

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عمارثليجي - الأغواط

Faculté : Génie Civil et Architecture

Département : Génie Civil

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Polycopié de Travaux pratiques

Destiné aux étudiants de : 1^{ère} Année Master

PHYSIQUE DES MATERIAUX

Présenté par : Dr. Hamza SOUALHI

Maître de Conférences A

Université de Laghouat

Email : hamza_s26@yaoo.fr / h.soualhi@lagh-univ.dz

Année universitaire : 2025/2026

CANEVAS PEDAGOGIQUE DE LA MATIERE

Semestre :1

Unité d'enseignement : UEM1.1

Matière 1 :TP Physique des matériaux

VHS :22h30 (TP :1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Connaitre et réaliser les différents essais physiques sur les matériaux de construction

Connaissances préalables recommandées :

Propriétés physiques et chimiques de matériaux. Matériaux de construction.

Contenu de la matière :

- I Analyse granulométrique.
- II Masse volumique.
- III Teneur et absorption.
- IV Essai Micro-Deval, Los Angeles, fragmentation dynamique.
- V Propreté des granulats.
- VI Essais de résistance mécanique.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu :100% ; Examen : 0%.

TABLE DES MATIERES

Canevas pédagogique de la matière	1
Table des matières	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Introduction	6
1 Tp N°1 Distribution granulaire	7
1.1 Analyse granulométrique des sables et des graviers	7
2 Tp N°2 : La masse volumique des granulats.....	20
2.1 Masse volumique apparente	20
2.2 Masse volumique absolue – méthode de l'éprouvette graduée.....	24
2.3 Masse volumique absolue – méthode du pycnomètre ou du densimeter	25
3 Tp N°3 : Le coefficient d'absorption et la teneur en eau des granulats	29
3.1 Coefficient d'absorption des granulats.....	29
3.2 Teneur en eau des granulats	33
4 Tp N°4 : Propreté des granulats	36
4.1 Essai de l'équivalent de sable.....	36
4.2 Essai de propreté superficielle des graviers	41
5 Tp N°5 : Essai Los Angeles, Micro Deval et Diffraction dynamique.....	43
5.1 Essai de Los Angeles.....	43
5.2 Essai de Micro-Deval	46
5.3 Essai de fragmentation dynamique	50
6 Tp N°6 : Essais de résistance mécanique	53
6.1 Résistance à la compression des bétons	53
6.2 Résistance à la traction des bétons	56
Conclusion.....	60
Références	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Courbe granulométrique [1].....	7
Figure 2. (a) Balance, (b) Diviseur à couloir [4].	10
Figure 3. (a) Tamis, (b) Tamiseuse automatique [5].	10
Figure 4. Opération de quatrage d'échantillon.	11
Figure 5. Opération de répartition des matériaux en utilisant l'échantillonneur.	12
Figure 6. Pesée des refus.	13
Figure 7. Feuille de traçage des courbes granulométriques.....	17
Figure 8. (a) Récipients cylindriques calibrés de 1 à 20 litres [14], (b) Entonnoir monté sur trépied plus récipient [5].....	21
Figure 9. Main écope [5].	21
Figure 10. Balance.....	22
Figure 11. Eprouvettes graduées [15].....	24
Figure 12. Pycnomètre [5,15].....	26
Figure 13. Etuves de laboratoire [15].	30
Figure 14. Cône d'absorption des Sables [5,15].....	31
Figure 15. Boîte de pétri métallique [18].	34
Figure 16. Ensemble d'outils pour l'équivalent de sable [4].....	37
Figure 17. Solution lavante [21].....	37
Figure 18. Agitateur automatique pour l'équivalent de sable [15,21].....	38
Figure 19. Mesure du h_1 et h_2 visuels [9,24].	39
Figure 20. Mesure du h_2 avec piston [9,24].....	39
Figure 21. Machine de Los Angeles [5].	44
Figure 22. Appareil de Micro-Deval [5].....	47
Figure 23. Machine de fragmentation dynamique [5,32].	51
Figure 24. Eprouvette de béton [27].....	53

Figure 25. Machine d'essais de compression [15].	54
Figure 26. Conservation des éprouvettes béton [37].	54
Figure 27. Équipement de la machine pour l'essai de fendage et positionnement de l'éprouvette [40].	58
Figure 28. Essai par fendage sur une éprouvette de béton [37].	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Dimensions nominales normalisées des tamis.....	12
Tableau 2. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du sable 0/5.....	14
Tableau 3. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du gravier 8/15.	15
Tableau 4. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du gravier 3/8.	15
Tableau 5. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable.	40
Tableau 6. Prise d'essai et nombre de charge pour l'essai Los Angeles.	45
Tableau 7. Type des graviers selon le coefficient Los Angles.	46
Tableau 8. Charge abrasive pour Micro-Deval.	48
Tableau 9. Type des graviers selon le coefficient Micro-Deval.....	49
Tableau 10. Nombre de coups pour la fragmentation dynamique [33,34].	52
Tableau 11. Type des graviers selon le coefficient Fragmentation dynamique.	52

INTRODUCTION

Les matériaux de construction sont des matériaux utilisés dans les secteurs du génie civil : bâtiment et travaux publics (souvent désignés par le sigle BTP). La gamme des matériaux utilisés dans la construction est relativement vaste. Elle inclut principalement le bois, le verre, l'acier, les matières plastiques (isolants notamment) et les matériaux issus de la transformation de produits de carrières, qui peuvent être plus ou moins élaborés. On a ainsi dérivé de l'argile, les briques, les tuiles, les carrelages, les éléments sanitaires.

Par le biais de ces travaux pratiques, vous aborderez l'étude des matériaux et plus précisément des matériaux du Génie Civil.

Tout praticien du Génie civil, s'il doit être en mesure de calculer les contraintes et les déformations en tout point d'un ouvrage, ne peut ignorer les caractéristiques des matériaux mis en œuvre. Non seulement il a besoin des caractéristiques mécaniques du matériau mais encore doit-il tenir compte de ses propriétés physico-chimiques qui vont conditionner sa mise en œuvre, son aspect, ses propriétés d'usages et sa durabilité.

Deux idées devraient vous guider :

- Les matériaux ont des propriétés extrêmement variables.
- Les matériaux les plus communément employés (bois, béton, fer...) ne sont pas, même à l'intérieur d'un ouvrage donné, de qualité rigoureusement constante. Les manipulateurs que vous êtes devront donc - sans oublier les calculs d'erreurs classiques - prendre en compte l'inévitable dispersion des résultats de mesures pratiquées sur plusieurs échantillons d'un même matériau.

D'où la nécessité :

- De toujours procéder à une exploitation statistique simplifiée des résultats que vous obtiendrez.
- D'étudier un prélèvement qui soit représentatif du matériau analysé.

La diversité des matériaux et des essais de laboratoire concernant le bâtiment et les travaux publics constitueraient un ensemble tellement important que nous nous limiterons à l'étude de quelques propriétés de quelques matériaux parmi les plus utilisés.

1 Tp N°1 DISTRIBUTION GRANULAIRE

1.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SABLES ET DES GRAVIERS

1.1.1 OBJECTIF

Déterminer la distribution pondérale d'un granulat (sable et graviers) en fonction de la dimension des grains qui le composent. La détermination est effectuée par tamisage à sec et représentée par une courbe granulométrique (cf, Figure 1). Il existe aussi un tamisage par voie humide. Pour la fraction inférieure à 0.08mm, il faut réaliser un tamisage par sédimentation.

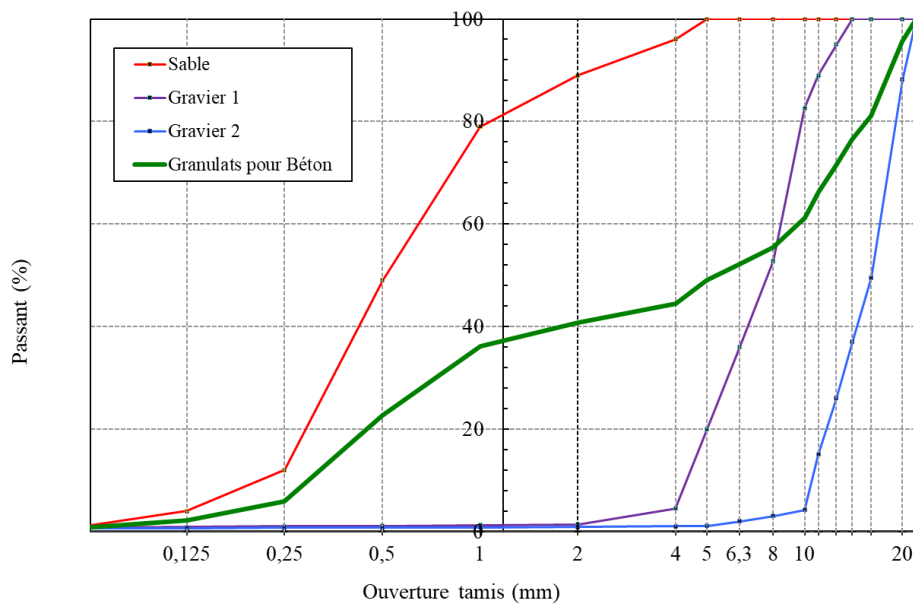


Figure 1. Courbe granulométrique [1].

La courbe granulométrique et le fuseau granulaire sont des concepts fondamentaux dans le domaine du génie civil et de la géotechnique pour caractériser la distribution des tailles de particules dans un échantillon de sol.

La courbe granulométrique représente graphiquement la répartition des différentes tailles de particules présentes dans un échantillon de sol. Elle est généralement tracée en coordonnées logarithmiques avec la taille des particules sur l'axe des abscisses et la proportion cumulée de masse ou de pourcentage retenu sur l'axe des ordonnées. Cette courbe permet d'analyser la distribution des particules fines, moyennes et grossières dans le sol, ce qui est essentiel pour comprendre son comportement géotechnique et pour concevoir des ouvrages adaptés.

Le fuseau granulaire, quant à lui, est un intervalle de tailles de particules spécifié pour un matériau de granulométrie donnée. Il est défini par deux limites, généralement exprimées en

termes de diamètre des particules. Ce concept est utilisé pour classifier les sols en fonction de leur granulométrie et pour spécifier les exigences de composition granulaire dans la conception des matériaux de construction.

1.1.2 VOCABULAIRE

La norme NF EN 933-1 [2] définit le vocabulaire spécifique aux caractéristiques granulométriques des granulats pour béton.

On notera particulièrement les définitions suivantes :

- Granularité : distribution dimensionnelle des grains.
Le terme "granularité" est souvent utilisé dans différents domaines pour décrire la qualité ou l'état d'être granulaire, c'est-à-dire composé de grains ou de particules distincts. Dans le domaine du génie civil et de la géotechnique, la granularité est utilisée pour décrire la taille des grains ou des particules dans les sols ou les matériaux granulaires.
- Granulométrie : étude de la granularité.
- Tamis : est une grille de maillage plus ou moins fin, servant à trier les particules solides, fixée sur un cadre.
- Tamisat : partie de l'échantillon passée à travers les mailles du tamis.
- Refus : partie de l'échantillon qui n'est pas passée à travers les mailles du tamis.
- Classe granulaire : l'ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.
- Granulat d/D et granulat $0/D$ Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D . Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D . Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné $0/D$
- Courbe granulométrique : La courbe granulométrique est une représentation graphique de la répartition des tailles de particules dans un échantillon de matériau, généralement du sol, du sable, du gravier ou d'autres matériaux granulaires.
- Le fuseau granulaire : fait référence à une zone spécifique sur une courbe granulométrique qui représente une plage de tailles de particules. Il est souvent utilisé pour spécifier les exigences de granularité pour diverses applications en génie civil

1.1.3 DEFINITION

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 125mm (fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Les granulats sont classés **selon les dimensions** des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et

D des granulats rencontrées (Norme XP P 18-540) [3] :

- Les fines $0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm.

