

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur**

**Et de la Recherche Scientifique**

**Université A. MIRA - Bejaïa –**



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vu d'obtention du diplôme de Master en Génie Civil*

*Option : Matériaux et structures*

*Thème :*

*Etude des caractéristiques mécaniques et  
la durabilité des bétons et mortiers a base  
de fibres métalliques*

*Réalisée par :*

*M<sup>elle</sup> : MADI Katia*

*M<sup>elle</sup> : FERCHOULI Razika*

*Encadré par:*

*Mme: S.ATTIL*

*Mr : K.MOUSSACEB*

*Soutenu devant le jury:*

*M<sub>r</sub> : N.CHELOUAH*

*M<sub>r</sub> : M.BOUZEROURA*

*Promotion : Année 2013-2014.*

## *Remerciements*

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auxquels nous avons pu achever ce mémoire.*

*On tient tout d'abord à remercier sincèrement notre promotrice M<sup>me</sup> S.ATTIL pour nous avoir proposé ce sujet aux multiples facettes que nous avons énormément appris. Merci pour sa patience, pour tout le temps consacré au suivi de ce travail, ses conseils, ses orientations, et pour les nombreuses discussions enrichissantes qu'on en a pu avoir.*

*Un immense merci à M<sub>r</sub>: K.MOUSSACEB pour avoir Co-encadré avec patience. Merci pour sa disponibilité, sa générosité, sa rigueur scientifique et ses nombreux conseils, qui nous avons été très précieux. On a pris un grand plaisir à travailler avec lui.*

*Nous remercions les membres du jury M<sub>r</sub>. :N.CHELOUAH et*

*Mr : BOUZEROURA, de s'être donné la peine d'examiner notre modeste travail.*

*Un grand merci à M<sub>r</sub>: D.ZOUBIRI, pour son soutien et surtout son aide au laboratoire, ainsi que Mr : S.AMEGHAR, et M<sup>elle</sup> : L.SASSI.*

*Merci à M<sub>r</sub>: BOUZKRI, BOUHIRED et, à toute l'équipe technique du laboratoire LTP-  
Est de Bejaia.*

*A tous ceux qui nous ont aidés, par une grande collaboration ou par une tendre parole.*

# *Dédicaces*

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*A mes chers frères : A/Aziz, Hichem, A/Malek ainsi que sa femme Lynda et ses enfants.  
A mes chères sœurs : Nadjet, Leyla, Souraya, Kahina, Lynda. Leurs maris : Zahir, Bernard, Nabil, Mouhoub, ainsi que leurs enfants.*

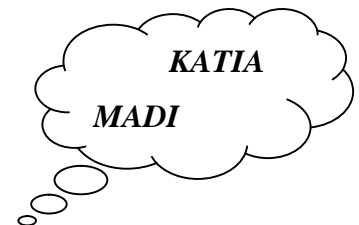
*A mes grands-parents : Mouhand, Mustafa (que dieu aie son âme), Baya, Houria.*

*A mes tantes et oncles.*

*A chaque cousins et cousines.*

*A mon binôme : Razika et sa famille.*

*A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.*



# *Dédicaces*

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour et à la mémoire de mes grands parents paternels.*

*A mes chers frères : Brahim, Riad, Mourad.*

*A mes grands parents maternels : A/Aziz, Baya,*

*A mes chères tantes : Lamia, Fadila, Sadika, Naima, Rbiha. et leurs maris : ainsi que leurs enfants.*

*A mes chers oncles : Nassim, Karim, Salim, et leurs femmes.*

*A chaque cousins et cousines.*

*A M<sup>r</sup> F/Mehidi qui m'a encouragé et m'a orienté.*

*A M<sup>r</sup> K /Mehidi qui m'a aidé durant toute ma formation.*

*A mon binôme : Katia et sa famille.*

*A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.*



## Résumé

L'ajout des fibres dans les matériaux de construction, particulièrement, les mortiers et les bétons est une technique de plus en plus utilisée, pour plusieurs raisons, soit écologique, soit économique, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Les propriétés mécaniques du béton de fibres dépendent de plusieurs facteurs qui sont les conditions de mise en œuvre, le dosage, l'espacement, l'orientation et la distribution des fibres dans le béton ou le mortier.

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons envisagé d'incorporer des fibres métalliques de nature industriel issues de l'unité de BCR, dans des formulations de bétons et mortiers en teneurs multiples (5%,10%,15%et20%) tout en substituant le sable.

Notre travail consiste à l'étude de :

- L'influence des fibres métalliques à différents pourcentages sur le comportement mécanique (traction et compression) du mortiers et bétons en les comparants à un mortier et béton de référence (0% de fibre).
- L'influence des fibres métalliques sur la variation dimensionnelle du mortier (retrait et gonflement), et les caractéristiques physico-chimiques (pH et la conductivité électrique).
- L'influence des fibres métalliques sur le comportement physico-chimique du mortier et béton

Nous avons constaté que l'utilisation des fibres métalliques dans un mortier ou un béton en substitution du sable diminue ses propriétés de résistance à la compression et à flexion mais à 5% de fibres pour un mortier et à 15% pour un béton ces résistances restent acceptables.

**Mots clés :** mortier, fibres métalliques, résistance, retrait, gonflement, pH, conductivité électrique, béton.

## Table des matières

REMERCIEMENTS	
DEDICACES	
RESUME	
ABSTRACT	
TABLE DES MATIERES	
TABLE DES FIGURES	
TABLE DES TABLEAUX	
NOTATIONS	
INTRODUCTION GENERALE	<b>1</b>
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>1. CHAPITRE I GENERALITES SUR MORTIERS ET BETON</b>	
INTRODUCTION	<b>4</b>
I. Composition du mortier et béton	<b>4</b>
I.1 Mortiers	<b>4</b>
I.1.1 Compositions du mortier	<b>4</b>
I.1.2 Caractéristiques des mortiers	<b>7</b>
I.2 Bétons	<b>11</b>
I.2.1 Compositions du béton	<b>11</b>
I.2.2 Mise en œuvre	<b>11</b>
I.2.3 Durcissement	<b>12</b>
I.2.4 Vieillesse	<b>12</b>
I.2.5 Avantages et inconvénients	<b>12</b>
I.2.6 Classification du béton	<b>13</b>
CONCLUSION	<b>14</b>
<b>2. CHAPITRE II LES BETONS FIBRES</b>	
INTRODUCTION	<b>16</b>
II.1 Fibres	<b>16</b>
II.1.1 Les différents types de fibres	<b>16</b>
II.1.2 Avantages de fibres	<b>17</b>
II.1.3 Le rôle des fibres	<b>19</b>
II.2 Elaboration du béton fibres	<b>19</b>
II.2.1 Définition	<b>19</b>
II.2.2 Domaine d'application	<b>20</b>
II.2.3 Avantage du béton fibré	<b>21</b>
II.3 Quelques recherches effectuées	<b>22</b>
II.4 Exemples d'ouvrages	<b>23</b>
CONCLUSION	<b>23</b>
<b>3. CHAPITRE III CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES BETONS</b>	
INTRODUCTION	<b>25</b>
III.1 La dégradation du béton vis-à-vis des agressions chimiques	<b>25</b>
III.2 Les mécanismes de dégradation dans les bétons	<b>25</b>
III.3 La pénétration des chlorures	<b>26</b>
III.3.1 Amorcage	<b>26</b>
III.3.2 Mécanisme de carbonatation	<b>26</b>

