

Analyse granulométrique par tamisage

SOURCES

MODES OPERATOIRES DU LABORATOIRE
CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
SANGLERAT – INTERNET

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE

1/ INTRODUCTION

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat.

On donnera le nom de granulats à un ensemble de grains inertes destinés à être agglomérés par un liant et à former un agrégat. Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple). Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé. Le terme granulats, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.

L'analyse granulométrique complète comprend deux opérations :

a/ Le tamisage qui consiste en la séparation et la classification des particules de dimensions supérieures ou égales à 100 microns (0,1 mm) formant le granulat .

b/ La sédimentométrie qui complète l'analyse granulométrique par tamisage et s'applique aux particules inférieure à 100 microns (0,100 mm)

Par tamisage, le granulat est séparé en fractions granulaires définies par le côté de la maille carrée du **tamis** ou le diamètre des trous de la **passoire**. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse facilite l'identification exacte du granulat et permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme **NF P 18-560**.

2/ PRINCIPE DE LA METHODE

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis ou de passoires, un granulat en plusieurs catégories de grains décroissants.

Le **refus** désigne la partie des grains retenue dans un tamis. Le **refus cumulé** représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures).

Le **tamisé** ou **passant** désigne la partie qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulat. Les pourcentages ainsi obtenus servent à l'établissement de la **courbe granulométrique**, qui est établie en portant sur un graphique semi-logarithmique :

- En ordonnées (échelle arithmétique), les pourcentages des refus (ou tamisats) cumulés ;
- En abscisses (échelle logarithmique), les dimensions des tamis et passoires et les modules AFNOR (Association Française de Normalisation) correspondants.

3/ APPAREILLAGE

3.01/ Appareillage spécifique

- Passoires (utilisées pour les particules de dimensions supérieures ou égales à 12,5 mm) ;
- Tamis (utilisées pour les particules de dimensions inférieures à 12,5 mm) ;
- Une tamiseuse ;
- Des échantillonneurs.

Les tamis

Un **tamis** est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des mailles de trous **carrés**. Les tamis sont désignés par la longueur du côté de ces carrés c'est à dire par la taille des mailles. Les mailles du plus petit tamis ont une dimension de 80 microns (0,08mm). La taille des mailles des tamis est normalisée. Cette taille correspond aux termes d'une suite géométrique de raison 1,259. Chaque dimension de maille d'un tamis correspond donc à la dimension du précédent multipliée par 1,259. Le plus grand tamis a une dimension de 80 mm.

Les tamis sont également repérés par un numéro d'ordre appelé **module**. Le module **M** d'un tamis de dimension **d** (à exprimer en microns) est défini de la manière suivante :

$$M = (1 + 10 \log_{10} d) \text{ arrondi au nombre entier le plus voisin}$$

Exemple : Tamis de 5 mm = 5 000 microns $\implies M = 1 + 10 \log_{10} 5\,000 = 37,99$ et $M = 38$

Le premier tamis (0,08 mm) a comme module $M = 20$, le suivant, $M = 21$ et ainsi de suite selon une progression arithmétique de raison 1.





TAMIS 1,25 MM DE MODULE 32

Les passoires

Une **passoire** est constituée d'une tôle perforée définissant de trous **circulaires**. Les passoires sont désignées par le diamètre de ces trous. La plus petite passoire à des trous de diamètre 0,50 mm. Comme pour les tamis, le diamètre des passoires est normalisé et correspond aux termes de la même suite géométrique.

Le module **M** d'une passoire de dimension **d** (à exprimer en microns) est défini de la manière suivante :

M = (10 log₁₀ d) arrondi au nombre entier le plus voisin

Exemple : Passoire de 80 mm = 80 000 microns ==> M = 10 log₁₀ 80 000 = 49,031 et M = 49



Série complète des tamis et passoires (Selon les normes AFNOR X-11 501 et 504)

MODULE	PASSOIRES (DIAMETRE DES TROUS EN MM)	TAMIS (COTE DE LA MAILLE EN MM)
50	100	80
49	80	63
48	63	50
47	50	40
46	40	31,5
45	31,5	25
44	25	20
43	20	16
42	16	12,5
41	12,5	10
40	10	8
39	8	6,3
28	6,3	5
37	5	4
36	4	3,15
35	3,15	2,5
34	2,5	2

MODULE	PASSOIRES (DIAMETRE DES TROUS EN MM)	TAMIS (COTE DE LA MAILLE EN MM)
33	2	1,6
32	1,6	1,25
31	1,25	1
30	1	0,8
29	0,8	0,63
28	0,63	0,50
27	0,5	0,40
26		0,315
25		0,25
24		0,2
23		0,16
22		0,125
21		0,1
20		0,08
19		0,063
18		0,050
17		0,040

Tamiseuse, échantillonneur



TAMISEUSE ELECTRIQUE



TAMISEUSE ELECTROMAGNETIQUE



ECHANTILLONNEURS

3.02/ Appareillage d'usage courant

- Des bacs dont les dimensions peuvent être 30 x 40 x 12 cm ;
- Une étuve ;
- Une balance de 30 kg de portée à 10 grammes près ;
- Une balance de 5 kg au gramme près ;
- Des plateaux tarés pour la mesure de la teneur en eau ;
- Un pinceau à poils doux en nylon.

4/ PRISE DE L'ECHANTILLON

La première question qui se pose est de choisir une masse d'échantillon à tamiser. Ce choix de masse doit vérifier plusieurs contraintes.

En effet, il faut que l'échantillon analysé soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop important pour éviter de saturer les tamis ou de les faire déborder. Il est recommandé de se tenir dans les limites définies par la formule suivante :

$$0,2 \times D \leq M \leq 0,6 \times D$$

On observe que cette plage est exprimée en fonction de D, qui représente le D de la classe du granulat « d/D » en mm. M est indiquée en kg

Exemple : pour effectuer l'analyse granulométrique d'un gravier 4/12,5, il faut identifier D : ici D = 12,5 mm. Il faudra alors prélever des échantillons de masse comprise entre : $0,2 \times 12,5 < M < 0,6 \times 12,5$, c'est à dire : $2,5 \text{ Kg} < M < 7,5 \text{ Kg}$

Par exemple, M peut être choisie égal à 3 Kg.

