



Traçage de la courbe granulométrique et la détermination des coefficients de Hazen par la méthode analytique

Dr GOUBA Bernard

Département Génie Civil, Laboratoire en science des matériaux de construction ; Université Technologies et de Management, Ouagadougou, Burkina Faso

This is an open access article under the [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) license.



Abstract: Sand and gravel make up the granular skeleton in concrete. They contribute to the resistance of concrete structures. They are able to support higher loads or allow more slender constructions. The aggregates can also present varieties of diameter and making it possible to carry out more resistant works. In the laboratory we carried out the sieving on a sample of sands and a sample of gravel then trace the granulometric curve and determine the coefficients of Hazen by the analytical method. These results allowed us to compare the analytical method with the so-called graphical method. This choice was guided by a concern to popularize the study of particle size analysis on the one hand and to give an effective and practical means to the operators of the results of particle size analysis on the other hand. The results of our study show that the use of the analytical method for the particle size analysis test gives much more precise and reliable results than the graphical method.

Keywords: aggregate1; particle size curve 2; Hazen coefficient 3; fineness modulus 4; analytical method; graphic method 5.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.7647398>

1 Introduction

La qualité des granulats utilisés dans le béton est un facteur très important. En plus d'une bonne répartition granulaire et d'une forme favorable, un granulats doit présenter une propriété satisfaisante. En effet, si les granulats sont enrobés par une quantité excessive d'éléments fins,

généralement argileux, ceux-ci empêchent une bonne adhérence de la pâte de ciment, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques du béton.

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destiné à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées, et des assises et des ballasts de voies ferrées.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur des grains d'un matériau et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions des mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique appelée courbe granulométrique.

Dans cette étude, nous présenterons, dans un premier temps, les matériels et la méthodologie utilisée pour la collecte des échantillons des granulats. Enfin, nous aborderons l'interprétation et la discussion des résultats obtenus.

2 Matériels et méthode

2.1 Choix des dispositifs de l'étude

Le granulats faisant l'objet de notre étude est constitué essentiellement du sable et du gravier, prélevé à des proportions bien déterminées.

Afin d'avoir des courbes granulométriques et des coefficients de HAZEN selon les règles de l'art, ces matériaux doivent être rigoureusement choisis. Ils doivent être propres et bien calibrés.

✓ Le sable

Ce sont des granulats de très petits diamètres de classe granulaire 0/D ou $D < 6,3\text{mm}$. Il a pour but de combler le vide laissé entre les granulats grossiers (gravier). Nous utiliserons un sable 0/5 pour notre étude.

✓ Les graviers

Ce sont des granulats grossiers, dont les caractéristiques dimensionnelles sont les suivantes : d/D ou $d > 2\text{mm}$ et $D < 31,5\text{mm}$. Pour notre étude, nous utiliserons des graviers naturels de classe 5/25. (BAROGHEL – BOUNYV ; 2004)

2.2 Matériels d'étude

Les outils servant pour notre étude sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : les matériels utilisés pour analyse granulométrique			
Désignations	Utilités	Nombres	Observations
Une balance	Pesé avec une précision $\pm 1g$	01	En bon état
Un tamis	Tamissage	- 8 pour le sable - 13 pour le gravier	En bon état
Un seau	Prélèvement	02	En bon état
Une brosse	Nettoyage des mailles des tamis	01	En bon état
Une pelle	Prélèvement	01	En bon état

2.2.1 Série de tamis

La colonne de tamis disposée de manière décroissance sur la tamiseuse.



Figure 1 : série de tamis sur une tamiseuse. Source : laboratoire UTM

2.3 Méthodologie

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon (sable-gravier) en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions sont décroissantes. Le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis à l'aide de la tamiseuse.

3 Description de l'étude

3.1 Préparation des granulats

3.1.1 Prélèvement

Cette opération a consisté à aller sur le site où étaient entreposés les granulats et à prélever à l'aide des brouettes et des pelles une quantité suffisante de gravier et de sable pour l'essai.

Pour respecter les classes granulaires prescrites dans le cahier de charge, nous avons :

- ✓ Pour le gravier, effectué un tamisage au tamis de 25 mm afin de recueillir les passants qui ont été ensuite passés au tamis de 5 mm pour recueillir les refus.
- ✓ Pour le sable, effectué un tamisage au tamis de 5 mm pour recueillir les passants.