III.3.3 Actions des chlorures	27
III.3.4 Pénétration des chlorures	27
III.4 Les sulfate	28
III.4.1 La solubilité des sulfates dans les eaux	29
III.4.2 Processus d'attaque par les sulfates	29
III.4.3 Pression de cristallisation de quelques sels	30
III.5 Quelques notions chimiques	30
CONCLUSION	33
<b>ETUDE EXPERIMENTALE</b>	
<b>4. Chapitre I IDENTIFICATION DES MATERIAUX</b>	
INTRODUCTION	36
I.1 Présentation général	36
I.2 Essai sur les granulats	36
I.2.1 Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533)	36
I.2.2 Analyse granulométrique (NF P 18-560)	38
I.2.2.1 Analyse granulométrique des gravillons	41
I.2.2.2 Analyses granulométriques du sable	42
I.2.2.3 Expression des résultats	43
I.2.3 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF P 18-561)	45
I.2.4 Détermination de la propreté superficielle	50
I. 2.4.1 La teneur en impuretés pour les graviers	50
I.2.4.2 Propreté du sable	51
I.2.5 L'essai de friabilité de sable	61
I.2.6 Détermination des masses volumiques nf p 18 - 555	62
I.2.6.1 Détermination de la masse volumique absolue	63
I.2.6.2 Détermination de la masse volumique apparente (NF P 18-554)	66
I.2.7 Mesure de la compacité	68
I.2.8 Mesure de la porosité P	68
I.2.9 Essai de résistance à l'usure et au choc	68
I.2.9.1 Essai Micro – Deval (NF P 18-572)	69
I.2.9.2 Essai los Angel.es (NF P 18-573)	71
I.3 Classification des granulats (XP P 18 – 540)	74
I.3.1 Résultats des essais effectués au laboratoire	74
I.3.2 Classification	78
I.4 Essais sur les ciments	78
I.4.1 Masses spécifiques	78
I.4.1.1 La masse volumique apparente EN 459-2	78
I.4.1.2 La masse volumique absolue: EN196-60	80

I.4.2 Essai de prise	82
I.4.3 Détermination de la stabilité par l'essai Le Chatelier ou essai d'expansion(EN 196-3)	85
I.5 Méthodes physiques d'analyses	88
I.5.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	88
I.5.1.1 Analyse granulométrique des fibres métalliques utilisées	90
I.5.1.2 Masses Volumiques des fibres métalliques B.C.R	92
I.5.1.3 Caractérisation des matériaux par des rayons X (DRX)	92
I.5.2 Microscopie électronique à balayage MEB couple a l'EDX	94
I.6 Méthodes chimiques d'analyses	97
I.6.1 Résultats des analyses chimiques	97
I.6.1.1 Analyses chimiques du sable	97
CONCLUSION	97
<b>5. CHAPITRE II FORMULATIONS DES BETONS ET MORTIERS</b>	
INTRODUCTION	99
II.1Mortiers	99
II.1.1 Caractéristiques des matériaux utilisés	99
II.1.2 Dosage ou pesée des constituants	101
II.1.3 Malaxage de mortier	103
II.2 Bétons	108
II.2.1 Composition du béton	108
II.2.2Quelques méthodes de composition de béton	108
II.2.3Methode dreux-gorisse	109
II.2.3.1 Dosage en ciment	115
II.2.3.2 Dosage en eau	115
II.2.3.3 Dosage des granulats	115
II.2.4 Densité théorique du béton frais ( $\Delta_0$ )	117
II.2.5 Dosage des granulats (litres/m <sup>3</sup> )	117
II.2.6 Récapitulation de la composition du béton	118
II.2.7 Confection des éprouvettes	118
II.2.8 Récapitulation de la composition des différentes gâchées	123
CONCLUSION	124
<b>6.CHAPITRE III ESSAIS ET PROCIDURES EXPERIMENTALES</b>	
INTRODUCTION	126
III.1.Essai sur les mortiers	126
III.1.1.Essais mécaniques	126
III.1.2 Mesure du retrait et du gonflement sur éprouvettes du mortier (NF P15-433)	128



III.2 Essais sur béton	<b>132</b>
III.2.1 Essais sur les bétons frais	<b>132</b>
III.2.2 Essais sur béton durci	<b>135</b>
III.3 Tests physico-chimiques pour betons et mortiers	<b>139</b>
CONCLUSION	<b>141</b>
<b>7.CHAPITRE IV</b>	<b>RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b>
INTRODUCTION	<b>143</b>
IV.1 Résultats et interprétation des essais sur les mortiers	<b>143</b>
IV.1.1 Comportement mécanique (résistance a la compression et a la traction par flexion)	<b>143</b>
IV.1.2 Mesure de retrait et du gonflement sur les éprouvettes du mortier	<b>144</b>
IV.1.2.1-Retrait de dessiccation	<b>144</b>
IV.1.2.2Gonflement	<b>146</b>
IV.2 Résultats et interprétation des essais sur les bétons	<b>148</b>
IV.2.1 affaissement	<b>150</b>
IV.2.2 Masse volumique du béton frais	<b>151</b>
IV.2.3 Résistance a la compression	<b>153</b>
IV.2.4 Masse volumique du béton durci	<b>154</b>
CONCLUSION GÉNÉRALE	<b>160</b>

## Liste des figures

N°	Intitulé	Page
<b>PARTIE THEORIQUE</b>		
<b>Figure I.1.</b>	Table à secousses	<b>8</b>
<b>Figure I.2.</b>	Principe de fonctionnement du maniabilimètre	<b>8</b>
<b>Figure I.3.</b>	Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge	<b>9</b>
<b>Figure I.4.</b>	Moule pour moulage des éprouvettes de mortier	<b>9</b>
<b>Figure I.5.</b>	Les constituants de béton	<b>11</b>
<b>Figure I.6.</b>	Transport et mise en place	<b>11</b>
<b>Figure I.7.</b>	Durcissement et finition	<b>12</b>
<b>Figure I.8.</b>	Détermination, exploitation et destruction	<b>12</b>
<b>Figure II.1.</b>	exemple sur les fibres métalliques	<b>17</b>
<b>Figure II.2.</b>	Fissuration en Béton sans fibres	<b>19</b>
<b>Figure II.3.</b>	Fissuration en Béton avec fibres	<b>19</b>
<b>Figure II.4.</b>	texture du béton fibré	<b>20</b>
<b>Figure III.1.</b>	Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques	<b>26</b>
<b>Figure III.2.</b>	Schéma de la corrosion par infiltration des chlorures	<b>28</b>
<b>PARTIE EXPERIMENTALE</b>		
<b>Figure I.1.</b>	Opération de quartage	<b>37</b>
<b>Figure I.2.</b>	Colonnes de tamis	<b>39</b>
<b>Figure I.3.</b>	Analyse granulométrique de sable et graviers	<b>44</b>
<b>Figure I.4.</b>	Grilles à fentes.	<b>47</b>
<b>Figure I.5.</b>	Equivalent de sable.	<b>54</b>
<b>Figure I.6.</b>	résultats de l'essai à la tache	<b>60</b>
<b>Figure I.7.</b>	pycnomètre	<b>63</b>
<b>Figure I.8.</b>	mesure de la masse volumique apparente	<b>67</b>
<b>Figure I.9.</b>	Appareil de Micro-Deval	<b>69</b>
<b>Figure I.10.</b>	Appareil de Los Angeles	<b>73</b>
<b>Figure I.11.</b>	appareil de masse volumique apparente.	<b>79</b>
<b>Figure I.12.</b>	conduite de l'essai de la masse volumique absolue	<b>81</b>
<b>Figure I.13.</b>	le dancimetre	<b>81</b>
<b>Figure I.14.</b>	caractéristiques d'appareil de vicat	<b>82</b>
<b>Figure I.15.</b>	appareil de vicat	<b>83</b>
<b>Figure I.16.</b>	Mesure le temps du début et fin de prise	<b>84</b>
<b>Figure I.17.</b>	Appareil de Chatelier	<b>86</b>
<b>Figure I.18.</b>	Mesure d'écartement A, B et C	<b>87</b>
<b>Figure I.19.</b>	les moules de chatelier	<b>89</b>
<b>Figure I.20.</b>	Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X.	<b>90</b>
<b>Figure I.21.</b>	analyse granulométrique des fibres métalliques	<b>91</b>
<b>Figure I.22.</b>	spectre obtenu par DRX pour le liant hydraulique utilisé ; ciment CPA , CEM I	<b>92</b>