1.1.4 TYPES DE GRANULATS

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être : naturel, artificiel ou recyclé.

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

1.1.5 PRINCIPE DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

1.1.6 MATERIEL UTILISE

Pour réaliser cette manipulation, nous avons besoin de :

- a. Étuve pour sécher les matériaux avant l'essai.
- b. Balance avec une précision de 0,1 g (cf, Figure 2(a)).
- c. Diviseurs à couloir pour homogénéiser l'échantillon (cf, Figure 2(b)).



(a)



(b)

Figure 2. (a) Balance, (b) Diviseur à couloir [4].

- d. Série de tamis normalisés de 0,080 mm à 31,5 mm (cf, Figure 3).
- e. Fond et couvercle : ils doivent avoir le même diamètre extérieur que les tamis.
- f. Tamiseuse automatique (cf, Figure 3).
- g. Matériel de manutention et de nettoyage.



(a)



(b)

Figure 3. (a) Tamis, (b) Tamiseuse automatique [5].

1.1.7 MATERIAUX ETUDIES

L'analyse granulométrique se fait sur le sable et le gravier. Les deux matériaux doivent être à l'état sec.

1.1.8 MODE OPERATOIRE

1.1.9 PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LE TAMISAGE

La procédure de préparation des échantillons pour le tamisage suivra la norme NF EN 932-2 [6].

On rappelle que la masse de l'échantillon doit tenir compte de la dimension des grains. Un échantillon de faible masse, à priori facile à tamiser, ne serait pas représentatif si la dimension des grains est importante. Inversement un échantillon trop massif demanderait un temps excessivement long pour que tous les grains (surtout les fractions fines) puissent accéder aux mailles de tamis.

Le prélèvement de l'échantillon se fera par quartage ou en utilisant les diviseurs à couloirs sur un lot primaire de plusieurs kilogrammes.

L'opération de quartage est une méthode manuelle employée pour traiter les solides en vrac. L'opération consiste à réduire la taille d'un échantillon en formant un tas conique qui est étendu en une galette plate circulaire. La galette est ensuite fractionnée en quatre quartiers (cf, Figure 4), d'où son nom.

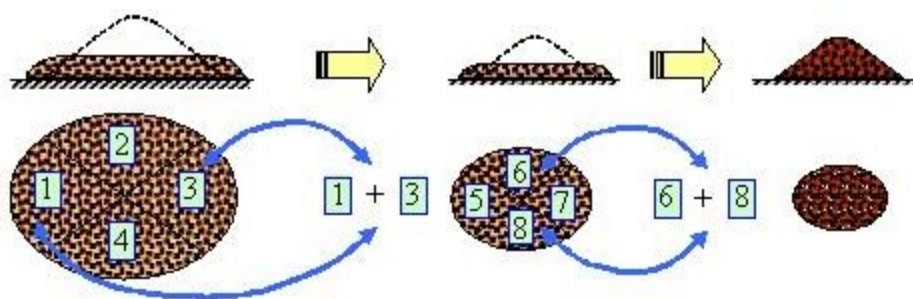


Figure 4. Opération de quartage d'échantillon.

Opération de répartition des matériaux en utilisant l'échantillonneur (cf, Figure 5) ou 'split-sample', consiste à diviser une quantité de matériau en deux parties égales ou en plusieurs fractions représentatives, afin d'obtenir des échantillons pour analyses ou d'autres utilisations.

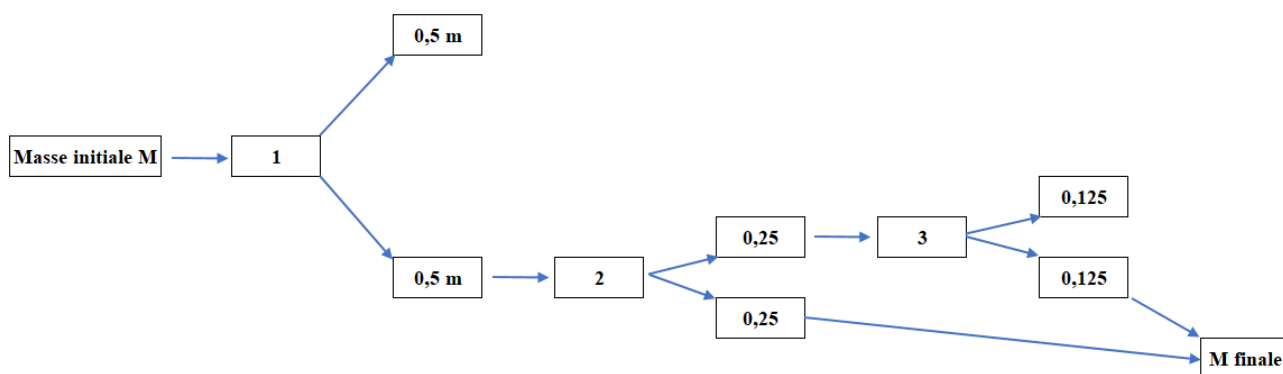


Figure 5. Opération de répartition des matériaux en utilisant l'échantillonneur.

Dans tous les cas, on doit s'assurer de la récupération des particules fines de l'échantillon prélevé s'il est sec.

Il faut que l'échantillon soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop important pour éviter de saturer les tamis. On note la formule suivante : **$0,2 D < M < 0,6 D$** .

D : le diamètre maximal de l'échantillon à analyser.

M : la masse de l'échantillon.

1.1.10 TAMISAGE

La procédure de tamisage suivra la norme EN 933-1 [2].

Dans le cadre du TP, le tamisage de l'échantillon prélevé sera effectué à sec sur les tamis de 0,080 – 0,160 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 4 – 10 – 20 – 31,5 – 40 mm. Le Tableau 1 représente les dimensions nominales normalisées des tamis utilisés dans l'analyse granulométrique.

Tableau 1. Dimensions nominales normalisées des tamis.

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0,08	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30	8,00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80		

Pour cela, on verse l'échantillon sur une colonne de tamis en ordre décroissant, munie d'un fond. On agite d'un mouvement horizontal de va-et-vient d'environ 120 fois par minute avec une amplitude d'environ 70 mm. On peut aussi utiliser une tamiseuse automatique.

Puis, on reprend un à un les tamis, en commençant avec celui de plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant des coups réguliers à la monture. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus sur le tamis ne se modifie pas de plus de 1% en une minute de tamisage.

On pèse alors soigneusement le refus de chaque tamis (cf, Figure 6) et le tamisat final récupéré et on vérifie que la somme des masses ne s'écarte pas de plus de 2% de la masse initiale de l'échantillon, sinon l'analyse ne peut pas être considérée comme valable.

La performance du tamisage mécanique est affectée par le type de granulat, la durée du tamisage, la charge sur le tamis et les variables du mouvement d'agitation, comme l'amplitude et la fréquence. Il est donc crucial de bien sélectionner le temps de tamisage mécanique.



Figure 6. Pesée des refus.

1.1.11 POURCENTAGE MASSIQUE DE REFUS

Le pourcentage massique de refus est un rapport, exprimé en pourcentage soit ' R_c ', de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture ' d ', à la masse totale initiale de matériau sec.

1.1.12 POURCENTAGE MASSIQUE D'UN TAMISAT :

Le pourcentage massique d'un tamisat est un rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec.

Le pourcentage massique de tamisat est désigné par : $100 - R_c(\%)$.

1.1.13 CALCULS

- Inscrire les différentes masses sur un formulaire d'essai (voir exemple Tableau 2, Tableau 3 et Tableau 4).

Tableau 2. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du sable 0/5.

Tamis [mm]	Refus élémentaire R_e [g]	Refus cumulé $\sum R_e$ [g]	Refus cumulé R_c [%]	Tamisats cumulé ($100 - R_c\%$) [%]
5				
3,15				
2,5				
1,25				
0,63				
0,315				
0,16				
0,08				
Fond				

- Calculer la quantité de refus cumulés sur chaque tamis, en grammes. Le refus cumulé pour chaque tamis est égal au refus sur le tamis sélectionné plus tous la somme des refus obtenus aux tamis de plus grandes tailles.
- Calculer le pourcentage de refus cumulés sur chaque tamis :

$$refus_{cumulés}(\%) = \frac{refus_{cumulés}(g)}{M_{initiale}} 100$$

- Calculer le pourcentage de tamisats cumulés.

$$Tamisats_{cumulés}(\%) = 100 - refus_{cumulés}(\%)$$

- Calculer le pourcentage des fines [$f(\%)$] inférieur à 0,08mm.

$$f(\%) = \frac{(M_{initiale} - M_{t0,063}) + M_{fond}}{M_{initiale}} * 100$$

- $M_{initiale}$ est la masse de prise d'essai.
- $M_{t0,063}$ est la masse de refus au tamis de 0,063mm.
- M_{fond} est la masse du tamisat restant dans le fond.

Tableau 3. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis [mm]	Refus élémentaire R_e [g]	Refus cumulé $\sum R_e$ [g]	Refus cumulé R_c [%]	Tamisât cumulé (100 – R_c %) [%]
16				
12.5				
10				
8				
6.3				
5				
4				
3.15				
2.5				
2				
1.6				
1.25				
1				
0.8				
Fond				

Tableau 4. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis [mm]	Refus élémentaire R_e [g]	Refus cumulé $\sum R_e$ [g]	Refus cumulé R_c [%]	Tamisâts cumulé (100 – R_c %) [%]
10				
8				
6.3				
5				
4				
3.15				
2.5				
2				
1.6				
1.25				
1				
0.8				
Fond				

1.1.14 COURBE GRANULOMETRIQUE

Il est possible de présenter les pourcentages de tamisât cumulés ou ceux des refus soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe, appelée courbe granulométrique.

La courbe granulométrique est une représentation du pourcentage massique des différents **tamisats** en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis. La Figure 7 représente une feuille cadrée pour le traçage des courbes granulométriques.

1.1.15 DIMENSION NOMINALE D'OUVERTURE A 'N' POUR CENT (D_N)

Dimension interpolée sur la courbe granulométrique pour laquelle le pourcentage massique 'P' de tamisas est égal à N pour cent.

1.1.16 LE DIAMETRE NOMINAL D_{10}

Le diamètre nominal ou d_{10} , correspond au diamètre des particules lorsque 10% du sable a passé à travers les tamis standards utilisés pour réaliser une étude granulométrique.

1.1.17 LE MODULE DE FINESSE DU SABLE

Le module de finesse (M_f) est une mesure utilisée en génie civil et en génie des matériaux pour caractériser la finesse d'un agrégat ou d'un matériau granulaire. Il est largement utilisé dans le domaine de la construction, en particulier dans la fabrication des bétons et des mortiers, ainsi que dans la formulation des mélanges d'asphalte.

