

## **Chapitre I : CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DES BETONS A ETUDIER**

Le **polyéthylène téréphtalate (PET)** fera partie des constituants du béton à étudier.

Par ailleurs la légèreté et la possibilité de supporter des charges de compression figurent parmi les principales propriétés que doivent avoir les bétons légers. L'étude de l'influence du PET sur ces propriétés est alors le but principal de cette étude.

La détermination de la masse volumique et de la résistance à la compression du nouveau béton léger est donc nécessaire.

Mais il serait intéressant d'étudier deux types de bétons qui se distinguent par la quantité du ciment qu'ils contiennent en vue de comparer leurs comportements face à la quantité du PET introduite.

Pour cela, le travail se divise en deux grandes parties :

- ❖ La première partie consiste à concevoir les types des bétons légers à étudier.
- ❖ La deuxième partie détermine expérimentalement les principales caractéristiques telles que la masse volumique et la résistance à la compression des types des bétons conçus.

### **I.1 - CONCEPTION**

Nous savons que les caractéristiques d'un matériau dépendent de la nature et de la quantité des éléments qui le constituent.

Le **ciment**, le **sable**, les **graviers** et l'**eau** sont les **principaux constituants** d'un béton. Nous nous servirons du mélange de ciment, du sable et de l'eau comme **matériau de base des bétons légers** à étudier.

Pour cette étude, nous avons dit que nous utiliserons deux types de matériau de base qui se différencient par la teneur en ciment.

Les matériaux de base que nous considérons sont des matériaux qui existent déjà ou qui ont été l'objet d'une étude.

Nous désignons par « **MATRICE M1** » et « **MATRICE M2** » ces deux types de matériau.

- **MATRICE M1**

Si **C**, **S** et **E** sont respectivement les masses du ciment, du sable et de l'eau, nous définissons cette matrice par les rapports **S/C** et **E/C** tels que :

$$\mathbf{S/C = 2,7}$$

$$\mathbf{E/C = 0,4}$$

Ces valeurs caractérisent la composition d'un mortier fondu respectant la norme **NF P15-315**.

- **MATRICE M2**

Nous définissons ce matériau de base par :

$$\mathbf{S/C = 0,8}$$

$$\mathbf{E/C = 0,5}$$

Les valeurs de ces rapports étaient celles adoptées par **Karim KMILED** [11] lors de ses travaux de recherche sur les bétons légers.

En ajoutant alors du **polyéthylène téréphtalate (PET)** dans l'une et l'autre de ces matrices, on obtient les deux types de bétons à étudier que nous appelons « **BETONS B1** » et « **BETONS B2** ». Les variantes de ces derniers sont obtenues en faisant varier la quantité de PET dans ces bétons.

Pour ce travail de mémoire, nous envisageons d'étudier cinq variantes pour chaque type de béton défini précédemment en mélangeant le **PET** et les éléments constitutifs de chaque matrice.

Ces variantes se distinguent l'une de l'autre par les valeurs **0 , 1/10 , 1/6 , 1/3 , 1/2** du rapport  **$M_{PET} / C$**  où  **$M_{PET}$**  est la masse du PET introduite dans la matrice et **C** le dosage du ciment utilisé.

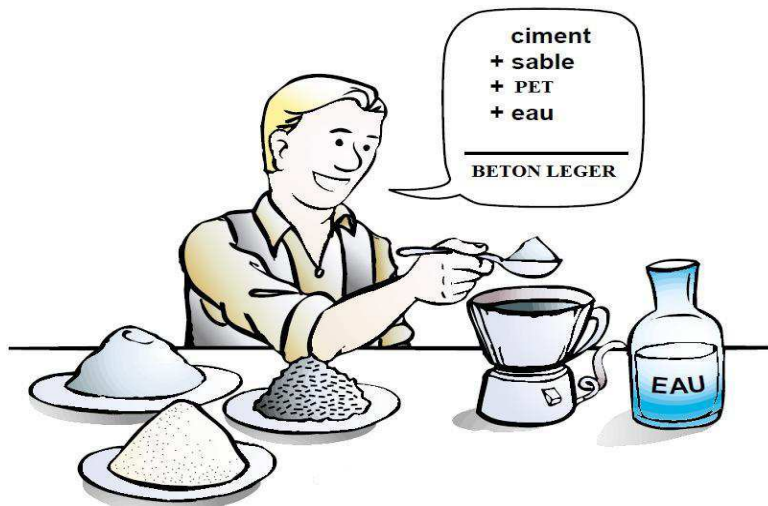
Le travail expérimental demandé pour cette deuxième partie comprend :

- **la préparation et la caractérisation des constituants**
- **la préparation des échantillons des bétons à étudier**
- **la détermination des masses volumiques des bétons étudiés**
- **la caractérisation mécanique des bétons étudiés**

## **I.2 - PREPARATION ET CARACTERISATION DES CONSTITUANTS**

Les bétons que nous allons étudier sont composés de :

- **ciment CEM I 42,5**
- **l'eau**
- **polyéthylène téréphtalate (PET)**
- **sable**



**Photo II.1 : Préparation des constituants**

### **I.2.1 - CIMENT CEM I 42,5**

Le ciment CEM I est un des types de ciment qui sont destinés à des travaux courants de béton.