<b>Figure I.23.</b>	spectre obtenu par DRX pour les fibres métalliques.	<b>93</b>
<b>Figure I.24.</b>	DRX du sable normalisé	<b>94</b>
<b>Figure I.25.</b>	Appareil du MEB	<b>95</b>
<b>Figure I.26.</b>	spectre EDX des fibres métalliques	<b>96</b>
<b>Figure II.1.</b>	Composition granulométrique du sable normalisé	<b>100</b>
<b>Figure II.2.</b>	Sable normalisé	<b>100</b>
<b>Figure II.3.</b>	les fibres métalliques	<b>101</b>
<b>Figure II.4.</b>	les pourcentages des différentes fractions granulaires entrant dans la composition du mortier à 00% de fibre métallique	<b>102</b>
<b>Figure II.5.</b>	: les pourcentages des différentes fractions granulaires entrant dans la composition du mortier à 05 % de fibre métallique	<b>103</b>
<b>Figure II.6.</b>	Malaxeur	<b>104</b>
<b>Figure II.7.</b>	table à choc	<b>105</b>
<b>Figure II.8.</b>	la conservation et le démoulage des éprouvettes	<b>106</b>
<b>Figure II.9.</b>	Conservation des éprouvettes du gonflement dans l'eau distillée	<b>107</b>
<b>Figure II.10.</b>	Conservation des éprouvettes pour le retrait à l'air libre	<b>107</b>
<b>Figure II.11.</b>	Courbe de référence	<b>110</b>
<b>Figure II.12.</b>	Les pourcentage des différentes fractions granulaires	<b>112</b>
<b>Figure II.13.</b>	Courbe de mélange selon Dreux-Gorisse	<b>114</b>
<b>Figure II.14.</b>	les moules 16 x 32 cm <sup>2</sup> .	<b>118</b>
<b>Figure II.15.</b>	Le pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 0% de fibre.	<b>120</b>
<b>Figure II.16.</b>	Les pourcentages des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 05% de fibre	<b>121</b>
<b>Figure II.17.</b>	Les pourcentages des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 10% de fibre	<b>122</b>
<b>Figure II.18.</b>	Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 15% de fibre	<b>122</b>
<b>Figure II.19.</b>	Les pourcentages des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 20% de fibre	<b>123</b>
<b>Figure III.1.</b>	Le dispositif de rupture en flexion et en compression	<b>127</b>
<b>Figure III.2.</b>	Presse hydraulique	<b>128</b>
<b>Figure III.3.</b>	Appareil de mesure du retrait et gonflement	<b>130</b>
<b>Figure III.4.</b>	Appareil multi-paramètres	<b>131</b>
<b>Figure III.5.</b>	Cône d'Abrams	<b>133</b>
<b>Figure III.6.</b>	Mesure de L'affaissement au cône d'Abrams	<b>134</b>
<b>Figure III.7.</b>	Masse du récipient vide et rempli	<b>134</b>
<b>Figure III.8.</b>	Conservation des éprouvettes	<b>135</b>
<b>Figure III.9.</b>	Surfaçage des éprouvettes	<b>136</b>
<b>Figure III.10.</b>	Presse de compression	<b>137</b>
<b>Figure III.11.</b>	fissures des éprouvettes	<b>137</b>

<b>Figure III.12.</b>	monolithes et pastilles	<b>139</b>
<b>Figure III.13.</b>	Test Lixiviation Monolithe de béton et mortier dans deux milieu	<b>141</b>
<b>Figure IV.1.</b>	Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours	<b>143</b>
<b>Figure IV.2.</b>	Retrait de dessiccation	<b>144</b>
<b>Figure IV.3.</b>	la masse	<b>145</b>
<b>Figure IV.4.</b>	Gonflemen	<b>146</b>
<b>Figure IV.5.</b>	Variation des masses	<b>147</b>
<b>Figure IV.6.</b>	Évolution du pH	<b>148</b>
<b>Figure IV.7.</b>	Conductivité électrique	<b>150</b>
<b>Figure IV.8.</b>	Variation de l'affaissement en fonction de Différentes séries du béton	<b>151</b>
<b>Figure IV.9.</b>	Evolution des masses volumiques en fonction du temps	<b>152</b>
<b>Figure IV.10.</b>	Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton.	<b>153</b>
<b>Figure IV.11.</b>	Variation de masse (milieu neutre)	<b>155</b>
<b>Figure IV.12.</b>	Variation la masse (milieu sulfaté)	<b>155</b>
<b>Figure IV.13.</b>	Évolution du pH (milieu neutre)	<b>156</b>
<b>Figure IV.14.</b>	Évolution du pH (milieu sulfaté)	<b>156</b>
<b>Figure IV.15.</b>	Conductivité électrique (milieu neutre)	<b>157</b>
<b>Figure IV.16.</b>	Conductivité électrique (milieu sulfaté)	<b>157</b>
<b>Figure IV.17.</b>	Température (milieu sulfaté)	<b>158</b>
<b>Figure IV.18.</b>	Température (milieu neutre)	<b>158</b>