En général la limite inférieure de cette formule est suffisante, de telle manière qu'on arrive au tableau suivant :

DIMENSION D DES PLUS GROS ELEMENTS			POIDS NECESSAIRE POUR L'ESSAI (KG)
MODULE	PASSOIRE (MM)	TAMIS (MM)	
50	100	80	20
48	63	50	12
46	40	32	10
44	25	20	5
41	12,5	10	3
38		5	1 à 1,5
D < 38		< 5	0,7 à 1
LIMON OU ARGILE			0,2 à 0,4

5/ EXECUTION DE L'ESSAI

5.01/ Tamisage par voie sèche

5.01.01/ Préparation du granulat

1/ Le granulat préalablement échantillonné, est séché dans une étuve à $105 \pm 5^\circ \text{ C}$, puis pesé ;

2/ Après dessiccation complète, on procède à l'élimination des fines par lavage continu. Pour cela, on introduit l'échantillon dans un récipient pourvu à sa partie supérieure d'un bec. Le lavage est effectué par renouvellement continu de l'eau qui s'écoule par le bec. Cette eau se déverse dans un tamis de 0,08 mm (module 20) destiné à retenir les éléments supérieurs qui auraient pu être entraînés. L'échantillon est agité de façon à bien décoller les éléments fins. L'écoulement est arrêté lorsque l'eau contenue dans le récipient devient claire. Le tamis de 0,08 mm contient en général un refus peu important qui est reversé dans le récipient en rinçant la toile tamisante.

3/ L'échantillon est ensuite séché à l'étuve puis pesé.

5.01.02/ Choix des tamis et passoires

La question du choix des tamis se pose ici. Quels sont les tamis nécessaires à l'analyse ?

Si la classe granulaire, d/D du granulat est connue, nous connaissons les dimensions du plus petit et du plus grand grain représentatif du granulat. Etre représentatif ne signifie pas être le plus petit ou le plus grand de l'échantillon. Il est fort probable que sur des tamis de mailles inférieures ou supérieures à d et D, des grains se déposent mais en faible quantité. La norme NF P 18-304 indique par le calcul que cela peut concerner les deux tamis de mailles inférieures à d est le tamis de maille supérieure à D. Il faut donc choisir tous les tamis partant de deux mailles en dessous de d et allant jusqu'à deux mailles au-dessus de D.

Si la classe granulaire n'est pas connue, l'œil sera un bon indicateur pour classer approximativement un granulat. Il est à savoir qu'un sable est un granulat constitué de grain de taille comprise entre 0 et 5 mm. Un gravier fin est constitué de grains de taille comprise entre 2,5 et 16 mm. Un gravier moyen est constitué de grains de taille comprise entre 3,15 et 31,5 mm. Un gros gravier est constitué de grains de taille comprise entre 5 et 80 mm. En prenant les tamis dans ces plages, il est fort probable que l'analyse permettra de classer tous les diamètres de grain.

Si l'échantillon contient des éléments retenus par la passoire de 12,5 mm, (module 41), l'analyse granulométrique s'effectuera en deux temps :

- > Utilisation des passoires ($\geq 12,5 \text{ mm}$) ;
- > Utilisation des tamis ($\leq 5 \text{ mm}$)

5.01.03/ Exécution de l'essai : Après dessiccation complète du matériau lavé, on procède au tamisage par voie sèche, soit manuellement, soit à la tamiseuse.

a) Tamisage manuel

1/ Exécuter l'analyse granulométrique en versant le matériau d'abord sur la passoire de dimension maximum retenue pour l'essai ; continuer l'opération sur les passoires de dimensions inférieures jusqu'à celle de 12,5 mm (module 41). Sur chaque passoire, le matériau est soigneusement agité à la main jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe par les trous de la passoire. Peser les différents refus des passoires en les cumulant et porter les résultats sur la feuille d'essais, en annexe.

2/ Si la quantité de matériau est trop importante pour poursuivre le tamisage (voir tableau ci-dessus), un échantillonnage s'impose.

3/ Le tamisage des éléments inférieurs à 12,5 mm s'effectuera sur la série de tamis à mailles carrés dont le premier est celui de 5 mm (module 38). Verser le matériau sur le premier tamis de la colonne correctement emboîtée qui peut comprendre, par exemple, les tamis de 5 – 2 – 1 – 0,4 – 0,2 – 0,1 et 0,075 mm.

4/ Agiter cette colonne dans le plan horizontal, puis reprendre un à un les tamis en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis dans le plan horizontal, en donnant à la main, des coups réguliers sur la monture. Verser le tamisat recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur et, avant de reprendre sur celui-ci la même opération et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis. Peser les différents refus en les cumulant et porter les résultats sur la feuille d'essais, en annexe.

b) Utilisation de la tamiseuse

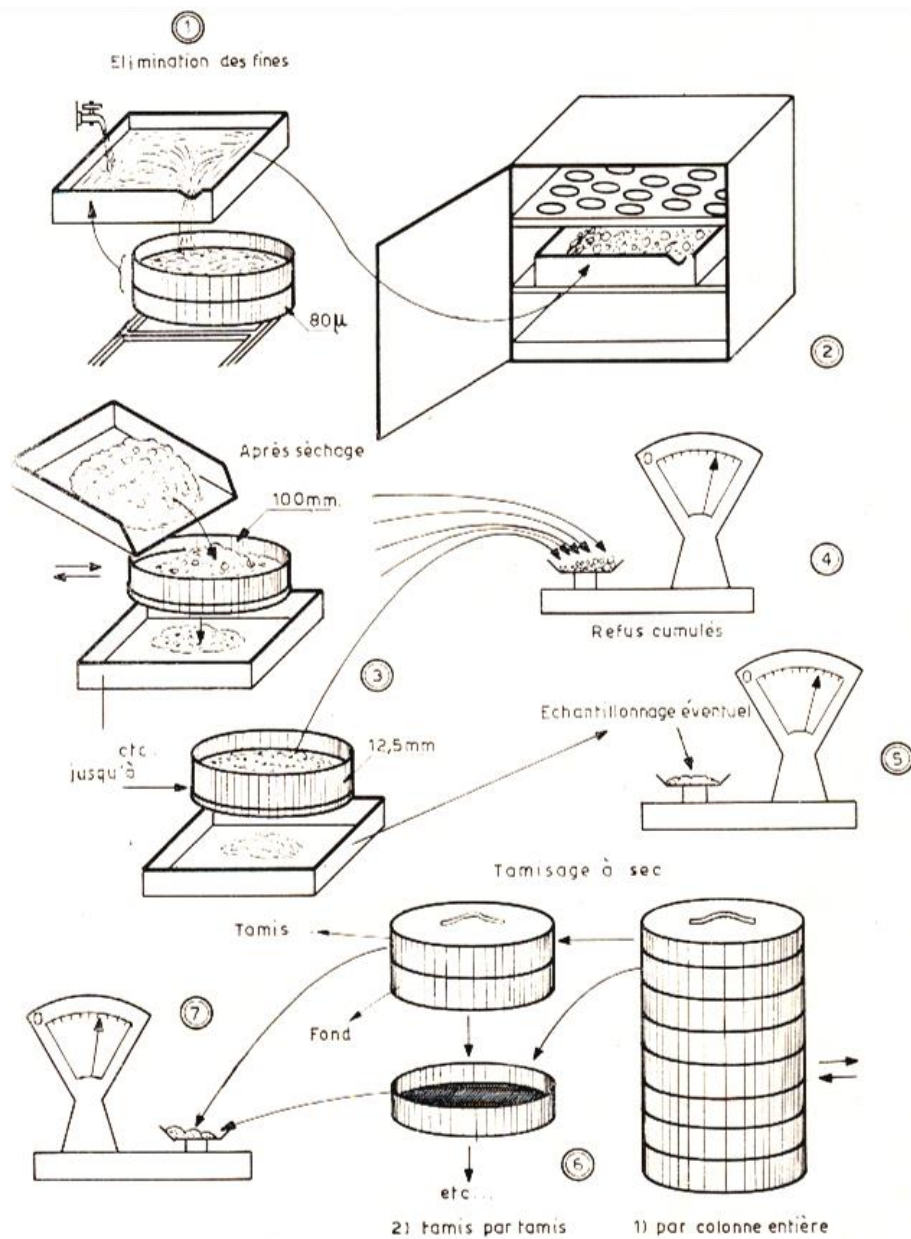
1/ L'échantillon à analyser est versé sur la passoire de dimension maximum retenue pour l'essai, placée en haut de la colonne de passoires qui est fixée sur la tamiseuse. La dernière passoire étant celle de 12,5 mm, on disposera un bac destiné à recevoir le tamisat inférieur à cette dimension. Faire fonctionner la tamiseuse jusqu'à ce que plus aucun élément ne tombe de la dernière passoire.