**Photo II.2 : Ciment CEM I 42,5**

La surface spécifique de Blaine de ce type de ciment est en générale de l'ordre de  $3304 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

**I.2.1.1 - Composition chimique**

**Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CEM I 42,5**

| <b>Constituants</b> | <b>CaO</b> | <b>SiO<sub>2</sub></b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>SO<sub>3</sub></b> | <b>K<sub>2</sub>O</b> | <b>Na<sub>2</sub>O</b> | <b>MgO</b> | <b>Perte au feu</b> |
|---------------------|------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------|---------------------|
| <b>Teneur [%]</b>   | 63,89      | 21,35                  | 4,59                               | 5,52                               | 2,72                  | 0,41                  | 0,13                   | 1,37       | 2,47                |

**I.2.1.2 - Composition minéralogique**

**Tableau II.2 : Composition minéralogique du clinker**

| <b>Constituants</b> | <b>C<sub>3</sub>S</b> | <b>C<sub>2</sub>S</b> | <b>C<sub>3</sub>A</b> | <b>C<sub>4</sub>AF</b> |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Teneur [%]</b>   | 47,15                 | 25,69                 | 2,84                  | 16,78                  |

### **I.2.2 - EAU**

L'eau du robinet de la société JIRO sy RANO MALAGASY (JIRAMA) est l'eau à utiliser. Ses principales caractéristiques sont indiquées dans le tableau ci-après :

**Tableau II.3 : Caractéristiques de l'eau de JIRAMA**

| <b>CONSTITUANTS</b>                    | <b>CARACTERISTIQUES</b> |
|--|-------------------------|
| acidite en pH                          | 7,2 à 8,5               |
| carbonates + bicarbonates alcalins (%) | 0,0028                  |
| chlorure [mg/l]                        | 3,55 à 8,87             |
| insoluble (%)                          | 0                       |
| ions soufre (%)                        | 0                       |
| matières dissoutes (%)                 | 0,0034 à 0,005          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)      | 0                       |
| NO <sub>3</sub> (%)                    | 0                       |
| sucres (%)                             | 0                       |
| sulfates en SO <sub>3</sub> (%)        | 0                       |
| sulfites en S (%)                      | 0                       |
| zinc (%)                               | 0                       |

### **I.2.3 - BOUTEILLES EN PET**

Nous avons choisi les bouteilles en PET usagées car on en trouve partout. Mais pour que le mélange avec les autres constituants du béton que nous allons étudier soit possible, il faut que ces bouteilles soient réduites en poudre ou en petites lamelles.



**Photo II.3 : Bouteilles en PET réduites en lamelles**

**I.2.3.1 - Caractéristiques mécaniques du PET**

**Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques du PET**

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Coefficient de frottement</b>  | 0,20 à 0,40 |
| <b>Coefficient de Poisson</b>   | 0,37 à 0,44 |
| <b>Dureté - Rockwell</b>  | M94 - 101   |
| <b>Module de tension (GPa)</b>  | 2 à 4       |
| <b>Résistance à la traction (Mpa)</b>                                   | 80          |
| <b>Résistance aux chocs (J.m<sup>-2</sup>)</b>                          | 13 à 35     |
| <b>Conductivité thermique à 23°C (W. m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b> | 0,15 à 0,40 |

**I.2.3.2 - Caractéristiques physiques du PET**

**Tableau II.5 : Caractéristiques physiques du PET**

|                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| <b>Absorption d'eau (%)</b>        | ≤ 0,70      |
| <b>Densité</b>                     | 1,30 à 1,40 |
| <b>Indice de réfraction</b>        | 1,58 à 1,64 |
| <b>Indice limite d'oxygène (%)</b> | 21          |
| <b>Inflammabilité</b>              | HB          |
| <b>Résistance à la radiation</b>   | Bonne       |

**I.2.3.3 - Caractéristiques thermiques du PET**

**Tableau II.6 : Caractéristiques thermiques du PET**

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Chaleur spécifique (J.K<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>)</b>              | 1200 à 1350 |
| <b>Coefficient d'expansion thermique (10<sup>-6</sup>.K<sup>-1</sup>)</b> | 20 à 80     |
| <b>Conductivité thermique à 23°C (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>    | 0,15 à 0,40 |
| <b>Température de déflexion à la chaleur – 0,45 MPa (°C)</b>              | 115         |
| <b>Température de déflexion à la chaleur – 1,80 MPa (°C)</b>              | 80          |
| <b>Température maximale d'utilisation (°C)</b>                            | 115 à 170   |
| <b>Température minimale d'utilisation (°C)</b>                            | - 40 à - 60 |



**I.2.3.4 - Caractéristiques électriques du PET**

**Tableau II.7 : Caractéristiques électriques du PET**

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Constantes diélectriques à 1 MHz</b>             | 3           |
| <b>Facteur de dissipation à 1 kHz</b>               | $2.10^{-3}$ |
| <b>Résistance diélectrique (kV.mm<sup>-1</sup>)</b> | 17          |
| <b>Résistivité de surface (Ohm/carré)</b>           | $10^{13}$   |

