'éprouvette de sédimentation est versé sur un tamis à ouverture de maille de 0,063 mm et lavé à l'eau pour éliminer les particules inférieures à cette dimension.

Le refus est séché à l'étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante à 0,01 g près, puis tamisé sur les tamis prescrits au § 3, placés par ordre décroissant d'ouverture de maille de (1,00 à 0,063) mm de la même manière que décrite au § 4.2.1.

On pèse cumulativement à 0,01 g près les refus sur les tamis successifs: soient r_1, r_2, \dots, r_5 les masses cumulées sur les différents tamis.

5. CALCULS

5.1. Coefficients de correction à introduire dans le calcul de l'analyse granulométrique.

Les coefficients de correction nécessaires sont calculés de la façon suivante :

$$A = \frac{100}{M + \frac{M_1 \cdot M'_A}{M_A}}$$

$$B = A \cdot \frac{M_1}{M_1 - M_A}$$

où:

M = masse sèche du refus au tamis à ouverture de maille de 2 mm selon le § 4.1.2. (g);
M₁ = masse "humide" de l'ensemble des grains inférieurs à 2 mm déterminée selon les § 4.1.1. ou 4.1.2. (g);

M_A = masse de l'échantillon auxiliaire avant le séchage à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ décrit aux § 4.1.1. ou 4.1.2. (g);

M'_A = masse de l'échantillon auxiliaire après le séchage à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ décrit aux § 4.1.1. ou 4.1.2. (g).

$$C = 1000 \cdot B \frac{\gamma_k}{\gamma_k - 1}$$

où:

γ_k est la masse volumique, exprimée en g/cm³, des grains de sol.

5.2. Calcul des résultats de l'analyse granulométrique.

5.2.1. Les pourcentages de refus cumulés sur les tamis à ouverture de maille supérieure à 2 mm

(X_1 à X_7) se calculent avec une décimale par la formule:

$$X_i = A.R_i (\%)$$

où:

i = le numéro d'ordre du tamis ayant servi à exécuter l'essai, sa valeur allant de 1 à 7;
 R_i = les refus cumulés sur les différents tamis (R_1, R_2, \dots, R_7) selon § 4.2.1. (g).

Ils s'expriment à l'unité de pour cent la plus proche.

5.2.2. Les pourcentages de refus cumulés sur les tamis à ouverture de maille inférieur à 2 mm. (x_1 à x_5) se calculent avec une décimale, par la formule:

$$x_i = X_7 + B.r_i (\%)$$

où:

i = le numéro d'ordre du tamis ayant servi à exécuter l'essai, sa valeur allant de 1 à 5;
 X_7 = le pourcentage de refus cumulé sur le tamis à ouverture de maille de 2 mm (%);
 r_i = les refus cumulés sur les différents tamis (r_1, r_2, \dots, r_5) selon le § 4.2.4. (g).

Ils s'expriment à l'unité de pour cent la plus proche.

5.2.3. En ce qui concerne l'analyse par sédimentation de la fraction granulométrique inférieure à 0,063 mm on calcule d'abord les diamètres des grains ayant terminé leur sédimentation aux différents temps t indiqués au § 4.2.3. ci-dessus, selon la formule:

$$D = K. \sqrt{\frac{h}{t}}$$

où:

D = le diamètre équivalent des grains, en millimètres, calculé au 0,0001 près et arrondi au 0,001 le plus proche pour $D > 0,010$ mm, et calculé au 0,00001 près et arrondi au 0,0001 le plus proche pour $D < 0,010$ mm;
 K = fonction de la température de l'eau du bain thermostatique et de la masse volumique (γ_k des grains du sol - tableau : 01.01/2);
 h = le niveau, sous la surface libre de la suspension du centre de poussée de l'aréomètre (tableau: 01.01/3) (cm);
 t = le temps écoulé depuis la mise en suspension des grains de sol, exprimé en minutes.

Les pourcentages de grains de diamètre D (mm) sont alors calculés, avec une décimale par la formule:

$$P_{(D)} = C. (L - L') (\%)$$

où :

L = la lecture, au temps t, de l'aréomètre dans la suspension de sol à examiner;
L' = la lecture, au temps correspondant, de l'aréomètre dans la solution contenue dans l'éprouvette d'attente.

Ils s'expriment à l'unité de pour cent la plus proche.

6. ÉTABLISSEMENT DE LA COURBE GRANULOMÉTRIQUE

On réalise un essai dont le résultat est présenté sous la forme d'une courbe granulométrique.

Sur demande expresse, trois essais peuvent être effectués en vue d'un contrôle du matériau. Dans ce cas les résultats sont présentés sous forme de trois courbes granulométriques.

Les résultats sont considérés comme concordants si, en aucun point, les ordonnées (pourcentages de passants ou de refus) des deux courbes les plus éloignées l'une de l'autre ne diffèrent de plus de 5 % (absolu).

Si les résultats ne sont pas concordants, il y a lieu de recommencer les essais.

7. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

On détermine graphiquement les fractions définies au cahier des charges.

AGITATEUR MANUEL

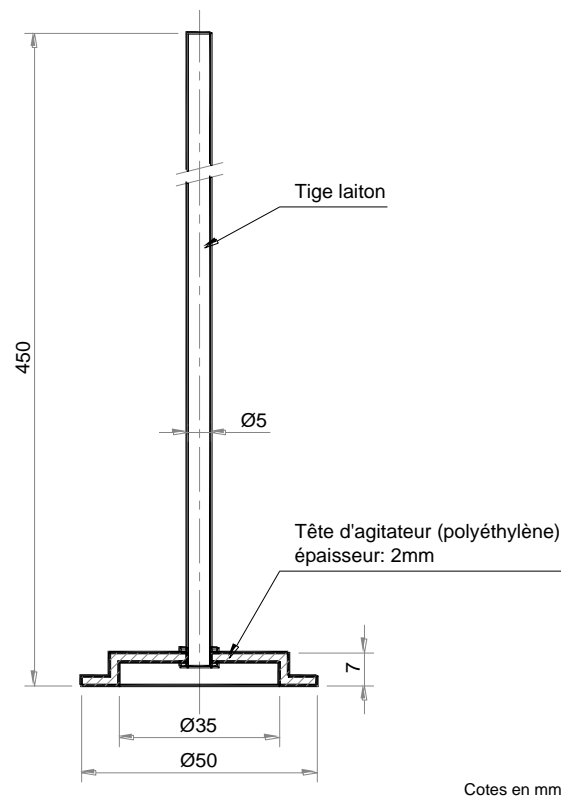


Fig. 01.01/1

TABLEAU : 01.01/2

VALEURS DE LA FONCTION "K"

Temp. °C	Masse volumique des grains (γ_k en g/cm ³ , déterminé suivant CME 01.08)								
	2,45	2,50	2,55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0,01530	0,01505	0,01481	0,01457	0,01435	0,01414	0,01394	0,01374	0,01356
17	0,01511	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
18	0,01492	0,01467	0,01443	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
19	0,01474	0,01449	0,01425	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
20	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
21	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
22	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
23	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
24	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
25	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
26	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01218	0,01201
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01225	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,01290	0,01269	0,01249	0,01230	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256	0,01236	0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

TABLEAU 01.01/3

HAUTEUR DE SEDIMENTATION h EN FONCTION
DES LECTURES L DE L'AREOMETRE

Lecture à l'aréomètre "L"	Hauteur "h" (cm)	
	Pour les mesures après 30 s, 1 min. et 2 min.	Pour les mesures ultérieures, à partir de celle à 5 min.
1,000	17,5	16,3
1,001	17,2	16,0
1,002	17,0	15,8
1,003	16,7	15,5
1,004	16,4	15,2
1,005	16,2	15,0
1,006	15,9	14,7
1,007	15,6	14,4
1,008	15,4	14,2
1,009	15,1	13,9
1,010	14,9	13,7
1,011	14,6	13,4
1,012	14,3	13,1
1,013	14,1	12,9
1,014	13,8	12,6
1,015	13,5	12,3
1,016	13,3	12,1
1017	13,0	11,8
1,018	12,7	11,5
1,019	12,5	11,3
1,020	12,2	11,0
1,021	11,9	10,7
1,022	11,7	10,5
1,023	11,4	10,2
1,024	11,2	10,0
1,025	10,9	9,7
1,026	10,6	9,4
1,027	10,4	9,2
1,028	10,1	8,9
1,029	9,8	8,6
1,030	9,6	8,4
1,031	9,3	8,1
1,032	9,0	7,8
1,033	8,8	7,6
1,034	8,5	7,3
1,035	8,2	7,0
1,036	8,0	6,8
1,037	7,7	6,5
1,038	7,4	6,2

01.03 LIMITES DE LIQUIDITE ET DE PLASTICITE DES SOLS (version 05/2014 + corrections 06/2014)

Références de base:

- NF P94-051(1993): Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des limites d’Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau
- CEN ISO/TS 17892-1: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content

1. BUT DE L’ESSAI

Caractériser la plasticité des sols en déterminant leurs limites de consistance (liquidité et plasticité) d’après les méthodes conventionnelles dues à Atterberg.

2. TERMES ET DEFINITIONS

2.1 Echantillon de laboratoire

Echantillon destiné aux essais en laboratoire

2.2 Sous-échantillon

Echantillon obtenu par réduction d’un échantillon de laboratoire

2.3 Prise d’essai

Echantillon utilisé dans sa totalité pour un seul essai.

2.4 Masse constante

Masse obtenue après séchage, à l’issue de pesées successives séparées d’au moins 1 h d’intervalle, lorsque la dernière pesée ne diffère pas de plus de 0,1 % de la précédente.

NOTE: Souvent la masse constante peut être atteinte après séchage de la prise d’essai dans une étuve réglée à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ pendant une période déterminée à l’avance. Les laboratoires d’essais peuvent déterminer le temps nécessaire pour atteindre la masse constante suivant le type et la taille de l’échantillon et en fonction de la capacité de séchage de l’étuve utilisée.

2.5 Pâte

Passant à 400 μm obtenu par tamisage en voie humide.

2.6 Limite de liquidité w_L

Teneur en eau d’un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

2.7 Limite de plasticité w_P

Teneur en eau d’un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

2.8 Indice de plasticité I_P

Différence entre les limites de liquidité et de plasticité, définissant l’étendue du domaine plastique.

$$I_P = w_L - w_P$$

2.9 Indice de consistance I_c

Rapport défini par la formule

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

La détermination de cette caractéristique n'est pas systématique; elle doit être explicitement demandée car elle nécessite des précautions pour le prélèvement de l'échantillon de sol et un conditionnement hermétique de ce dernier de manière à pouvoir déterminer correctement w , la teneur en eau du sol dans son état naturel, sans éléments supérieurs à 400 μm .

3. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

On détermine, selon les méthodes conventionnelles dues à Atterberg, deux caractéristiques de la fraction de particules de diamètre inférieur à 400 μm (appelée "pâte") des sols; à savoir:

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

La présente méthode opte pour la détermination des limites dans cet ordre, l'homogénéité de la teneur en eau au sein de l'échantillon étant plus facile à obtenir par séchage progressif que par humidification.

A partir de ces 2 caractéristiques, on calcule par différence l'indice de plasticité I_p qui définit l'étendue du domaine plastique:

$$I_p = W_L - W_P$$

4. APPAREILLAGE ET PRODUITS

4.1 Appareillages et produits généraux

- Tamis d'ouverture de mailles 400 μm , conforme à l'ISO 3310-1.
- Tamis de protection éventuel, d'ouverture supérieure à 400 μm .
- Balance permettant de peser 200 g à 0,01 g près (lecture).
- Etuve ventilée, capable de maintenir la température à $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ et à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- Flux d'air chaud (par exemple: sèche-cheveux, décapeur thermique) réglé de manière telle que la température soit supportable pour la paume de la main à une distance minimale d'environ 20 cm.
- Pèse-filtre (ou équivalent).
- Spatule.
- Eau déminéralisée.