2/ Reprendre une à une les différentes passoires et s'assurer, en remuant les éléments à la main, que plus aucun ne passe, puis peser les différents refus et les porter sur la feuille d'essai, en annexe.

3/ Le tamisage des éléments inférieurs à 12,5 mm s'effectuera sur la série de tamis à mailles carrées dont le premier est celui de 5 mm (module 38). Si le tamisat à 12,5 mm est trop important pour poursuivre le tamisage (voir tableau ci-dessus), il faudra faire un échantillonnage.

4/ Après avoir fixé la colonne de tamis sur la tamiseuse, verser l'échantillon sur le tamis supérieur, faire fonctionner la tamiseuse comme précédemment et procéder de la même manière qu'en 2/.

Il est possible, par ailleurs, d'utiliser une méthode combinée consistant à effectuer manuellement les opérations de tamisage jusqu'à 12,5 mm (module 41) et continuer à l'aide de la tamiseuse pour les éléments inférieurs.



OPERATIONS DE PESAGE

Un récipient pour recueillir les granulats, est posé sur la balance. La balance est tarée. Le plus grand tamis est vidé dans le récipient.



Sans vider le récipient, le tamis suivant est à son tour vidé dans le récipient. Cette opération est reproduite ainsi de suite jusqu'au dernier tamis

Remarque : Si le matériau est propre, donc ne contient pas ou très peu de fines (graves maigres, sols sableux, laitiers, etc.), on pourra éviter l'opération de lavage préalable et le matériau, totalement sec, est alors tamisé sur l'ensemble des passoires retenues jusqu'à celle de 12,5 mm. Avant de peser les différents refus, on s'assurera que les gros éléments ne retiennent pas de fines. Sur ce tamisat, on effectue un prélèvement pour disposer d'une quantité de matériau conforme au tableau de la page précédente et, pour la suite du tamisage, on procédera :

- > Soit en éliminant les fines par lavage dans un bac, puis en tamisant à sec le matériau propre.
- > Soit en procédant par tamisage humide avec la série de tamis habituelle (manuellement ou au moyen de la tamiseuse) suivi d'un tamisage complémentaire après séchage (voir tamisage par voie humide).

5.01.04/ Exemple de calcul (Tamisage par voie sèche)

Soit un matériau dont les plus gros éléments ont 63 mm de diamètre (passoire). On prendra environ 12 kg pour effectuer l'analyse granulométrique.

1/ Le matériau après séchage complet à une masse **M_s = 11 460 kg**.

2/ Après lavage préalable pour élimination des éléments < 0,08 mm et séchage à l'étuve, il pèse **M's = 10 280 g**.

3/ Le tamisage sur la série de passoires a donné lieu aux résultats suivants :

PASSOIRES	REFUS CUMULES	
	EN GRAMMES	EN %
63 mm	500	5
40 mm	1 200	11
25 mm	2 135	19
12,5 mm	3 616	32

4/ La masse de la totalité des éléments passant à la passoire de 12,5 mm (y compris ceux éliminés par lavage) est donc de :

$$Q_s = 11\,460 - 3\,616 = 7\,844 \text{ g}$$

5/ On dispose, pour poursuivre l'analyse sur les tamis, d'une masse trop importante : **Q's = 10 280 - 3 616 = 6 664 g**

Après échantillonnage, répété deux fois, on obtient une masse **q's = 1 131 g**, retenue pour poursuivre l'analyse.

6/ La masse **q_s** exacte (y compris fines) est obtenue de la manière suivante :

$$\frac{q_s}{q's} = \frac{Q_s}{Q's} \implies \frac{q_s}{1\,131} = \frac{7\,844}{6\,664} = 1\,190 \text{ g}$$

Les différents refus sont :

TAMIS (DIMENSIONS EN MM)	5	2	1	0,4	0,2	0,1	0,08
REFUS CUMULES (EN GR)	249	314	420	532	710	1 060	1 131
REFUS CUMULES (EN %)	19	24	32	40	53	80	85
TAMISATS (EN %)	81	76	68	60	47	20	15

Pour ramener ces pourcentages à la quantité de matériau initiale **M_s**, on procède de la manière suivante : Le tamisat à la passoire de 12,5 mm, égale à (100 - 32) = 68 %, correspond à la part de matériau analysé sur les tamis, s'il n'y a pas eu d'échantillonnage. Il suffit donc de multiplier chaque tamisat ci-dessus par 0,68 pour obtenir les tamisats ramenés à la quantité initiale de matériau :

TAMIS (DIMENSIONS EN MM)	5	2	1	0,4	0,2	0,1	0,08
	81 x 0,68	76 x 0,68	68 x 0,68	60 x 0,68	47 x 0,68	20 x 0,68	15 x 0,68
TAMISATS (EN %)	55	52	46	41	32	14	10