**I.2.3.5 - Résistances chimiques du PET**

**Tableau II.8 : Résistances chimiques du PET**

|                                  |                     |
|----------------------------------|---------------------|
| <b>Acides - concentrés</b>       | Bonne - Mauvaise    |
| <b>Acides - dilués</b>           | Bonne               |
| <b>alcalins</b>                  | Mauvaise            |
| <b>Alcools</b>                   | Bonne               |
| <b>Cétones</b>                   | Bonne - Passable    |
| <b>Graisses et huiles</b>        | Bonne               |
| <b>Halogènes</b>                 | Passable – Mauvaise |
| <b>Hydrocarbures halogénés</b>   | Bonne - Mauvaise    |
| <b>Hydrocarbures aromatiques</b> | Bonne - Passable    |

## I.2.4 - SABLE

Le sable de rivière est généralement utilisé pour la fabrication des bétons courants. Nous l'avons ainsi choisi comme constituant du béton à étudier.



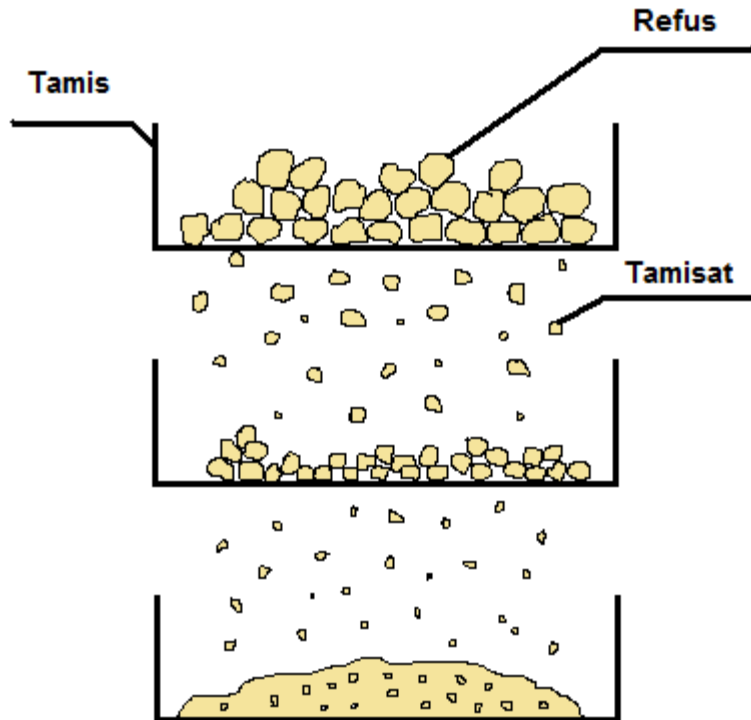
*Photo II.4* : Sable de rivière

### I.2.4.1 - GRANULOMETRIE

#### 1- Définitions

- La **granulométrie** est la détermination des dimensions des grains.
- La **granularité** est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.
- Le **tamisat** est la quantité de l'échantillon du matériau passant à travers un tamis donné.

Le **refus** est la quantité du matériau retenue par ce même tamis.



**Photo II.5** : Refus et tamisat sur un tamis

## **2- But de l'analyse granulométrique**

Selon la norme NF P 18-304, l'analyse granulométrique permet de définir la classification des granulats d'après les dimensions de leurs grains, celles-ci étant exprimées en ouvertures de tamis à mailles carrées mesurées en millimètres. Cette norme s'applique aux granulats d'origines naturelle et artificielle utilisés dans le domaine des bâtiments et des travaux publics. La granularité est déterminée par tamisage.

## **3- Classification des granulats**

Les granulats sont triés par dimension au moyen des tamis (mailles carrés). Un granulat est dit « granulat  $d/D$  » si  $d$  et  $D$  sont respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions. Mais pour le cas où  $d$  est inférieure à 2mm les granulats se désignent par  $0/D$ .

D'après la norme NFP18-101, les granulats peuvent être classés selon le tableau ci-après.

**Tableau II.9 : Classes granulaires des granulats**

| APPELLATION                 |        | Dimension de la maille des tamis en (mm) |
|-----------------------------|--------|--|
| Pierres cassées et cailloux | Gros   | 50 à 80                                  |
|                             | Moyens | 31,5 à 50                                |
|                             | Petits | 20 à 31,5                                |
| Gravillons                  | Gros   | 12,5 à 20                                |
|                             | Moyens | 8 à 12,5                                 |
|                             | Petits | 5 à 8                                    |
| Sable                       | Gros   | 1,25 à 5                                 |
|                             | Moyens | 0,31 à 1,25                              |
|                             | Petits | 0,08 à 0,31                              |
| Fillers                     |        | Inférieur à 0,08                         |

Ce tableau montre que la classe granulaire du sable est **0/5**.

#### **4- Domaine d'application**

L'analyse granulométrique ne concerne ni les éléments inférieurs à 0,08 mm ni ceux qui dépassent 80 mm.