3.1.2 Lavage

Les matériaux exposés à l'air libre regorgent de débris de feuilles mortes, d'argile et d'impuretés pouvant nuire aux résultats des essais. Pour remédier à cela, nous avons procédé au lavage des matériaux (sables, graviers) jusqu'à évacuation complète des impuretés.

3.1.3 Séchage

Le lavage terminé, nous passons au séchage des granulats. Cette opération nous permet de les préparer pour l'analyse granulométrique. Elle s'est déroulée en deux phases, une première au soleil et la seconde à l'aide du réchaud à gaz.

3.2 Tamisage

3.2.1 Le tamisage du sable

Les tamis utilisés pour l'analyse granulométrique du sable sont tels que inscrits dans le tableau ci-dessous. Le sable prélevé pour le tamisage a une masse initiale $m_i = 2250g$.

Tableau 2 : les différents types de tamis utilisés pour le sable

Tamis (mm)	5	4	3.15	2.5	2	1.6	1.25	0.8	0.63	0.315	0.25	0.16	0.125	0.063	Fond
------------	---	---	------	-----	---	-----	------	-----	------	-------	------	------	-------	-------	------

3.2.2 Tamisage du gravier

Les tamis utilisés pour l'analyse du gravier sont inscrits dans le tableau ci-dessous : la masse initiale $m_i = 6000g$.

Tableau 3 : les différents types de tamis utilisés pour le gravier

Tamis (mm)	25	20	16	14	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5	2	Fond
------------	----	----	----	----	------	----	---	-----	---	---	------	-----	---	------

3.3 Tracé de la courbe granulométrique par la méthode analytique

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant :

- ✓ En ordonnée le pourcentage des tamisât.
- ✓ Les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

On établit le tableau des résultats si ce n'est pas donnée, Calculer le refus cumulé, le pourcentage de refus et le pourcentage de tamisât puis compléter le tableau.

Soient

- ✓ P : le fond recueilli sur le dernier tamis ;
- ✓ $r_1 ; r_2 ; r_3 ; \dots ; r_n$ le refus respective des tamis numéros 1 ; 2 ; 3 ; ... ; n ;
- ✓ m : la masse initiale du matériau.

On a: $m_{\text{initial}} = \sum_i^n r_i + P$

Tableau 4 : Tableau model des résultats d'analyse granulométrique

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)

Pour placer les mailles des tamis sur l'axe des abscisses suivre les étapes suivantes :

- ✓ Compte tenu de ta taille du papier, choisir **une distance de représentation**. Exemple : 15 cm ; 16cm
- ✓ Identifier la **borne inférieur** et **borne supérieur** des tamis
- ✓ Calculer les distances des **autres tamis** se situant entre les deux bornes par rapport au **borne inférieur**

Pour placer les mailles des tamis sur l'axes des abscisses, nous avons établi la relation suivante :

$$X = \frac{(\log TC - \log TBI)}{\log TBS - \log TBI} \times D_{CH}$$

Où :

X : distance du tamis considéré par rapport au tamis borne inférieure

TC : maille du tamis considéré

TBS : maille du tamis borne supérieure

TBI : maille du tamis borne inférieure

D_{ch} : distance choisie

3.4. Détermination des coefficients de Hazen par la méthode analytique

3.4.1 les coefficients de Hazen

❖ Le coefficient d'uniformité

C'est un paramètre qui caractérise la courbe granulométrique, encore appelé coefficient de

HAZEN, noté C_u il est défini par : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

❖ Le coefficient de courbure

Il intervient également dans la classification unifiée des sols. Il est noté C_c . Il est défini par :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

- ✓ D_p : Diamètre effectif. C'est le diamètre équivalent correspondant au P % de passant, placé en indice, déterminer soit à l'aide de la courbe granulométrique soit par la méthode analytique.
- ✓ D_{60} = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.
- ✓ D_{10} = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.
- ✓ D_{30} = diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

Dans notre étude nous allons déterminer les diamètres effectifs par la méthode analytique puis comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus à l'aide de la courbe granulométrique.

3.4.2 Calcul des diamètres effectifs par la méthode analytique

La détermination des diamètres effectifs D_p des tamis se fait à l'aide du tableau des résultats de l'essai de tamisage. Soit le résultat d'un essai de tamisage quelconque selon le tableau ci-dessous :

Table 5 : Résultat d'un essai de tamisage quelconque

Mailles des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
D_X				X
D_Y				Y
D_Z				Z

- ✓ D_X = diamètre effectif des particules qui correspond à X % du passant.
- ✓ D_Y = diamètre effectif des particules qui correspond à Y % du passant.
- ✓ D_Z = diamètre effectif des particules qui correspond à Z % du passant.

$$D_Z < D_Y < D_X$$

On peut écrire :
$$\frac{D_X - D_Z}{X - Z} = \frac{D_Y - D_Z}{Y - Z}$$

Avec D_Z ; D_X ; Z ; X les valeurs connues dans le tableau des résultats et D_Y l'inconnu à déterminer.

