

Annexes 2 : Analyse granulométrique

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse 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**. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 100 micromètres (0.001mm).

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 **tamisat** 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 sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisats jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulat. (La représentation graphique est plus explicite).

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 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 80mm.



Les tamis sont également repérés par un numéro d'ordre appelé **module**. Le premier tamis, 0,08 a comme module le numéro 20, le suivant le module 21 et ainsi de suite selon une progression arithmétique de raison 1.



Tamis 1,25mm de module 32

A chaque maille correspond un module et réciproquement.

Tableau des correspondances :

tamis	0,08	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,4	0,5	0,63
--------------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	------

module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
tamis	0,80	1	1,25	1,60	2	2,50	3,15	4	5	6,3	8
module	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
tamis	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	
module	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	

MANIPULATIONS : SELON LA NORME NF P 18-560

Article 6 : PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON POUR L'ESSAI

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. En caricaturant, il est impensable d'analyser un échantillon d'un micro gramme, comme un échantillon d'une tonne. L'article 6, définit une plage de masse limite qui permet d'éviter ces inconvénients. La masse de l'échantillon à prélever, M doit être dans la plage :

$$0,2xD < M < 0,6xD$$

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=12,5mm.

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. Pour les analyses conduites au labo du lycée, il est conseillé de choisir une masse plutôt près de la limite inférieure ($0,2xD$).

Articles 7 EXÉCUTION DE L'ESSAI

L'analyse granulométrique doit permettre de séparer les grains, d'un granulat et de les classer par diamètre. Le diamètre des mailles des tamis définit ces classes.

La vibration fait descendre les grains au travers les tamis jusqu'à ce qu'ils soient bloqués par le tamis de la maille correspondante au diamètre du grain. Mais la vibration n'est pas suffisante pour faire descendre les fines, c'est à dire les grains d'un très petit diamètre. En effet ces grains sont si fins qu'ils se collent aux grains d'un diamètre plus gros. Ces fines restent ainsi bloquées dans des tamis ne correspondant pas à leur diamètre. Sous le seul effet de la vibration, l'analyse est donc faussée. En effet, Chaque tamis contient les grains de diamètres correspondant plus une part de fines. La pesée du refus indiquera et représentera la masse des grains du diamètre correspondant au tamis plus la masse des fines collées aux autres grains. La masse mesurée sera donc supérieure à la masse recherchée.

Article 7.2 Lavage

Puisque la vibration ne suffit pas à faire descendre les fines tout en bas, il faut trouver un autre moyen d'y parvenir. Pour cela la norme indique de laver l'échantillon dans le plus petit tamis nécessaire à l'analyse. En effet l'eau a pour effet d'entraîner les fines avec elle. L'utilisation du plus petit tamis nécessaire à l'analyse garanti que seule l'eau chargée de fines traversera ce tamis. Ce lavage n'a donc pas pour finalité de rendre propre en terme d'hygiène le granulat. Pour l'analyse, il importe peu qu'un granulat soit propre ou joli à regarder. Il ne s'agit en aucun cas de se débarrasser des fines. Elles font parties à part entière des grains constituant le granulat. Cela signifie qu'il faudra par le calcul prendre en compte leur proportion en % dans le granulat. Cela signifie également que le calcul de la proportion de la présence de chaque diamètre de grain est

pris en compte par rapport à tout le granulat (masse de fines comprises). L'essai comporte donc deux méthodes de tamisage. Un tamisage par lavage pour faire descendre les fines et un tamisage par vibration pour faire descendre les autres grains.



Tamisage des fines par lavage en utilisant le plus petit tamis de l'analyse.

Les fines sont entièrement tamisées lorsque l'eau de lavage devient claire.

Article 7.1 Détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique.

Le tamisage par vibration s'effectue sur un matériau sec. L'échantillon tamisé par lavage doit donc être séché. On cherche à connaître la proportion de chaque diamètre de grain qu'il y a dans le granulat. Le granulat représente ici la masse totale des grains qui constituent le granulat, c'est à dire les fines et les autres plus gros. Les fines étant perdues pendant le tamisage par lavage, il faut donc mesurer la masse sèche de l'échantillon avant cette opération.

Lorsque l'on prélève un échantillon de granulat, il est la plus part du temps humide.