#### **5- Principe de l'essai**

L'échantillon du matériau à étudier est versé dans le tamis ayant la plus grande ouverture de maille et qui fait partie d'une colonne de tamis emboîtés les uns sur les autres et placés du bas vers le haut selon les dimensions croissantes des ouvertures de leurs mailles carrées. La vibration de cette colonne au moyen d'une machine à tamiser électrique permet de classer les différents grains constituant l'échantillon.

## 6- Tamis

Les dimensions des ouvertures des tamis sont normalisées (NF X 11-501).

**Tableau II.10 : Modules et dimensions nominales des tamis**

|                   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Module</b>     | <b>20</b> | <b>21</b> | <b>22</b> | <b>23</b> | <b>24</b> | <b>25</b> | <b>26</b> | <b>27</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>30</b> |
| <b>Tamis (mm)</b> | 0,080     | 0,100     | 0,125     | 0,160     | 0,200     | 0,250     | 0,315     | 0,400     | 0,500     | 0,630     | 0,800     |
| <b>Module</b>     | <b>31</b> | <b>32</b> | <b>33</b> | <b>34</b> | <b>35</b> | <b>36</b> | <b>37</b> | <b>38</b> | <b>39</b> | <b>40</b> | <b>41</b> |
| <b>Tamis (mm)</b> | 1,00      | 1,25      | 1,60      | 2,00      | 2,50      | 3,15      | 4,00      | 5,00      | 6,30      | 8,00      | 10,00     |
| <b>Module</b>     | <b>42</b> | <b>43</b> | <b>44</b> | <b>45</b> | <b>46</b> | <b>47</b> | <b>48</b> | <b>49</b> | <b>50</b> |           |           |
| <b>Tamis (mm)</b> | 12,5      | 16,0      | 20,0      | 25,0      | 31,5      | 40,0      | 50,0      | 63,0      | 80,0      |           |           |

### **I.2.4.2 - GRANULOMETRIE DU SABLE UTILISE**

Pour l'analyse granulométrique, nous avons utilisé les appareils suivants :

- d'une balance de marque TESTUT type BINGO N°XB13134 (Max 6kg 230 V 50Hz 7 VA)
- d'une balance de précision (Max 250g )
- d'une tamiseuse électrique de marque FRISTSCH 3 PRO
- d'une série de tamis de modules respectifs 21, 23, 26, 29, 32, 34, 38.
- d'un fond étanche



**Photo II.6** : Balance TESTUT type BINGO N°XB13134



**Photo II.7** : Balance de précision



**Photo II.8 : Tamiseuse électrique**



**Photo II.9 : Tamis de mailles carrées**



**Photo II.10 : Fond étanche**

### **1- Préparation de l'échantillon**

L'échantillon du sable à étudier doit être bien sec. En pratique, sa masse M en kilogramme est déterminée par la relation :

$$M = 0,2 D$$

Où D est le diamètre du plus gros grain du sable exprimé en millimètre.

Nous avons vu que la classe granulaire du sable est 0/5. Alors pour notre cas, nous prenons D = 5mm. La masse de l'échantillon que nous utilisons est donc :

$$M = 1\text{kg}$$

### **2- Description de l'essai**

Les principales opérations suivantes sont à effectuer dans l'ordre :

- Peser l'échantillon
- Emboîter les tamis les un sur les autres sur la tamiseuse électrique
- Verser l'échantillon dans le tamis supérieur de la colonne
- Mettre la tamiseuse en marche
- Peser les refus et les tamisats après arrêt de la tamiseuse



a- Pesage de l'échantillon

La balance de marque TESTUT type BINGO N°XB13134 (Max 6 Kg 230 V 50Hz 7 VA) permet de régler la masse de l'échantillon à 1kg.

Pour cela, avant de procéder au pesage, il faut mettre à zéro la balance en tenant compte du poids propre du récipient qui va contenir l'échantillon à peser.



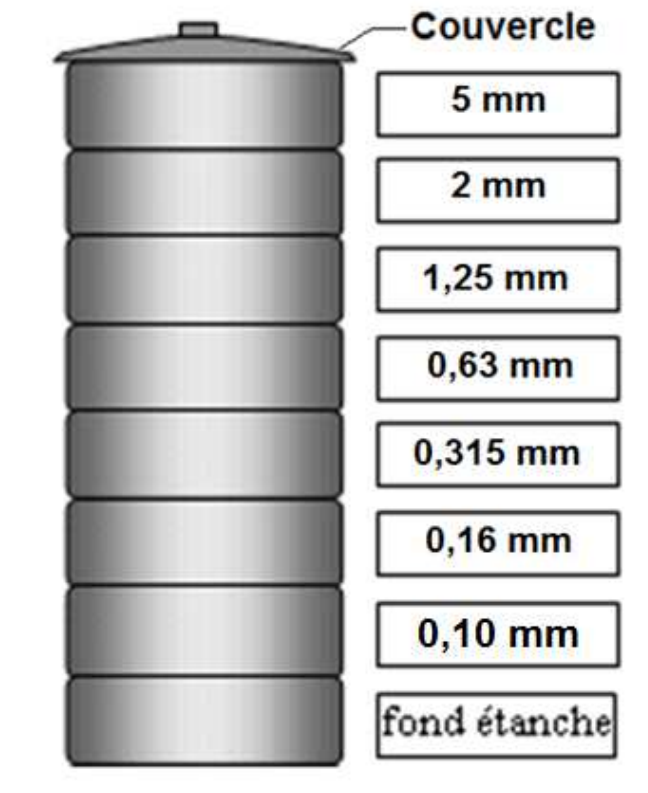
**Photo II.11 : Pesage de l'échantillon de sable**

b- Emboîtement des tamis

Les tamis sont disposés l'un après l'autre selon l'ordre croissant des ouvertures des mailles du bas vers le haut pour obtenir une colonne de tamis. On place sous cette colonne un fond étanche pour la récupération des fillers.