4.2 Equipement pour la détermination de la limite de liquidité

- Appareil de Casagrande conforme à la NF P94-051, comprenant:
 - un support en bakélite (ou en toute autre matière de mêmes caractéristiques), recevant les chocs de la coupelle;
 - un arbre à came muni d'une manivelle, permettant de soulever la coupelle de 10 mm au-dessus du socle;
 - une coupelle amovible en laiton, en forme de calotte sphérique, de surface lisse, munie d'un ergot qui vient s'articuler sur une tige métallique qui constitue l'axe de rotation de la coupelle;

- une coupelle spéciale pour matériaux sableux, de forme identique à la coupelle normale, mais dont la surface intérieure est rendue rugueuse (rugosité de l'ordre du 1/2 mm) sauf sur une bande spécifiée;
- un dispositif permettant de faire varier la hauteur de chute de la coupelle, constitué essentiellement par une plaque coulissante qui entraîne dans ses déplacements l'axe de rotation de la coupelle et qui peut être bloquée par deux écrous dans une position quelconque;
- Outil à rainurer conforme à la NF P94-051;
- Jauge d'épaisseur (pour réglage de la hauteur de chute de la coupelle) conforme à la NF P94-051.

4.3 Equipement pour la détermination de la limite de plasticité

- Calibre de $3 \pm 0,5$ mm pour la détermination du diamètre des cylindres de pâte.
- Plaque de verre de dimensions permettant la manipulation décrite au § 5.3 ci-après.

5. MODE OPÉRATOIRE

5.1. Préparation.

- Si la teneur en eau initiale de l'échantillon de laboratoire ne permet pas les opérations suivantes, laisser sécher l'échantillon à l'air libre jusqu'au moment où celles-ci deviennent réalisables.
- Homogénéiser l'échantillon de laboratoire par brassage.
- Prélever une prise d'essai, représentative de l'échantillon de laboratoire et telle que la masse de particules inférieures à 400 μm qu'elle contient soit d'au moins 200 g.
- Recouvrir la prise d'essai d'eau déminéralisée, laisser imbiber à température ambiante et mélanger jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

NOTE: La durée d'imbibition est généralement de 24 h au moins; les agglomérats peuvent être écrasés entre les doigts.

- Tamiser la prise d'essai par voie humide sur un tamis de 400 μm , éventuellement protégé par un tamis d'ouverture supérieure (2 mm par exemple) et recueillir le tamisat (passant à 400 μm) avec l'eau de lavage.
- Décanter le passant à 400 μm à l'air libre et sans utilisation d'un processus accélérant (centrifugation, ajout d'un flocculant, ...).
- Siphonner le surnageant (eau claire) sans entraîner de particules solides.
- Sécher cette pâte à une température inférieure à 40°C en étuve ou sous flux d'air chaud jusqu'aux conditions de détermination de la limite de liquidité.

5.2. Détermination de la limite de liquidité w_L .

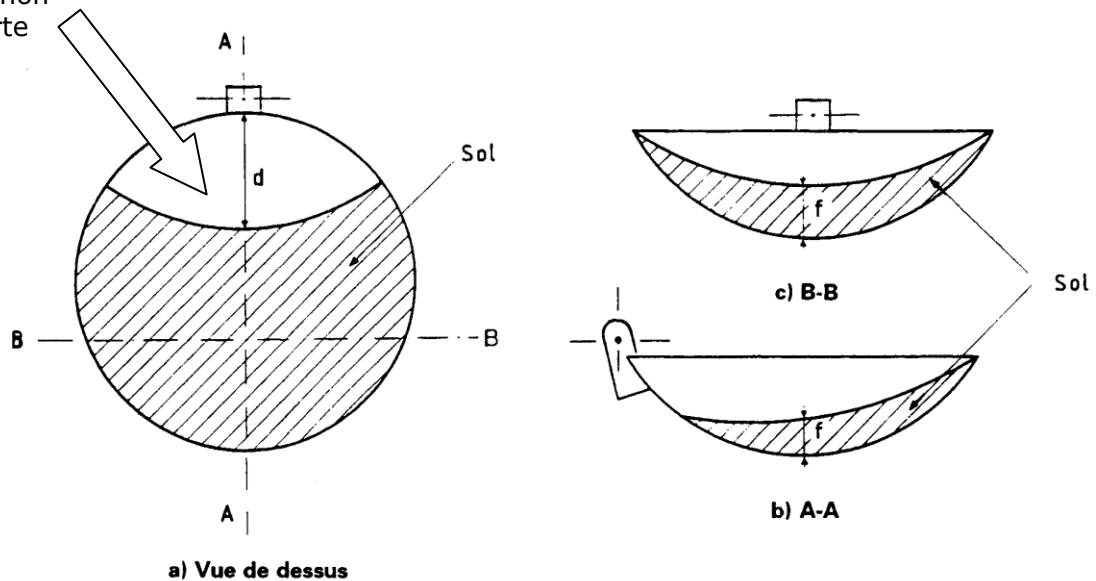
- Vérifier le réglage correct de la hauteur de chute de la coupelle de l'appareil de Casagrande, soit 10 mm (tolérance -0,1 mm / +0,5 mm).
- Prélever une quantité d'environ 100 g de pâte mûrie et malaxer soigneusement à la spatule sur une plaque de verre.
- Toujours à l'aide de la spatule, répartir une portion de cette pâte (environ 70 g) dans la coupelle, propre et sèche, de l'appareil de Casagrande de façon à former un gâteau à peu près symétrique par rapport au plan de symétrie de la coupelle.

NOTE 1: Pour les argiles, limons et sables argileux, on utilise la coupelle normale. Pour les sols très sableux qui ont tendance à glisser sur les coupelles normales, on utilise la coupelle rugueuse spéciale, après tentative à la coupelle normale.

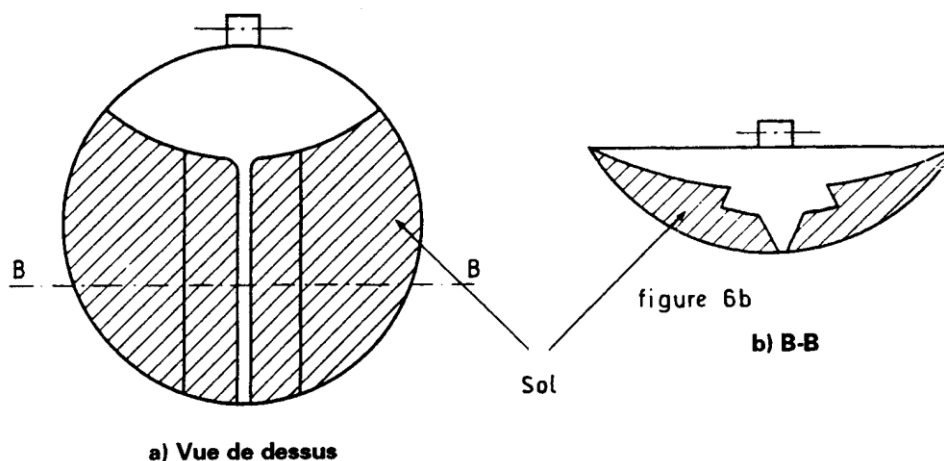
NOTE 2: Pour les sols organiques, la portion pourra avoir une masse inférieure à 70 g.

- Respecter les conditions suivantes:
 - L'épaisseur maximale du gâteau ainsi formé est d'environ 1 cm;
 - Eviter la présence de bulles d'air au cœur de l'échantillon;
 - La pâte recouvre le fond de la coupelle sauf une partie **d** d'environ 3 cm.

Partie **d** non recouverte

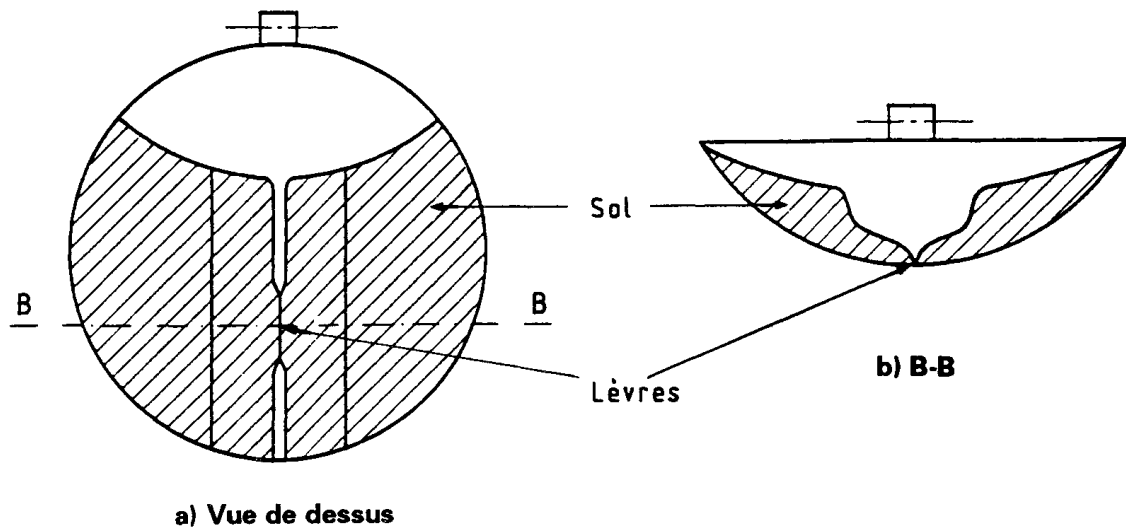


- A l'aide de la partie biseautée de l'outil à rainurer (face chanfreinée dans la direction du mouvement), tenu perpendiculairement à la surface de la coupelle, partager la pâte en deux moitiés par un mouvement circulaire partant du point d'attache vers l'avant de la coupelle.



- A l'aide de la manivelle, imprimer à la coupelle une série de chocs à la cadence régulière de 2 chocs par seconde.
- Noter le nombre de chocs **N** nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent, à la base de la coupelle, sur une longueur d'environ 1 cm (appréciation visuelle)

NOTE: 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. Dans ce dernier cas, l'essai est non valide et doit être recommencé avec la coupelle rugueuse.



- Vérifier la validité du résultat: **N** doit être compris entre 15 et 35.
 - Si **N** est inférieur à 15, la pâte est toujours trop humide et doit être séchée sous flux d'air chaud;
 - Si **N** est supérieur à 35, la pâte est trop sèche et doit être humidifiée par ajout d'un peu d'eau déminéralisée; dans ce cas, une période de mûrissement (minimum 16 h) est à nouveau nécessaire.
- A l'aide d'une petite spatule, prélever perpendiculairement à la rainure environ 10 g de pâte validée dans la zone où les deux lèvres se sont rejointes.
- Placer ce prélèvement dans un pèse-filtre.
- Déterminer la teneur en eau par séchage en étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (selon CEN ISO/TS 17892-1).
- Re-mélanger la portion utilisée à la pâte de départ et ré-homogénéiser.
- Nettoyer la coupelle et l'essuyer.
- Réduire la teneur en eau de la pâte par séchage sous un flux d'air chaud.
- Répéter ces opérations jusqu'à obtenir au minimum 4 résultats compris entre 15 et 35, avec au moins deux essais où cette fermeture est apparue entre 15 et 25 chocs et 2 autres entre 25 et 35 chocs.

5.3. Détermination de la limite de plasticité w_p .

- Poursuivre le séchage de la pâte sous flux d'air chaud jusqu'à obtenir une pâte "solide", c-à-d dans un état de consistance tel qu'elle peut être facilement roulée en boule et qu'elle n'adhère pas aux doigts lorsqu'on l'écrase.
- Prélever un échantillon d'environ 50 g de pâte
- Diviser l'échantillon en 3 sous-échantillons.
- Avec un des 3 sous-échantillons, former une boulette.
- A cadence régulière, rouler la boulette à la main sur une plaque de verre de façon à former un cylindre, aminci progressivement jusqu'à 3 ± 0.5 mm de diamètre et atteignant une longueur d'environ 10 cm.

NOTE: une cadence rapide, d'environ 60 mouvements aller-retour par minute, est recommandée afin d'éviter un séchage excessif de l'échantillon au contact de la chaleur de la main.