## Liste des tableaux

N°	Intitulé	Page
<b>La partie théorique</b>		
<b>Tableau II.1.</b>	Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	<b>18</b>
<b>Tableau II.2.</b>	domaines d'applications privilégiées par type de fibres	<b>21</b>
<b>Tableau III.1.</b>	Solubilité de différents sulfates dans l'eau, à 20 °C.	<b>29</b>
<b>Tableau III.2.</b>	Pression de cristallisation de quelques sels.	<b>30</b>
<b>Tableau III.3.</b>	Valeurs moyennes de conductivité thermique de différents types matériaux ou produits	<b>32</b>
<b>La partie expérimentale</b>		
<b>Tableau I.1.</b>	Dimensions nominales des tamis	<b>39</b>
<b>Tableau I.2</b>	Analyses granulométriques du gravier 15/25	<b>41</b>
<b>Tableau I.3</b>	Analyses granulométriques du gravier 8/15	<b>42</b>
<b>Tableau I.4</b>	Analyses granulométriques du sable 0/4.	<b>43</b>
<b>Tableau I.5</b>	Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées	<b>46</b>
<b>Tableau I.6</b>	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25	<b>49</b>
<b>Tableau I.7</b>	Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 08/15	<b>50</b>
<b>Tableau I.8</b>	Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15.	<b>51</b>
<b>Tableau I.9</b>	Calcul de teneur en eau W du sable 0/4	<b>56</b>
<b>Tableau I.10</b>	Détermination de f et $M_{sc}$ ainsi que $M_{ech}$	<b>56</b>
<b>Tableau I.11</b>	calcul d'ES pour le sable 0/4	<b>56</b>
<b>Tableau I.12</b>	Résultats de la friabilité de sable 0/4	<b>62</b>
<b>Tableau I.13</b>	Résultats de la masse volumique absolue du sable 0/4	<b>65</b>
<b>Tableau I.14</b>	Résultats de la masse volumique absolue des graviers.	<b>66</b>
<b>Tableau I.15</b>	Résultats de la Masse volumique apparente	<b>67</b>
<b>Tableau I.16</b>	Mesure de compacité et de la porosité des granulats.	<b>68</b>
<b>Tableau I.17</b>	Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire	<b>70</b>
<b>Tableau I.18</b>	Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25	<b>71</b>
<b>Tableau I.19</b>	Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.	<b>72</b>
<b>Tableau I.20</b>	Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15	<b>74</b>
<b>Tableau I.21</b>	Récapitulatif de tous les résultats des essais.	<b>74</b>
<b>Tableau I.22</b>	Los Angeles	<b>75</b>
<b>Tableau I.23</b>	Granularité des graviers	<b>75</b>
<b>Tableau I.24</b>	Résultats sur la granularité des graviers	<b>75</b>
<b>Tableau I.25</b>	Coefficient d'aplatissement	<b>76</b>
<b>Tableau I.26</b>	Granularité du sable	<b>76</b>
<b>Tableau I.27</b>	Résultats sur la granularité du sable	<b>76</b>
<b>Tableau I.28</b>	Module de finesse	<b>77</b>
<b>Tableau I.29</b>	Teneur en fines	<b>77</b>
<b>Tableau I.30</b>	propreté du sable ou VB	<b>77</b>
<b>Tableau I.31</b>	Mesure de la masse volumique apparente du ciment.	<b>80</b>
<b>Tableau I.32</b>	Mesure de la masse volumique absolue du ciment.	<b>82</b>

<b>Tableau I.33</b>	temps de début et de fin de prise.	<b>84</b>
<b>Tableau I.34</b>	Les résultats obtenus à partir de l'essai chatelier	<b>88</b>
<b>Tableau I.35</b>	Classement dimensionnel par tamisage des fibres.	<b>91</b>
<b>Tableau I.36</b>	Analyse des fibres par l EDX	<b>96</b>
<b>Tableau I.37</b>	Analyse chimique du sable 0/4	<b>97</b>
<b>Tableau II.1</b>	Analyses chimiques du sable normalisé	<b>99</b>
<b>Tableau II.2</b>	proportions des matériaux utilisées pour les mortiers	<b>103</b>
<b>Tableau II.3</b>	les étapes de malaxage du mortier	<b>104</b>
<b>Tableau II.4</b>	Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton.	<b>108</b>
<b>Tableau II.5</b>	Valeurs de K	<b>111</b>
<b>Tableau II.6</b>	Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange	<b>113</b>
<b>Tableau II.7</b>	Récapitulatif de la composition du béton	<b>118</b>
<b>Tableau II.8</b>	Récapitulatif de la composition des gâchées	<b>123</b>
<b>Tableau III.1</b>	les quatre classes de consistances	<b>132</b>
<b>Tableau IV.1</b>	résultats d'affaissement	<b>150</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Valeurs des masses volumiques calculées des différents Bétons étudiés.	<b>154</b>

## Liste des notations

<b>BHP</b>	:	Béton de haute performance
<b>BCR</b>	:	Boulonnerie, Coutellerie, Robinetterie.
<b>BFM</b>	:	Béton a fibre métallique
<b>CPA</b>	:	Ciment Portland Artificiel.
<b>CPJ</b>	:	Ciment Portland aux ajouts.
<b>DRX</b>	:	Diffraction par Rayon X.
<b>CE</b>	:	conductivité électrique
<b>E/C</b>	:	Le rapport masse d'Eau / masse sèche du Ciment.
<b>ESP</b>	:	Equivalent de sable par piston.
<b>ESV</b>	:	Equivalent de sable visuel.
<b>LTP-Est</b>	:	Laboratoire des travaux publics Est.
<b>LCPC</b>	:	Laboratoire centrale des ponts et chaussés
<b>MEB</b>	:	Microscope Électronique à Balayage.
<b>MF</b>	:	Module de finesse.
<b>NA</b>	:	Norme Algérienne
<b>NE P</b>	:	Norme européenne
<b>NF P</b>	:	Norme française.
<b>PFE</b>	:	Projet fin d'étude.
<b>TLM</b>	:	Test Lixiviation Monolithe
<b>VB</b>	:	Valeur au bleu.

# **INTRODUCTION GENERALE**



On peut situer la naissance des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM), en tant que véritable matériau de construction, au début des années 60. Les travaux de Romualdi sur l'arrêt de la propagation des fissures dans une matrice fragile par des fibres réparties,

[Romualdi 1963] en sont à l'origine et ont conduit au dépôt d'un brevet. Depuis, les chercheurs se sont principalement intéressés au fonctionnement des fibres et à leur interaction avec la matrice. Ces travaux ont été complétés avec succès par les industriels producteurs de fibres qui ont développé des géométries et des matériaux constitutifs plus performants. Il est très vite apparu qu'en fonction de la fibre utilisée, de son dosage, de la qualité de la matrice mais aussi de la mise en œuvre, les propriétés obtenues pouvaient varier de manière significative.

Dans le but de connaître le comportement des bétons et les mortiers à base des fibres métallique, nous avons incorporés ces fibres métalliques à différents pourcentages dans les bétons et les mortiers.

Avant d'entamer l'étude expérimentale, il est nécessaire de faire une synthèse bibliographique concernant le béton de fibre. Nous exposons dans cette étude bibliographique, un bref historique des généralités sur les bétons et les mortiers. Nous nous intéressons ensuite aux bétons de fibres (les différents fibres utilisées, formulation de béton fibre, domaine d'application de ces bétons).en dernier nous donnons un aperçu générale sur la chimie dans les bétons.

Le programme de recherche expérimentale dont l'objectif principal est de monter l'influence de ces fibres aux différents pourcentages dans les bétons et les mortiers, englobe les points suivants :

- Détermination des caractéristiques et identification des matériaux
- Confection et détermination de la résistance à la compression des mortiers (4\*4\*16).
- Confection et détermination de la résistance à la compression des bétons (16\*32).
- Détermination de la résistance à la traction par flexion des mortiers (4\*4\*16).
- Mesure de retrait et variation de masse des mortiers (4\*4\*16), mesure de gonflement et variation de masse et de PH.
- Mesure de PH, T,  $\lambda$  et dans les solutions de conservation des mortiers et des bétons.
- Enfin les analyses chimiques.

Pour terminer nous présentons, une conclusion et quelques perspectives pour mieux valoriser ce nouveau matériau dans les constructions.

# **CHAPITRE I**

## **GENERALITES SUR LES MORTIERS ET LES BETONS**

## Introduction

Divers types des bétons et mortiers sont utilisés dans la construction et la restauration des monuments. Le choix du mortier ou de béton s'appuie sur plusieurs critères : esthétique, et économique.

Par principe, les acteurs de ce domaine pensent qu'on doit utiliser des mortiers et des bétons qui répondent à un ensemble de spécifications très précises qui sont particulièrement la résistance et la durabilité.