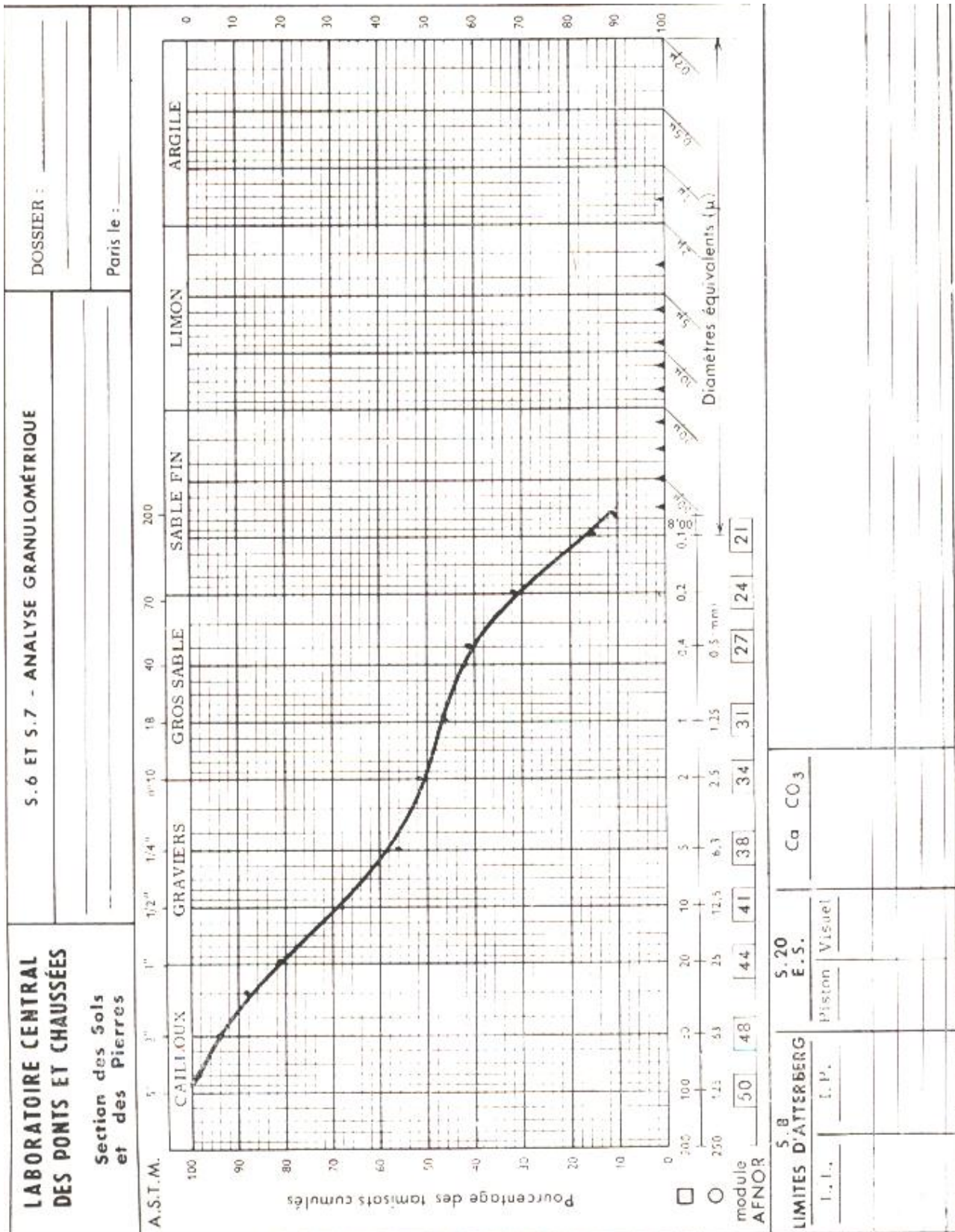
ANALYSE GRANULOMETRIQUE							
Tamisage par voie sèche							
DOSSIER.....				DATE.....			
OPERATEUR.....				ECHANTILLON.....			
ANALYSE SUR PASSOIRES							
MODULES	PASSOIRES	TAMIS	MASSES DES REFUS CUMULES R _c (G)	MASSE TOTALE DE L'ECHANTILLON SEC M _s = 11 460 G	% TAMISATS CUMULES T = (100 - R)	% REFUS CUMULES R = (100 x R _s / M _s)	
50	100	80		MASSE DE L'ECHANTILLON APRES LAVAGE M's = 10 280 G			
48	63	50	580	MASSE TOTALE SECHE < 12,5 MM Q _s = M _s - R _c (12,5) = 7 844	95	5	
46	40	32	1 260	MASSE TOTALE APRES LAVAGE < 12,5 MM Q's = M's - R _c (12,5) = 6 664 G	89	11	
44	25	20	2 135		81	19	
41	12,5	10	3 616		B = 68	32	

$$q_s = \frac{Q_s}{Q's} \times q's = \frac{7\ 844 \times 1\ 131}{6\ 664} = 1\ 330 \text{ GR}$$

ANALYSE SUR TAMIS

MODULES	PASSOIRES	TAMIS	MASSES DES REFUS CUMULES R'c (G)	% REFUS CUMULES R' = (100 x R'c / Qs)	% TAMISATS CUMULES T' = (100 - R')	% TAMISATS CUMULES RAMENES A Ms : B.T'	% REFUS CUMULES RAMENES A Ms : 100 - (B.T')
38	6,3	5	249	19	81	55	45
34	2,5	2	314	24	76	52	48
31	1,25	1	420	32	68	46	54
27	0,5	0,4	532	40	60	41	59
24		0,2	710	53	47	32	68
21		0,1	1 060	80	20	14	86
20		0,08	1 131	85	15	10	90

TRACE DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE



2/ Exécuter l'analyse granulométrique du refus à 12,5 mm en le versant d'abord sur la passoire de dimension maximum retenue pour l'essai ; continuer l'opération sur les passoires de dimensions inférieures jusqu'à celle de 12,5 mm (module 41). Sur chaque passoire, le matériau est soigneusement agité à la main jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe par les trous de la passoire. Peser les différents refus des passoires en les cumulant et porter les résultats sur la feuille d'essais, en annexe.

3/ Verser le tamisat à 12,5 mm dans le bac contenant l'eau de lavage des éléments supérieurs à 12,5 mm. Si la quantité d'eau est trop importante, faire évaporer l'eau excédentaire à l'air ou à une température ne dépassant pas 80 ° C. Ne pas laisser sécher complètement le matériau.

4/ peser la totalité du tamisat humide avant de prélever un échantillon pour déterminer la teneur en eau du tamisat inférieur à 12,5 mm. Si la quantité de matériau est trop importante pour poursuivre le tamisage, faire un échantillonnage.

5/ Le tamisage des éléments inférieurs à 12,5 mm s'effectuera sur la série de tamis à mailles carrées dont le premier est celui de 5 mm. Verser le matériau éventuellement échantillonné sur le premier tamis de la colonne correctement emboîtée qui comprend normalement les tamis de 5 – 2 – 1 – 0,4 – 0,2 – 0,1 et 0,08 mm. Poser cette colonne de tamis dans un évier, asperger le matériau d'eau dans le tamis de 5 mm en le brassant soigneusement, en veillant à ce que les tamis inférieurs ne débordent pas. Lorsque le refus est parfaitement propre, enlever le tamis de 5 mm et procéder de même sur les autres tamis de la colonne. Les éléments < 0,08 mm ne sont pas recueillis. Le tamisage terminé, porter la colonne de tamis reconstituée dans une étuve pour sécher les refus.