**Photo II.12** : Emboîtement des tamis utilisés



**Photo II.13** : Colonne des tamis et le fond étanche

c- Versement de l'échantillon dans le tamis supérieur de la colonne



**Photo II.14 : Versement de l'échantillon dans le tamis supérieur**

Pour éviter toute perte de matériau pendant le tamisage, on met un couvercle sur le tamis placé en haut de la colonne.

d- Mise en fonctionnement de la tamiseuse

La colonne de tamis contenant l'échantillon est placée sur la tamiseuse électrique. Avant la mise en fonctionnement de celle-ci, on règle l'amplitude de vibration à 3 mm et le temps de tamisage à 10 min.



**Photo II.15 : Tamiseuse en marche**

### **3- Résultats de l'essai**

#### **a- Refus sur les tamis**

Une fois que la tamiseuse s'arrête de vibrer, on pèse le refus sur chaque tamis. Ce qui permet de tracer la courbe granulométrique.

La construction d'une courbe granulométrique se fait dans un repère rectangulaire. Les valeurs des ouvertures des mailles des tamis sont portées sur l'axe des abscisses en ordre croissant de gauche à droite selon une graduation logarithmique.

L'axe des ordonnées est gradué linéairement en pourcentage de la masse totale de l'échantillon.

b- Refus et tamisats cumulés sur les tamis

➤ Refus cumulés

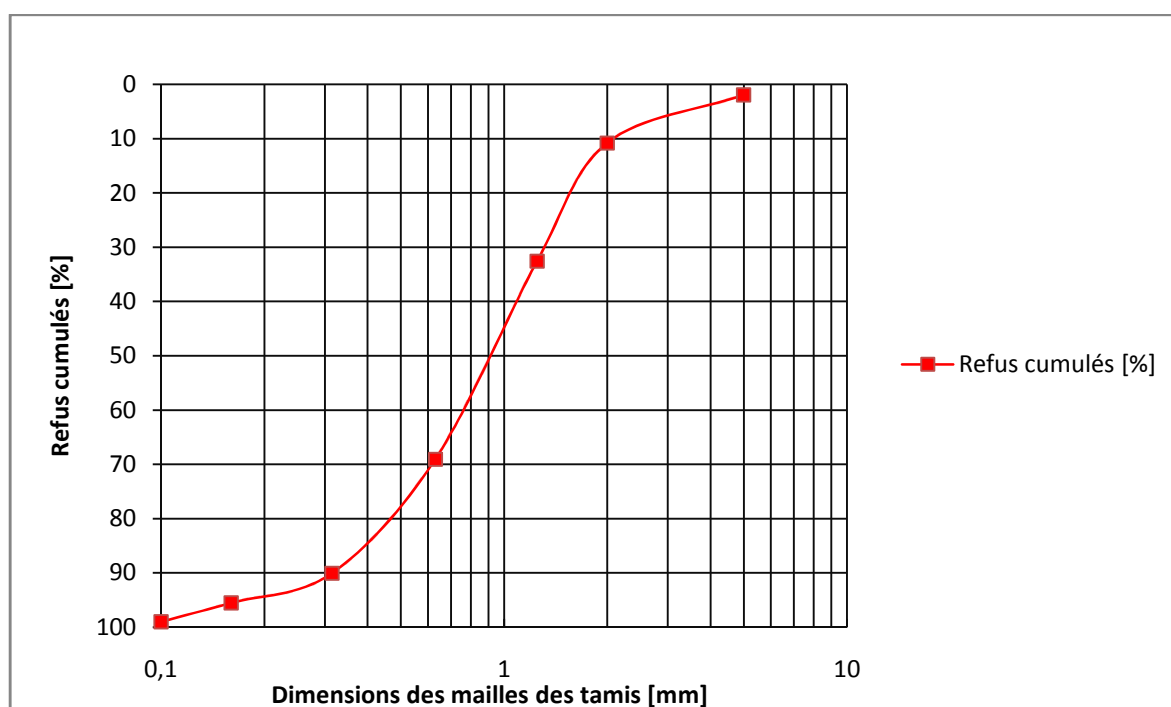
La masse des refus cumulés dans la colonne des tamis s'obtient de la façon suivante :

- Peser le refus sur le tamis ayant la plus grande maille
- Peser le refus sur le tamis immédiatement inférieur avec celui du tamis précédent. La masse ainsi obtenue est la masse du refus cumulé sur ce dernier tamis
- Poursuivre cette opération pour tous les tamis dans l'ordre des ouvertures décroissantes

La somme de la masse des refus cumulés sur tous les tamis de la colonne et celle du tamisat recueilli par le fond étanche doit être théoriquement égale à la masse de l'échantillon versé initialement dans cette colonne.