Le module de finesse est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Il est défini comme la somme des pourcentages cumulés pondérés des fractions de sable divisée par 100. Plus précisément, il est calculé comme suit :

Selon la norme Française NF P 18-540 [7]

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulés en \% des tamis (0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5)}$$

Selon la norme Européenne EN 12620 [8]

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulés en \% des tamis (0.063 - 0.125 - 0.25 - 0.50 - 1 - 2 - 4)}$$

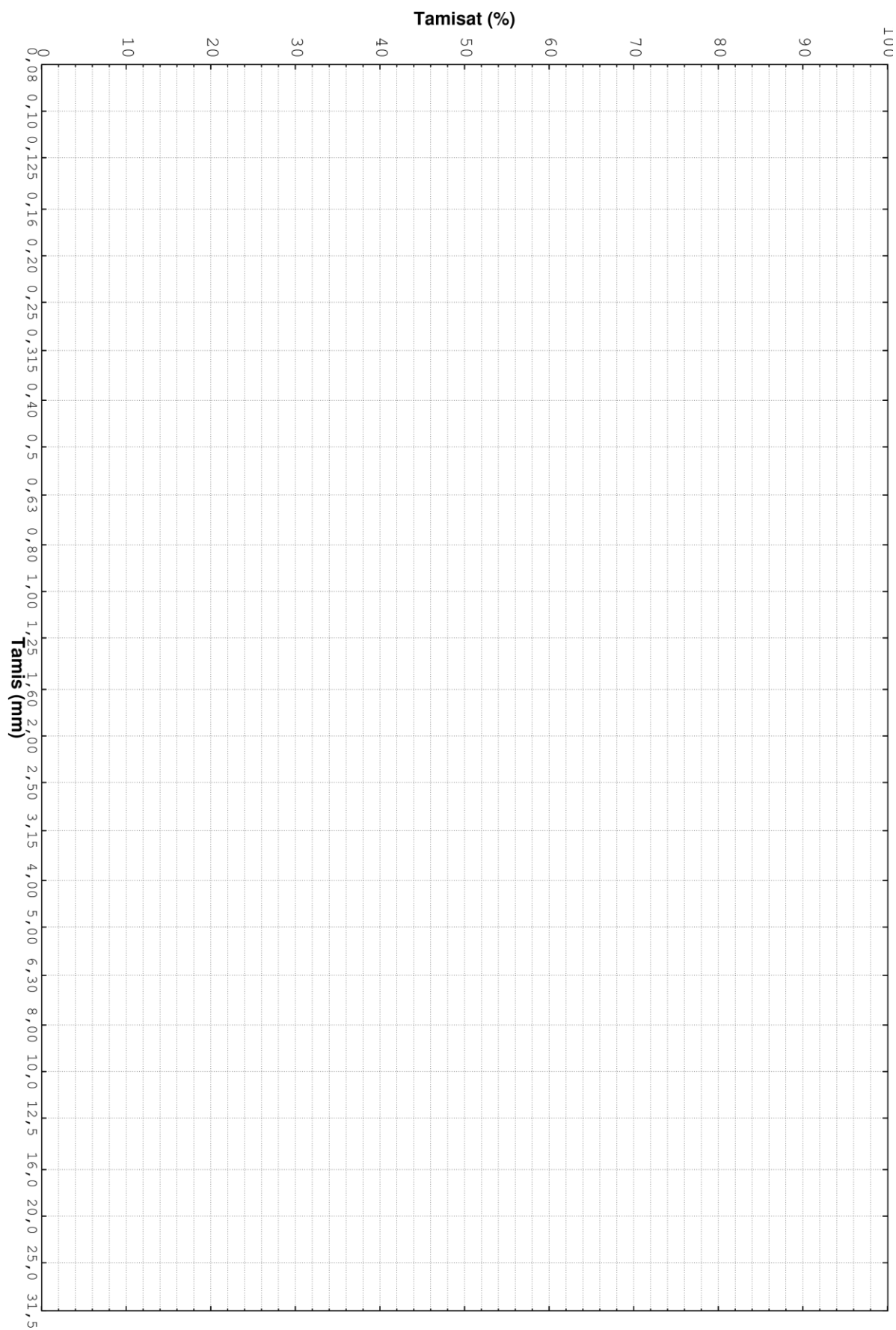


Figure 7. Feuille de traçage des courbes granulométriques.

Lorsque M_f est compris entre [9]:

1,8 et 2,2 : le sable est à majorité de grains fins.

2,2 et 2,8 : on est en présence d'un sable préférentiel.

2,8 et 3,3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Plus le module de finesse est élevé, plus l'agrégat est gros. Un module de finesse plus faible indique une plus grande quantité de fines particules dans l'agrégat.

Le module de finesse est un paramètre important dans la conception des mélanges de béton car il influe sur les propriétés du mélange, telles que la maniabilité, la résistance et la durabilité. Il est également utilisé pour spécifier les exigences de granularité des agrégats.

1.1.18 COEFFICIENT D'UNIFORMITE – COEFFICIENT DE HAZEN

Le facteur d'uniformité (C_u) est le rapport des dimensions des mailles de tamis pour lesquels il y a respectivement 60% et 10% de passant :

$$C_u = d_{60} / d_{10}$$

- d_{60} : diamètre du tamis pour lequel on obtient 60 % de passant.
- d_{10} : diamètre du tamis pour lequel on obtient 10 % de passant.
- $C_u > 2$: granulométrie étalée.
- $C_u < 2$: granulométrie uniforme ou serrée.

1.1.19 FACTEUR DE COURBURE

Le facteur d'uniformité (C_c) est le rapport des dimensions des mailles de tamis défini par :

$$C_c = d_{30}^2 / d_{10} \cdot d_{60}$$

- d_{60} : diamètre du tamis pour lequel on obtient 60 % de passant.
- d_{10} : diamètre du tamis pour lequel on obtient 10 % de passant.
- d_{30} : diamètre du tamis pour lequel on obtient 30 % de passant.
- $1 < C_c < 3$: matériau bien gradué (la continuité est bien répartie).
- $C_c < 1$ ou $C_c > 3$: matériau mal gradué (la continuité est mal répartie).

1.1.20 TRAVAIL DEMANDE**1.1.21 PREMIERE PARTIE**

Effectuer l'analyse granulométrique des sables et graviers désignés en suivant les procédures normalisées.

Donner le tableau de mesures et tracer la courbe granulométrique (sables et graviers).

Déterminer le module de finesse des sables.

Déterminer les dimensions normalisées $0/D$ des sables et d/D des graviers.

Calculer le coefficient d'uniformité.

Calculer le coefficient de courbure.

1.1.22 DEUXIEME PARTIE

Effectuer l'analyse granulométrique d'un mélange de sable et graviers (voir enseignant) analysés dans les proportions utilisées pour la fabrication du béton.

Comparer la courbe granulométrique obtenue avec la courbe de référence donnée par Dreux-Gorisse (courbe à partir des courbes granulométriques des composants du mélange).

1.1.23 CONCLUSION

La granulométrie d'un matériau influence divers aspects de son comportement et de ses propriétés, tels que sa perméabilité, sa résistance, sa compacité, sa stabilité, sa capacité de filtration, son aspect esthétique, etc. Par conséquent, elle est cruciale dans de nombreux domaines d'application, notamment pour la conception et la construction d'infrastructures, la production de matériaux de construction, etc. Une connaissance précise de la granulométrie d'un matériau permet d'optimiser sa sélection et son utilisation pour des applications spécifiques.

La granulométrie permet de choisir le granulat en fonction des besoins du chantier. Par exemple, un granulat bien gradué est souvent préférable pour les bétons afin d'assurer une bonne compacité et une bonne résistance mécanique.

Les granulats plus fins peuvent être utilisés pour le revêtement de surface, tandis que les plus grossiers sont adaptés aux sous-couches ou aux remblais.

2 TP N°2 : LA MASSE VOLUMIQUE DES GRANULATS

Lors de la confection des mortiers et des bétons, il est important de connaître la masse volumique ou la densité de chaque matériau. Cet essai est essentiel pour le calcul des proportions dans la fabrication des mélanges, comme le béton ou le mortier, où il est important de connaître le volume réel occupé par le matériau solide. La masse volumique des granulats est définie selon les normes NF P18-554, NF P18-555, NF EN 1097-3 et NA 255 [10–13].

2.1 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

2.1.1 DEFINITION

La masse volumique apparente d'un corps représente le rapport de la masse du corps sec par unité de son volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, notée ρ_{app} et exprimée en (gr/cm^3 , kg/m^3 , T/m^3).

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube de matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant la méthode de détermination si le matériau est compacté ou non compacté.

La masse volumique apparente sèche ρ_{app} est la masse de granulats secs (M_s) occupant un volume apparent V_{app} .

$$V_{\text{app}} = \text{volume des solides } (V_s) + \text{volume des vides } (V_v)$$

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction, c'est-à-dire leur densité à l'état naturel (en présence des pores) selon leur dimension et leur dispersion.

- a) Pour les matériaux solides : les roches naturelles, le béton, le bois ..., on peut faire des échantillons de forme géométriques connues (cubiques, cylindriques ...).
- b) Pour les matériaux de construction incohérents ou ceux qui n'ont pas de forme géométrique régulière : l'ensemble de grains (sable ou gravier), on peut la calculer en utilisant un récipient standard (de volume connu).

2.1.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

Pour déterminer la masse volumique apparente, il suffit de déterminer la volume apparent occupé par une masse du matériau étudié.

2.1.3 MATERIEL UTILISE

Pour réaliser cette manipulation, nous avons besoin de :

- Un récipient cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats (cf, Figure 8)
 - Si $D_{\text{Granulats}}$ de dimension maximale $D < 20 \text{ mm}$: récipient de capacité 1L.
 - Si $D_{\text{Granulats}}$ de dimension maximale $D > 20 \text{ mm}$: récipient de capacité $> 1\text{L}$.
- Un entonnoir monté sur trépied pour minimiser le compactage du granulat (cf. Figure 8).



(a)



(b)

Figure 8. (a) Récipients cylindriques calibrés de 1 à 20 litres [14], (b) Entonnoir monté sur trépied plus récipient [5].

- Une main écope pour le remplissage (cf, Figure 9).



Fond rond



Fond plat

Figure 9. Main écope [5].

- Une balance de portée 2 à 5 kg, précision 1g (cf. Figure 10).
- Une règle à araser métallique.
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.



Figure 10. Balance.

2.1.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

2.1.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait suivant les étapes ci-dessous :

- a. Prendre un récipient d'un volume connu (**V**).
- b. Noter la masse du récipient propre et vide = **M₀**
- c. Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement jusqu'au remplissage total du récipient.
- d. Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient
- e. Noter la masse du récipient rempli= **M₁**
- f. Vider les granulats dans un autre bac en plastique.
- g. Renouveler l'opération au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même matériau.

2.1.6 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, la masse volumique est calculée avec la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V} = \frac{M_s}{V_{app}}$$

ρ_{app} : La masse volumique apparente (kg/m³)

M_s : La masse sèche d'un corps (kg).

V_{app} : le volume apparent du récipient (m³).

M_1 : la masse du récipient rempli (kg).

M_0 : la masse du récipient vide (kg).

2.1.7 FACTEURS INFLUENÇANT LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

Plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats de l'essai, tel que :

- L'humidité : La présence d'humidité dans le sable augmente sa masse apparente sans nécessairement modifier le volume, ce qui fausse la mesure. Pour un résultat précis, le sable doit être sec, ou l'humidité doit être mesurée et prise en compte.
- La granulométrie : Un sable bien gradué (avec une large gamme de tailles de particules) a une masse volumique plus élevée qu'un sable mal gradué, car il y a moins de vides entre les particules.
- Le taux de compactage : La masse volumique augmente avec le compactage, car les particules sont rapprochées, réduisant les vides.

2.1.8 CONCLUSION

L'essai de la masse volumique du sable permet de mesurer la densité apparente d'un échantillon de sable, ce qui est crucial pour la conception des mélanges de béton et de mortier. Un contrôle précis de la masse volumique permet de garantir que les matériaux de construction sont correctement proportionnés pour répondre aux exigences de résistance et de durabilité des structures.

2.2 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE – METHODE DE L'EPROUVETTE GRADUEE

2.2.1 DEFINITION

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, **sans tenir compte des vides** pouvant exister dans ou entre des grains.

La masse volumique absolue d'un échantillon de granulats (sable, gravier...) est défini comme le rapport de la masse sèche (M_s), par le volume absolu occupé par la matière solide (V_s). Le volume occupé par la matière solide est déterminé généralement par le déplacement d'un volume équivalent d'eau.

La connaissance simultanée de la masse volumique absolue (ρ_{abs}) et de la masse volumique apparente (ρ_{app}) permet de calculer la compacité (C) et le pourcentage des vides dans un échantillon.

Pour un matériau tassé ou comprimé la masse volumique apparente tend vers sa masse volumique spécifique.