D_Z et D_X sont des diamètres effectifs des tamis immédiats du diamètre effectif D_Y .

$$Y = \begin{cases} 10\% \\ 30\% \\ 60\% \end{cases}$$

$$\text{Donc } D_Y = \frac{(D_X - D_Z)(Y - Z)}{X - Z} + D_Z$$

4 Résultats et discussions

4.1 L'analyse granulométrique du sable

4.1.1 Tableau des résultats

Les résultats du tamisage sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Table 6 : Résultat du tamisage du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5.000	60	60	2.66	97.34
4.000	46	106	4.71	95.29
3.150	50	156	6.93	93.07
2.500	60	216	9.60	90.40
2.000	66	282	12.53	87.47
1.600	94	376	16.71	83.29
1.250	120	496	22.04	77.96
0.800	882	1378	61.24	38.76
0.630	264	1642	72.97	27.03
0.315	512	2154	95.73	4.27
0.250	42	2196	97.55	2.45
0.160	38	2234	99.28	0.72
0.125	4	2238	99.46	0.54
0.063	6	2244	99.73	0.27
Fond	4	2248	99.91	0.09

4.1.2 Traçage de la courbe granulométrique par la méthode analytique

Le traçage de la courbe granulométrique par la méthode analytique est selon les étapes suivantes :

✓ Calcul des distances des mailles des tamis :

$$X = \frac{(\log TC - \log TBI)}{\log TBS - \log TBI} \times D_{CH}$$

$$D_{CH} = 20 \text{ cm}$$

$$X_5 = 20 \text{ cm}; X_4 = 18.98 \text{ cm}; X_{3.15} = 17.89 \text{ cm}; X_{2.5} = 16.83 \text{ cm}; X_2 = 15.81 \text{ cm};$$

$$X_{1.6} = 14.79 \text{ cm}; X_{1.25} = 13.66 \text{ cm}; X_{0.8} = 11.62 \text{ cm}; X_{0.630} = 10.53 \text{ cm}; X_{0.315} = 7.36 \text{ cm};$$

$$X_{0.250} = 6.30 \text{ cm}; X_{0.160} = 4.26 \text{ cm}; X_{0.125} = 3.13 \text{ cm}; X_{0.063} = 0 \text{ cm}$$

✓ Traçage de la courbe

Echelle : 1 cm pour 10% de tamisât

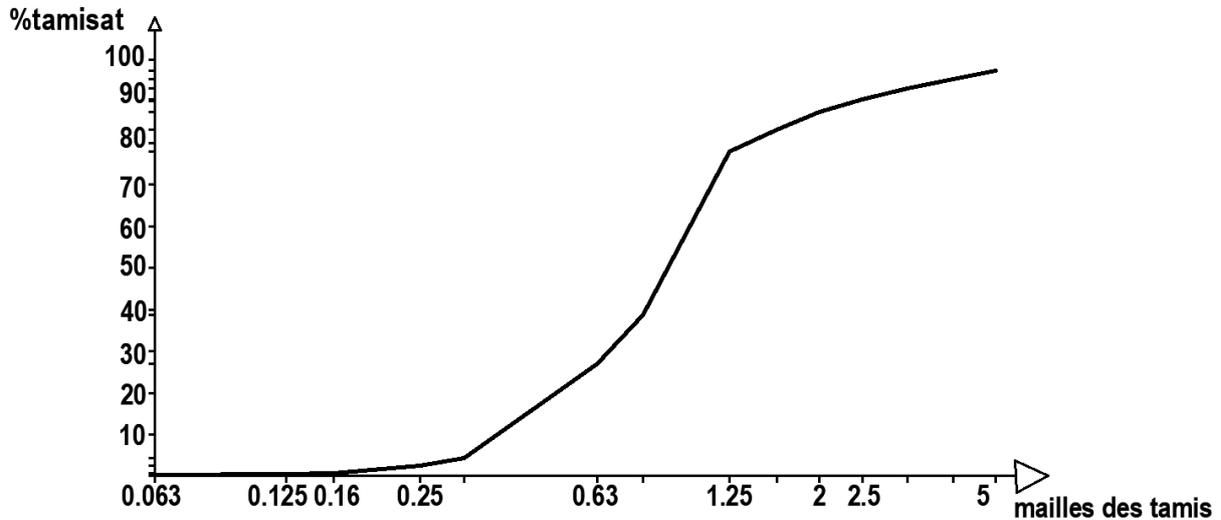


Figure 2 : Courbe granulométrique du sable tracé par la méthode analytique

4.1.3 Calcul des coefficients de Hazen

✓ La méthode graphique

D'après la courbe granulométriques $D_{10} = 0.375$ mm ; $D_{30} = 0.669$ mm et $D_{60} = 1.019$ mm