**Tableau II.11 : Refus cumulés**

| Dimensions des mailles des tamis [mm] | Refus cumulés |           |
|---------------------------------------|---------------|-----------|
|                                       | Refus [g]     | Refus [%] |
| 5                                     | 19,5          | 1,95      |
| 2                                     | 107,5         | 10,75     |
| 1,25                                  | 325           | 32,5      |
| 0,63                                  | 690           | 69        |
| 0,315                                 | 900           | 90        |
| 0,160                                 | 955           | 95,5      |
| 0,10                                  | 990           | 99        |



**Figure II.1 : Refus cumulés obtenus selon l'ouverture des mailles**

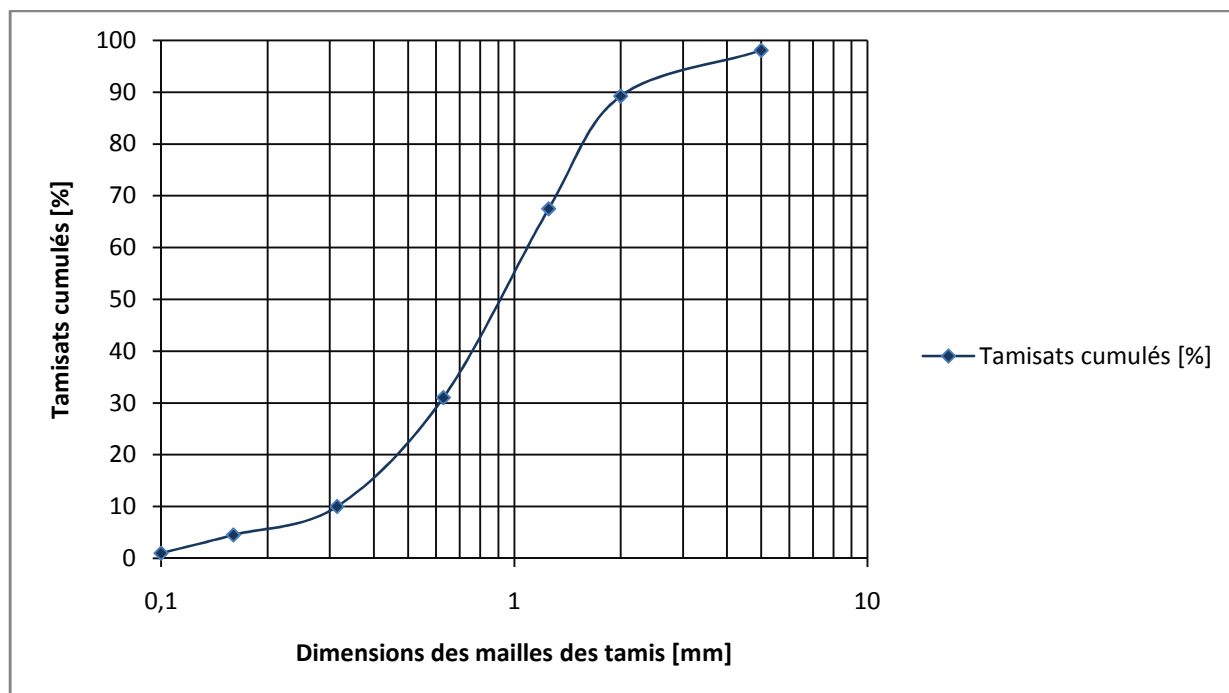
➤ Tamisats cumulés

La masse des tamisats cumulés est obtenue en suivant la démarche adoptée pour les refus cumulés mais en sens inverse.

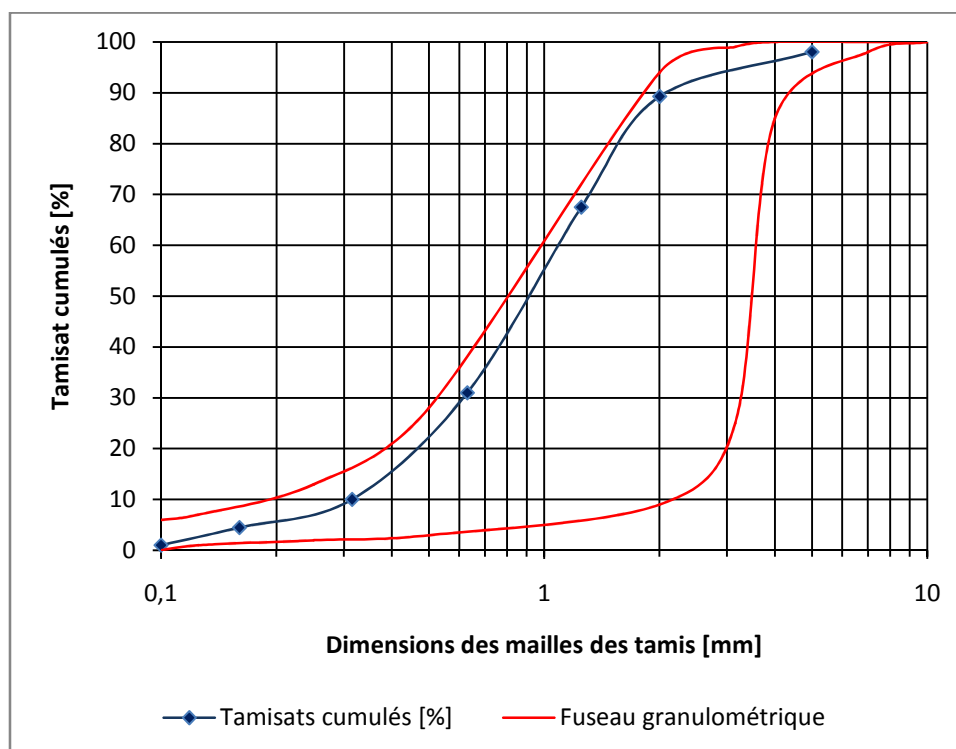
Les résultats obtenus permettent de dresser les tableaux suivants et de construire les courbes leur correspondant.