- Vérifier la validité du résultat : La limite de plasticité est atteinte lorsqu'au cours des manipulations décrites ci-avant, le cylindre de pâte se brise quand son diamètre atteint $(3 \pm 0,5)$ mm. Pour évaluer correctement ce diamètre, il est utile de se servir d'un calibre.
 - Si le cylindre se brise lorsque son diamètre dépasse encore 3 mm, le prélèvement est trop sec et l'essai est à recommencer sur un prélèvement plus humide;
 - Si au contraire, le diamètre peut être réduit à 3 mm sans qu'il y ait rupture, le prélèvement est trop humide. On le roule alors de nouveau en boulette, qu'on pétrit entre les doigts pour l'assécher et on recommence à le rouler en cylindre.

NOTE: Le cylindre ne peut pas être creux et doit avoir une longueur d'environ 10 cm (largeur de la paume de la main de l'opérateur).

- Dès qu'un cylindre se brisant à un diamètre de $(3 \pm 0,5)$ mm est obtenu, le placer dans un unique pèse-filtre qu'on referme.
- Traiter de la sorte la totalité du sous-échantillon.
- Déterminer la teneur en eau par séchage en étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (selon CEN ISO/TS 17892-1).

Répéter ces opérations sur les 2 autres sous-échantillons.

6. CALCUL ET EXPRESSION DES RESULTATS

6.1. Limite de liquidité w_L .

- Calculer la teneur en eau w de chaque prélèvement conformément au CEN ISO/TS 17892-1.
- Arrondir les valeurs de w ainsi obtenues à la première décimale.
- Reporter sur un diagramme linéaire les points représentatifs de chaque prélèvement: le nombre de chocs (N) est porté en abscisse et la teneur en eau correspondante en ordonnée, avec au moins 1 cm / %.

NOTE: Le nombre minimal de points sur le graphique est fixé à 4.

- Tracer une droite de régression, passant au plus près des points ainsi obtenus.
- Vérifier la validité des résultats: Le coefficient de régression doit être supérieur ou égal à 0,85.
- Déterminer graphiquement la limite de liquidité w_L , qui correspond, conventionnellement, à l'abscisse $N = 25$ chocs sur la droite de régression.
- Arrondir la valeur de la limite de liquidité w_L à la première décimale.

6.2. Limite de plasticité w_p .

- Calculer la teneur en eau w de chacun des contenus des trois pèses-filtres conformément au CEN ISO/TS 17892-1.
- Arrondir les valeurs de w ainsi obtenues à la première décimale.
- Déterminer la valeur de la limite de plasticité w_p comme étant leur moyenne arithmétique.
- Vérifier la validité des résultats: Les 3 valeurs individuelles ne peuvent s'écarter de plus de **1 2%** de la moyenne.
- Arrondir la valeur de la limite de plasticité w_p , à la première décimale.

6.3. INDICE DE PLASTICITÉ I_p

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de liquidité w_L et la limite de plasticité w_p :

$$I_p = w_L - w_p$$

Il s'exprime également avec une décimale.

7. RAPPORT D'ESSAI

Les informations suivantes doivent être consignées dans le rapport d'essai:

- a) Référence à la présente norme;
- b) Identification du laboratoire;
- c) Identification de l'échantillon (site, sondage, profondeur);
- d) Date de réception de l'échantillon;
- e) Date de l'essai;
- f) Limite de liquidité et type de coupelle utilisée (et coefficient de régression);
- g) Limite de plasticité;
- h) Indice de plasticité.

La mention des valeurs individuelles ayant conduit à la détermination des limites d'Atterberg est facultative.

BIBLIOGRAPHIE

NF P94-051	1993	Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau
NBN EN 1997-2	2007	Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 2: Reconnaissance des terrains et des sols
SPRINT RA 216	1993	Quality assurance in geotechnical testing
Mode opératoire LCPC – SI. – 4-1963 (DUNOD)	1965	Limites d'Atterberg – Limite de liquidité et limite de plasticité

01.11 DELITEMENT DES SOLS, SABLES, MATIERES D'AGREGATION, GRAVILLONS ET GRAVES

Référence de base: -1) Méthode de mesure C.R.R. M.F. 67/93: "Mode opératoire pour l'évaluation de la stabilité dimensionnelle des scories LD et de matériaux similaires -2) Essai de délitement"

1. BUT DE L'ESSAI

Evaluer la stabilité des matériaux artificiels et des matériaux de recyclage.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

On mesure le morcellement du matériau après une immersion de 14 jours dans l'eau à 50° C.

3. APPAREILLAGE

- un jeu de tamis à ouverture de mailles de 2 - 4 - 5 - 7,1 - 10 - 14 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 56 - 63 mm;
- balance de capacité suffisante permettant de peser au 1/10 de sa capacité;
- étuve réglable à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- étuve réglable à $(52,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$ ou bain thermostatisé réglable à $(52,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$;
- conteneurs d'une capacité de (2 à 10) litres pouvant être fermés hermétiquement;
- récipient de protection éventuellement;
- eau distillée ou déminéralisée.

4. MODE OPERATOIRE

4.1 Nombre d'essais.

Le nombre d'essais constituant la détermination est fixé à trois.

4.2 Echantillonnage.

L'échantillonnage est effectué conformément à la norme NBN EN 932-1 et NBN EN 932-2 de manière à obtenir finalement 3 échantillons réduits de calibre 2/D de granulats secs de masse déterminée (voir tableau 01.11/1).

TABLEAU 01.11/1

Calibre nominal d'essai	Masse d'essai de l'échantillon réduit (3 x)
$d > 2$ et $D \leq 10$	3500 g
$10 < D \leq 25$	7000 g
$25 < D \leq 40$	15000 g
$D > 40$	25000 g

4.3 Préparation de l'échantillon d'analyse.

L'essai est réalisé sur la fraction supérieure à 25 mm.

Sur demande expresse l'essai peut être effectué suivant les tamis de coupure et de mesure repris aux tableaux 01.11/2 et 3.

Les tamisages sont réalisés conformément aux principes énoncés dans la norme NBN EN 932-1.

Pour chacun de ces 3 échantillons, on procède à un lavage à l'eau suivi d'un tamisage sur le tamis dont l'ouverture de mailles est reprise au tableau 01.11/2.

TABLEAU 01.11/2

Calibre nominal d/D	Tamis de coupure (mm)	Tamis de protection (mm)
2/D	2	4
4/D	4	7,1
7/D	7,1	10
10/D	10	14
14/D	14	20
20/D	20	25
25/D	25	31,5
31,5/D	31,5	25
d/D	D	environ 1,4.d

Le passant à l'ouverture de mailles d est éliminé tandis que le refus est séché à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ à masse constante, puis de nouveau tamisé à sec sur le même tamis que précédemment. Dans ce cas, le tamis de coupure est surmonté d'un tamis de protection dont le rôle est d'éviter la surcharge du tamis de coupure.

Les refus des 2 tamis sont alors rassemblés. L'échantillon ainsi préparé est pesé à 0,1 g près et sa masse (M_1) constitue une prise d'essai de 3,5 à 25 kg suivant le calibre D.

4.4 Mode opératoire.

Chaque prise d'essai est introduite dans un conteneur de capacité appropriée. On ajoute alors de l'eau distillée ou déminéralisée de manière à ce que son niveau soit de 1 cm environ au-dessus de celui de l'échantillon, puis on place les conteneurs dans le récipient de protection à l'intérieur de l'étuve à $(52,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$, ou dans un bain thermostatisé à $(52,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$. On ferme hermétiquement les conteneurs pour éviter l'évaporation de l'eau et on les laisse séjourner 14 jours. Passé ce délai, on procède à un nouveau tamisage en utilisant, selon le calibre nominal de départ, le tamis de mesure repris au tableau 01.11/3.

Le passant est éliminé tandis que le refus est séché à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante, puis de nouveau tamisé à sec sur le même tamis que précédemment. Le tamis de mesure étant surmonté d'un tamis de protection dont le rôle est d'éviter la surcharge du tamis de mesure. Les refus des deux tamis sont rassemblés et pesés à 0,1 g près (masse M_2).

TABLEAU 01.11/3

Calibre nominal d/D	Tamis de mesure (mm)	Tamis de protection (mm)
2/D	2	4
4/D	4	7,1
7/D	5	7,1
10/D	7,1	10
14/D	10	14
20/D	14	20
25/D	20	25
31,5/D	25	31,5
d/D	0,7.d (le plus proche)	D

5 CALCULS

Le délitement, exprimé en pourcent avec deux décimales est obtenu par la formule:

$$\frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100$$

Le résultat est la moyenne de 3 essais exprimé avec une décimale.

6 EXPRESSION DU RÉSULTAT

Le rapport d'essai mentionne tous les résultats (individuels et moyenne) ainsi que les ouvertures des mailles des tamis de coupure et de mesure.

01.12 GONFLEMENT DES SOLS, SABLES, MATIERES D'AGREGATION, GRAVILLONS ET GRAVES

SOMMAIRE

01.12.A - CAS DES SCORIES D'ACIERIES.

PARTIE 1: GRANULATS POUR COUCHES DE FONDATIONS NON LIEES;

PARTIE 2: GRANULATS POUR MELANGES BITUMINEUX;

01.12.B - CAS DES AUTRES MATERIAUX ARTIFICIELS.

01.12.A MODE OPERATOIRE POUR DETERMINATION DE L'AUGMENTATION DE VOLUME DE SCORIES D'ACIERIES UTILISEES COMME GRANULATS.

PARTIE 1 : GRANULATS POUR COUCHES DE FONDATIONS NON LIEES

références de base:

- circulaire AWA/178 – 95/150 – annexe 5 - addendum 1;
- Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für die Güteüberwachung von Stahlwerksschlacken im Strassenbau – TL – SWS, Ausgabe 1992. – Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, No 66, 19 octobre 1992, RdErl. d. Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr v. 26.8.1992 – III B 6 – 30-05/199.
- NBN EN 1744-1: Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats. Partie 1, analyse chimique

1. BUT DE L'ESSAI

Cette méthode d'essai est destinée à mesurer la susceptibilité à la désintégration et au gonflement de scories concassées d'aciéries résultant surtout de l'hydratation tardive de chaux surcuite (chaux libre) et dans certains cas, de l'oxyde de magnésium libre.

Cet essai est réalisé sur la fraction inférieure à 25 mm.

Note: Les scories de fours électriques, plus communément appelées scories E.A.F., font partie, au même titre que les laitiers de hauts fourneaux ou les scories de convertisseurs L.D., de la gamme des co-produits générés par la sidérurgie lors de la fabrication de l'acier. Elles proviennent de la gangue lors de la fusion des ferrailles prétraitées et dans certains cas de fonte, dans le four électrique à arc.

Lorsque la teneur en MgO total, mesuré suivant la norme NBN EN 196-2 est supérieure à 5 %, la durée des essais de gonflement est portée à 7 jours.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

Un échantillon compacté de scories, composé à partir de fractions granulométriques définies, est soumis à un courant de vapeur à 100° C, dans un bain de vapeur à pression atmosphérique. De cette manière, l'humidité nécessaire pour favoriser les réactions d'hydratation est fournie en continu à l'échantillon. Tout changement de volume suite à ces réactions peut être lu sur le cadran d'un comparateur installé au centre de la face supérieure de l'échantillon. Le résultat donné est l'augmentation de volume, calculée en % par rapport au volume original de l'échantillon compacté de scories.

3. APPAREILLAGE ET MOYENS NECESSAIRES

3.1. Unité d'étuvage avec cylindre d'essai muni d'un comparateur à cadran couvrant un domaine de mesure (10 mm) avec une précision de 0,01 mm ou système équivalent.

L'équipement d'étuvage comporte deux chambres dans lesquelles de l'eau est portée à ébullition, en cours d'essai, par des éléments chauffants. La puissance maximale de

chauffe des éléments est de 2 kW. Au-dessus de la chambre de chauffe se place l'échantillon de scories compacté, dans un cylindre muni d'un fond percé de trous de \varnothing 3 mm (cylindre de 210 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur). La vapeur s'élevant lors du chauffage peut ainsi se propager régulièrement au travers de l'échantillon. Pour éviter une condensation à la paroi interne du cylindre par perte de chaleur, le cylindre est chauffé à $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$ à l'aide d'un manteau chauffant circulaire adapté sur la paroi extérieure (puissance de 250 W). L'appareil est muni d'un dispositif permettant une remise à niveau automatique. L'appareil est représenté schématiquement aux figures 01.12A/1 et 2 qui contiennent des détails complémentaires de construction.