En interprétant ces trois observations par ordre chronologique, cela signifie que l'on prélève un échantillon de granulat humide, qu'il faut le sécher pour connaître sa masse totale sèche, qu'il faut ensuite le tamiser par lavage, puis le faire de nouveau sécher pour la tamiser par vibration. Il faudrait faire sécher deux fois l'échantillon ce qui est relativement long. La norme propose de diminuer ce temps en travaillant sur deux échantillons. Un premier servira exclusivement à établir une règle de proportionnalité sur la teneur en eau du granulat. Pour cela Il est prélevé et pesé humide, M_{1h} , puis séché et pesé sec, M_{1s} . Le second est prélevé et pesé humide, M_h puis tamisé par lavage, séché et pesé sec, M_s . Le gain de temps apparaît en coordonnant et en menant simultanément toutes ces opérations. Le raisonnement permettant de déterminer la masse sèche totale de l'échantillon à laver sans le sécher est le suivant. Si la masse humide d'un échantillon de granulat, M_{1h} , donne une masse sèche, M_{1s} , alors la masse humide de n'importe qu'elle autre échantillon du même granulat, M_h , donnera la masse sèche, M_s , correspondante par proportionnalité, c'est à dire :

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$$

Représentation mathématique:

$$M_h \longrightarrow M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h \quad M_{1h} \longrightarrow M_{1s}$$

Exemple: Un premier échantillon est prélevé humide. Sa masse vaut 1500g. Il est séché puis de nouveau pesé. Sa masse vaut alors 1456g. Pendant ce temps, un second échantillon est prélevé humide en vue de l'analyse granulométrique et pesé. Sa masse vaut 1800g. Il subit ensuite en l'état la première opération de tamisage : le lavage. La masse sèche totale de l'échantillon est déterminée par le calcul. Elle vaut $1800 \times 1456 / 1500 = 1747g$.

Cela implique que l'humidité soit homogène dans tout le granulat. Cette condition est vérifiée en brassant complètement le granulat avant d'y prélever des échantillons.

La durée des séquences d'expérimentation au lycée ne permet pas de faire sécher le granulat après le tamisage par lavage. De ce fait, selon la formulation des TP, vous effectuerez l'opération de lavage, puis vous placerez votre échantillon dans l'étuve. Il vous sera alors fourni un échantillon déjà lavé et séché de la masse correspondante. Pour d'autres TP, l'opération de tamisage par lavage et le séchage auront déjà été effectués. Il vous sera fourni un granulat lavé et séché avec le pourcentage de fines qu'il contient par rapport à l'échantillon total (masse d'échantillon sèche avant le lavage). De là, vous prélèverez un échantillon et vous en déduirez la masse sèche avant lavage. Vous débuterez ensuite l'analyse par l'opération de tamisage par vibration.

Exemple : On vous donne un granulat lavé séché comportant 2% de fine par rapport à la masse totale sèche, M_s . En vérifiant les conditions déterminant le choix de la masse, vous prélevez un échantillon de masse $M_{s1} = 1500\text{g}$ de ce granulat lavé et séché. (Attention de ne pas confondre M_{s1} qui désigne la masse de l'échantillon lavé et séché avec M_{1s} qui désigne la masse sèche de l'échantillon destiné à établir la teneur en eau du granulat). Le granulat contient 2% de fine par rapport à sa masse sèche totale, c'est à dire M_s . La quantité de fine vaut $0.02 \times M_s$. et M_{s1} représente l'échantillon sec sans les fines, c'est à dire $M_s - 0.02 \times M_s$

D'où la relation $M_{s1} = M_s - 0.02 \times M_s$ (1)

M_{s1} est connue et nous cherchons à connaître M_s .

$$(1) \Leftrightarrow M_s - 0.02 \times M_s = M_{s1}$$

$$(1) \Leftrightarrow M_s \times (1 - 0.02) = M_{s1}$$

$$(1) \Leftrightarrow 0.98 \times M_s = M_{s1}$$

$$(1) \Leftrightarrow M_s = M_{s1} / 0.98$$

$$(1) \Leftrightarrow M_s = 1500 / 0.98$$

$$(1) \Leftrightarrow M_s = 1531\text{g}$$

La masse sèche totale de l'échantillon équivalent, avant le tamisage par lavage, M_s vaut 1531g.

Article 7.3 Tamisage

Cet article décrit les opérations de tamisage par vibration. Il fixe également les conditions à vérifier lors de ces opérations.

Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.

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 5mm. Un gravier fin est constitué de grains de taille comprise entre 2.5 et 16mm. Un gravier moyen est constitué de grains de taille comprise entre 3.15 et 31.5mm. Un gros gravier est constitué de grains de taille comprise entre 5 et 80mm. En prenant les tamis dans ces plages, il est fort probable que l'analyse permettra de classer tous les diamètres de grain.

Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.

Cette condition fixée par la norme pour savoir quand stopper le tamisage par vibration est largement vérifiée au bout de 10 minutes de vibration, ce qui est plus simple à mesurer.

Verser le tamisat recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.



Les tamis sont empilés.
Le plus petit en bas puis par ordre croissant pour avoir le plus grand en haut. Dès qu'ils le sentent, ils vibrent les tamis durant 10 minutes. C'est quand vous voulez...