**Tableau II.12 : Tamisats cumulés**

| Dimensions des mailles des tamis [mm] | Tamisats cumulés |              |
|---------------------------------------|------------------|--------------|
|                                       | Tamisats [g]     | Tamisats [%] |
| 5                                     | 980,50           | 98,05        |
| 2                                     | 892,5            | 89,25        |
| 1,25                                  | 675              | 67,5         |
| 0,63                                  | 310              | 31           |
| 0,315                                 | 100              | 10           |
| 0,160                                 | 45               | 4,5          |
| 0,10                                  | 10               | 1            |



**Figure II.2 : Tamisats cumulés obtenus selon l'ouverture des mailles**



**Figure II.3 : Tamisats cumulés et fuseau granulométrique en fonction de l'ouverture des mailles**

**Interprétations**

La figure II.3 montre bien que la courbe granulométrique du sable utilisé s'inscrit dans le fuseau granulométrique défini par la norme NF XP DTU 64.1.

**I.2.5 - MASSE VOLUMIQUE**

La masse volumique est une des principales propriétés physiques d'un béton léger. Il est alors intéressant de connaître la masse volumique de chaque constituant de ce type de béton.

D'une façon générale, la masse volumique  $\rho$  d'un corps s'obtient par la formule :

$$\rho = \frac{\text{masse du corps}}{\text{volume du corps}} \quad (\text{II} - 1)$$



Il existe deux types de masses volumiques :

- la masse volumique apparente
- la masse volumique absolue

En effet, l'observation d'un granulats montre que les grains qui le constituent sont entourés de vide. Le volume d'un granulats peut désigner alors deux choses : le volume des grains seuls ou le volume des grains avec l'air qui les entoure.

Par définition, le volume des grains seuls est appelé « **volume absolu** » et celui des grains avec l'air « **volume apparent** ».

### I.2.5.1 - Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un corps est la masse de ce corps par unité de volume apparent. Elle se calcule par la relation :

$$\rho_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}} \quad (\text{II} - 2)$$

$\rho_{ap}$  : masse volumique apparente [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$M_s$  : masse du corps sec [kg]

$V_{ap}$  : volume apparent [ $\text{m}^3$ ]

- a- Pour les **matériaux solides** non homogènes comme les bétons, on fabrique des échantillons de forme géométrique (cylindrique, cubique...) dont on peut déterminer le volume.



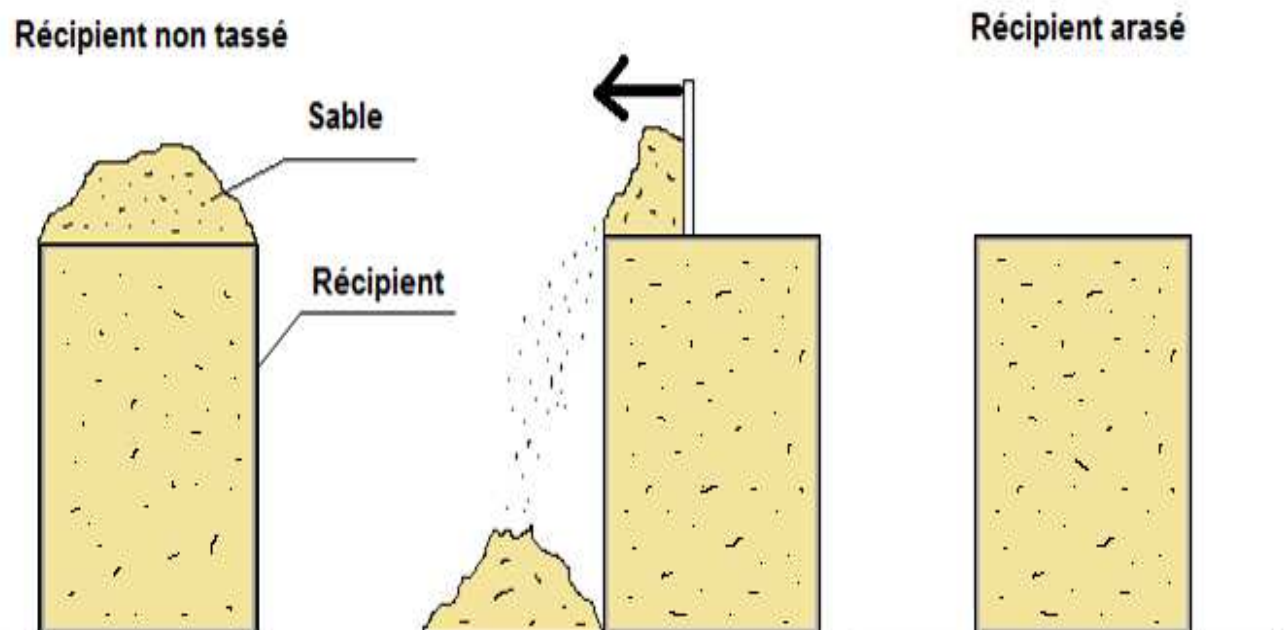
b- Pour les **matériaux incohérents** (ensemble de grains, granulat), on utilise un récipient de volume  $V_{ap}$  et de masse connus.