Le cylindre est équipé d'un couvercle constitué par une plaque métallique percée de trous de \varnothing 3 mm, rendue rigide au moyen d'un croisillon de lestage comportant un réceptacle central pour le pied du comparateur.

3.2. Masse de lestage d'un diamètre extérieur inférieur à 210 mm (par exemple 180 mm), muni d'une cavité centrale (diamètre de 10 mm) permettant le positionnement de la tige du comparateur d'une masse telle que l'ensemble "poids de lestage + grille équipée du croisillon de lestage" pèse $6,00 \pm 0,02$ kg.

3.3. Tamis avec ouvertures de mailles de 0,5 mm, 2,0 mm et tamis avec ouvertures carrées de 5,6 mm, 8,0 mm, 11,2 mm, 16,0 mm et 22,4 mm.

3.4. Perles (billes) de verre de 5 mm de diamètre.

3.5. Papier filtre de 240 mm de diamètre.

3.6. Table vibrante à fréquence d'environ 50 Hz et avec une amplitude de 3 mm.

3.7. Tige de sondage graduée en mm, avec une échelle totale de 200 mm.

3.8. Etuve travaillant jusqu'au moins 120°C .

3.9. Balance de 10 kg avec précision de 0,2 g.

3.10. Eau distillée.

3.11. Acide chlorhydrique dilué.

3.12. Huile de silicone.

4. ECHANTILLONNAGE

L'échantillon est prélevé conformément aux modes opératoires prescrits dans la norme NBN EN 932-1.

5. PRÉPARATION ET COMPACTAGE DES ÉCHANTILLONS D'ANALYSE

L'échantillon prélevé est séché immédiatement au laboratoire à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante.

Il est fait usage d'échantillons d'analyse 0/22 mm de mélanges minéraux secs de scories, combinés suivant la parabole de Fuller. Les proportions en masse des différentes fractions granulométriques sont données au tableau 1.

Fraction granulométrique	% en masse
0/0,5	15
0,5/2	15
2/5,6	19
5,6/8	10
8/11,2	11
11,2/16	15
16/22,4	15
TOTAL 0/22	100

Tableau 1: Proportions en masse des différentes fractions granulométriques

Les différentes fractions sont préparées par tamisage à partir de l'échantillon séché.

Dans le cas où l'échantillon à tester est d'un calibre d/D avec $d \geq 0$ mm, la préparation de fractions inférieures à 2 mm en quantité suffisante peut ne pas être obtenue; dans ce cas, il est convenu d'ajuster à 30 % (sur base volumique) la teneur en granulats inférieurs à 2 mm de chaque prélèvement particulier en lui incorporant du sable silicieux naturel sec de granulométrie 0/0,5. Comme indiqué plus loin, on cherche à obtenir un échantillon présentant, après compactage, un pourcentage de vide de 20 à 30 % en volume. Pour les calculs, il est tenu compte des masses volumiques moyennes des matériaux, à savoir 2,65 g/cm³ pour le sable et 3,5 g/cm³ pour les scories, sauf si les valeurs réelles sont connues au 1: Proportions en masse des différentes fractions granulométriques.

Les différentes fractions sont préparées par tamisage à partir de l'échantillon séché.

Dans le cas où l'échantillon à tester est d'un calibre d/D avec $d \geq 0$ mm, la préparation de fractions inférieures à 2 mm en quantité suffisante peut ne pas être obtenue; dans ce cas, il est convenu d'ajuster à 30 % (sur base volumique) la teneur en granulats inférieurs à 2 mm de chaque prélèvement particulier en lui incorporant du sable silicieux naturel sec de granulométrie 0/0,5. Comme indiqué plus loin, on cherche à obtenir un échantillon présentant, après compactage, un pourcentage de vide de 20 à 30 % en volume. Pour les calculs, il est tenu compte des masses volumiques moyennes des matériaux, à savoir 2,65 g/cm³ pour le sable et 3,5 g/cm³ pour les scories, sauf si les valeurs réelles sont connues.

La quantité de sable nécessaire pour chaque échantillon particulier se calcule comme exposé ci-après, en tenant compte de la quantité de granulats < 2 mm disponible par prélèvement (Mc). Mc est la masse totale des fractions 0/0,5 et 0,5/2 obtenues lors du tamisage divisée par le nombre d'échantillons nécessaires, y compris celui pour la détermination de la masse volumique absolue.

- Masse d'un échantillon: 4500 g (100 % scories).
- Masse totale nécessaire de granulats < 2 mm selon le tableau 1 (= 30 % de 4500 g): 1350 g
- Masse disponible de granulats < 2 mm: Mc
- Masse de sable naturel à ajouter (Ms): $Ms = ((1350 - Mc) \cdot 2,65) / 3,5$ (g)
- Masse de l'échantillon avec sable: $Mcs = 3150 + Mc + Ms$

La réduction de l'échantillon est exécutée conformément aux modes opératoires prescrits dans la norme NBN EN 932-2.

L'expansion est déterminée sur au moins deux échantillons prélevés séparément. Chaque échantillon est recombéné séparément conformément à la distribution granulométrique mentionnée ci-dessus. La quantité de matériau requise pour chaque prélèvement particulier est de 4,5 kg (100 % scories ou de M_c (scories + sable)). En complément, un échantillon identique est constitué pour déterminer la masse volumique absolue (CME 01.08).

Couvrir la base perforée du cylindre d'essai par un papier filtre rond (mat) et à l'aide d'une pelle de laboratoire, transférer l'échantillon préparé dans le cylindre (voir 3.1.) La La quantité de sable nécessaire pour chaque échantillon particulier se calcule comme exposé ci-après, en tenant compte de la quantité de granulats < 2 mm disponible par prélèvement (M_c). M_c est la masse totale des fractions 0/0,5 et 0,5/2 obtenues lors du tamisage divisée par le nombre d'échantillons nécessaires, y compris celui pour la détermination de la masse volumique absolue.

- Masse d'un échantillon: 4500 g (100 % scories).
- Masse totale nécessaire de granulats < 2 mm selon le tableau 1 (= 30 % de 4500 g): 1350 g
- Masse disponible de granulats < 2 mm: M_c
- Masse de sable naturel à ajouter (M_s): $M_s = ((1350 - M_c) \cdot 2,65) / 3,5$ (g)
- Masse de l'échantillon avec sable: $M_{cs} = 3150 + M_c + M_s$

La réduction de l'échantillon est exécutée conformément aux modes opératoires prescrits dans la norme NBN EN 932-2.

L'expansion est déterminée sur au moins deux échantillons prélevés séparément. Chaque échantillon est recombéné séparément conformément à la distribution granulométrique mentionnée ci-dessus. La quantité de matériau requise pour chaque prélèvement particulier est de 4,5 kg (100 % scories ou de M_c (scories + sable)). En complément, un échantillon identique est constitué pour déterminer la masse volumique absolue (CME 01.08).

Couvrir la base perforée du cylindre d'essai par un papier filtre rond (mat) et à l'aide d'une pelle de laboratoire, transférer l'échantillon préparé dans le cylindre (voir 3.1.) illustré à la figure 01.12A/1. Compacter ensuite dynamiquement l'échantillon sec sur la table vibrante (voir 3.6.) pendant 6 min à une fréquence de 50 Hz (amplitude 3 mm) et sous une charge statique de 0,035 kPa (produite par exemple par une pression d'huile).

Sous ces conditions d'essai, il subsiste dans le mélange un volume de vides de 20 à 30 % en volume, proche des conditions de la pratique.

Après compactage, déterminer le volume V_s de l'échantillon de scories qui est la différence entre le volume V_c du cylindre et le volume V_a de l'air entre la surface de l'échantillon de scories et le bord supérieur du cylindre. V_c et V_a sont calculés d'après les mesures effectuées au moyen de la tige de sondage (voir 3.7.); on calcule la moyenne des lectures effectuées en cinq points de mesure, l'un au centre et les quatre autres à (50-55) mm du bord sur deux diamètres se croisant à angle droit. Couvrir enfin la surface du mélange de scories à l'aide d'un filtre rond (mat) et ensuite avec une couche de perles de verre (voir 3.4.).

La masse totale de la couche de billes est de 1,5 kg. Les billes de verre sont distribuées régulièrement à l'intérieur du cylindre d'essai de manière à constituer une surface plane. Afin de réduire le frottement entre chaque bille de verre, les lubrifier avant l'essai au moyen d'huile de silicone; pour une masse de 1,5 kg de billes, 1,5 g d'huile de silicone suffit.

Il faut renouveler la lubrification des billes de verre après chaque essai à la vapeur. Etant donné que de la chaux se dépose sur les billes de verre en cours d'essai, il est en outre nécessaire d'éliminer cette chaux, au minimum après quatre essais à la vapeur, à l'aide d'acide chlorhydrique dilué.

6. MODE OPÉRATOIRE DE L'ESSAI À LA VAPEUR

Lorsque la prise d'essai de scories a été recouverte de la couche de billes de verre, fixer le cylindre d'essai au générateur de vapeur et ajuster le manteau chauffant à la paroi externe du cylindre d'essai. Déposer alors la plaque perforée équipée du croisillon et la masse de lestage (voir 3.2.) sur la couche de billes. Fixer le comparateur, qui enregistre la levée de la surface de l'échantillon, à un statif rigide sur le générateur de vapeur. Après avoir enclenché le manteau chauffant et le générateur de vapeur, l'échantillon de scories se réchauffe, ce qui entraîne une expansion thermique. Afin de ne pas tenir compte des déformations dues à cette expansion thermique, ne mettre le comparateur à zéro qu'au moment où la vapeur commence à se dégager.

La durée totale de l'essai à la vapeur est de 24 h¹. A la fin de cette période, le soulèvement de la surface de l'échantillon d'essai est lu et calculé en % en volume par rapport au volume original (voir § 7).

La capacité du réservoir à eau du générateur de vapeur est d'une dimension permettant d'effectuer un essai à la vapeur pendant une période de 24 h.

Dans de nombreux cas, il est utile d'enregistrer la progression de l'augmentation de volume en fonction du temps. Comme c'est au début de l'essai à la vapeur que le gonflement se produit de la manière la plus marquée, il est recommandé d'effectuer les lectures à des intervalles de 15 min. Après 4 heures, l'intervalle peut être étendu à 60 min². Si l'augmentation de volume est suivie en fonction du temps, une interprétation détaillée des résultats d'essai est possible sur base des diagrammes enregistrés (cadence de gonflement en début d'essai, approche asymptotique d'une valeur limite en fin d'essai).

7. CALCULS

Le volume V_s de l'échantillon de scories est calculé avant l'étuvage à partir de l'équation suivante:

$$V_s = V_c - V_a$$

V_s est le volume de la prise d'essai de scories après compactage dans le cylindre d'essai, en centimètres cubes;

V_c est le volume du cylindre, en centimètres cubes;

V_a est le volume d'air entre la surface de l'échantillon de scories et le bord supérieur du cylindre, en centimètres cubes.

V_c et V_a sont calculés à partir de mesures de hauteur à la sonde et du diamètre (21 cm) du cylindre.

¹ La durée totale de l'essai à la vapeur est toutefois de 7 jours pour les scories de fours électriques dont la teneur en MgO total est supérieure à 5 %.

² Pour les scories E.A.F. dont la teneur en MgO total est > à 5 %, il est recommandé d'effectuer les lectures à des intervalles de 30 min. Après 8 heures, l'intervalle peut être étendu à 120 min. Après 48 heures, on procède à 2 lectures par jour.

Après compactage, la masse volumique apparente et le pourcentage de vides du mélange compacté sont déterminés comme suit:

$$\rho_M = \frac{W}{V_S}$$

$$V_M = \left(1 - \frac{\rho_M}{\rho}\right) \cdot 100$$

où:

ρ_M est la masse volumique apparente du mélange compacté, en grammes par centimètre cube;

W est la masse du mélange compacté, en grammes;

V_M est le pourcentage de vide du mélange compacté, en volume %;

ρ est la masse volumique absolue du mélange 0/22, en g/cm³ (CME 01.08).