7.4 Pesées

Cet article décrit les opérations de pesée. Il fixe également les conditions à vérifier lors de ces opérations.

Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : 100 g si $d < 1$ mm, 200 g si d compris entre 1 et 4 mm et 700 g si $d > 4$ mm. Cela permet de vérifier que les tamis ne sont pas saturés. Un tamis saturé perturbe l'effet de la vibration. En effet malgré la vibration, Certains grains peuvent rester coincés par d'autres en trop grande quantité dans un tamis alors qu'ils devraient descendre en traversant ce tamis. L'analyse de ce fait pourrait être faussée.

Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R_1 la masse de ce refus.

Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à R_1 et peser l'ensemble. Soit R_2 la masse des deux refus cumulés.

Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés $R_3, R_4, \dots, R_i, \dots, R_n$.

Peser s'il y en a, le tamisat au dernier tamis. Soit T_n sa masse.

Si après essai, les résultats montrent qu'un (ou plusieurs) tamis a (ont) été surchargé(s), l'essai doit être refait manuellement à partir de ce tamis.



Un récipient pour recueillir les granulats, est posé sur la balance. La balance est tarée.
Le plus grand tamis est vidé dans le récipient.
La balance indique la masse des granulats refusés dans ce tamis : ici 32g



Sans vider le récipient, le tamis suivant est à son tour vidé dans le récipient.
La balance indique le cumul des masses des granulats refusés dans chaque tamis : ici 1168g.
Cette opération est reproduite ainsi de suite jusqu'au dernier tamis.

Article 8.1 Calculs

Les résultats des différentes pesées cumulées sont portés sur une feuille d'essai.

Analyse granulométrie par tamisage P 18-560			
Opérateur :			
Désignation du matériau : Préciser granulat « d/D »			
Date :			
Premier échantillon pour établissement du rapport M1s/M1h			
M1s =Masse sèche		M1h =	Masse humide
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique :			
Mh =		Masse humide avant lavage	
Masse totale sèche : Ms =		(M1s/M1h)xMh =	
Masse sèche après lavage : Ms1 =			
tamis ouverture en millimètres	masse des refus cumulés (Ri) en grammes	pourcentage refus cumulés 100(Ri/Ms)	% tamisats cumulés 100 - 100(Ri/Ms)
25			
20			
16			
12,5			
10			
8			
6,3			
5			
2,5			
1,25			
0,63			
0,315			
0,16			
0,08			
Rn =			
passant au dernier tamis Tn =			
Rn + Tn =			
100[Ms1 - (Rn+Tn)]/Ms1=	<2%		

Tamis utilisés pour l'analyse en **ordre décroissant**

Attention le % porte sur tout l'échantillon, fines comprises. La masse à

Masse de refus cumulés sur le dernier tamis, c'est à dire le plus petit

Masse de tamisats sur le dernier tamis, c'est à dire, masse de refus dans le fond

Représente la masse totale de l'échantillon tamisé. On devait retrouver Ms1, mais comme ce calcul porte sur les pesées après la manipulation, cette diffère de Ms1 d'une valeur équivalente aux pertes et imprécisions de mesures liées à la manipulation.

Ms1- (Rn+Tn) : Cette différence présente la valeur équivalente aux pertes et imprécisions de mesures liées à la manipulation. Pour vérifier si cela n'a pas de conséquences sur la justesse de l'analyse, cet écart est observé par rapport à Ms1 et exprimée en %. Ce % doit être <2%. Voir article 8.3

Article 8.2 Présentation des résultats

Les pourcentages de tamisats cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

Tracé de la courbe :