## I – Constituants du mortier et béton

### I-1 Mortier [1]

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

La durée de malaxage doit être dans les normes, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être:

- ❖ préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- ❖ préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré dosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- ❖ livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

### I-1-1 Compositions [1]

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- liant (ciment ou chaux)
- eau
- sable
- adjuvants

➤ **Les liants:**

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, ..)
- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes

➤ **Les sables:**

- **Pour mortier normale**

Les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Généralement les sables peuvent être :

- naturels roulés (de rivières, de sablières, de plage..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
  - sable de laitier;
  - sable d'oxydes de fer, de chromite;
  - sable de briques concassés; etc.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm.

### ➤ Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.etc

### ➤ Les ajouts

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- poudres fines pouzzolaniques (cendres volante, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);
- polymères.

### ➤ Mortiers fabriqués sur chantier [1]

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CEM I ou CEM II et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

### ➤ Mortier industriel [1]

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

### I-1-3 Les caractéristiques principales des mortiers [1]

Sont:

- ♦ ouvrabilité;
- ♦ prise;
- ♦ résistances mécaniques;
- ♦ retrait et gonflements, etc.

#### ✓ Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) La table à secousses: le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

Avec  $D_f$  = diamètre final et  $D_i$  = diamètre initial.

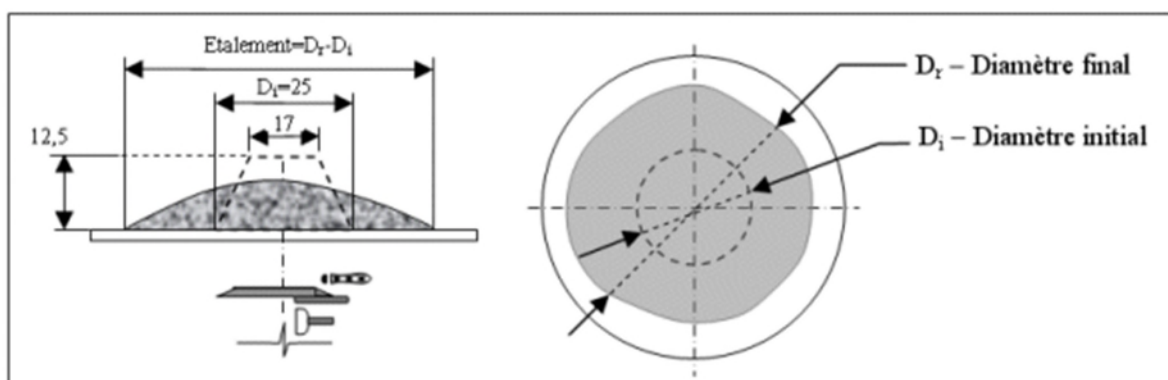
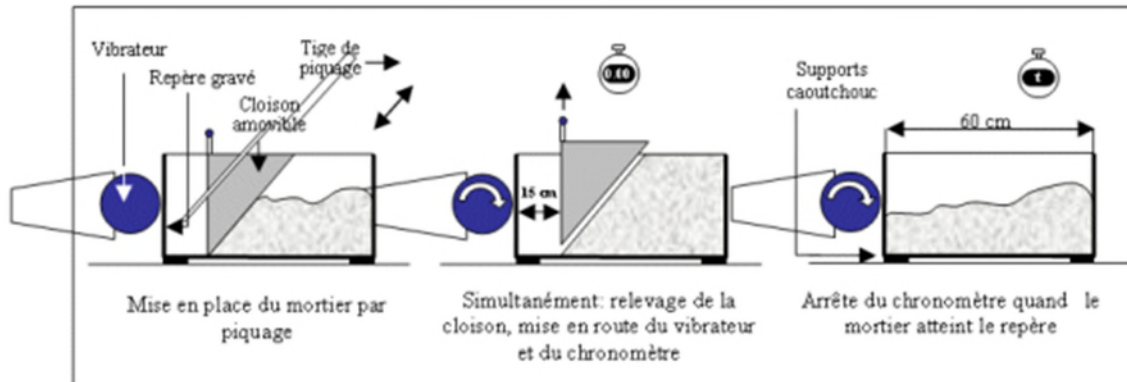


Figure I.1 : Table à secousses [1]

b) Le maniabilimètre du LCPC: il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.



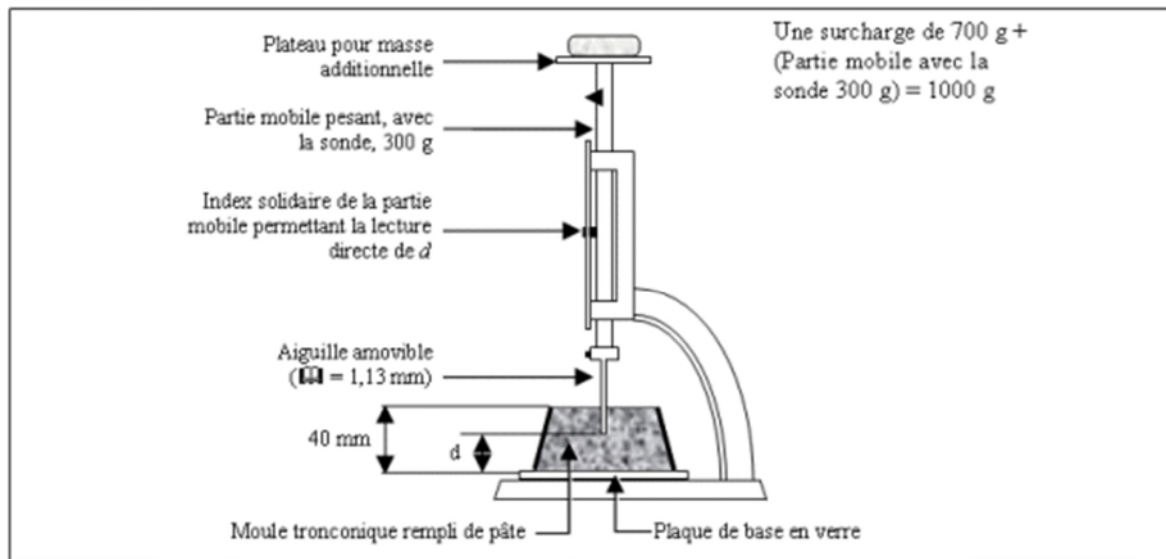
**Figure I.2 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre [1]**

c) Le cône: dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

#### ✓ **Prise**

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes.

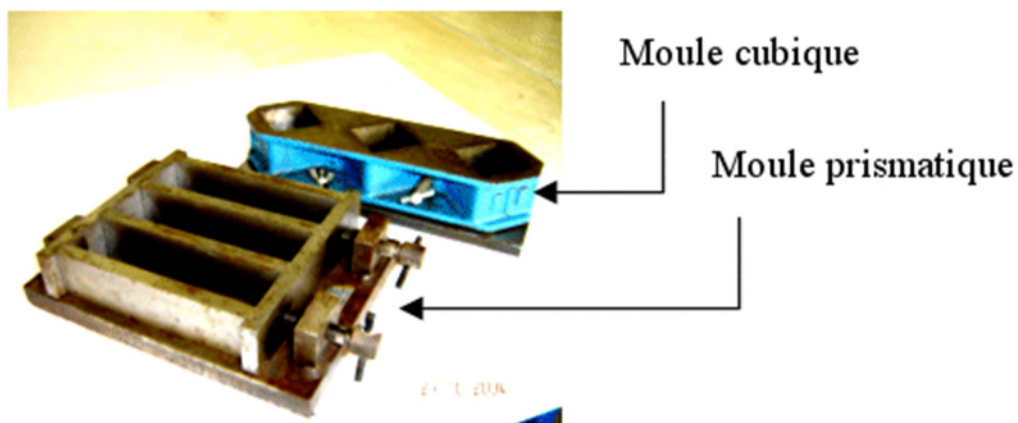
Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à  $5 \pm 1$  mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 0.5 mm du niveau supérieur.