Après l'essai, calculer l'expansion en volume (%) d'après la déformation de l'échantillon lue au comparateur et le diamètre interne (21 cm) du cylindre d'essai, au moyen de l'équation suivante :

$$V = \frac{\pi \times h \times d^2}{4 \times V_S} \cdot 100$$

où:

V est l'expansion (en % en volume)

h est la déformation de l'échantillon après essai à la vapeur, en centimètres;

d est le diamètre intérieur (21 cm) du cylindre d'essai.

Lorsqu'un ajustement au moyen de sable a été nécessaire il faut rapporter l'expansion à la fraction volumique de scories réellement testée.

8. EXPRESSION DES RÉSULTATS

La moyenne arithmétique de l'expansion en volume, de deux prises d'essai est arrondie à 0,1 % près.

9. RAPPORT D'ESSAI

Le rapport d'essai doit contenir:

- le nom du producteur de la scorie;
- la durée du vieillissement;
- le calibre nominal du matériau fourni;
- l'ajout éventuel de sable pour la constitution des mélanges 0/22 testés: la masse Ms est mentionnée;
- la masse volumique absolue du mélange 0/22;
- la masse volumique apparente du mélange 0/22 compacté;
- le pourcentage de vide;
- l'expansion volumique après 24 h, arrondie à 0,1 %, avec l'enregistrement graphique s'il a été relevé (l'expansion volumique après 7 jours, lorsque la teneur en MgO est > à 5 %).

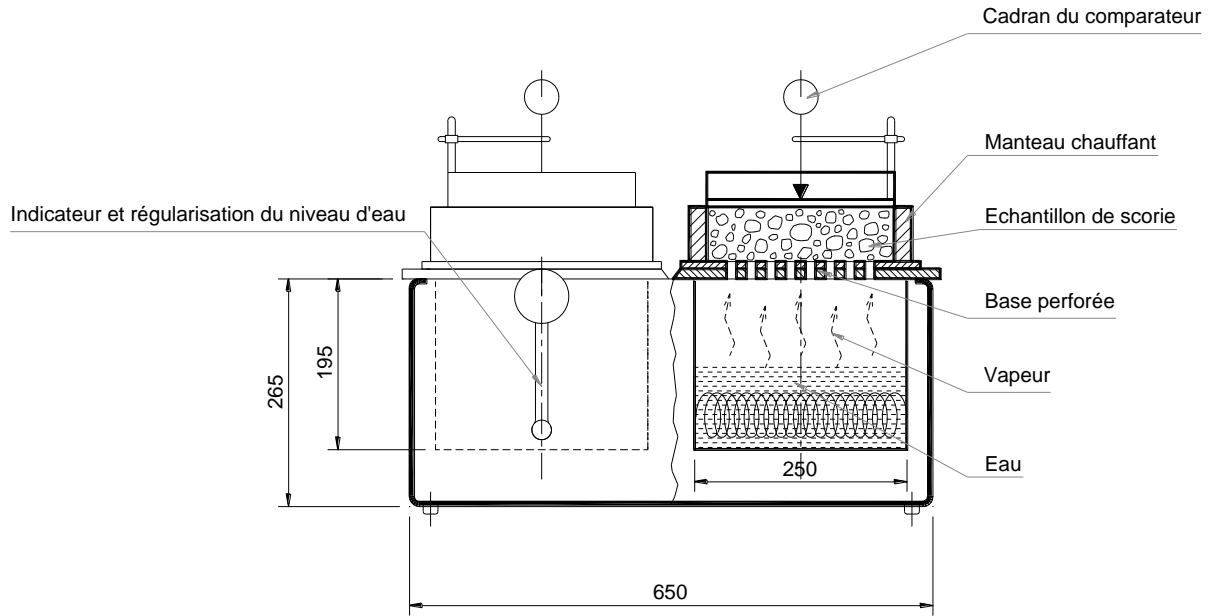


Fig. 01.12/A1

Plaque perforée à trous \varnothing 3mm

Densité des trous: 2.39 trous/cm²,
c'est-à-dire trous placés sur des
circonférences séparées de 6mm l'une de
l'autre et espacées de 6.5 à 7mm de
centre de trou à centre de trou sur chaque
circonférence.

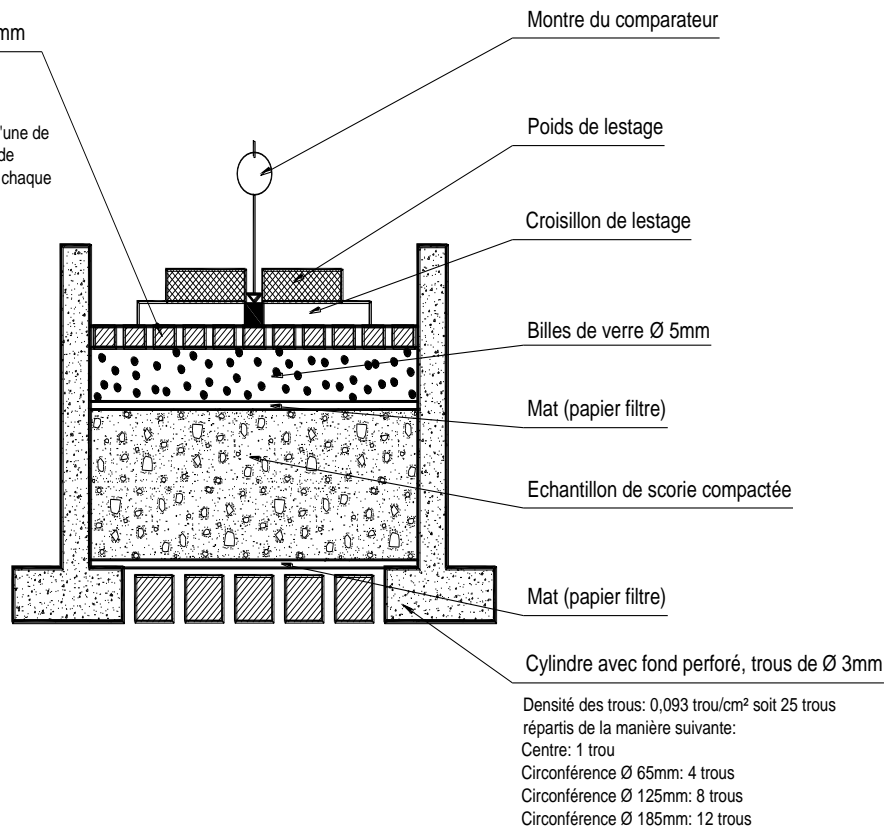


Fig. 01.12/A2

PARTIE 2 : GRANULATS POUR MELANGE BITUMINEUX

(Références de base :

- Circulaire AWA/178-95/150 – Annexe 5,
- Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für die Güteüberwachung von Stahlwerksschlacken im Strassenbau – TL – SWS – StB, Ausgabe 1992. – Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, No 66, 19 octobre 1992, RdErl.d. Ministeriums für Stadtentwicklung und Verkehr v. 26.08.1992 – III B 6 – 30-05/199).

1. BUT DE L'ESSAI

Cet essai sert à estimer la stabilité volumique de scories d'aciérie utilisées pour la confection de revêtements bitumineux. La susceptibilité à former des gonflements locaux par la réaction de la chaux libre ou de la magnésie libre avec l'humidité est estimée au moyen d'une mesure directe et continue de la dilatation volumique.

Cette méthode est applicable pour un mélange dont la partie minérale (filler exclu) est constituée de scories.

2. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Les éprouvettes type MARSHALL, fabriquées suivant le CME 54.16, d'une composition définie sont saturées d'eau sous vide et ensuite placées et maintenues à 40°C dans une cellule d'essai dans des conditions telles que l'humidité nécessaire à une réaction soit continuellement disponible. L'éprouvette est enrobée d'un mélange de vaseline et de paraffine. Cette éprouvette est surmontée d'un dispositif de mesure de variation de volume utilisant une colonne graduée contenant de l'eau distillée comme liquide de mesure.

Toute variation de volume de la scorie générée par la réaction de la chaux libre est transmise au liquide de mesure et peut être lue directement en cm³ sur la colonne graduée. Le résultat de l'essai est la variation de volume exprimée en % volumique par rapport au volume initial de l'éprouvette MARSHALL.

3. APPAREILLAGE ET MATIÈRES UTILISÉES

3.1. Cellule d'essai cylindrique en laiton munie d'une plaque de fond perforée, d'un couvercle pouvant être vissé et d'une colonne en verre graduée en ml montée de manière étanche (fig. 01.12A partie 2/1, qui comporte des informations techniques complémentaires).

3.2. Bain d'eau dont le fond est équipé d'une grille-support. Une régulation permet de maintenir les cellules d'essais à une température de $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ (profondeur minimum du bain d'eau: 16 cm).

3.3. Soucoupe à fond plat d'un diamètre utile d'au moins 15 cm et d'une profondeur de 3 cm.

3.4. Papier-filtre de \varnothing 10 cm.

3.5. Mélange de 80 % de vaseline à point de fusion de 25°C et de 20 % de paraffine (en masse).

3.6. Bitume 70-100 (B80).

3.7. Filler calcaire.

3.8. Eau distillée.

3.9. Produit d'étanchéité résistant à l'eau à 40° C (par exemple, colle au silicone, pour aquarium).

3.10. Huile à haute viscosité.

4. CONFECTION DES ÉPROUVETTES

Des éprouvettes «Marshall» sont confectionnées conformément aux prescriptions du CME 54.16 en respectant la composition suivante :

• liant bitumineux: bitume 70-100 (B80)	13,0 % -v
• partie minérale: mélange de scories et de filler calcaire	81,5 % -v
• pourcentage de vide dans l'éprouvette (par calcul) :	5,5 % -v

total:	100,0 % -v

En fonction de la granularité des mélanges prévus sur chantier, la partie minérale est composée comme indiqué au tableau 01.12/1:

FRACTION GRANULOMETRIQUE	MELANGE 0 / 11,2	MELANGE 0 / 22
Filler calcaire	5	6
Scorie - 0,063 - 0,25	12	12
Scorie - 0,25 - 1,00	15	15
Scorie - 1,00 - 2,00	8	9
Scorie - 2,00 - 5,6	20	17
Scorie - 5,6 - 8,0	15	9
Scorie - 8,0 - 11,2	25	9
Scorie- 11,2 - 16,0	/	11
Scorie - 16 - 22	/	12
TOTAL (%)	100	100

Tableau 01.12/1 : Composition de la partie minérale (% en masse)

Le pourcentage de liant bitumineux exprimé en masse se calcule en tenant compte, d'une part, de la masse volumique et du volume de liant de l'éprouvette et, d'autre part, de la masse volumique et du pourcentage de vide fictif de la partie minérale de l'éprouvette obtenus par l'équation suivante :

$$B = \frac{100 \cdot B_V \cdot \rho_B}{\rho_{R,M}(100 - H_{M,bit}) + B_V \cdot \rho_B} \quad (\% \text{ en masse}) \quad (1)$$

où:

B = teneur en liant en % en masse;

B_V = teneur en liant en % volumique;

ρ_B = masse volumique du liant en g/cm³;

ρ_{R,M} = masse volumique apparente de la partie minérale;

H_{M, bit} = pourcentage de vide fictif de la partie minérale dans l'éprouvette.

Pour le calcul de la teneur en bitume selon l'équation (1), les valeurs suivantes peuvent être utilisées:

$B_V = 13,0$ % en volume;
 $\rho_B = 1,025$ g/cm³;
 $H_{M, bit} = 18,5$ % en volume.

De cette manière, l'équation (1) se simplifie en:

$$B = \frac{16,3}{\rho_{R,M} + 0,163} (\% \text{ en masse})$$

En appliquant un compactage conforme aux prescriptions et en utilisant un mélange hydrocarboné respectant la composition donnée ci-dessus, on obtient des éprouvettes Marshall comportant un pourcentage de vides de (5 à 6) %.

Le gonflement volumique doit être déterminé sur au moins 2 éprouvettes de chacun des deux mélanges comportant les pourcentages de liant suivant:

- a) Essai avec la teneur en liant calculée selon la méthode indiquée ci-dessus.
- b) Essai avec une teneur en liant calculée selon la méthode indiquée ci-dessus, et réduite de 0,5 % en masse de liant. Cet essai supplémentaire est demandé afin de pouvoir estimer l'influence sur le gonflement d'une erreur au niveau du dosage du liant.