2.2.2 MATERIEL UTILISE

Pour réaliser cette manipulation, nous avons besoin de :

- Des éprouvettes graduées en plastique (cf. Figure 11).
- Une tige agitatrice.
- Un entonnoir pour le remplissage.
- Une balance de portée 2 à 5 kg, précision 1g.
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.



Figure 11. Eprouvettes graduées [15].

2.2.3 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

2.2.4 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait suivant les étapes ci-dessous, selon les norme NA 5089 et EN 1097-3 [12,16] :

- Verser de l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur) et noter le volume initial de l'eau V_1 .
- Préparer un échantillon de granulats secs de masse M (environ 300g).
- Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides (air) en remuant le mélange avec la tige agitateur.
- Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V_2 .
- Vider les granulats dans un bac en plastique.
- Renouveler l'opération au minimum 2 fois.

2.2.5 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, la masse volumique absolue (ρ_{abs}) est calculée avec la formule suivante :

$$\rho_{abs} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

M (g) : la masse de l'échantillon d'essai.

V_1 (ml) : le niveau initial de l'eau dans l'éprouvette.

V_2 (ml) : Le niveau final de l'eau dans l'éprouvette.

2.3 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE – METHODE DU PYCNOMETRE OU DU DENSIMETER

2.3.1 DEFINITION

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) correspond à la masse de la matière constituant le granulat par unité de volume, en **excluant les vides** présents à l'intérieur ou entre les grains. Elle est définie comme le rapport entre la masse sèche (M_s) de l'échantillon (sable, gravier, etc.) et le volume absolu (V_s) occupé uniquement par la matière solide. Ce volume est généralement

déterminé par la méthode du pycnomètre ou du densimètre, qui permet de calculer le volume réel de la matière solide. Cette méthode est aussi connue sous le nom de la méthode du bocal.

2.3.2 MATERIEL UTILISE

- Balance de précision : Pour mesurer la masse des échantillons.
- Pycnomètre : Un flacon à bouchon de volume connu, équipé d'une ouverture fine pour éviter l'évaporation et les bulles d'air. Le pycnomètre peut être remplacé par un densimètre.
- Eau distillée : Pour remplir le pycnomètre et immerger le sable.
- Étuve : Pour sécher le sable à une température standard.
- Tige ou spatule : Pour agiter le mélange et éliminer les bulles d'air.



Figure 12. Pycnomètre [5,15].

2.3.3 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

2.3.4 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 255 et NF-EN 1097- 6 [16,17], en suivant les étapes ci-dessous :

- a. Remplir le pycnomètre d'eau jusqu'au trait de jauge (à ras bord) et peser l'ensemble (M_1).
- b. Introduire une masse précise (M_g) de granulat sec (sable ou gravier) dans le pycnomètre.
- c. Après avoir introduit le granulat, remplir le pycnomètre d'eau jusqu'au trait de jauge (à ras bord).

- d. Agiter doucement le pycnomètre pour éliminer les bulles d'air emprisonnées entre les grains.
- e. Lorsque toutes les bulles d'air ont été enlevées, peser le pycnomètre rempli de granulat et d'eau (M_2).

2.3.5 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, on peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés comme suit :

$$M_2 = M_1 + M_g - \frac{M_g}{\rho_{abs}} \rho_{eau}$$

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) est calculée avec la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M_g}{M_g + M_1 - M_2}$$

M_g (g) : la masse de l'échantillon d'essai.

M_1 (g) : le poids du pycnomètre rempli d'eau.

M_2 (g) : le poids du pycnomètre rempli d'échantillon et d'eau.

ρ_{eau} (g/ml) : la masse volumique de l'eau.

2.3.6 FACTEURS INFLUENÇANT LA MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

Plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats de l'essai, tel que :

- L'humidité : Si le granulat n'est pas correctement séché, la masse volumique apparente pourrait inclure une partie de l'eau dans les grains, faussant ainsi les résultats.
- La température de l'eau : La masse volumique de l'eau change légèrement avec la température. Il est donc important de mesurer la température de l'eau et d'ajuster la densité de l'eau dans les calculs en conséquence.
- L'élimination des bulles d'air : Il est crucial de bien éliminer les bulles d'air lors du remplissage du pycnomètre, car les bulles restantes pourraient fausser le calcul du volume du granulat.

2.3.7 CONCLUSION

L'essai de la masse volumique absolue d'un granulat est essentiel pour déterminer la densité réelle des grains, ce qui est important pour le calcul des volumes de matériaux dans les mélanges

de béton et de mortier. En connaissant la masse volumique absolue, on peut mieux comprendre la proportion de matériau solide dans un échantillon de sable et ainsi ajuster les proportions de ciment, d'eau et d'autres composants dans les formulations des mélanges de construction.

3 TP N°3 : LE COEFFICIENT D'ABSORPTION ET LA TENEUR EN EAU DES GRANULATS

3.1 COEFFICIENT D'ABSORPTION DES GRANULATS

3.1.1 OBJECTIF

L'essai d'absorption des granulats vise à déterminer la quantité d'eau qu'un échantillon de granulat peut absorber lorsqu'il est immergé dans l'eau. Cela permet de connaître la porosité des granulats et leur état hydrique. La connaissance de cette propriété est cruciale pour les mélanges de béton et de mortier, car les granulats absorbent une partie de l'eau de gâchage, modifiant ainsi les propriétés du béton frais et durci. En construction, la connaissance de l'absorption est nécessaire pour ajuster la quantité d'eau dans le mélange de béton ou de mortier, afin d'obtenir les propriétés mécaniques optimales.

3.1.2 PRINCIPE D'ESSAI

L'essai consiste à comparer la masse du granulat à l'état sec, à l'état saturé en surface sèche (SSS), et à l'état immergé.

3.1.3 MATERIEL UTILISE

- **Échantillon de sable sec** : Un échantillon de sable de granulométrie inférieure à 5 mm.
- **Échantillon gravier sec** : Échantillon de gravier dont la taille peut varier en fonction des spécifications (généralement supérieur à 5 mm).
- **Balance de précision** : Pour peser les échantillons avant et après immersion.
- **Récipients d'immersion** : Pour immerger le sable et le graviers dans l'eau.
- **Essuie-tout ou chiffon** : Pour sécher les granulats en surface après immersion.
- **Etuve** : Pour sécher les granulats jusqu'à masse constante (cf. Figure 13).
- **Chronomètre** : Pour mesurer le temps d'immersion.
- **Tamis** : Pour éliminer les impuretés et obtenir un sable propre.



Figure 13. Etuves de laboratoire [15].

3.1.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

3.1.5 MODE OPERATOIRE

Le mode opératoire pour mesurer le coefficient d'absorption du sable et du gravier suit les normes NA 255 et NF EN 1097-6 [16,17]. La procédure suit les étapes ci-dessous :

- a) Prélever un échantillon de sable ou de gravier représentatif, pesant entre 500 g et 1 000 g, en fonction des spécifications.
- b) Immerger complètement l'échantillon de granulat (sable/gravier) dans de l'eau propre pendant une durée de 24 heures. Cette durée est suffisante pour permettre aux granulats d'absorber toute l'eau possible. Laisser l'échantillon reposer immerger pendant 24 heures pour atteindre un état de saturation.
- c) Retirer l'échantillon de granulat (sable/gravier) de l'eau après 24 heures.
- d) Sécher délicatement l'échantillon avec un chiffon ou un essuie-tout pour éliminer l'excès d'eau à la surface des granulats, sans toutefois absorber l'eau contenue dans les pores internes du gravier.
- e) L'échantillon est ensuite séché à l'air jusqu'à atteindre la consistance de "saturé et surface sèche" (SSS).

Pour le sable : Il faut étaler l'échantillon sur une surface non absorbante. Le sable est exposé ensuite à un flux d'air chaud en le remuant pour assurer un séchage uniforme en veillant à ne perdre aucun élément du sable. L'opération est continuée jusqu'à ce que le sable approche l'état

d'écoulement libre (grains libres de toute force capillaire). Pour vérifier cet état, on utilise un moule tronconique et une dame (cf. Figure 14). Le sable est placé dans le moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante. Remplir alors le moule de sable sans tasser et damer légèrement 25 coups. Ensuite le moule est retiré.

- Si l'humidité demeure, l'échantillon garde la forme du moule, il faut alors le sécher un peu plus et recommencer l'essai.
- Si l'état d'écoulement libre est atteint, l'échantillon damé s'affaisse au démoulage, l'essai est terminé. Le sable est considéré saturé avec surface sèche.

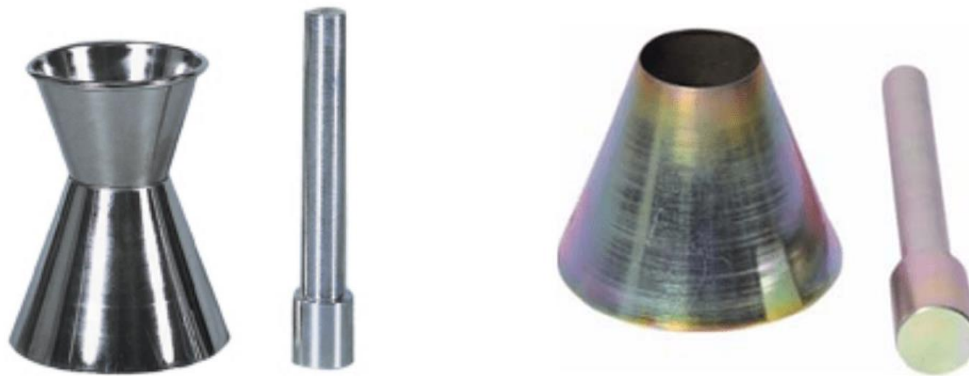


Figure 14. Cône d'absorption des Sables [5,15].

Pour le gravier : l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant. Les gros granulats sont essuyés individuellement [3]. Il faut arriver à l'état des 3S (saturé avec surface sèche).

- f) Peser l'échantillon immédiatement après le séchage superficiel à l'aide de la balance de précision et noté la masse (M_h).
- g) L'échantillon est placé dans l'étuve pendant 24 heures à 105 °C.
- h) Après un séchage de 24h, l'échantillon sec est pesé. La masse de l'échantillon sec est noté (M_s).

3.1.6 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, on peut alors écrire la relation du coefficient d'absorption comme suit :

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Abs est le coefficient d'absorption.

M_h est la masse de l'échantillon à l'état saturé surface sèche.

M_s est la masse de l'échantillon avec séchage de 24h à 105 °C.

Absorption faible (généralement < 2 %) : Indique un granulat peu poreux qui absorbe peu d'eau. Ce type de granulat est idéal pour les bétons, car il n'absorbe pas une grande quantité d'eau de gâchage, préservant ainsi l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment.

Absorption élevée (> 2 %) : Signale un granulat poreux. Ce type de granulat pourrait nécessiter une correction du rapport eau/ciment dans un mélange de béton, car il absorbera une partie de l'eau initialement prévue pour l'hydratation du ciment.

3.1.7 IMPORTANCE ET IMPACT DE L'ABSORPTION D'EAU

Les granulats avec une absorption d'eau élevée peuvent nécessiter une correction dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage du béton. En effet, ces granulats absorberont une partie de l'eau du mélange, diminuant ainsi l'eau disponible pour l'hydratation du ciment.

Des granulats avec une faible absorption sont préférables pour assurer la durabilité et la résistance mécanique du béton, car ils ne modifient pas le rapport eau/ciment.

Les granulats très poreux peuvent absorber plus d'eau et être sujets à des phénomènes de gel/dégel, entraînant une dégradation plus rapide du matériau.

Les granulats avec une faible porosité sont plus durables et résistent mieux aux intempéries et aux agressions chimiques.