6/ Le séchage terminé, compléter le tamisage en agitant les différents tamis avec un fond pour recueillir les grains retenus éventuellement dans les mailles des tamis. Peser les refus cumulés et porter les résultats sur la feuille d'essais, en annexe.

6/ Prélever alors un échantillon pour déterminer la teneur en eau des éléments inférieurs à 12,5 mm (module 41), puis passer la quantité retenue sur le tamis supérieur de la colonne (tamis de 5 mm). Fixer cette colonne sur la tamiseuse en la coiffant du dispositif arroseur puis ouvrir l'arrivée d'eau et laisser fonctionner la tamiseuse jusqu'à ce que l'eau de lavage s'écoule claire du dernier tamis. Régler le débit d'eau pour éviter des fuites entre deux tamis, provenant de l'engorgement de l'un d'eux.

Porter la colonne de tamis à l'étuve pour sécher les refus. Avant de les peser en les cumulant, retamiser à sec et porter les résultats sur la feuille d'essai en annexe.

5.03/ Tracé et interprétation de la courbe granulométrique

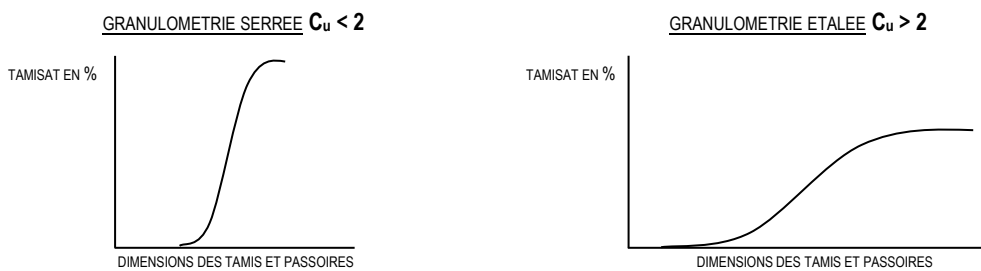
On porte les divers pourcentages des refus ou des tamisats cumulés sur la feuille de travail en coordonnées semi-logarithmiques, de façon à donner une représentation plus précise des particules fines (qui influent énormément sur le comportement des sols).

La courbe est tracée de manière continue et ne passe pas rigoureusement par tous les points.

Soit D_x , le diamètre pour lequel le tamisât est de x % (ex: D_{30} = diamètre du tamis pour lequel on obtient 30 % de passant). On définit alors les caractéristiques de la courbe granulométrique suivantes :

➤ Le coefficient de Hazen (ou coefficient d'uniformité) : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

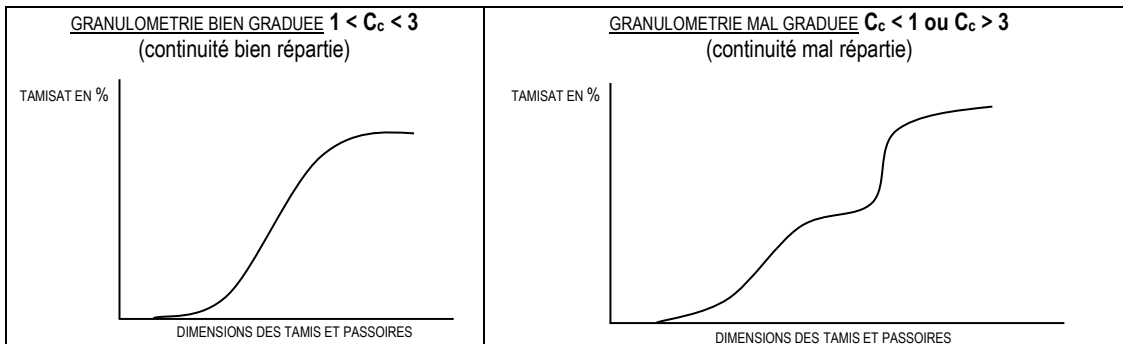
Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée, notamment en ce qui concerne les sables. Pour CAQUOT et KERISEL, une granulométrie est étalée dès que $C_u > 2$, elle est serrée lorsque $C_u < 2$.



A la suite des travaux de HAZEN, on admet que la perméabilité d'un sol dépend, en première approximation, du coefficient de HAZEN et du diamètre D_{10} , qui a reçu le nom de **diamètre efficace**.

➤ Le coefficient de courbure $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$

Ce coefficient vient en complément du coefficient de HAZEN dans la classification des sols LCPC, afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée (un sol est mal gradué si une fraction de grains prédomine).



Continuité - Discontinuité : On dit que la courbe granulométrique est continue si entre deux éléments consécutifs présents, il manque au plus 3 éléments. Il y a discontinuité si l'absence porte sur plus de 3 éléments.

5.04/ Recommandations

- On ne doit pas appuyer les particules du granulat sur la toile tamisante pour essayer de forcer leur passage ;
- Lorsque l'on opère manuellement sur les tamis fins (à partir de 0,5 mm), il faut remuer les matériaux avec d'extrêmes précautions afin de ne pas distendre les toiles tamisantes ;

Au moment de la pesée des refus cumulés, brosser la toile avec un pinceau de nylon ou de soie pour recueillir les éléments qui pourraient se trouver retenus

5.05/ Observations

Précision/ si, sur une certaine quantité de matériau homogène, on effectue parallèlement deux analyses granulométriques différentes, il est possible que les deux courbes ne concordent pas parfaitement et soient semblables à une translation près, ou bien qu'elles présentent des différences quant aux refus cumulés sur certains tamis. La tolérance va d'environ 2 % du poids total pour les sables fins et 5 % pour les graviers.

Si dans une quantité importante d'un granulat, se trouvent un ou deux éléments de très grande dimension par rapport au reste, il est recommandé de ne pas en tenir compte et de les enlever de l'échantillon.

Erreur/ les sources d'erreur de l'analyse granulométrique sont essentiellement les suivantes :

- Précision des balances : l'erreur maximale porte sur les fines. Si on veut leur pourcentage avec une très grande précision, il faut respecter rigoureusement les quantités minimums nécessaires pour l'essai et les précisions de balance indiquées dans le présent mode opératoire.
- Précision des tamis : les tamis doivent répondre rigoureusement aux exigences des normes AFNOR X 11 501 et X 11 504 et subir un contrôle d'usure qui consiste à les comparer avec le jeu étalon du pouvoir tamisant. Pour cela, on prendra un échantillon de billes de verre (ou à la rigueur un échantillon d'un granulat quelconque) pour lequel on déterminera la courbe granulométrique, d'une part à l'aide du jeu étalon et d'autre part à l'aide du jeu de tamis à contrôler. Si les refus retenus sur chaque tamis différent entre eux de 1 % pour les tamis en dessous de 1 mm et de plus de 2 % pour les tamis entre 1 et 5 mm, il faut remplacer le tamis usagé.