5. MODE OPÉRATOIRE

Les éprouvettes Marshall sont tout d'abord saturées d'eau sous vide. Ceci permet de déterminer:

ρ_A masse volumique apparente;
 W_V absorption d'eau.

Ensuite, les éprouvettes sont positionnées dans le dispositif d'essai (fig. 01.12A partie 2/2) en utilisant une pince de laboratoire adéquate. La base des éprouvettes repose sur le fond perforé du dispositif d'essai sur lequel on a d'abord déposé un papier filtre. Ce dispositif est ensuite placé dans une soucoupe à fond plat, elle-même remplie d'eau de manière à ce que le fond perforé et le papier filtre soient tout juste recouverts par l'eau.

Il y a lieu de vérifier que d'éventuels rebords provenant de la confection des éprouvettes Marshall soient enlevés (grattés au couteau ou à la lime) et que l'éprouvette présente deux faces parfaitement planes et parallèles.

L'échantillon bien centré est ensuite enrobé d'un mélange vaseline-paraffine liquéfié par chauffage à $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$. Le niveau de recouvrement de l'éprouvette par cette paraffine est de (15 à 20) mm.

Après refroidissement et maintien de (10 à 30) minutes à température ambiante, le dispositif d'essai est rempli d'eau distillée désaérée jusqu'au niveau de la partie supérieure du filet de vissage du couvercle en laiton; celui-ci est ensuite vissé de manière étanche. Ensuite, toutes les bulles d'air sont évacuées, au moyen de la vanne de désaération du dispositif d'essai, de la cloche en verre et du tube gradué placés en même temps que le couvercle (fig. 01.12 partie 2/2).

Le dispositif d'essai préparé ainsi est placé avec la soucoupe sur une grille dans un bain d'eau régulé à $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ en maintenant continuellement la soucoupe jusqu'au positionnement sur la grille et puis la soucoupe d'essai est retirée de manière à ce que le

fond perforé du dispositif d'essai soit en permanence immergé dans sa totalité (il faut éviter l'entrée d'air dans le fond perforé). La hauteur du niveau d'eau du bac de maintien à 40 °C doit être ajustée de manière à atteindre le bas de l'échelle de mesure située sur le tube gradué. Ce niveau doit être maintenu durant toute la durée de l'essai (éventuellement par une régulation de niveau d'eau).

Le niveau d'eau dans le tube de mesure est tout d'abord réglé approximativement à environ 2 ml au-dessus du niveau de référence. Ensuite, après 2 heures de stabilisation en température à 40 °C, le zéro est réglé correctement au moyen de la vanne. Pour éviter l'évaporation de l'eau dans le tube de mesure, le ménisque est recouvert d'un mince film d'huile à haute viscosité.

La hauteur du niveau d'eau dans le tube de mesure est lue à heure fixe après 1, 3, 7, 14 et 28 jours, et arrondie à 0,1 ml.

6. EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le gonflement de l'éprouvette est mesuré par l'intermédiaire de la variation du niveau d'eau dans le tube. La mesure exprimée en ml est l'expression chiffrée de ce gonflement V en cm^3 , il est exprimé en %, ramené au volume de départ de l'échantillon.

Le résultat de l'essai est la moyenne arithmétique du gonflement des 2 éprouvettes après 28 jours à 40 °C, arrondie au 0,1 % en volume.

Afin de pouvoir éventuellement extrapoler le comportement de l'éprouvette sur une durée supérieure, il est utile d'enregistrer les mesures et de les porter en diagramme.

7. RAPPORT D'ESSAI

Le rapport d'essai doit comporter :

- des données relatives au prélèvement, l'origine et la nature de la scorie d'aciérie contrôlée;
- la teneur en chaux libre de la scorie (% en masse);
- la durée du vieillissement;
- le calibre du mélange (0/11, 2 ou 0/22);
- l'absorption d'eau W_V des éprouvettes en % volumique;
- la masse volumique apparente (ρ_A);
- le pourcentage de vides H_{bit} des éprouvettes en % volumique;
- la durée de l'essai;
- le gonflement (valeurs individuelles des éprouvettes et moyenne arithmétique sur l'échantillon) en % volumique, avec éventuellement une représentation graphique des résultats.

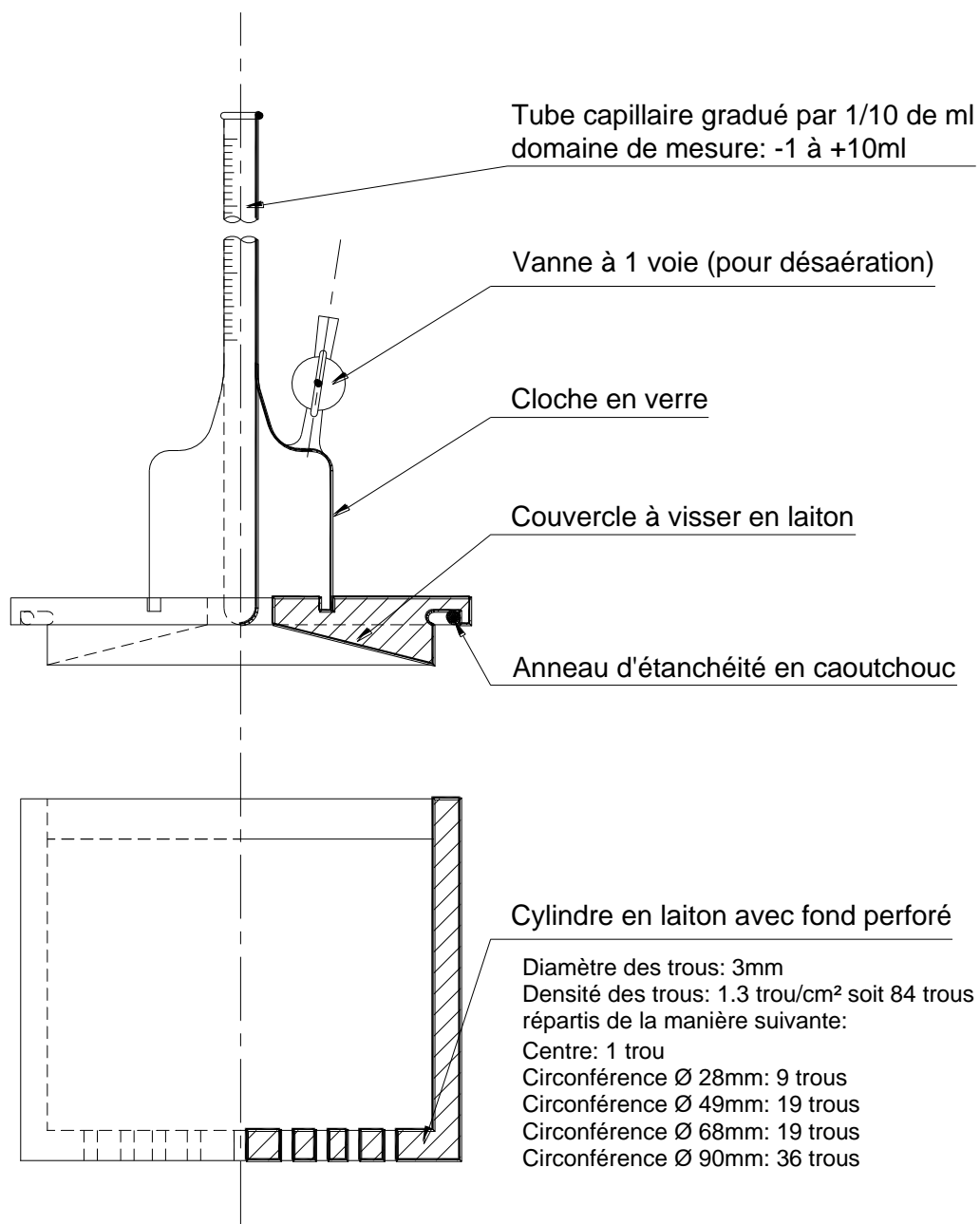


FIG. 01.12A - PARTIE 2/1 - DISPOSITIF DE GONFLEMENT
SUR EPROUVETTES MARSHALL

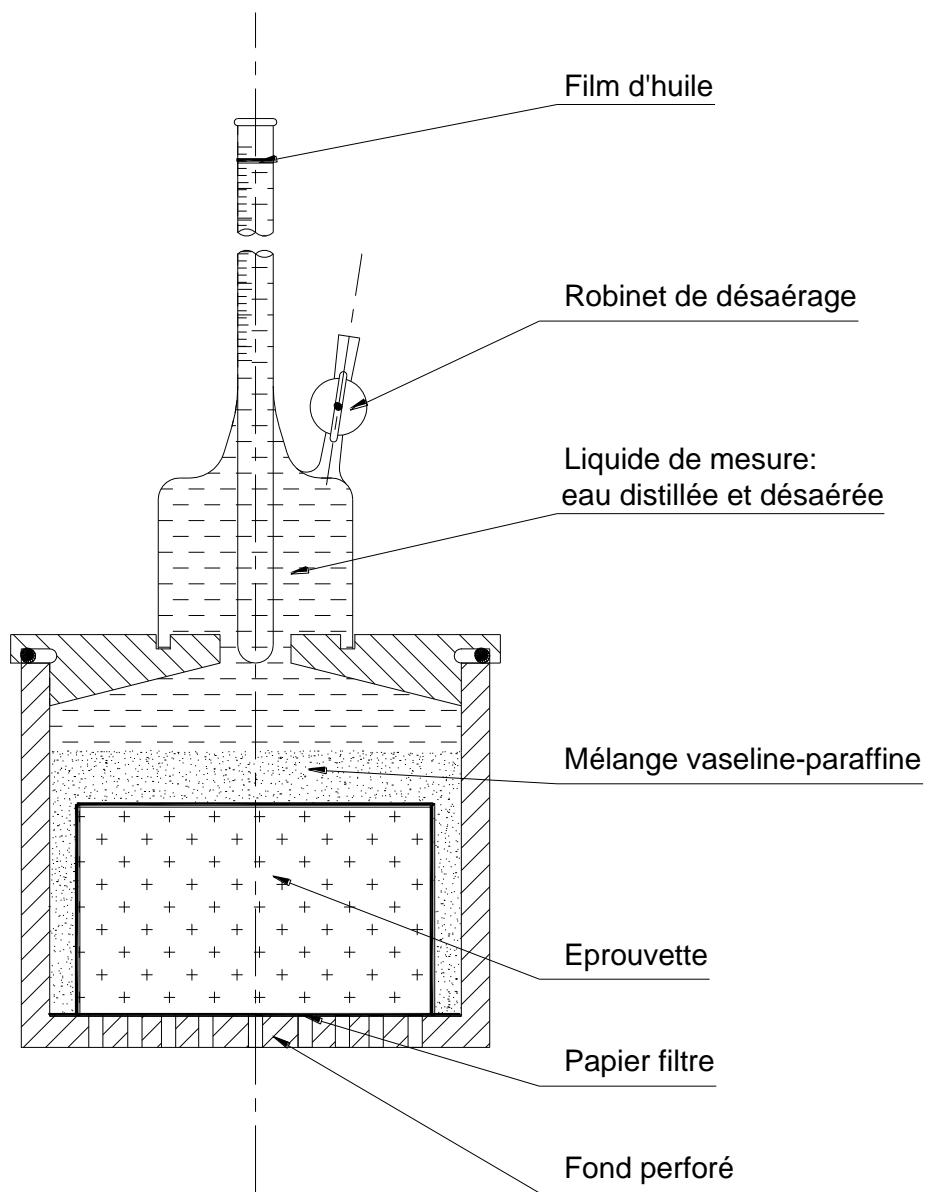


FIG 01.12A- PARTIE 2/2 SCHEMA DU DISPOSITIF AVEC EPROUVETTE "MARSHALL" PLACEE A L' INTERIEUR

01.12.B. ESSAI DE GONFLEMENT POUR LES AUTRES MATERIAUX ARTIFICIELS.

Référence de base: Méthode de mesure C.R.R. M.F. 67/93 : "Mode opératoire pour l'évaluation de la stabilité dimensionnelle des scories LD et de matériaux similaires: -1) Essai de gonflement accéléré"

1. BUT DE L'ESSAI

Evaluer le potentiel de gonflement des matériaux artificiels et de réemplois autres que les scories LD et EAF.

2. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

On mesure la dilatation linéaire, en fonction du temps et sous immersion dans l'eau, à une température de $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ d'une éprouvette cylindrique réalisée à partir de l'échantillon de matériaux à examiner. Si nécessaire, la teneur de la fraction inférieure à 2 mm est ajustée au moyen de sable siliceux naturel.

3. APPAREILLAGE ET PRODUITS

- Tamis à ouverture de mailles de (2 à 25) mm;
- Malaxeur pour matériaux de capacité au moins 10 kg;
- Gaine en plastique rigide (fig. 01.12B/1) fabriquée à partir d'un tuyau PVC à usage sanitaire :
 - diamètre extérieur: (100 - 101) mm;
 - hauteur $(120 \pm 0,2)$ mm;
 - épaisseur de la paroi: $(1,9 \pm 0,2)$ mm
- Disque de fond en plastique rigide de $(95 \pm 0,5)$ mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur avec une petite rainure latérale pour faciliter son extraction;
- Moule Proctor Standard :
 - diamètre intérieur: 101,6 mm
 - hauteur: 117 mm
- Dame de compactage Proctor Standard :
 - diamètre: 50,5 mm
 - masse: 2,5 kg
 - hauteur de chute: 305 mm;
- Lame rigide à bord tranchant pour l'arasage;
- Petite dame d'un diamètre de (45 ± 5) mm (on peut par exemple utiliser un cylindre métallique de ce diamètre et d'une hauteur d'environ 100 mm);

Note: Les moules PROCTOR modifiés peuvent également convenir; dans ce cas, il faut adapter les dimensions des gaines et disques en plastique rigide et la dame de compactage.

- Enceinte cylindrique en plexiglas fermée par un couvercle permettant le passage de la tige d'un comparateur et le remplissage de ce réservoir selon le schéma de montage présenté à la fig. 01.12 B/1. Toute autre enceinte qui permet de reproduire assez fidèlement cette disposition peut convenir (par exemple bécot sans bec verseur). Les trois conditions suivantes sont cependant à respecter: un fond plan, un espace réduit entre l'éprouvette et la paroi de l'enceinte (1,5 cm maximum) et une assez bonne étanchéité au niveau du couvercle ;

Note: L'enceinte cylindrique en plexiglas n'est pas nécessaire si l'on plonge les éprouvettes directement dans un bain thermostaté (sans agitation).

- Disque en plastique rigide de (105 ± 1) mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur (plaque de support); disque en plexiglas de (105 ± 1) mm de diamètre et d'environ 5 mm d'épaisseur (plaque de niveau);
- Comparateur avec précision de lecture au 0,01 mm;
- Dispositif de fixation du comparateur;
- Balance de 10 kg de capacité, sensibilité 0,1 g;
- Balance de 2 kg de capacité, sensibilité 0,01 g;
- Etuves réglables à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ et à $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ ou/et bain thermostatisé réglable à $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$;
- Eau distillée ou déminéralisée;
- Sable silicieux naturel sec de granularité 0/0,5 mm et de masse volumique d'environ $2,65 \text{ g/cm}^3$ (ou valeur déterminée).

4. MODE OPÉRATOIRE

4.1. Nombre d'essais.

Le nombre d'essais est fixé à deux.

4.2. Préparation de l'échantillon.

1. L'échantillon de matériaux à analyser est pesé (masse P_1) puis tamisé sur le tamis à ouverture de maille de 25 mm. Le passant est ensuite homogénéisé. la quantité recueillie constitue l'échantillon d'essai et elle ne peut pas être inférieure à 8 kg. Le refus éventuel est pesé (masse P_2). Dans le cas où il dépasse 10 %, sa stabilité volumique est jugée au moyen de l'essai de délitement décrit au CME 01.11
2. On en prélève ensuite environ 2000 g, pesés exactement à 0,1 g près (masse P_3), sur laquelle on détermine:

a) la teneur en eau par séchage à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (masse P_4) à 0,1 g près:

$$W_o (\%) = \left(\frac{P_3 - P_4}{P_4} \right) \cdot 100$$

b) la fraction inférieure à 2 mm par tamisage de l'échantillon séché (masse P_5 à 0,1 g près).

La teneur de la fraction inférieure à 2 mm, T_s est calculée par la formule:

$$T_s (\%) = \frac{P_5}{P_4} \cdot 100$$

Si la teneur T_s obtenue est supérieure ou égale à 25 % et que W_o est supérieur à 4 %, on peut poursuivre les opérations de confection des éprouvettes en utilisant le solde de l'échantillon d'essai.

Si la teneur en eau W_o est inférieure à 4 %, il faut l'amener à (5 ± 1) % par adjonction d'eau (cas n° 1, voir § suivant).

Dans le cas où T_s est inférieur à 25 % (cas n° 2, voir § suivant), il faut ajuster à 30 % (sur base volumique) la teneur de la fraction inférieure à 2 mm de l'échantillon d'essai en lui incorporant du sable naturel sec de composition granulométrique 0/0,5 (T_c %) et en tenant compte des masses volumiques mesurées des matériaux, à savoir ρ_s (g/cm^3) pour le sable et ρ_m (g/cm^3) pour les matériaux soumis à l'essai.

La teneur en masse du sable à ajouter est:

$$T_c = \frac{(30 - T_s) \rho_s}{\rho_m}$$

4.3. Préparation du mélange à compacter.

Lorsque T_s est $\geq 25 \%$ et $W_o > 4 \%$, on peut passer directement à la confection des éprouvettes.

Sinon:

Cas n° 1 ($W_o < 4 \%$)

On prélève au gramme près une masse de $5000 \cdot (1 + W_o/100)$ g de l'échantillon d'essai que l'on introduit dans le malaxeur et on lui incorpore $(250 - (W_o \cdot 50))$ g d'eau distillée ou déminéralisée. On mélange et on poursuit les opérations de confection des éprouvettes à partir de ce mélange.

Cas n°2 ($T_s < 25\%$)

On prélève au gramme près une masse de 5.000 g de l'échantillon d'essai. La quantité de sable sec à ajouter est calculée, en gramme, comme suit :

$$P_s (g) = \frac{T_c \cdot 5000}{70 \cdot (1 + W_o / 100)}^3$$

La quantité d'eau à incorporer éventuellement est déduite de la formule:

$$P_e (g) = 0,05 \cdot P_s + \left(\frac{5250}{(1 + W_o / 100)} - 5000 \right)^4$$

Le second terme (obtenu après simplification) représente la quantité d'eau qu'il faut ajouter à la prise de 5000 g de matériaux humide pour l'amener à $W = 5 \%$

Le mélange ainsi constitué est homogénéisé au malaxeur. On poursuit les opérations de confection des éprouvettes à partir de ce mélange.

4.4. Compactage Proctor Standard.

On effectue alors les pesées suivantes, à 0,1 g près:

- Le moule vide, contenant la gaine rigide en plastique (masse M_1)
- Le moule vide, contenant la gaine rigide en plastique ainsi que le disque de fond en plastique (masse M_2).

Le compactage se fait en 3 couches successives d'environ 3,5 cm d'épaisseur (correspondant chacune à environ 600 g de mélange), compactées chacune à raison de 25 coups de dame.

Les coups de dame doivent être bien répartis sur toute la surface de la couche de façon à obtenir un compactage aussi uniforme que possible.

³ Le chiffre 70 représente le pourcentage volumique final de la fraction "pierres" dans le mélange à réaliser. Cette fraction est constituée entièrement par les éléments supérieurs à 2 mm de l'échantillon d'essai.

⁴ $0,05 \cdot P_s$ est la quantité d'eau nécessaire pour amener le sable sec à $W = 5 \%$.

Le compactage est réalisé de manière à laisser un espace vide d'environ 1 cm dans le haut de la gaine en plastique.

On pèse le moule contenant le matériau compacté (masse M_3) à 0,1 g près.

Pour terminer la confection de l'éprouvette, on procède au remplissage successif des deux vides laissés aux extrémités de l'éprouvette avec du sable naturel contenant (8 à 9) % d'eau.

L'extrémité supérieur du moule est remplie de sable que l'on compacte légèrement avec la petite dame et que l'on arase ensuite avec la lame à bord tranchant.

On pèse l'ensemble (masse M_4) à 0,1 g près.

Puis on recommence l'opération à la base de l'éprouvette après avoir retourné la gaine dans le moule et retiré le disque de fond en plastique.

Après cette dernière opération, on pèse l'ensemble (moule + gaine + éprouvette + sable sans le disque de fond en plastique) (masse M_5) à 0,1 g près.

La seconde éprouvette est alors confectionnée de la même manière et, sur le solde du mélange (masse M_6), pesé à 0,01 g près, on détermine la teneur en eau par séchage à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (masse M_7):

$$W_m (\%) = \frac{M_6 - M_7}{M_7} \cdot 100$$

Les conditions choisies pour la préparation et le compactage du mélange conduisent à des éprouvettes dont la porosité se situe en général entre (25 et 30) %. Lorsque le matériau est plus fin (0/10 par exemple) avec une teneur en eau plus élevée (plus de 6 % par exemple), cette porosité peut atteindre une valeur de plus de 35 %.

4.5. Réalisation de l'essai.

L'éprouvette dans sa gaine est retirée du moule et placée verticalement sur sa plaque support dans le réservoir, sa face supérieure correspondant à la face supérieure du compactage.

On place alors la plaque de niveau qui repose à la fois sur le sable et sur le bord de la gaine, puis le couvercle et le comparateur selon le schéma de montage de la figure 01.12B/1.

On laisse reposer l'ensemble, à la température ambiante du laboratoire, pendant minimum 24 heures et maximum 72 heures. Le réservoir est progressivement rempli d'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à un centimètre environ de la surface supérieure de l'éprouvette puis transféré dans une enceinte à température contrôlée de $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ (ou dans un bain thermostaté).

Après une période d'environ 2 heures dans l'enceinte à 50°C , on procède à la première lecture du comparateur pour déterminer le point zéro (L_0). A partir de ce moment et à la même heure, on procède à la lecture du comparateur (L_t) une fois par journée de travail pendant une période de 28 jours calendrier.

La hauteur de l'éprouvette étant d'environ 100 mm, le pourcentage de dilatation linéaire est assimilé à la différence entre les lectures du comparateur ($\Delta h = L_t - L_0$), exprimées en millimètres avec deux décimales.

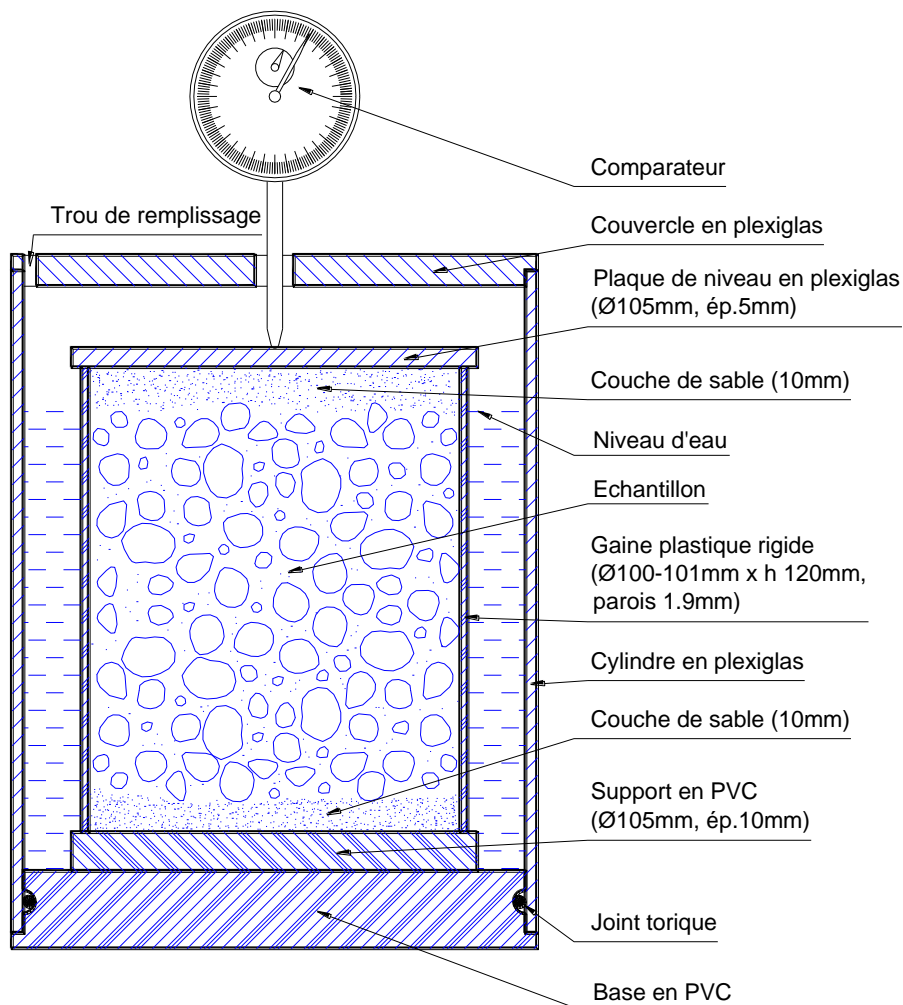
5. EXPRESSION DU RÉSULTAT

Le résultat final est la moyenne des deux pourcentages de dilatation linéaire, exprimée en pour cent avec une décimale. Les valeurs obtenues sont ensuite transposées graphiquement, en portant le temps en abscisse et la dilatation linéaire en ordonnée.