**Figure I.3 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge [1]**

#### ✓ Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.



**Figure I.4 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier**

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- ◆ nature et dosage en ciment;



- ◆ rapport E/C;
- ◆ granulométrie et nature du sable;
- ◆ énergie de malaxage et mise en œuvre;
- ◆ protection les tous premiers jours.

### ✓ **Retraits et gonflements [1]**

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 90 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).

## I-2- Bétons [1]

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment)  $t/m^3$ . Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

### I-2-1 Constituants d'un béton

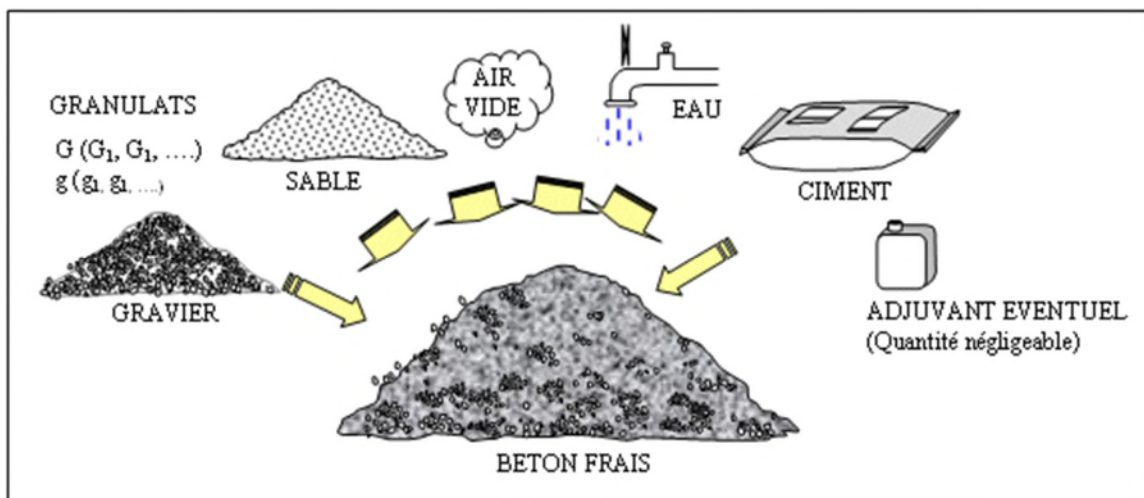


Figure I.5: Les constituants du béton (Fabrication du béton frais) [1]

### I-2-2 Mise en œuvre

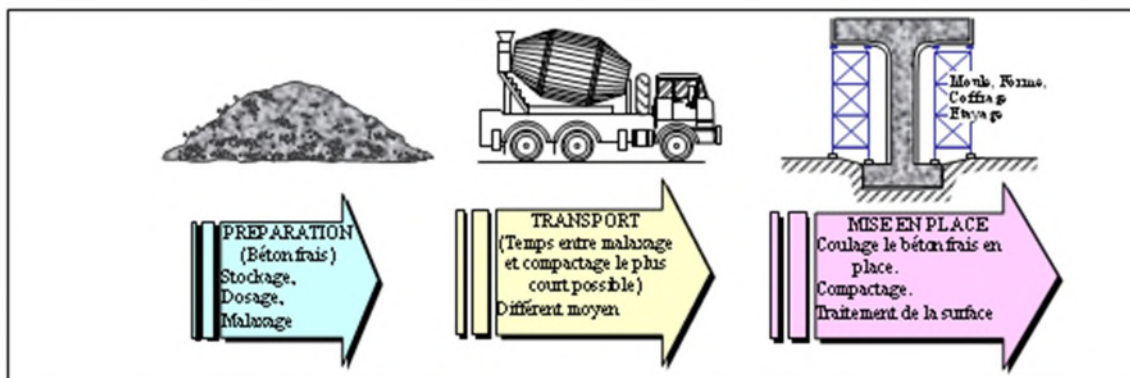


Figure I.6: Transport et mise en place le béton frais [1]

Toutes les opérations de mise en œuvre sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène.

### I-2-3 Durcissement

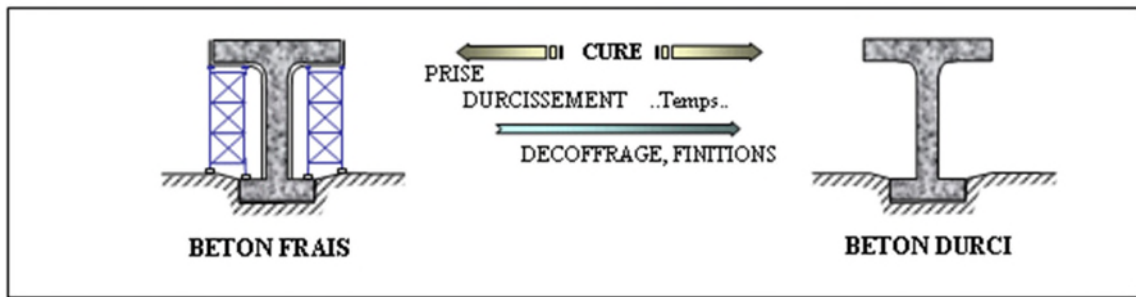


Figure I.7: Durcissement, finition [1]

La condition favorable pour le durcissement d'un béton:

- l'humidité
- la température supérieure à 50 °C.
- le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

### I 2-4 vieillissements

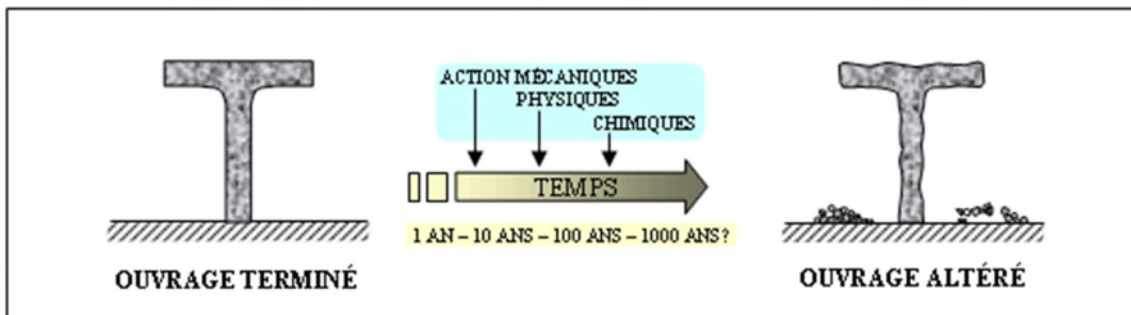


Figure I.8: Détermination, exploitation et destruction [1]

Pour être durable, un béton doit:

- être bien composé.
- correctement mis en œuvre.
- protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

### I-2-5 Principaux avantages et inconvénients du béton [1]

#### ✓ Avantages du béton:

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.

- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

✓ **Inconvénients du béton [1]**

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant du béton léger spécial)
- le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

### **I-2-6 Classification du béton [1]**

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd:  $> 2500 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton lourd (béton courant):  $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton léger:  $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$ .
- Béton très léger:  $< 500 \text{ kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants:

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse), etc.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

- a) Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics.
- b) Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre  $6000 \text{ kg/m}^3$  servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- c) Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment.
- d) Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de  $500 \text{ kg/m}^3$ . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- e) Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés: dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

## Conclusion

Le béton et le mortier sont les matériaux les plus utilisés dans la construction, mais, ils résistent mal à la traction. Les conditions d'environnement chauds et secs, tels que la région saharienne de notre pays, dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit à des retraits importants et des fissures dans les structures.

**CHAPITRE II**

**LES BETONS FIBRES**

## Introduction

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreux chercheurs.

Dans la littérature, les études effectuées sur le béton, pour modérer la faiblesse de son comportement en traction, consistent en l'ajout de fibres métalliques. Ces fibres jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration.

### II.1. Les fibres [2]

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de se croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi les fibres peuvent exister sous différents types et formes.

#### II.1.1. Les différents types de fibres [2]

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leurs natures ou leurs géométries.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

Leur géométrie est très variable. Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post-fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites.

Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

On distingue trois grandes familles de fibres.

- Les fibres métalliques.
- Les fibres organiques.
- Les fibres minérales.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres: dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m<sup>3</sup> de béton.



**Figure II.1 : différents types de fibres métalliques [2]**

### **II.1.2. Avantages de fibres**

Les fibres peuvent remplacer le treillis soudé, afin de maîtriser la fissuration de retrait, parce que les treillis soudés sont souvent utilisés pour éviter le phénomène de retrait du béton,

Les fibres retardent la microfissuration et améliorent le comportement post-fissuration en maintenant les différents blocs de béton. Elles empêchent le retrait au jeune âge et s'opposent au faïençage (le faïençage correspond à l'apparition de nombreuses fissures très fines qui forment un réseau hexagonal ou octogonal). Le retrait du béton peut être diminué de 35 % ou moins si l'on ajoute 1,5 % de fibres par volume.



Les fibres améliorent la ductilité du béton durci et à un degré moindre la résistance à la traction.

Les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20 %.

Parmi les fibres les plus utilisées, nous citons les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène (tableau II.1).

**Tableau II.1 : Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres. [2]**

Fibre	Diamètre (mm)	Densité	Allongement de rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (GPa)
Acier	5-500	7,8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2,6	2-3,5	80	2-3
Polypropylène	7,5	0,9	20,0	5	0,5
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	2,3	200	3

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau. L'augmentation du rapport longueur/ diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton. Les valeurs de ces rapports sont généralement comprises entre 40 et 100, des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des oursins dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

En règle générale, les fibres sont éparpillées au hasard dans le béton; toutefois, si on traite le béton pour que les fibres soient alignées dans la direction des contraintes en service, on obtient de meilleure résistance en traction et en flexion. Ce procédé est assez compliqué, néanmoins, il commence à se développer en utilisant les champs magnétiques.

### II.1.3. Le rôle des fibres

Lorsque la charge appliquée au béton s'approche de la charge de rupture, les fissures se propagent parfois rapidement en ouverture et en longueur. Les fibres noyées dans le béton permettent de bloquer le développement de cette fissuration en la couturant. Comme schématiquement illustré dans les figures ci-dessous



Figure II.2 : Fissuration en Béton sans fibres [2]

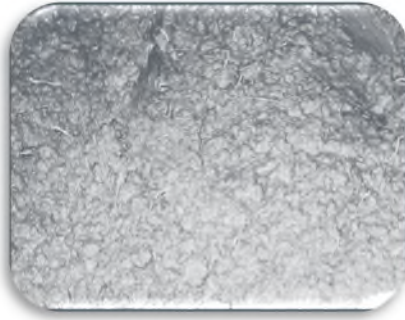


Figure II.3 : Fissuration en Béton avec fibres

## II.2. Elaboration du béton fibrés

### II.2.1. Définition

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.



**Figure II.4 : texture du béton fibré [3]**

### **II.2.2. Domaine d'application des bétons fibrés [4]**

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil:

- béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.);
- béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.);
- béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.);
- mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scelle

Tableau II.2 : domaines d'applications privilégiés par type de fibres [4]

Type de fibre	Dosage courant	Domaine d'application privilégié	Exemples d'application
<b>Fibres métalliques</b>	0,5 à 2% en volume 40 à 160 Kg /m <sup>3</sup>	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	-dallages, sois industriels, planchers, dalles de compression -éléments préfabriqués voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux -bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation en pente et ouvrages d'assainissements -pieux de fondations, semelles filantes
<b>Fibres de polypropylènes</b>	0,5 à 2% en volume 0,5 à 2 Kg /m <sup>3</sup>	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue en feu des bétons	-dallages -voussoirs tunnels -revêtements d'ouvrages souterrains -mortiers projetés -parements esthétiques
<b>Fibres en verre</b>	1 à 2%	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	-parements architectoniques -panneaux de façade -éléments décoratifs

### II.2.3. Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

- Aspect technique : L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration.

Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (résistance résiduelle).
- Une énergie d'absorption élevée;
- Une résistance aux impacts élevée;
- Une résistance à la fatigue élevée;
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

### **II.3. Quelques recherches effectuées sur les bétons fibrés**

#### **a. Formulation de béton à base des fibres métalliques [5]**

Cet étude présente, en premier lieu la formulation d'un béton témoin optimisé sans déchets métalliques. En deuxième lieu, nous avons étudié l'influence des déchets sur le béton. Une amélioration de ces caractéristiques mécaniques a été observée. Les dimensions des déchets sont parues importantes. L'emploi des déchets métalliques de petits diamètres jalonne augmente la résistance du béton et jalonne, dans le temps, l'apparition des fissures par comparaison aux observations sur l'utilisation des déchets métalliques de grands diamètres. L'emploi des déchets métalliques longs et de petits diamètres améliore en plus la ductilité du béton. L'augmentation du pourcentage des déchets métalliques incorporés dans un mètre cube de béton améliore nettement les caractéristiques mécaniques, néanmoins et au-delà d'un dosage optimal (40 kg/m<sup>3</sup>) il agit d'une manière récidive, en perturbant l'arrangement granulaire et les résistances à la traction et à la compression du béton.

#### **b. Effet du dosage en fibres métalliques ondulés sur le comportement mécanique des bétons à haute performances [6]**

Bien que la relation existante entre la résistance et le taux de fibres soit incontournable d'autres facteurs peuvent influencer ce comportement parmi eux la nature des additions minérales utilisées, la nature des granulats et l'étendu granulaire. La géométrie des fibres ainsi que le dosage de ces dernières jouent un rôle important sur le comportement

mécanique mais aussi sur la maniabilité du mélange. L'utilisation des fibres de forme ondulée et avec un rapport Longueur/diamètre élevée a changé énormément le mécanisme d'endommagement et à augmenter les forces relatives à la charge ultime des BHP.