3.1.8 CONCLUSION

L'essai d'absorption des granulats (sable/gravier) est crucial pour déterminer la porosité et la quantité d'eau que granulats peuvent absorber ce qui permet de mieux gérer la formulation des bétons ou des mortiers en ajustant la quantité d'eau de gâchage. Une bonne gestion de l'absorption permet d'optimiser la qualité des mélanges, d'assurer la durabilité des ouvrages, et de réduire les risques de fissuration et de dégradations prématurées.

3.2 TENEUR EN EAU DES GRANULATS

Par définition la **Teneur en eau** pondérale d'un matériau (w) est le rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (m_w) sur la masse des grains solides (m_s). Elle exprime la quantité d'eau contenue dans un granulats à un instant définit. Contrairement au degré d'absorption, la teneur en eau n'est pas intrinsèque au granulats, elle change avec les conditions de stockage et du climat.

3.2.1 OBJECTIF

L'objectif de ce TP est de déterminer la teneur en eau des granulats (sable ou gravier). Cette grandeur est essentielle pour le dosage du béton, car l'eau contenue dans les granulats influence directement le rapport E/C (Eau/Ciment), donc la résistance mécanique et l'ouvrabilité du béton.

3.2.2 PRINCIPE

L'essai repose sur la détermination de la perte de masse d'un échantillon de granulats avant et après séchage. La différence entre la masse humide et la masse sèche correspond à l'eau évaporée lors du séchage.

3.2.3 MATERIEL UTILISE

- Un échantillon de granulats (sable ou gravier).
- Une étuve de dessiccation à une température réglable à (100 – 105°C).
- Une balance de précision de portées maximale et minimale compatible avec les masses à peser.
- Des porte-échantillons ou des boites de pétri métalliques (cf. Figure 15).



Figure 15. Boite de pétri métallique [18].

3.2.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25 stockés à l'extérieure du laboratoire.

3.2.5 MODE OPERATOIRE

Le mode opératoire pour mesurer la teneur en eau du sable et du gravier suit les normes NA 5129-5 de 2021 et NF EN 1097-5 de 2008 [19,20]. La procédure suit les étapes ci-dessous :

- a) Prélever environ **1 kg de sable** ou **2 kg de gravier** représentatif du lot. Homogénéiser l'échantillon et éliminer les gros éléments indésirables.
- b) Peser dans la boîte à pétri un échantillon humide : **masse humide (M_h)**.
- c) Placer l'échantillon dans une étuve réglée à **105 °C**.
- d) Laisser sécher jusqu'à masse constante, c'est-à-dire lorsque deux pesées successives espacées de 1 h ne diffèrent pas de plus de 0,1 %.
- e) Retirer l'échantillon, laisser refroidir en dessiccateur (pour éviter l'absorption d'humidité).
- f) Peser l'échantillon sec : **masse sèche (M_s)**.

3.2.6 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, on peut alors écrire la relation du coefficient d'absorption comme suit :

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

w est la teneur en eau

M_h est la masse de l'échantillon humide.

M_s est la masse de l'échantillon après séchage à 105 °C.

3.2.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Une teneur en eau trop élevée conduit à un excès d'eau dans le mélange, provoquant une diminution de la résistance et une augmentation de la porosité du béton. À l'inverse, une teneur trop faible peut rendre le mélange sec et peu ouvrable, compliquant sa mise en œuvre.

3.2.8 CONCLUSION

L'essai de détermination de la teneur en eau des granulats permet d'évaluer la quantité d'eau libre contenue dans les pores et à la surface des grains. Cette donnée est essentielle dans le domaine du génie civil, car elle influence directement la formulation du béton et le rapport eau/ciment, paramètres déterminants pour la résistance mécanique et la durabilité du matériau.

Ainsi, la connaissance précise de la teneur en eau permet de corriger la quantité d'eau de gâchage afin d'obtenir un béton homogène, performant et conforme aux exigences de la norme. Cet essai, bien que simple, constitue donc une étape indispensable du contrôle de la qualité des granulats avant toute utilisation dans les bétons ou les mortiers.

4 TP N°4 : PROPRETE DES GRANULATS

L'essai de propreté des granulats est un test fondamental en physique des matériaux pour le génie civil, car la présence d'impuretés (argiles, limons, poussières, matières organiques) peut nuire considérablement à la qualité des bétons et mortiers.

La propreté correspond à la quantité de fines argileuses ou de particules adhérentes présentes à la surface des grains, que l'on peut identifier sur le chantier en observant les traces laissées après frottement manuel des granulats. Elle inclut également la présence d'impuretés pouvant compromettre la qualité du béton, comme les scories, le charbon, les débris de bois, les feuilles ou les racines.

Pour garantir la qualité des bétons et des mortiers, la propreté des granulats est évaluée par des essais normalisés : l'essai d'équivalent de sable et l'essai de propreté superficielle pour les graviers.

4.1 ESSAI DE L'EQUIVALENT DE SABLE

4.1.1 OBJECTIF

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté des granulats fins en déterminant la quantité relative de particules fines (argile, limon) dans un échantillon de sable. Un équivalent de sable élevé indique un sable propre avec peu de particules fines, tandis qu'un équivalent de sable faible suggère une forte présence de fines, ce qui peut affecter la qualité des bétons ou des enrobés.

N.B : Il existe un essai complémentaire pour la mesure de la propreté des sables qui ont un 'ES' faible, à savoir l'essai du bleu de méthylène plus utilisé pour les sols.

4.1.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai se déroule selon un processus normalisé. On lave un échantillon de sable de fraction 0/5mm avec une solution dite « lavante », elle permet de séparer le sable des particules fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette.

4.1.3 MATERIEL UTILISE

- Eprouvette gradué en plastique : Une éprouvette cylindrique de 40 cm de hauteur et de 3,2 cm de diamètre, gradué, munie d'un bouchon en caoutchouc (cf. Figure 16).
- Un piston mesureur composé de (cf. Figure 16) :

- Une tige de 43 cm de longueur.
- Une embase de 2,5 cm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage du piston dans le cylindre ;
- Un manchon, de 1 cm d'épaisseur, qui s'adapte sur le cylindre gradué et permet de guider la tige, en même temps qu'il sert à repérer l'enfoncement du piston d'essai dans le cylindre,
- Un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston d'essai, hormis le manchon, une masse totale de 1 kg.



Figure 16. Ensemble d'outils pour l'équivalent de sable [4].

- **Solution de lavage :** Une solution d'eau distillée et de produit dispersant (généralement une solution de sulfate de calcium ou d'eau savonneuse) (cf. Figure 17).



Figure 17. Solution lavante [21].

- **Chronomètre :** Pour contrôler le temps de repos (20 minutes).
- **Entonnoir :** Pour introduire l'échantillon dans le cylindre.
- **Agitateur manuel ou mécanique :** Pour agiter la suspension.



Figure 18. Agitateur automatique pour l'équivalent de sable [15,21].

4.1.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour cet essai, on a besoin d'un échantillon de sable à tester, généralement composé de particules inférieures à 2mm. L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/2 mm à une teneur en humidité inférieure à 2%.

4.1.5 MODE OPERATOIRE

Le mode opératoire pour mesurer l'équivalent de sable suit les normes NA 544 de 2018 et 1 NF EN 933-8+A1 de 2015 [22,23]. La procédure suit les étapes ci-dessous :

- a) Verser une petite quantité de solution lavante dans l'éprouvette spécifique pour cet essai jusqu'à atteindre le premier trait (100 mm) indiqué sur l'éprouvette.
- b) Verser l'échantillon de sable dans le cylindre gradué à l'aide de l'entonnoir.
- c) Verser une prise d'essai de sable de 120g.
- d) Laisser reposer 10 minutes pour éliminer les bulles d'air.
- e) Mettre le bouchon en caoutchouc sur l'éprouvette et la placer sur l'agitateur mécanique.
- f) Agiter l'éprouvette en 30 secondes avec 90 cycles de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai.
- g) Retirer le bouchon en caoutchouc et laver les parois intérieures de l'éprouvette en utilisant le tube laveur.
- h) Remuer la suspension avec le tube laveur en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable.
- i) Remplir à nouveau le cylindre jusqu'à la graduation 380 mm avec la solution de lavage.

- j) Laisser la suspension reposer pendant 20 minutes pour permettre aux particules de se déposer dans le cylindre selon leur densité.
- k) Mesurer la hauteur (h_1) de l'ensemble sable plus floculat et la hauteur de sable (h_2) à l'aide d'une règle métallique (cf. Figure 19).

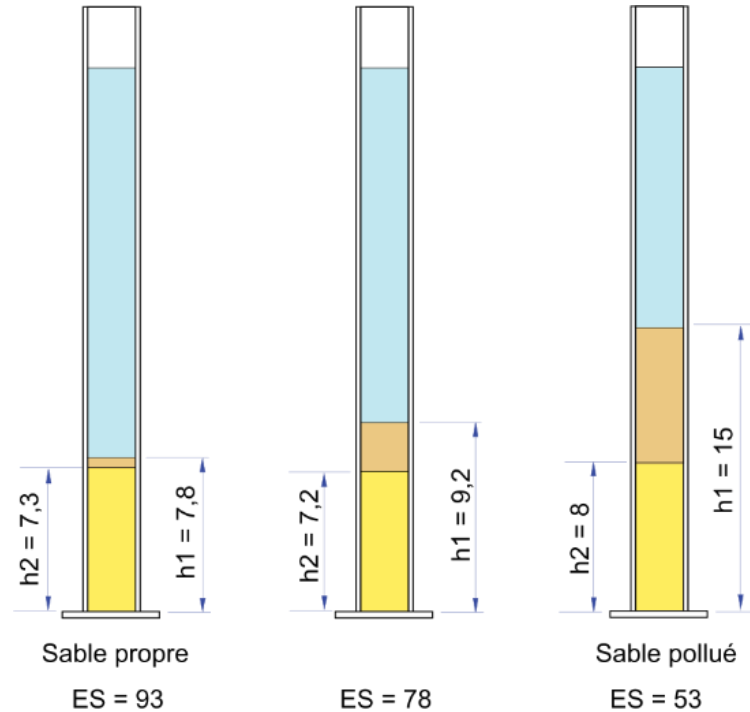


Figure 19. Mesure du h_1 et h_2 visuels [9,24].

- l) Mesurer de la hauteur (h_2) du sable en utilisant le piston.

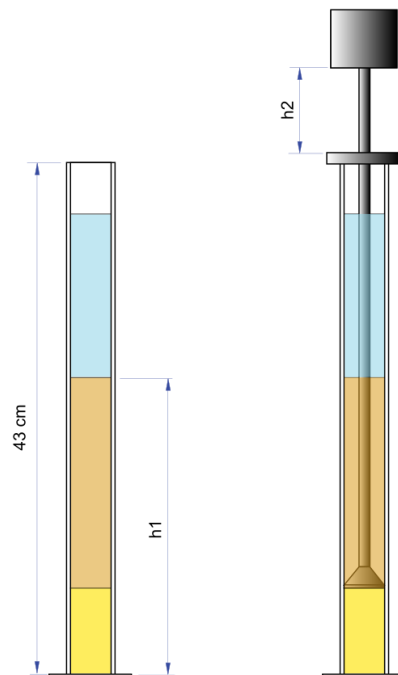


Figure 20. Mesure du h_2 avec piston [9,24].

- m) Calculer l'équivalent de sable visuel ESV et l'équivalent de sable piston ESP.

4.1.6 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, on peut alors écrire la relation l'équivalent de sable ES comme suit :

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

$$ESP = \frac{h_{2'}}{h_1} * 100$$

ESV : l'équivalent de sable piston ESP.

ESP : l'équivalent de sable piston ESP.

h_1 (mm) : la hauteur sable plus flocculat.

h_2 (mm) : la hauteur sable mesurer avec la règle.

$h_{2'}$ (mm) : la hauteur sable mesurer avec le piston.

4.1.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

La valeur de l'équivalent de sable obtenue nous donne une indication sur sa nature, sa qualité et sa propreté. Le Tableau 5 regroupe les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons [22,23].