6. RAPPORT D'ESSAIS

Le rapport d'essais mentionne tous les résultats (individuels et moyenne) ainsi que les graphiques correspondants.

Fig. 01.12B/1 : EXEMPLE DE CELLULE DE GONFLEMENT



01.18 TAUX DE CENDRES (EN PRESENCE DE PYRITE) (TENEUR EN PYRITE)

1. PRINCIPE DE LA METHODE

La teneur en pyrite (FeS_2) est obtenue à partir de la détermination des sulphures solubles dans l'acides (normes NBN EN 1744-1)

01.19 VITESSE SISMIQUE DANS LES SOLS COMPACTS

01.24 PRELEVEMENT A LA LIVRAISON D'UN ECHANTILLON DE MATERIAUX POUR SOUS-FONDATION ET FONDATION DE TYPE GRANULAIRE (version 10/2018)

Référence de base: NBN EN 932-1

1. BUT DE L'ESSAI

Prélever un échantillon représentatif à la livraison d'un matériau granulaire en vue de la réalisation d'essais de laboratoire.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

Réaliser le prélèvement représentatif d'un échantillon de matériaux pour sous fondation ou fondation de type granulaire:

- Déverser le contenu du camion à faible allure sous forme d'andain sur une surface "propre".
- Araser la partie supérieure de l'andain de manière à obtenir une plateforme.
- Constituer un échantillon global à partir de plusieurs prises élémentaires.

3. EQUIPEMENT

- Pelle col de cygne ronde en acier.
Dimensions minimales de la partie en tôle: 25 x 25 cm

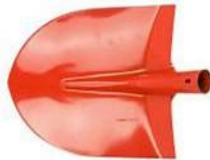


fig. 01.24/1 - pelle

- Contenants de transport propres, imperméables et non absorbants, de type sac en plastique d'au moins 100 µm d'épaisseur ou bac ou pot avec couvercle.
- Balance (précision 1 kg).

REMARQUE:

- alternativement à la balance, des récipients rigides de volume connu peuvent être utilisés. Dans ce cas, la masse volumique des produits en vrac est considérée comme étant égale à 1000 kg/m³.

4. MODE OPERATOIRE

Le contenu d'une livraison de matériau est déversé sur une surface « propre » (zone dégagée préalablement définie). Pour ce faire, le camion avancera à faible allure afin de déverser son contenu sous forme d'andain.



fig. 01.24/2 – déversement sous forme d'andain

REMARQUES:

- S'assurer de la propreté du bac de l'engin utilisé !
- Si le matériau à prélever est constitué d'un mélange de plusieurs matériaux, il appartient à l'adjudicataire de s'assurer que ceux-ci ont été correctement mélangés préalablement (soit en carrière soit sur site)

A l'aide d'un engin de chantier, araser le dessus de l'andain en un seul coup de bac à bord plat, afin d'obtenir une plateforme d'une hauteur d'environ 2/3 de la hauteur initiale de l'andain.



fig. 01.24/3 – arasement de l'andain & zone de prélèvement

REMARQUE:

- L'opérateur en charge de l'arasement prend soin de ne pas lisser la surface de la plateforme et de ne passer son bac qu'une seule fois sur la largeur de celui-ci.

Cette plateforme constitue la zone de prélèvement sur laquelle aucune autre opération ne peut être effectuée (pas de circulation d'engins ni de personnes aux endroits de prélèvement).

L'opérateur en charge du prélèvement réalise plusieurs prises élémentaires réparties de manière homogène dans la partie centrale de la plateforme.

REMARQUE:

- Il est recommandé d'exclure de la zone de prélèvement les bords de la plateforme (min 30cm).

Une prise élémentaire consiste à enfoncer une seule fois la pelle à col de cygne à la surface de la plateforme constituée du matériau homogène et foisonné. Il y a donc autant de prises élémentaires que d'emplacements de prélèvement.

Le nombre de prises élémentaires à réaliser est défini de manière à obtenir une quantité de matériau minimale permettant de répondre à la formule suivante:

$$10 \times \sqrt{D}$$

où D (en mm) correspond au calibre (d/D ou 0/D) du matériau granulaire à échantillonner. Cette quantité est indépendante de l'usage (sous-fondation ou fondation).

Les prises élémentaires sont ensuite rassemblées afin d'obtenir l'échantillon représentatif.

Le tableau ci-après reprend, à titre d'exemples, les quantités d'échantillon nécessaires pour les calibres les plus fréquemment utilisés.

D du calibre d/D ou 0/D (mm)	Masse minimale (kg)
20	45
31.5	56
40	63
63	80
80	89
90	95

Cet échantillon est réparti dans plusieurs contenants. Chaque contenant est identifié de façon claire et indélébile.

Le marquage doit comprendre:

- un code unique;
- le lieu et la date de l'échantillonnage;
- la désignation du matériau;
- le nombre de contenants dans lesquels l'échantillon est réparti.

À la réception au laboratoire d'essais, ce dernier reporte le numéro interne d'échantillon attribué sur les contenants correspondants.

REMARQUES:

- *Les échantillons de laboratoire sont emballés et transportés de façon à préserver leur état au moment de l'échantillonnage (teneur en eau, teneur en fines, ...).*
- *Si nécessaire, les conteneurs sont pourvus d'un couvercle étanche, par exemple, pour préserver l'humidité ou les matières volatiles des échantillons de laboratoire.*

5. RAPPORT DE PRÉLÈVEMENT

Le rapport est conforme au §11 de la norme NBN EN 932-1 et doit notamment comprendre les éléments suivants:

- l'identification du rapport;
- les coordonnées du projet;
- la date et le lieu de prélèvement;
- la référence du bon de livraison du camion échantillonné;
- le type de matériaux prélevés (classe granulaire ou désignation);
- le code unique repris sur le marquage de l'échantillon;
- la masse de l'échantillon prélevé;
- les observations réalisées pendant le prélèvement;
- les personnes présentes lors du prélèvement.

01.25 ESSAI DE SENSIBILITE AU GEL-DEGEL SPECIFIQUE AUX GRANULATS DONT LA RESISTANCE AU GEL- DEGEL EST DECLAREE F10 (version 04/2019)

Référence de base:

- NBN EN 1367-1: Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats. Partie 1: détermination de la résistance au gel-dégel
- NBN EN 933-1: Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage

1. BUT DE L'ESSAI

Sur base de la teneur en fines, déterminer la sensibilité spécifique à des cycles de gel-dégel d'un granulat dont la résistance au gel-dégel est déclarée F10.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

La norme NBN EN 1367-1 donne une méthode pour déterminer la résistance d'un granulat aux cycles de gel-dégel.

Pour certaines applications, des matériaux avec une plus grande sensibilité (F10) sont acceptables aux conditions suivantes :

- la teneur en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) produites lorsque le granulat est soumis à des cycles de gel-dégel est limitée ($\text{FF2} \leq 2\%$)

ET

- la somme de la teneur en fines initiale et de la teneur en fines produites précitées est limitée ($\text{FFt} \leq 5\%$).

Dès lors, en complément à la détermination de la résistance au gel-dégel selon NBN EN 1367-1, il y a lieu de procéder aux essais suivants :

- détermination de la teneur initiale en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) du granulat selon NBN EN 933-1;
- exposition du granulat exempt de fines aux cycles de gel-dégel définis dans l'essai NBN EN 1367-1;
- détermination de la teneur en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) produites par les cycles de gel-dégel selon NBN EN 933-1.

Ces essais sont limités à la fraction inférieure à 90 mm de l'échantillon, quel que soit son calibre.

3. APPAREILLAGE

- Appareillage selon la norme NBN EN 1367-1
- Appareillage selon la norme NBN EN 933-1, à l'exception des tamis
- Tamis de 90 mm et de 63 μm d'ouvertures de mailles (+ éventuellement un tamis de protection)
- 3 récipients (1 par éprouvette) de taille appropriée à l'armoire de congélation et permettant de limiter la hauteur d'échantillon dans le récipient

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Préparation des échantillons

Préparer 3 éprouvettes d'un échantillon d/D par quartage selon la NBN EN 932-1.
Eliminer par tamisage à sec la fraction supérieure à 90 mm.
La masse minimale de chaque éprouvette écrétée à 90 mm est fixée conformément au tableau 1 de la NBN EN 1367-1, repris ci-après:

Granularité	Masse par éprouvette
$D \leq 16$	(2000±100) g
$16 < D \leq 32$	(4000±200) g
$D > 32$	(6000±300) g

4.2. Teneur initiale en fines

Déterminer la teneur initiale en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) de chaque éprouvette selon la norme NBN EN 933-1 par lavage (sans récupération des fines) puis tamisage à sec sur un tamis de $63 \mu\text{m}$.

4.3. Exposition aux cycles de gel-dégel

Placer chaque éprouvette débarrassée de ses fines dans un récipient de taille appropriée à l'armoire de congélation et permettant de limiter la hauteur d'échantillon dans le récipient. L'utilisation de plusieurs récipients par éprouvette est interdite.

Imbiber chaque éprouvette selon le §8.1 de la norme NBN EN 1367-1.

L'exposer aux 10 cycles de gel-dégel définis au §8.2 de la norme NBN EN 1367-1.

4.4. Teneur en fines produites par les cycles de gel-dégel

A la fin du dixième cycle, pour chaque éprouvette, déterminer la teneur en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) produites par les cycles gel-dégel selon la norme NBN EN 933-1 par lavage puis tamisage à sec sur un tamis de $63 \mu\text{m}$.

5. RESULTATS

Calculer la teneur initiale en fines de chaque éprouvette conformément au §8.1 de la NBN EN 933-1 et donc arrondie à 0,1%.

Calculer la teneur initiale en fines de l'échantillon comme la moyenne arithmétique (=FF1) des résultats des 3 éprouvettes, arrondie à 0,1%.

Calculer la teneur en fines de chaque éprouvette après cycles de gel-dégel, conformément au §8.1 de la NBN EN 933-1 et donc arrondie à 0,1%.

Calculer la teneur en fines produites par les cycles de gel-dégel de l'échantillon comme la moyenne arithmétique (=FF2) des résultats des 3 éprouvettes, arrondie à 0,1%.

Calculer la teneur totale en fines comme la somme de la teneur initiale en fines et de la teneur en fines produites par les cycles de gel-dégel
 $FFt = FF1 + FF2$, arrondie à 1%.

6. RAPPORT D'ESSAI

Les informations suivantes doivent être consignées dans le rapport d'essai :

- Référence à cette méthode;
- Identification du laboratoire;
- Identification de l'échantillon (origine, nature, calibre);
- Date de réception de l'échantillon;
- Date de l'essai;
- Masse sèche initiale de chaque éprouvette;
- Teneurs initiales en fines (=FF1) individuelles et moyenne ;
- Teneurs en fines produites par les cycles de gel-dégel individuelles et moyenne (=FF2);
- Teneur totale en fines (FFt).