La mesure de la masse volumique apparente s'effectue de la façon suivante :

- remplir le récipient du matériau incohérent considéré sans le tasser
- araser le récipient ainsi rempli
- peser le récipient arasé

La masse  $M_S$  du matériau contenu dans le récipient arasé est la différence entre la masse de ce dernier et celle du récipient vide.

La masse volumique apparente du matériau incohérent s'obtient donc par le quotient de la masse  $M_S$  par le volume  $V_{ap}$ .



**Photo II.16 : Volume apparent d'un matériau incohérent**

### **I.2.5.2 - Masse volumique absolue**

La masse volumique absolue d'un corps est la masse de ce corps par unité de volume absolu. Elle se détermine par la formule :

$$\rho_{ab} = \frac{M_s}{V_{ab}} \quad (\text{II} - 3)$$

$\rho_{ab}$  : masse volumique absolue [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

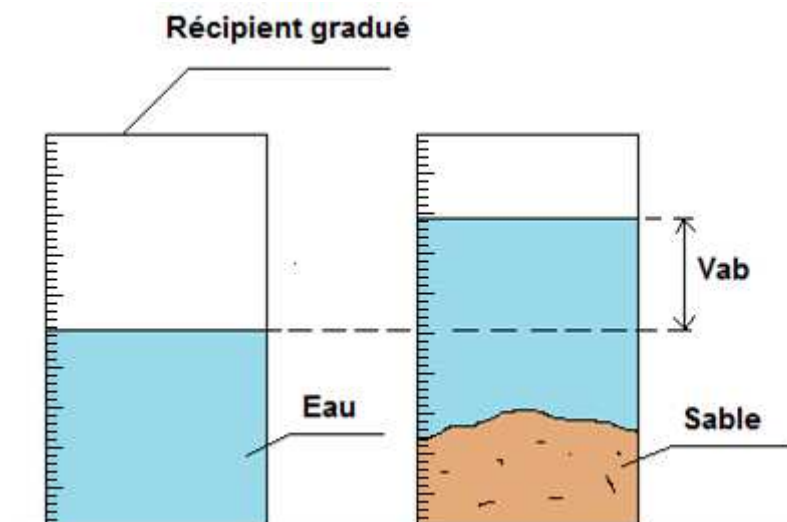
$M_s$  : masse du corps sec [kg]

$V_{ab}$  : volume absolu [ $\text{m}^3$ ]

Pour les **matériaux incohérents** :

On utilise la « **méthode de l'éprouvette graduée** ». Pour cela, le volume absolu d'un échantillon du matériau est mesuré en immergeant cet échantillon dans un récipient gradué contenant de l'eau. Le volume d'eau déplacée représente le volume absolu de l'échantillon étudié. Mais pour supprimer toutes les bulles d'air entre les grains du matériau incohérent, on agite le contenu du récipient gradué avec une baguette en verre.

La connaissance de la variation de la hauteur d'eau permet alors d'évaluer le volume absolu de l'échantillon.



**Photo II. 17 : Volume absolu d'un matériau incohérent**

### **Remarques**

- Cette méthode est aussi valable pour un corps solide homogène de forme quelconque.

- Pour le cas du ciment, on utilise du pétrole au lieu de l'eau car le ciment réagit chimiquement avec cette dernière. Par ailleurs, il faut noter que le pétrole est très volatile, par conséquent l'expérience doit se faire dans un environnement à température constante et proche de 20°C.

### **I.2.6 - MASSES VOLUMIQUES DES CONSTITUANTS**

Les résultats expérimentaux que nous avons obtenus pour la mesure des masses volumiques des constituants sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau II.13 : Masses volumiques des constituants**

|                     | <b>Masse volumique<br/>apparente<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Masse volumique<br/>absolue<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> |
|---------------------|---|---|
| <b>Ciment CEM I</b> | 1000  | 3090  |
| <b>Sable</b>        | 1500  | 2610  |
| <b>PET</b>          | 560   | 1400  |