Tableau 5. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable.

ES Visuel	ES Piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
$65\% \leq ES < 75\%$	$60\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$75\% \leq ES < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ES \geq 85\%$	$ES \geq 80\%$	Sable très propre ; l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

4.1.8 CONCLUSION

L'essai d'équivalent de sable est essentiel pour évaluer la propreté des granulats fins, notamment leur teneur en particules fines, qui peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux de construction. Un sable avec un bon équivalent de sable est indispensable pour des constructions durables et performantes, notamment pour les bétons et les enrobés.

Un sable avec un **ES faible** peut réduire la performance des bétons en rendant l'hydratation du ciment plus difficile et en augmentant la demande en eau, ce qui peut affecter la durabilité et la résistance mécanique.

Un sable **propre avec un ES élevé** est recommandé pour des bétons ou des enrobés, car il assure une meilleure cohésion, résistance et durabilité dans le temps.

4.2 ESSAI DE PROPETE SUPERFICIELLE DES GRAVIERS

4.2.1 OBJECTIF

Les graviers doivent être propres avant d'être utilisés dans la fabrication de bétons, tout comme c'est le cas pour les sables.

4.2.2 PRINCIPE

À la différence des sables, les graviers se caractérisent par des classes granulaires plus grossières. De ce fait, la séparation des particules fines ne peut être réalisée par sédimentation, mais requiert un procédé de lavage permettant d'éliminer efficacement les impuretés adhérentes.

4.2.3 MATERIEL UTILISE

- Tamis de maille 0.5 mm
- Un sceau d'eau.
- Un bac en plastique.

4.2.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

4.2.5 MODE OPERATOIRE

La procédure de l'essai suit la norme NA 463 et la norme P18-591 [25,26] avec les étapes ci-dessous :

- a) Peser une masse d'échantillon de gravier sec soit M_1 et le
- b) Placer l'échantillon dans le tamis.
- c) Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire.
- d) Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon.
- e) Sécher l'échantillon dans l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante.
- f) Peser la nouvelle masse d'échantillon, soit M_2 .

4.2.6 PRESENTATION DES RESULTATS

Une fois la manipulation terminée, la propreté des graviers est calculée comme suit :

$$P(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100$$

P (%) : la propreté des graviers.

M_1 : la masse initiale du gravier sec.

M_2 : la masse finale du gravier après lavage est séchage.

4.2.7 CONCLUSION

Les impuretés de surface peuvent agir comme des agents perturbateurs qui nuisent à l'homogénéité et à la résistance du béton. Les fines peuvent interférer avec la réaction chimique d'hydratation du ciment. Elles peuvent réduire l'adhérence entre la pâte de ciment et les graviers. Les normes spécifient des pourcentages maximaux de fines admissibles selon le type de gravier. Le gravier est considéré propre si le pourcentage des fines ne dépasse pas 5%.

5 TP N°5 : ESSAI LOS ANGELES, MICRO DEVAL ET DIFFRACTION DYNAMIQUE

La résistance mécanique des granulats est déterminée à l'aide d'essais normalisés visant à évaluer leur capacité à résister à l'usure et à la fragmentation, tels que les essais Micro-Deval et Los Angeles. Ces caractéristiques sont essentielles, car les granulats forment l'ossature du béton hydraulique et du béton de chaussées et influencent de manière significative ses performances mécaniques finales, en particulier sa résistance à la compression et sa résistance aux chocs et aux frottements.

5.1 ESSAI DE LOS ANGELES

5.1.1 OBJECTIF

L'essai de Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat grossier. Il permet de déterminer la résistance à la fragmentation du gravier suivant le coefficient de Los Angeles (LA). Il permet de classer les graviers selon leurs résistances. Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le BTP.

5.1.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

Cet essai permet d'évaluer la résistance à la fragmentation par chocs d'un échantillon de granulats. Au cours de l'essai, le matériau subit à la fois l'impact des boulets et le frottement réciproque des éléments entre eux ainsi que contre la paroi du cylindre de la machine Los Angeles. L'essai consiste à déterminer la proportion de particules inférieures à 1,6 mm générées après exposition du matériau aux chocs de boulets normalisés.

5.1.3 MATERIEL UTILISE

- La machine Los Angeles (cf. Figure 21) se compose de [27] :
 - Un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de $711 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ et une longueur intérieure de $508 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales. Une trappe de chargement avec une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire les granulats et les boulets.
 - Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation comprise entre 30 et 33 tours /min.

- Un compteur de tours permettant de contrôler le nombre total de révolutions effectuées (habituellement 500 tours).
- Les boulets en acier, de dimensions et de masses normalisées, sont introduits avec un échantillon de granulats de fraction déterminée.
- Un bac destiné à recueillir le matériau après l'essai.
- Un tamis de 1,6mm.
- Une balance.

Essai Los Angeles

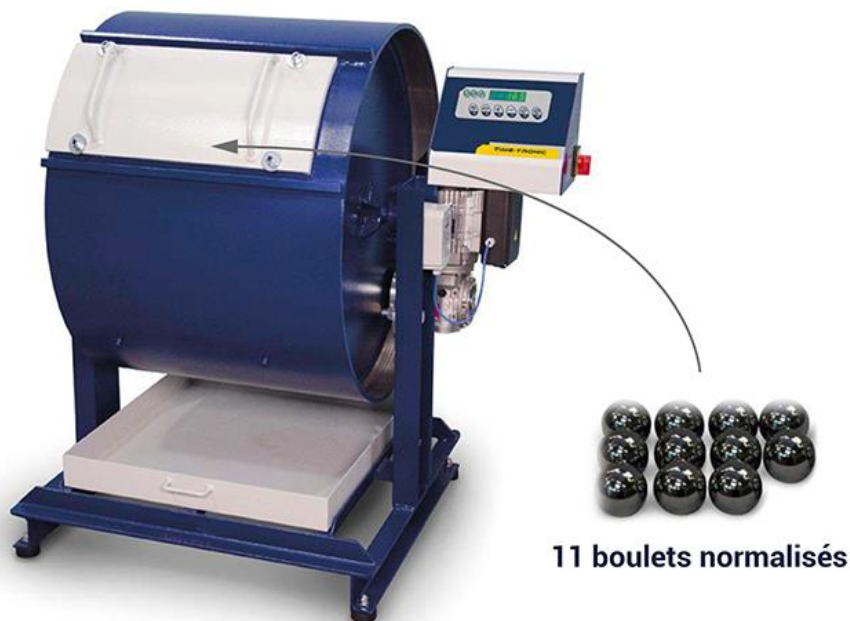


Figure 21. Machine de Los Angeles [5].

5.1.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de sables 0/5, gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

5.1.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 5129-2 de 2021 et NF EN 1097-2 de 2020 [28,29], en suivant les étapes ci-dessous :

- a) Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- b) Introduire le nombre de boulets correspondant à la classe granulaire choisie (cf. Tableau 6) dans le cylindre creux de la machine.

- c) Ajouter le matériau pour essai avec une masse (**M₁**) suffisante selon la classe granulaire (cf. Tableau 6).
- d) Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- e) Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes sauf la classe 25-50 mm où le nombre de rotation est de 1000.
- f) Décharger le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- g) Tamiser l'échantillon contenu dans le bas au tamis 1,6mm.
- h) Laver le refus à 1,6 mm dans un autre bac et on le verse dans le bac troué. Dès que le refus est séché à l'étuve (105 °C), on détermine les poids de la pesée (**M₂**).

Tableau 6. Prise d'essai et nombre de charge pour l'essai Los Angeles.

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6,3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6,3 – 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10 – 14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10 - 25	10-16	11	4840 ± 25	3000
	16-25	11	4840 ± 25	2000
16 -31,5	16 – 25	12	5280 ± 25	2000
	25 – 31,5	12	5280 ± 25	3000
25 - 50	25 – 40	12	5280 ± 25	3000
	40 - 50	12	5280 ± 25	2000

5.1.6 PRESENTATION DES RESULTATS

La résistance à la fragmentation des granulats est exprimée par le coefficient de Los Angeles (**LA**) calculé comme suit :

$$LA = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100$$

LA (%) : le coefficient de Los Angeles.

$M_1(g)$: la masse initiale de l'échantillon.

$M_2(g)$: la masse finale de l'échantillon.

5.1.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les valeurs du coefficient Los Angeles reflètent la nature des graviers et permettent d'évaluer leur qualité en vue de leur utilisation dans la composition d'un béton, comme le montre le Tableau 7 :

Tableau 7. Type des graviers selon le coefficient Los Angles.

Valeurs du coefficient Los Angles	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 < LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 < LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre « mauvaise qualité »

5.1.8 CONCLUSION

Un coefficient (LA) faible représente un granulat résistant à la fragmentation. Un coefficient (LA) élevé indique que le granulat est fragile et moins durable. L'essai de Los Angeles ne simule pas toutes les sollicitations réelles, mais il permet une comparaison fiable entre différents types de granulats. Il est souvent complété par l'essai Micro-Deval, qui évalue la résistance à l'usure par frottement.

5.2 ESSAI DE MICRO-DEVAL

5.2.1 OBJECTIF

L'essai de Micro Deval permet d'évaluer la durabilité des granulats, en particulier leur aptitude à résister à l'usure dans des conditions de trafic, comme dans les chaussées ou les ouvrages en béton.

5.2.2 PRINCIPE

L'essai Micro Deval a pour objectif de mesurer la résistance des granulats à l'usure par frottement lorsqu'ils sont soumis à un mouvement dans un tambour rotatif en présence de billes d'acier avec ou sans eau.

5.2.3 MATERIEL UTILISE

- La machine de Micro-Deval (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) se compose de [27] :
 - Trois à quatre tambours cylindriques rotatifs en acier de 20 cm de diamètre et de 15,7 cm de longueur, où sont placés les granulats. Ces tambours doivent être fabriqués en acier inoxydable d'une épaisseur de 3 mm et une capacité de 5 litres. L'intérieur doit être parfaitement lisse, sans aucune aspérité ni saillie. Les couvercles doivent être équipés de joints en caoutchouc afin de garantir une étanchéité optimale.
 - Les tambours sont installés sur deux arbres horizontaux recouverts de caoutchouc, qui assurent leur rotation. Ces arbres sont entraînés par un moteur via un système mécanique comprenant des roues dentées, des chaînes, une courroie et un réducteur de vitesse. Le moteur doit fournir une puissance suffisante pour garantir une vitesse de rotation des cylindres de 100 ± 5 tours par minute. Il est nécessaire de contrôler régulièrement cette vitesse afin de corriger toute variation due à l'usure des rouleaux d'entraînement ou des éléments du système de transmission.
 - Une charge abrasive constituée par des billes sphériques de $10 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de diamètre en acier inoxydable. Elles sont utilisées pour provoquer l'abrasion des granulats.



Figure 22. Appareil de Micro-Deval [5].

- Une balance de précision pour peser les échantillons avant et après l'essai.

- Tamis 1,6 mm utilisé pour tamiser les granulats après l'essai et séparer les fines produites.
- Un bac de collecte pour récupérer les fines après tamisage.

5.2.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

5.2.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 5129-1 de 2019 et NF EN 1097-1 de 2023 [30,31], en suivant les étapes ci-dessous :

- a) Laver le gravier et sécher le à 105 °C pendant 24 heures.
- b) Peser l'échantillon sec avec précision (M_0). Ce sera la masse de départ des granulats avant l'essai. La prise d'essai sera de 500 ± 2 g pour les granulats 4-14 mm et de $10\text{kg} \pm 20$ g pour les granulats 25-50 mm.
- c) Introduire l'échantillon de granulats dans le tambour Micro Deval.
- d) Introduire la charge abrasive (billes) relative à la classe granulaire choisie (cf. Tableau 8).