6/ CLASSIFICATION DES SOLS

L'analyse granulométrique par tamisage est probablement l'essai le plus largement utilisé : on l'emploie pour l'étude des sols, des bétons hydrauliques, des bétons bitumineux, des produits chimiques, des charbons, etc. il s'applique à toutes les matières grenues, pulvérulentes ou même cohérentes susceptibles d'être subdivisées par tamisage

6.01/ Classification de l'agronome suédois ATTERBERG

C'est la plus ancienne classification utilisée pour caractériser les particules de différentes dimensions, c'est aussi la plus simple et l'une des plus répandues. Comme on le voit ci-après, elle suit une progression géométrique de raison 1/10.

DESIGNATION	DIMENSIONS
ENROCHEMENTS	D > 200 MM
CAILLOUX	200 MM > D > 20 MM
GRAVIER	20 MM > D > 2 MM
SABLE GROS	2 MM > D > 0,2 MM
SABLE FIN	0,2 MM > D > 0,02 MM
LIMON	20 μ > D > 2 μ
ARGILE	2 μ > D > 0,2 μ
ULRARGILE	0,2 μ > D

6.02/ Classification du Massachussets Institute Technology (M.I.T.)

DESIGNATION	DIMENSIONS
PIERRES	D > 63 MM
GRAVIER GROS	63 MM > D > 20 MM
GRAVIER MOYEN	20 MM > D > 6 MM
GRAVIER FIN	6 MM > D > 2 MM
SABLE GROS	2 MM > D > 0,6 MM
SABLE MOYEN	0,6 MM > D > 0,2 MM
SABLE FIN	0,2 MM > D > 0,06 MM
LIMON GROSSIER	0,06 MM > D > 20 μ
LIMON MOYEN	20 μ > D > 6 μ
LIMON FIN	6 μ > D > 2 μ
ARGILE	2 μ > D > 0,6 μ

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL	LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS
<h2 style="margin: 0;">ANALYSE GRANULOMETRIQUE</h2> <h3 style="margin: 0;">Tamisage par voie sèche</h3>	
DOSSIER.....	DATE.....
OPERATEUR.....	ECHANTILLON.....

ANALYSE SUR PASSOIRES

MODULES	PASSOIRES	TAMIS	MASSES DES REFUS CUMULES R _c (G)	MASSE TOTALE DE L'ÉCHANTILLON SEC M _s =	% TAMISATS CUMULES T = (100 - R)	% REFUS CUMULES R = (100 x R _s / M _s)
50	100	80		MASSE DE L'ÉCHANTILLON APRES LAVAGE M _L =		
48	63	50		MASSE TOTALE SECHE < 12,5 MM Q _s = M _s - R _c (12,5).....		
46	40	32		MASSE TOTALE APRES LAVAGE < 12,5 MM Q' _s = M' _s - R _c (12,5) =		
44	25	20				
41	12,5	10				B =

$$q_s = \frac{Q_s}{Q'_s} \times q'_s$$

ANALYSE SUR TAMIS

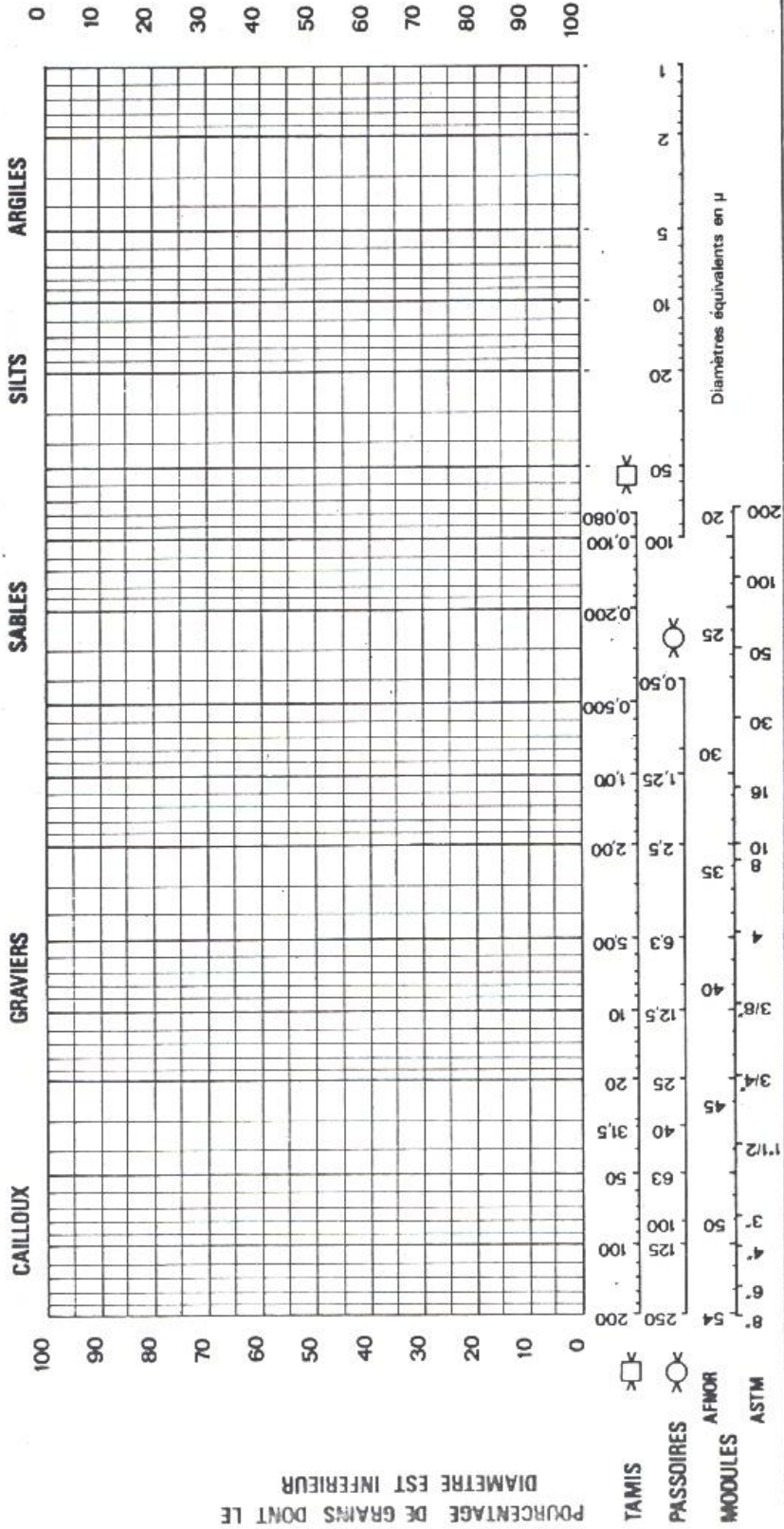
MODULES	PASSOIRES	TAMIS	MASSES DES REFUS CUMULES R' _c (G)	% REFUS CUMULES R' = (100 x R' _c / Q _s)	% TAMISATS CUMULES T' = (100 - R')	% TAMISATS CUMULES RAMENES A M _s : B.T'	% REFUS CUMULES RAMENES A M _s : 100 - (B.T')
38	6,3	5					
34	2,5	2					
31	1,25	1					
27	0,5	0,4					
24		0,2					
21		0,1					
20		0,08					

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

PROVENANCE :
PRELEVEMENT :

NATURE :
OPERATEUR :

DOSSIER N° :
DATE :



Analyse granulométrique par sédimentométrie

SOURCES

MODES OPERATOIRES DU LABORATOIRE
CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
SANGLERAT - INTERNET

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

1/ GENERALITES

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0,100 mm (module AFNOR 21).