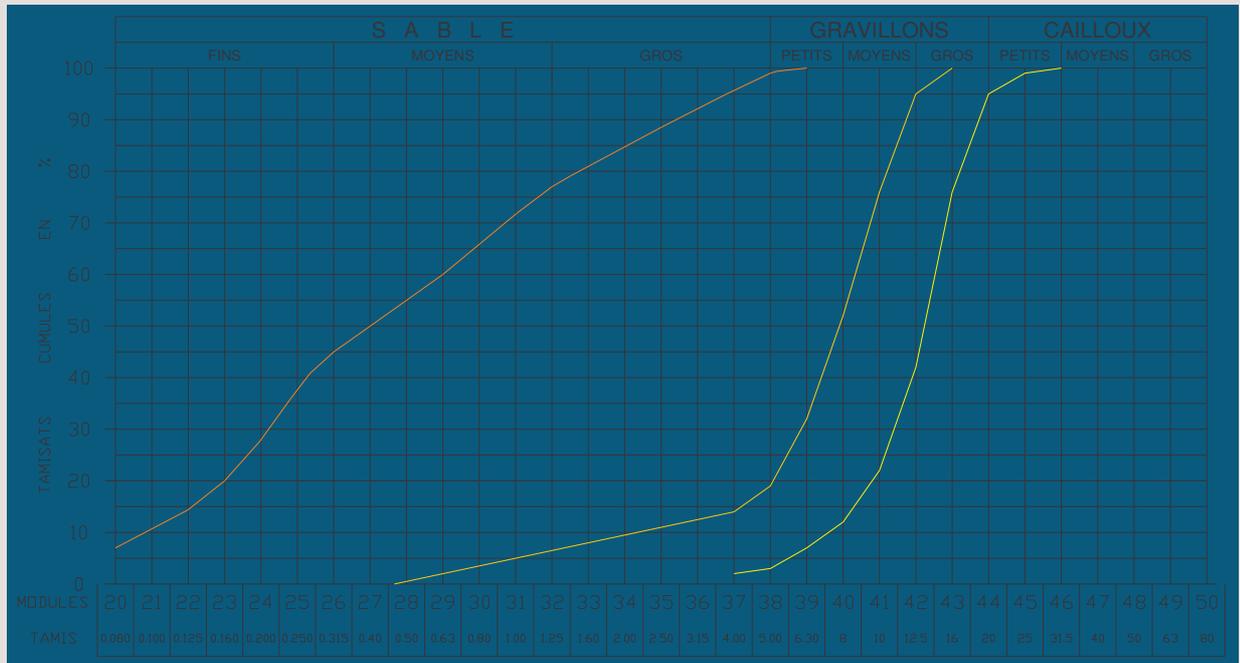
La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats. Elle donne pour chaque diamètre d_i la masse M_i des particules de taille inférieure ou égale à d_i . La masse est indiquée en pourcentage de la masse totale de la matière sèche de l'échantillon étudié.

Axes :

- abscisses :
Dimensions des tamis.

- ordonnées :
Tamisats en pourcentage cumulé des grains, de 0 à 100%

Tracé : La **courbe granulométrique** est la ligne brisée qui joint les points mesurés.



La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Article 8.3 Validité de l'analyse granulométrique

La somme des masses, R_n et T_n , ne doit pas différer de plus de 2 % de la masse M_{S1} .

Cela permet d'observer et de vérifier si les pertes et les imprécisions liées à la manipulation sont dans des proportions suffisamment faibles pour ne pas fausser pas l'analyse.

Exemple : La masse sèche d'un échantillon prêt pour le tamisage par vibration, M_1 vaut 1456g.

Après tamisage, le refus cumulé sur le dernier tamis de la série, c'est à dire le tamis de plus petite maille, R_n vaut 1448g. Dans le fond, il reste, le tamisat du dernier tamis de la série, T_n . Il vaut 4g. La masse totale sèche de l'échantillon après le tamisage vaut donc : $1448+4=1452$ g. Elle diffère de $1456-1452=4$ g par rapport à la masse initiale. Ce qui signifie que les pertes et les imprécisions de mesures durant les manipulations représentent 4g. Est-ce important ? Autrement dit, cela a-t-il des conséquences sur l'analyse ? En caricaturant, si c'est 4g par rapport à un échantillon de 5g, c'est certainement très important. Cela signifie que la conséquence d'une imprécision n'est pas une notion absolue, mais relative à la quantité mise en œuvre.

Ici, il faut donc relativiser ces 4g en les rapportant aux 1456g d'échantillon mis en œuvre. L'imprécision relative à l'échantillon vaut $4/1456=0,003$. Exprimé en pourcentage cette valeur est plus représentative : $0,003 \times 100 = 0,3\%$

La norme indique qu'en dessous de 2%, l'imprécision des manipulations n'a pas de conséquences sur l'analyse. L'expérience est validée.

Il est à observer qu'il s'agit de l'évaluation de l'imprécision liée à l'opération de tamisage par vibration. Cela implique de considérer la masse de l'échantillon manipulé, c'est à dire de l'échantillon sec et sans les fines.

Article 9 PRÉCISION

L'article 8.3 vérifie s'il n'y a pas trop d'erreurs commises durant l'opération de tamisage par vibration. Seules, les pertes et les imprécisions liés à cette opération sont prises en compte.

L'article 9 indique un moyen de vérifier la précision de l'analyse d'une façon plus globale. Il est proposé de conduire des analyses granulométriques d'un granulat dans plusieurs laboratoires. Il est ensuite observé dans quelle mesure le résultat de ces analyses se répète et se reproduit. Cela introduit deux notions : la répétabilité, (r) et la reproductibilité, (R) qui permettent cette observation en quantifiant les écarts.

Il n'est pas utile de conduire les essais et de tenir compte de les notions de cet article pour le bac STI Génie Civil.