Tableau 8. Charge abrasive pour Micro-Deval.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4/6,3	2000±5
6,3/10	4000±5
10/14	5000±5

- e) Pour l'essai humide en présence d'eau, jouter une quantité de 2,5L d'eau pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm et de 2L d'eau pour les gravillons compris entre 25 et 50mm.
- f) Faire tourner les cylindres à une vitesse de $100 \text{ tr/min} \pm 5 \text{ tr/min}$ pendant :
 - 12 000 tours (soit 2 heures) pour les graviers de dimension comprise entre 4 et 14mm.
 - 14 000 tours (soit 2 heures 20 minutes) pour les graviers de dimension comprise entre 25 et 50mm.
- g) Après avoir atteint le nombre de tours requis, arrêter la rotation du tambour, et retirer l'échantillon de granulats et les billes d'acier.

- h) Récupérer les granulats en les tamisant à travers un tamis de 1,6 mm pour séparer les fines (particules inférieures à 1,6 mm) générées par l'abrasion.
- i) Laver les granulats avec de l'eau dans le tamis pour séparer les fines.
- j) Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante.
- k) Peser ce refus, soit (M_1) le résultat de la pesée.

5.2.6 PRESENTATION DES RESULTATS

La résistance à l'usure des granulats est exprimée par le coefficient de Micro-Deval (**MD**) calculé comme suit :

$$MD = \frac{M_0 - M_1}{M_0} * 100$$

MD (%) : le coefficient de Micro-Deval.

M_0 (g) : la masse initiale de l'échantillon.

M_1 (g) : la masse finale de l'échantillon.

5.2.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les valeurs du coefficient Micro-Deval reflètent la nature des graviers et permettent d'évaluer leur qualité en vue de leur utilisation dans la composition d'un béton ou des travaux de routes, comme le montre le Tableau 9:

Tableau 9. Type des graviers selon le coefficient Micro-Deval.

Valeurs du coefficient Los Angles	Appréciation
$MD \leq 10$	Très bon à bon
$10 < MD \leq 20$	Bon à moyen
$20 < MD \leq 35$	Moyen à faible
$MD > 35$	Médiocre « mauvaise qualité »

5.2.8 CONCLUSION

L'essai Micro Deval est essentiel pour évaluer la qualité des granulats, en particulier leur capacité à résister à l'usure et à l'abrasion. Cela aide à sélectionner les matériaux adéquats pour les projets de génie civil, notamment pour les chaussées, où la durabilité est cruciale. Le coefficient Micro Deval est directement lié à la durabilité des granulats et à leur aptitude à être utilisés dans des conditions d'usure mécanique intense.

5.3 ESSAI DE FRAGMENTATION DYNAMIQUE

5.3.1 OBJECTIF

L'objectif de cet essai est de déterminer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'effet de chocs répétés. Cet essai permet d'évaluer la tenue mécanique des granulats soumis à des sollicitations dynamiques (impacts), comme celles subies dans : les couches de roulement des chaussées, les bétons soumis aux vibrations et/ou les enrobés bitumineux.

Il complète d'autres essais mécaniques comme : Los Angeles (résistance à la fragmentation par chocs et frottements) et Micro-Deval (résistance à l'usure par frottement).

5.3.2 PRINCIPE

L'essai consiste à soumettre un échantillon de granulats à une série d'impacts verticaux produits par la chute libre d'un marteau de masse connue, à une hauteur déterminée, dans un moule cylindrique. Ces chocs fragmentent partiellement les granulats. La fraction de matière fine produite après l'essai est mesurée et permet d'estimer la résistance du granulat à la fragmentation dynamique. Plus la production de fines est faible, plus le granulat est résistant aux chocs.

5.3.3 MATERIEL UTILISE

- La machine de fragmentation dynamique comporte (cf. Figure 23) [27]:
 - Un moule cylindrique en acier trempé pour une usure minimale avec un fond de 102 ± 0.2 mm de diamètre intérieur, de 52 ± 1 mm de hauteur intérieure et de 10 ± 0.2 mm d'épaisseur.
 - Une masse de 14 ± 0.02 kg, en acier, de 100 ± 0.2 mm de diamètre. La masse est guidée dans sa chute libre par deux colonnes.
 - Une poignée permet de soulever la masse jusqu'à une hauteur, où elle se bloque, de 40 ± 0.5 cm au-dessus du niveau supérieur du matériau contenu dans le moule.
 - Un système de levier libère la masse qui retombe sur les granulats.
 - Un compteur de coups de masse.
 - L'appareil doit être fixé sur un support en béton d'au moins 25 kg.
- Les tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10 et 14mm.
- Une balance de précision.



Figure 23. Machine de fragmentation dynamique [5,32].

5.3.4 MATERIAUX ETUDIES

Pour ce TP, les étudiants peuvent utiliser des échantillons secs de gravier 3/8, gravier 8/15 et gravier 15/25.

5.3.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 459 et NF P18-574 de 1990 [33,34], en suivant les étapes ci-dessous :

- Le granulat doit être sec avec un séchage préalable à 105 °C jusqu'à masse constante.
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- Peser l'échantillon sec avec précision (M_0). Ce sera la masse de départ des granulats avant l'essai. La prise d'essai sera de 350 ± 1 g.
- Mettre l'échantillon pour essai dans le moule de l'appareil de fragmentation dynamique, en le répartissant uniformément.
- Laisser tomber la masse normalisée de la hauteur définie de manière régulière. Donner le nombre de corps de masse indiquée dans le tableau ci-dessous selon la classe granulaire.
- Après le dernier choc, récupérer soigneusement tout le matériau du moule, y compris les fragments fins.
- Tamiser le granulat après essai sur le tamis de 1,6mm.

h) Peser le refus au gramme près, soit (M_1) la masse de ce refus.

Tableau 10. Nombre de coups pour la fragmentation dynamique [33,34].

Classe granulaire (mm)	Nombre de coups de masse
4 / 6,3	16
6,3 / 10	22
10 / 14	28

5.3.6 PRESENTATION DES RESULTATS

La résistance des granulats à la fragmentation est exprimée par le coefficient fragmentation dynamique (**FD**) calculé comme suit :

$$FD = \frac{M_0 - M_1}{M_0} * 100$$

FD (%) : le coefficient de fragmentation dynamique.

M_0 (g) : la masse initiale de l'échantillon.

M_1 (g) : la masse finale de l'échantillon.

5.3.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les valeurs du coefficient fragmentation dynamique reflètent la dureté des graviers et permettent d'évaluer leur qualité en vue de leur utilisation dans la composition d'un béton ou des travaux de routes, comme le montre le Tableau 11:

Tableau 11. Type des graviers selon le coefficient Fragmentation dynamique.

Valeurs du coefficient Los Angles	Appréciation
$FD \leq 10$	Très résistant aux chocs
$10 < FD \leq 20$	Résistant
$20 < FD \leq 30$	Moyennement résistant
$FD > 30$	Fragile

5.3.8 CONCLUSION

L'essai de fragmentation dynamique permet d'évaluer la tenue mécanique des granulats face aux chocs répétés, simulant les conditions de service. Il est particulièrement utile pour : le choix des granulats pour bétons de structure, le dimensionnement des chaussées, et le contrôle qualité des carrières.

6 TP N°6 : ESSAIS DE RESISTANCE MECANIQUE

6.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS

La résistance à la compression du béton est un paramètre très essentiel pour évaluer la qualité et la performance d'un béton. Elle permet de mesurer la capacité du béton à résister à des charges de compression, ce qui est crucial pour les structures en béton soumises à des contraintes mécaniques, comme les ponts, les bâtiments et les routes.

6.1.1 OBJECTIF

L'objectif de l'essai de résistance à la compression est de déterminer la résistance maximale qu'une éprouvette de béton peut supporter sous l'effet d'une charge de compression. Cet essai permet de vérifier si le béton satisfait les exigences de résistance fixées par les normes ou les spécifications de projet. Cette résistance conditionne le classement des bétons selon la norme NA 16002 et la norme NF EN 206 [35,36], pour le dimensionnement des structures en béton armé et la vérification de conformité de la production sur chantier.

6.1.2 PRINCIPE

L'essai consiste à soumettre une éprouvette en béton à un effort de compression axial croissant jusqu'à la rupture.

6.1.3 MATERIEL UTILISE

- Éprouvettes de béton : Généralement sous forme de cubes (150mm x150 mm x150 mm) et (100mm x100 mm x100 mm) ou de cylindres de diamètre de 150 mm et hauteur de 300 mm ou diamètre 160 mm et hauteur 320 mm (cf. Figure 25).



Figure 24. Eprouvette de béton [27].

- Balance de précision : Pour peser les matériaux avant la fabrication du béton.

- Cure humide : Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes après démoulage.
- Presse hydraulique : Machine capable d'appliquer une charge de compression croissante sur les éprouvettes, d'une capacité de plus de 2000 kN (cf. Figure 25).



Figure 25. Machine d'essais de compression [15].

6.1.4 PREPARATION DES EPROUVETTES

- a) Préparation du béton : Le béton est préparé conformément au mélange spécifique, en respectant les proportions des matériaux (ciment, granulats, eau, et éventuellement des adjuvants).
- b) Remplissage des moules : Le béton frais est versé dans des moules cubiques ou cylindriques en trois couches égales. Chaque couche est compactée à l'aide d'une tige métallique ou d'un vibreur pour éliminer les poches d'air et assurer une bonne compacité du béton.
- c) Cure : Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et placées dans un bassin d'eau ou dans une chambre humide à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour la cure (cf. Figure 26). La durée de la cure est généralement de 7, 14 ou 28 jours, selon l'âge auquel la résistance doit être mesurée.



Figure 26. Conservation des éprouvettes béton [37].

6.1.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 5074-2 de 2020 et NF EN 12390-2 de 2019, en suivant les étapes ci-dessous :

- a) Préparation des éprouvettes : Les éprouvettes sont retirées du bain de cure avant l'essai et séchées en surface.
- b) Positionnement dans la presse : L'éprouvette est placée de façon centrée entre les plaques de la presse hydraulique pour que la charge soit appliquée uniformément sur toute la surface.
- c) Application de la charge : Une charge croissante est appliquée à un taux constant (généralement entre 0,2 et 0,4 MPa/s) jusqu'à rupture de l'éprouvette. La charge maximale atteinte au moment de la rupture est enregistrée.

6.1.6 PRESENTATION DES RESULTATS

La résistance à la compression est déterminée en fonction de la charge maximale appliquée au moment de la rupture et de la surface de la section de l'éprouvette comme suit :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

R_c (MPa) : la résistance à la compression.

F (N) : la charge maximale à la rupture.

S (mm²) : la surface de la section sollicitée.

6.1.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Résistance élevée : Une résistance à la compression élevée est un indicateur de la bonne qualité du béton. Cela signifie que le béton est capable de supporter de fortes charges de compression sans se fissurer ou s'effondrer.

Résistance faible : Une faible résistance peut indiquer des problèmes dans la formulation du béton (mauvais rapport eau/ciment, granulométrie inadéquate des agrégats) ou des conditions de cure non optimales.

6.1.8 IMPORTANCE DE L'ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

Contrôle qualité : Cet essai est fondamental pour vérifier que le béton utilisé sur les chantiers respecte les spécifications de résistance. C'est souvent l'essai le plus couramment utilisé pour le béton.

Durabilité et sécurité : Un béton de bonne résistance à la compression est crucial pour garantir la durabilité des ouvrages et la sécurité des utilisateurs.

6.1.9 CONCLUSION

L'essai de résistance à la compression du béton est une procédure standard utilisée dans les laboratoires pour évaluer la capacité du béton à supporter des charges compressives. Il permet de garantir la qualité du béton utilisé dans les constructions et de vérifier sa conformité aux normes et au cahier de charge du projet. Le bon déroulement de l'essai et l'interprétation correcte des résultats sont essentiels pour s'assurer que les structures en béton seront durables et sûres.