❖ Le coefficient d'uniformité : $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.019}{0.375} = 2.72$

❖ Le coefficient de courbure : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{0.669^2}{0.375 \times 1.019} = 1.171$

✓ La méthode analytique

Calculons D_{10} ; D_{30} et D_{60} analytiquement :

❖ D_{10}

$$D_{10} = \frac{(0.63 - 0.315)(10 - 4.27)}{27.03 - 4.27} + 0.315 = 0.394 \text{ mm}$$

❖ D_{30}

$$D_{30} = \frac{(0.8 - 0.63)(30 - 27.03)}{38.76 - 27.03} + 0.63 = 0.673 \text{ mm}$$

❖ D_{60}

$$D_{60} = \frac{(1.25 - 0.8)(60 - 38.76)}{77.96 - 38.76} + 0.8 = 1.044 \text{ mm}$$

❖ Le coefficient d'uniformité : $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.044}{0.394} = 2.65$

❖ Le coefficient de courbure : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{0.673^2}{0.394 \times 1.044} = 1.10$

4.2 L'analyse granulométrique du gravier

4.2.1 Tableau des résultats

Les résultats du tamisage sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Table 7 : Résultat du tamisage du gravier

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
25.00	0	0	0.00	100.00
20.00	662	662	11.00	89.00
16.00	920	1582	30.86	69.14
14.00	582	2164	36.06	63.94
12.50	526	2690	44.83	55.17
10.00	838	3528	58.80	41.20
8.00	696	4224	70.40	29.60
6.30	606	4830	80.50	19.50
5.00	360	5190	88.16	11.84
4.00	456	5646	94.10	5.90
3.15	138	5784	96.46	3.60
2.50	78	5862	97.70	2.30
2.00	38	5900	98.33	1.67
Fond	98	5998	99.96	0.04

4.2.2 Traçage de la courbe granulométrique par la méthode analytique

Le traçage de la courbe granulométrique par la méthode analytique est selon les étapes suivantes :

- ✓ Calcul des distances des mailles des tamis :

$$X = \frac{(\log TC - \log TBI)}{\log TBS - \log TBI} \times D_{CH}$$

$$D_{CH} = 20 \text{ cm}$$

$$X_{25} = 20 \text{ cm}; X_{20} = 18.23 \text{ cm}; X_{16} = 16.47 \text{ cm}; X_{14} = 15.41 \text{ cm}; X_{12.5} = 14.51 \text{ cm};$$

$$X_{10} = 12.74 \text{ cm}; X_8 = 10.98 \text{ cm}; X_{6.30} = 9.09 \text{ cm}; X_5 = 7.26 \text{ cm}; X_4 = 5.49 \text{ cm}$$

$$X_{3.15} = 3.60 \text{ cm}; X_{2.5} = 1.77 \text{ cm}; X_2 = 0 \text{ cm}$$

- ✓ Traçage de la courbe par la méthode analytique

Echelle : 1 cm pour 10% de tamisât

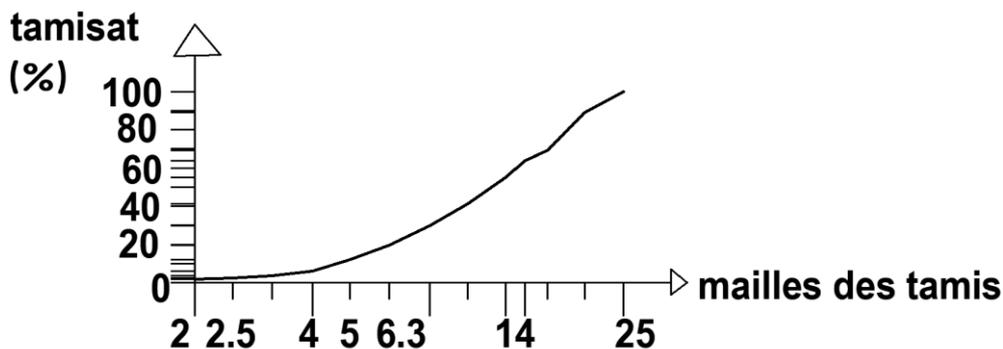


Figure 3 : Courbe granulométrique du gravier tracé par la méthode analytique

4.2.3 Calcul des coefficients de Hazen

✓ La méthode graphique

D'après la courbe granulométriques $D_{10} = 4.67$ mm ; $D_{30} = 8.065$ mm et $D_{60} = 13.31$ mm