Les grains de différents diamètres sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par **la loi de Stokes**. Comme cette relation a été établie pour des grains de forme sphérique, on n'obtiendra, en l'appliquant aux éléments d'un sol, que des « diamètres équivalents ».

Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme **NF P 94-057**.

2/ APPAREILLAGE

2.01/ Appareillage spécifique

- Un densimètre gradué de 0,995 à 1,030 g/cm³ ayant la forme d'une torpille avec des graduations tous les 0,0005 g/cm³.
- Des éprouvettes cylindriques de 85 mm de diamètre intérieur, 450 mm de hauteur de graduations et 2 litres de capacité.
- Un agitateur mécanique dont la vitesse de rotation peut être modifiée de 0 à 10 000 tours par minute.
- Un défloculant : hexamétophosphate de sodium.
- Un agitateur manuel pour homogénéisation de la suspension avant essai.



HEXAMETAPHOSPHATE DE SODIUM



DENSIMETRE TORPILLE

2.02/ Appareillage d'usage courant

- Un thermomètre gradué en 1/10 de degré de + 1 à + 35 ° C, environ.
- Un chronomètre.
- De l'eau distillée.
- Une balance précise de 200 g de portée, au décigramme près.
- Un tamis de 0,100 mm (module 21).
- Un mortier de 20 cm de diamètre environ avec pilon en caoutchouc.
- Une étuve
- Spatules et cuillères.
- Papier indicateur pH 1-10
- Bacs pour tamisage.



THERMOMETRE

CHRONOMETRE



BALANCE



TAMIS (MODULE 21)



MORTIER AVEC PILON



ETUVE



BAC POUR TAMISAGE

3/ PREPARATION DE L'ECHANTILLON

- Tamiser le sol par voie humide au tamis de 0,1 mm et recueillir dans un bac l'eau de lavage avec les éléments inférieurs à 0,1 mm.
- Laisser décanter, puis siphonner au maximum l'eau devenue claire, sans entraîner de fines et porter ensuite le bac dans une étuve.
- Une fois le matériau sec, le recueillir soigneusement et le désagréger au pilon en caoutchouc dans le mortier.
- Homogénéiser l'ensemble avant de prélever dans une éprouvette de 2 litres, la quantité de 80 grammes de matériau sec, nécessaire à la réalisation de l'essai.
- Mettre à imbiber les 80 grammes de matériau sec dans un des récipients de l'agitateur mécanique. Cette imbibition préalable doit être faite au moins de 60 cm d'une solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium (cette solution préparée à partir du produit commercial cristallisé a une validité maximum de un mois ; il est recommandé de noter la date de préparation de la solution et de la jeter une fois ce délai écoulé).
- Agiter mécaniquement pour séparer convenablement les grains pendant 3 minutes à 10 000–12000 tours par minute. L'eau distillée qui servira au cours de l'essai, séjournera suffisamment longtemps dans la salle pour être à la température ambiante.
- Verser la suspension dispersée dans l'éprouvette de 2 litres et rincer soigneusement le récipient de l'agitateur, puis compléter le remplissage de l'éprouvette par de l'eau distillée jusqu'à 2 litres exactement.

4/ EXECUTION DE L'ESSAI

4.01/ Principe d'application de la loi de Stokes

Lorsque les dimensions des particules d'un sol sont inférieures à 0,100 mm, le tamisage n'est plus possible. On a recours alors à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule. Cette relation s'écrit :

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1,8 \eta} d^2$$

v =	vitesse de décantation (en cm/s)	γ _w =	masse volumique du liquide (en kN/m ³)
d =	diamètre de la particule (en cm)	η =	viscosité dynamique (Pa/s)
γ _s =	masse volumique des grains solides du sol (en kN/m ³)		

Cette formule donne par exemple, pour la décantation de grains de masse volumique γ_s = 2,65 t/m³, dans de l'eau à 20 ° C (η = 1 mPa/s) :

$$v \text{ (cm/s)} = 9\,000 \text{ d}^2 \text{ (cm}^2 \text{)}$$

En pratique, pour pouvoir appliquer la loi de Stokes, il convient d'opérer sur une suspension de faible concentration (environ 20 g/l) et sur des grains dont les dimensions varient de 100 μ à 1 μ. Par convention, le diamètre d'une particule est égal au diamètre de la particule sphérique de même masse volumique qui a la même vitesse décantation. Ce point est important à souligner car les particules très fines, comme on l'a vu, sont loin d'être toutes sphériques.

La méthode consiste à mesurer à différentes époques, à l'aide d'un densimètre torpille, la densité d'une suspension de sol. On opère sur une suspension initialement homogène ; la décantation des particules détruit cette homogénéité et à un instant donné t, après le début de l'essai, la densité de la suspension n'est plus constante et varie avec la profondeur. On peut admettre, sans erreur notable, que cette densité moyenne est égale à la densité de la suspension à la profondeur h du centre de gravité du bulbe du densimètre.

Les particules qui, à l'instant initial étaient en surface et qu'à l'instant t sont à la profondeur h, ont décanté avec une vitesse h/t, elles ont donc une dimension :

$$d = \sqrt{\frac{1,8 \eta}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{h}{t}}$$

Les particules les plus grosses ont une vitesse de décantation plus élevée. Par conséquent, à l'instant t et à la profondeur h, on ne trouve que des particules de dimensions inférieures ou égales à dy. Puisque les vitesses de décantation sont constantes, ces particules ont une concentration pM/V) identique à la concentration en particules de même taille de la concentration initiale (V est le volume de la suspension, M la masse de sol sec contenu dans la suspension et p le pourcentage en masse de sol sec des particules de dimensions inférieures ou égales à dy)

La densité R de la suspension à l'instant t et à la profondeur h est donc :

$$R = p \frac{M}{V} + \gamma_w \left[1 - \frac{y M}{V} \right] \quad \text{On en tire} \quad p = \frac{V \gamma_s \gamma_w}{R - 1} x (R - 1)$$

V $\gamma_s V$ $M (\gamma_s - \gamma_w)$

A l'instant t , on mesure la densité R à l'aide du densimètre et on en déduit immédiatement H (c'est la distance de la graduation R au centre de gravité du bulbe). On peut donc calculer y et dy . On a ainsi déterminé un point de la courbe granulométrique. En recommençant la mesure plusieurs fois, on obtient d'autres points de la courbe.