6.2 RESISTANCE A LA TRACTION DES BETONS

La résistance à la traction du béton est un paramètre fondamental en physique des matériaux pour le génie civil. Le béton étant un matériau fort en compression mais faible en traction, il est important de connaître sa résistance à la traction pour : estimer sa ductilité, évaluer le module d'élasticité, et déterminer le taux d'armature minimale à prévoir.

6.2.1 OBJECTIF

L'objectif de ce TP est de déterminer la résistance à la traction du béton, paramètre essentiel pour : l'étude du comportement mécanique global du béton, la prévention des fissurations (retrait, fluage, efforts de traction), et le dimensionnement des structures en béton armé.

6.2.2 PRINCIPE

Trois méthodes permettent d'évaluer la résistance à la traction :

1. Essai de traction directe est rare en laboratoire, car il est difficile à réaliser correctement.
2. Essai de traction par fendage (*essai brésilien* ou *essai de fendage sur cylindre*).
3. Essai de traction par flexion.

Dans ce TP, on utilise l'essai de traction par fendage selon les normes NA 5074-6 et NF EN 12390-6 [38,39]. Le principe repose sur l'application d'une charge de compression selon un

diamètre du cylindre en béton. Cette charge engendre dans la section médiane du cylindre des contraintes de traction perpendiculaires à l'axe de chargement qui provoquent la rupture par fendage.

6.2.3 MATERIEL UTILISE

- Éprouvettes de béton cylindres de diamètre de 150 mm et hauteur de 300 mm ou diamètre 160 mm et hauteur 320mm.
- Balance de précision : Pour peser les matériaux avant la fabrication du béton.
- Cure humide : Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes après démoulage.
- Presse hydraulique : Machine capable d'appliquer une charge de compression croissante sur les éprouvettes (cf. Figure 25).

6.2.4 PREPARATION DES EPROUVETTES

- a) Préparation du béton : Le béton est préparé conformément au mélange spécifique, en respectant les proportions des matériaux (ciment, granulats, eau, et éventuellement des adjuvants).
- b) Remplissage des moules : Le béton frais est versé dans des moules cubiques ou cylindriques en trois couches égales. Chaque couche est compactée à l'aide d'une tige métallique ou d'un vibreur pour éliminer les poches d'air et assurer une bonne compacité du béton.
- c) Cure : Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et placées dans un bassin d'eau ou dans une chambre humide à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pour la cure (cf. Figure 26). La durée de la cure est généralement de 7, 14 ou 28 jours, selon l'âge auquel la résistance doit être mesurée.

6.2.5 MODE OPERATOIRE

La réalisation de cette manipulation se fait selon les normes NA 5074-6 de 2015 et NF EN 12390-6 de 2009 [38,39], en suivant les étapes ci-dessous :

- a) Préparation des éprouvettes : Sortir les éprouvettes du bain de cure. Essuyer leur surface. Vérifier leur diamètre (D) et longueur (L).
- b) Positionnement dans la presse : Placer l'éprouvette horizontalement entre les deux cales de chargement. La machine hydraulique qui génère l'effort de compression est équipée de support en V permettant de centrer l'éprouvette (cf. Figure 27). Des baguettes en bois léger sont installées au fond du V et sur le dessus de l'éprouvette afin d'éviter les concentrations de contraintes dues aux imperfections de l'éprouvette.

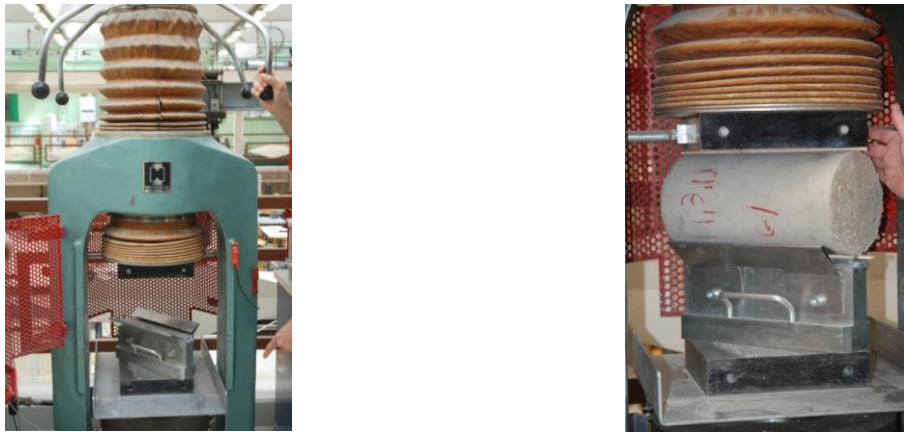


Figure 27. Équipement de la machine pour l'essai de fendage et positionnement de l'éprouvette [40].

- c) Application de la charge (cf. Figure 28) : Appliquer la charge progressivement à une vitesse constante ($\approx 0,04$ MPa/s). Observer le comportement : apparition d'une fissure verticale le long du cylindre. Noter la charge de rupture au moment de la fissuration.

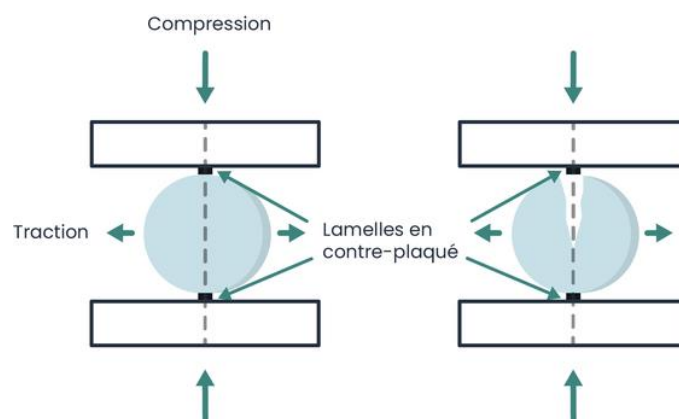


Figure 28. Essai par fendage sur une éprouvette de béton [37].

6.2.6 PRESENTATION DES RESULTATS

La résistance à la traction par fendage est déterminée en fonction de la charge maximale appliquée au moment de la rupture de l'éprouvette comme suit :

$$R_{tf} = \frac{2F}{\pi DL}$$

R_{tf} (MPa) : la résistance à la traction par fendage.

F (N) : la charge maximale à la rupture.

D (mm) : le diamètre de l'éprouvette.

L (mm) : la longueur de l'éprouvette.

6.2.7 INTERPRETATION DES RESULTATS

Une traction faible explique la rupture fragile du béton et la présence de fissures fines avant la rupture indique une microfissuration progressive du matériau.

6.2.8 CONCLUSION

L'essai de traction par fendage est une méthode indirecte, simple et fiable pour évaluer la résistance en traction du béton. Il permet d'obtenir un paramètre clé pour le dimensionnement des structures, notamment pour : le calcul des fissures, le contrôle de la qualité du béton et l'évaluation des performances mécaniques des formulations.

CONCLUSION

L'ensemble des travaux pratiques de physique des matériaux réalisés au cours de ce module vont permettre aux étudiants de comprendre et d'expérimenter les propriétés physiques fondamentales des matériaux utilisés en génie civil, notamment les granulats pour les bétons.

À travers les différents essais, à savoir, granulométrie, masse volumique, teneur en eau, absorption, propreté, résistance mécanique, ou encore essais Micro-Deval, Los Angeles et fragmentation dynamique, les étudiants vont pouvoir identifier les paramètres influençant la performance et la durabilité des matériaux de construction. Ces expérimentations vont leur offrir une approche concrète des normes et des méthodes utilisées dans le contrôle de qualité des matériaux, tout en développant une rigueur scientifique indispensable à la profession d'ingénieur civil.

Les résultats obtenus lors des essais mettent en évidence que la qualité d'un matériau ne dépend pas d'une seule propriété, mais de l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques qui interagissent entre elles. La maîtrise de ces paramètres permet de formuler des bétons adaptés aux conditions de mise en œuvre, aux contraintes mécaniques et aux exigences environnementales actuelles.

En conclusion, ce module de travaux pratiques constitue une étape essentielle dans la formation des futurs ingénieurs civils, leur permettant d'acquérir à la fois les compétences techniques, la méthodologie expérimentale et la conscience des enjeux de qualité et de durabilité dans le domaine des matériaux de construction.

REFERENCES

- [1] H. Soualhi, Rhéologie et Rhéométrie Des Bétons Conventionnels et Écologique: Influence des additions minérales sur la rhéologie des bétons à faible impact environnemental, Presses Ac, Presses Académiques Francophones, 2020.
- [2] Norme Européenne 933-1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 2012.
- [3] R. Dupain, J.-C. Saint-Arroman, Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire terminale STI Génie civil, BTS Bâtiment, BTS Travaux publics, DUT Génie civil, Master Pro géosciences Génie civil, écoles d'ingénieurs / R. Du, 4e édition, Casteilla, Paris, 2009.
- [4] Vialab, Vialab, (1935). <https://www.vialab.fr/fr/>.
- [5] Contolab, Contolab, (1979). <https://www.controlab.fr>.
- [6] Norme Française EN 932-2, Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats. Partie 2 : Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire, 1999.
- [7] NF P 18-540, Granulats - Définitions, conformité, spécifications., 1997.
- [8] Norme Française EN 12620, Granulats pour béton, 2008.
- [9] J. Festa, G. Dreux, Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8e édition, Eyrolles, 1998.
- [10] NF P18-554, Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, (1990).
- [11] NF P18-555, Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient

- d'absorption et teneur en eau des sables, (1990).
- [12] Norme Française EN1097-3, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire, 1998.
 - [13] NA 255, Mesure de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau des gravillons et roches, 2006.
 - [14] Proviteq, Proviteq, (1979). <https://www.proviteq.com/produits-genie-civil.html>.
 - [15] Labo-3R, Labo, 3R, (1987). <https://3r-labo.com/genie-civil/>.
 - [16] NA 255, Norme Algérienne - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2024.
 - [17] Norme Française EN 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption, 2022.
 - [18] Fisher-science, <https://www.fishersci.fr>, (1902).
 - [19] NA 5129-5, Norme Algérienne - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée, 2021.
 - [20] Norme Française EN 1097-5, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée, 2008.
 - [21] CTRMAT, CTRMAT, (2023) <https://www.ctrmat.fr>.
 - [22] Norme Française EN 933-8+A1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de

- sable, (2015).
- [23] NA 455, Norme Algérienne pour l'essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - évaluation des fines - Équivalent de sable, (2018).
 - [24] Wikimedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/user:Roulex_45, (2008).
 - [25] P18-591, Granulats - Détermination de la propreté superficielle, 1990.
 - [26] NA 463, Norme Algérinne - Détermination de la propreté superficielle des gravillions et ballasts (fraction > 2mm), 1990.
 - [27] STDE, Smart testing & drilling equipment, (2012).
<https://www.stde.fr/stde-granulats//>.
 - [28] Norme Française EN 1097-2, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, 2020.
 - [29] NA 5129-2, Norme Algérienne Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, 2021.
 - [30] NA 5128, Norme Algérienne Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval), (2011).
 - [31] Norme Française EN 1097-1, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval), 2023.
 - [32] Novarent, <https://www.novarent.fr>, (2021).
 - [33] NA 459, Norme Algérienne Granulats - Essai de fragmentation dynamique, 1990.
 - [34] P18-574, Granulats - Essai de fragmentation dynamique, 1990.

- [35] NA 16002, Norme Algérienne Béton - Spécification, performances, production et conformité, (2004).
- [36] NF EN 206, Béton - Spécification, performances, production et conformité, 2016.
- [37] Suitedispatch, <https://www.concretedispatch.eu/blog/controles-qualite-beton-durci-resistance-beton/>, (2017). <https://www.concretedispatch.eu>.
- [38] NA 5074-6, Norme Algérienne - Essais pour béton durci - détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes, 2015.
- [39] Norme Européenne 12390-6, Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes, 2009.
- [40] X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, F. Soleilhet, Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature, 2018.