$$\text{❖ Le coefficient d'uniformité : } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{13.31}{4.67} = 2.85$$

$$\text{❖ Le coefficient de courbure : } C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{8.065^2}{4.67 \times 13.31} = 1.05$$

✓ La méthode analytique

Calculons D_{10} ; D_{30} et D_{60}

$$\text{❖ } D_{10}$$

$$D_{10} = \frac{(5-4)(10-5.9)}{11.84-5.9} + 4 = 4.69 \text{ mm}$$

$$\text{❖ } D_{30}$$

$$D_{30} = \frac{(10-8)(30-29.60)}{41.20-29.6} + 8 = 8.07 \text{ mm}$$

$$\text{❖ } D_{60}$$

$$D_{60} = \frac{(14-12.5)(60-55.17)}{63.94-55.17} + 12.5 = 13.33 \text{ mm}$$

$$\text{❖ Le coefficient d'uniformité : } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{13.33}{4.69} = 2.84$$

$$\text{❖ Le coefficient de courbure : } C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{8.07^2}{4.69 \times 13.33} = 1.04$$

Au regard des différences des résultats entre les deux méthodes, nous pouvons affirmer que cela s'explique par plusieurs raisons :

- ✓ **La qualité de la courbe** : la moindre erreur au cours du traçage de la courbe à un impact sur les valeurs des coefficients de HAZEN car la détermination des valeurs des diamètres effectifs D_p par la méthode graphique, est intimement lié à la qualité de la courbe granulométrique.
- ✓ **La qualité des mesures** : une mauvaise lecture des distances mesurées a également des conséquences négatives sur les valeurs des coefficients de HAZEN car la détermination des valeurs des diamètres effectifs D_p par la méthode graphique, fait intervenir des distances entre les mailles des tamis qu'il faut mesurer sur le graphique.

La méthode graphique se base sur la courbe granulométrique pour la détermination des coefficients de HAZEN tandis que la méthode analytique se focalise sur le tableau des résultats de l'essai de tamisage.

Au regard de forte probabilité des erreurs liées à la méthode graphique, nous pouvons affirmer que la méthode analytique est beaucoup plus fiable que la méthode graphique car elle a moins de contrainte.

En plus la méthode analytique est le fruit de l'interpolation mathématique, donc donne des résultats plus précis et plus fiable que la méthode graphique.

5 Conclusion

Nous partons du constat qu'à l'issue des différents essais de laboratoire, nonobstant la non utilisation des logiciels pour le traçage de la courbe granulométrique, nous pouvons affirmer que ce fut une belle expérience qui nous a permis d'acquérir d'avantages des nouvelles connaissances sur les études pratiques d'analyse granulométrique.

Cette étude donne un moyen efficace aux exploitants des résultats d'analyse granulométriques, d'avoir des résultats très précis et plus fiable. Cela permet à l'étude des sciences des matériaux de faire un pas dans la technologie des ouvrages de génie civil.

A cette époque de 21eme siècle, avec un changement climatique brutal où les ouvrages de béton sont beaucoup plus sollicités, la qualité des granulats entrant dans les bétons est un paramètre indispensable pour garantir la stabilité des ouvrages et de préserver la sécurité des usagers. C'est la raison pour laquelle des études plus poussées sur d'autres matériaux de construction s'avère indispensable.

REFERENCES

- [1] BAROGHEL - BOUNYV. Les spécificités des bétons à hautes performances Paris : LCPC, 2004
- [2] FRED PORTET ET OLIVIER NOËL, ENSEIGNANTS À L'ENTE D'AIX-EN-PROVENCE SYLVIE NICAISE, LABORATOIRE DU CETE MÉDITERRANÉE CAROLE PORTILLO ET MATHIEU VERMEULEN, ECOLE DES MINES DE DOUAI ; 18 juillet 2011
- [3] GHOMARI F. & BENDI-OUIS A. SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION Travaux pratiques; 2008