4.02/ Mode opératoire de l'essai

S'assurer, avant de commencer l'essai, que la tige du densimètre est parfaitement propre, ce qui est très important pour la formation correcte du ménisque. Ne jamais saisir, en cours d'essai, le densimètre autrement qu'à l'extrémité supérieure de la tige.

Avant de plonger le densimètre, agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette (Figure 1). Retirer l'agitateur et déclencher au même moment le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre (Figure 2). Faire les lectures au sommet du ménisque (Figure 3) et noter le nombre R de divisions à partir de la graduation **1000** affecté du signe **+** pour les lectures supérieures à **1000**. Par exemple 1,0185 se note 18,5.

Les lectures sont faites au bout de 30 secondes, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 80, 120, 240 minutes (et éventuellement au bout de 1 140 minutes, soit après 24 heures), ces temps étant tous comptés à partir du début de l'essai.

Les 3 lectures au bout de 3 secondes, 1 et 2 minutes se font sans retirer le densimètre de la suspension. Ce n'est qu'après les lectures à 2 minutes que la température de la suspension est relevée au 1/10 de degré près.

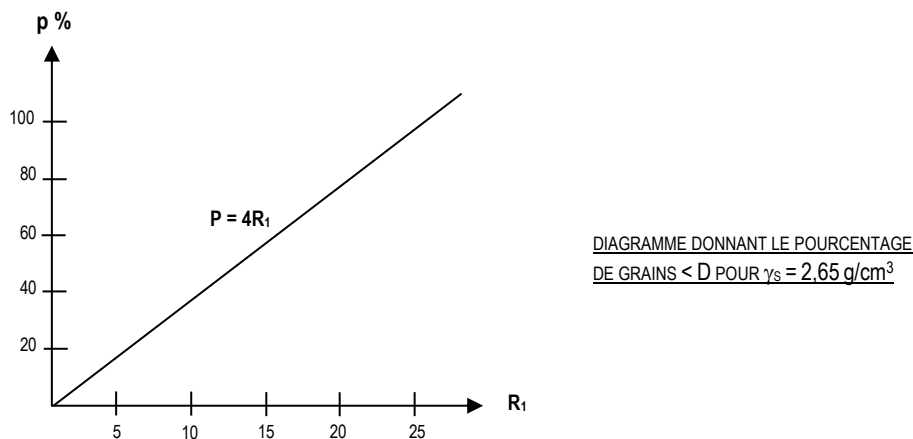
Pour les autres lectures, plonger le densimètre 15 à 20 secondes avant la lecture. Noter la température après chaque lecture.

5/ CORRECTION, CALCULS ET PRESENTATION DES RESULTATS

Calculer les lectures corrigées R_1 tenant compte de la température, du ménisque et du défloculant à partir des lectures faites F . Pour cela on se servira de l'échelle d'étalonnage établie pour chaque densimètre, donnant la correction à ajouter (voir étalonnage d'un densimètre).

On calcule ensuite le pourcentage p des grains pour les différents diamètres équivalents,

- Soit à partir de la formule : $p = 4 R_1$
- Soit à partir du diagramme suivant :



Les diamètres équivalents, lorsque la masse volumique γ_s exacte des grains n'a pas été déterminée avant l'essai, sont calculés pour la valeur $\gamma_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ et figure sur la feuille d'essai. On trouvera en annexe N° 01 les méthodes pour calculer le diamètre équivalent D et le pourcentage p exacts lorsque γ_s est connu.

Lorsque la concentration de la suspension n'est pas celle recommandée dans le présent mode opératoire (elle peut varier sans raisons graves d'erreur entre 30 et 100 g pour 2 litres d'eau), on emploiera la formule suivante pour le calcul des pourcentages :

$$p = \frac{V \gamma_s}{M (\gamma_s - 1)} \times \frac{R_1}{10}$$

Pour se ramener aux pourcentages de l'échantillon complet (fraction supérieure à 0,1 mm éliminée par tamisage), il suffit de multiplier les pourcentages p obtenus dans la sédimentométrie par le pourcentage de fraction inférieure à 0,100 mm (voir exemple dans la feuille d'essai en annexe).

6/ OBSERVATIONS

De nombreux facteurs influencent la précision de l'analyse granulométrique par sédimentométrie tels que, par exemple, le mode de préparation de l'échantillon, le type de concentration de défloculant, la masse volumique du sol, etc. il n'a, dans ces conditions, pas paru nécessaire d'imposer le calcul exact

pour chaque essai des diamètres équivalents, en fonction de la masse volumique des grains, de la viscosité du liquide, de la profondeur effective du centre de gravité du bulbe, du temps de sédimentation, de l'accélération de la pesanteur (Voir Annexe N° 01 : Théorie de la sédimentométrie).

L'expérience a montré que des résultats très satisfaisants étaient obtenus en retenant, une fois pour toutes, les diamètres équivalents moyens figurant sur la feuille d'essai.

Il est, par contre, indispensable de procéder aux corrections dues aux variations de température, même, faibles. On trouvera en annexe la description de la méthode à employer pour étalonner un densimètre. Bien qu'il soit demandé de tracer la courbe d'étalonnage de + 15 à + 35 ° C, il est recommandé de ne s'écarter que de quelques degrés de la température du début de l'essai. Si de grandes variations de température dans la salle d'essai sont à craindre (lorsqu'on effectue par exemple la lecture à 24 heures), il y a intérêt à placer les éprouvettes dans un bain d'eau, afin d'amortir au mieux les écarts de température.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

SEDIMENTOMETRIE

PROVENANCE :
 SONDAGE :
 PROFONDEUR :

DOSSIER N° :
 DATE :
 OPERATEUR :

NATURE DU SOL :

		Pourcentage d'éléments inférieurs à 100 µ										%
		30"	1'	2'	5'	10'	20'	40'	80'	4h	24h	
Temps												
Température												
Lecture du densimètre												
Lecture corrigée												
Pourcentage de grains $\phi < \text{Déqui}$												
Pourcentage de grains $\phi < \text{Dequi}$ pour l'échantillon complet												
Diamètres équivalents pour	$\delta_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$	70 µ	50 µ	35 µ	25 µ	18 µ	12 µ	9 µ	6 µ	3,5 µ	1,5 µ	
	$\delta_s \neq 2,65 \text{ g/cm}^3$											

Corrections :
 a) Méanique :
 $C_m = +$

b) Température :
 $t_s =$
 $t_a =$
 $t_w =$
 °C
 °C
 °C

$C_t =$
 $C_t =$
 $C_t =$

c) Déflocculant :
 $t =$
 $t =$
 $t =$
 °C
 °C
 °C

$C_d =$
 $C_d =$
 $C_d =$