Le développement des fissures est nettement limité avec l'augmentation du taux des fibres ce qui laisse croire qu'une réduction d'une partie de ferrailage est possible surtout dans le cas des armatures de compression des gains de résistance en flexion de l'ordre de 24% à 50% pour les BHPF avec fillers de laitier granulé et de 7 à 52 % pour les BHPF avec fumée de silice sont obtenus. Ceci montre la possibilité d'élaboration des bétons à hautes performances à base de fillers de laitier granulé local en substitution totale de la fumée de silice.

Les résultats obtenus montrent la possibilité d'élaboration des éléments en BHP fibré non armé tel que les cloisons et les dalles de compression et élément horizontaux.

#### **II.4.Exemples d'ouvrages construits en béton fibré [7]**

- ✓ Réalisation de 52700 m<sup>2</sup> de chaussées de parking à l'aéroport de LAS – VEGAS (USA), avec 2% de fibres métalliques.  
L'épaisseur des chaussées était 15 cm, au lieu de 37.5 cm pour un béton traditionnel.
- ✓ Réalisation de 33400 m<sup>2</sup> de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de TAMPA – NEVADA (USA), avec 2% de fibres métalliques.
- ✓ Réalisation de la piste de l'aéroport de TAMPA (USA), avec 1,5 % de fibres métalliques.
- ✓ Consolidation de voutes en briques des tunnels ferroviaires près de BIRMINGHAM (Angleterre).

#### **Conclusion**

Les fibres peuvent exister sous différents types et formes. L'utilisation des ces fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de se croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi

## **CHAPITRE III**

# **CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU BETON**

## Introduction

Dans ce chapitre nous proposons d'étudier le comportement chimique des bétons vis-à-vis des milieux extérieurs en s'intéressant davantage à la réaction des bétons aux effets de certains produits chimiques pouvant réduire leur durabilité ainsi que sa résistance.

### III-1 La dégradation du béton vis-à-vis des agressions chimiques :

Les ouvrages en béton sont exposés à la pluie, à la neige, aux eaux souterraines, à l'eau de mer et à toutes solutions résultantes de la dissolution de sels et de gaz qui seront des agents agressifs vis-à-vis du béton. Les bétons sont des solides poreux qui ont un caractère basique très accentué dû à la nature de la pâte durcie qui renferme :

- 15 à 20 % d'une base forte : la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$
- Environ 70% de C-S-H  $\text{Ca}_3\text{H}_2\text{Si}_2\text{O(OH)}_2$
- 10 à 15 % d'aluminate et sulfoaluminates de calcium hydratés
- Une solution interstitielle, dans les pores et les capillaires, enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie de 12,5 à 13,5;

La dégradation des ouvrages en béton provoquées par ces agents est due à la dissolution et l'érosion en cas des attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaques salins, en particulier sulfateuse. Le classement des causes de détérioration par ordre d'importance décroissant est : corrosion des armatures, action du gel, effets chimiques sur les pâtes de ciment hydraté....[8]

### III-2 Les mécanismes de dégradation du béton

Les mécanismes fondamentaux d'altérations des bétons, ainsi que leurs effets résultants, ont été synthétisées sous forme du schéma synoptique représenté sur la figure ; Ou on retrouve deux type de réaction : hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durcie (dissolution des ions provenant de la dissociation d'un sel d'acide faible ou de base faible réagissant sur l'eau qui se décompose avec production de protons  $\text{H}^+$  ou  $\text{H}_3\text{O}^+$  ou d'hydroxyles  $\text{OH}^-$  qui conduit au lessivage de la chaux provoquant un accroissement de la porosité et une déstructuration progressive du liant.), réaction d'échange entre le milieu agressif et les composés hydratés, enfin réactions entraînant la formation de produits expansifs [8]



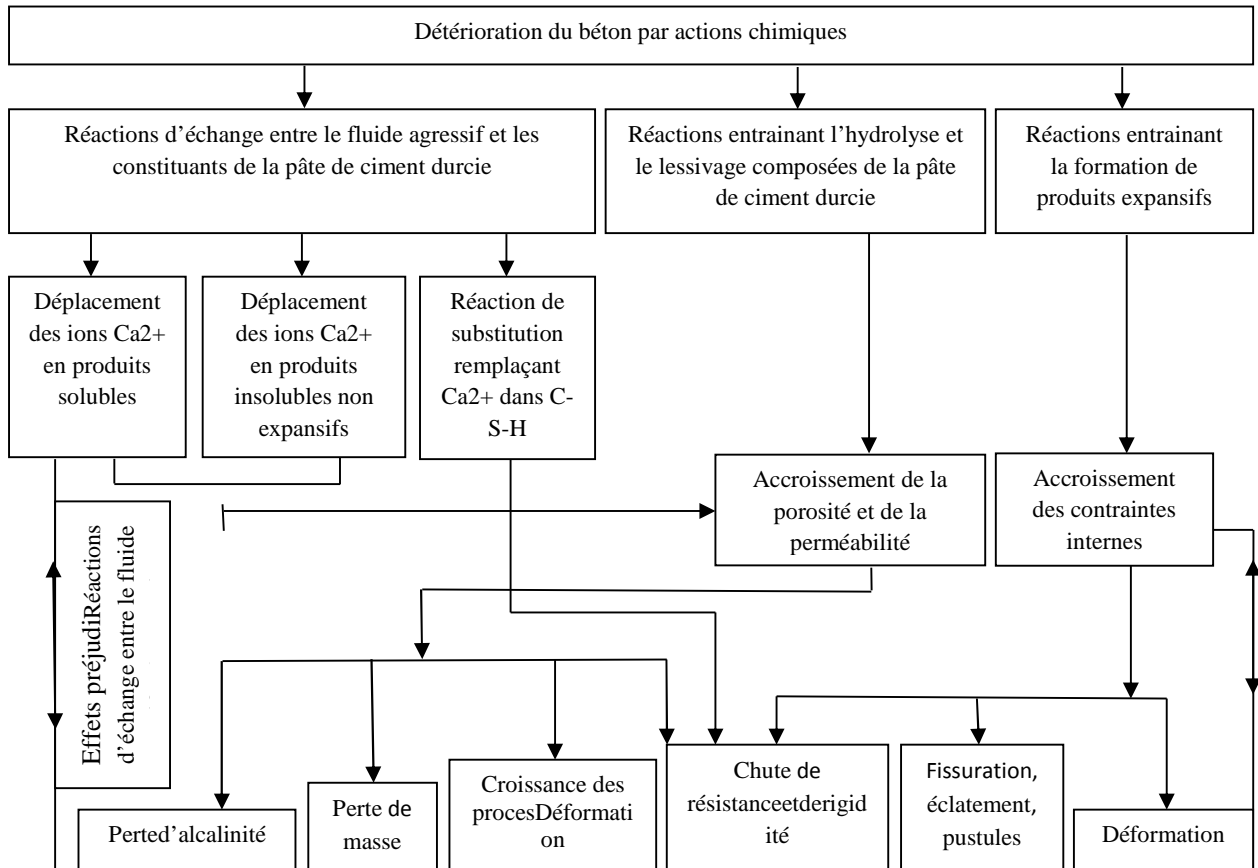


Figure III.1 : Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques.[8]

### III-3 La pénétration des chlorures

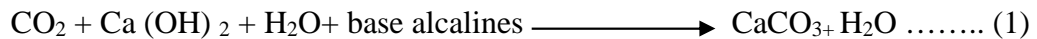
#### III-3-1 Amorçage :

Initialement l'acier est rapidement stabilisé par le milieu environnant de béton frais, pour des valeurs du pH supérieur à 13,5 les oxydes  $Fe_3O_4$  et  $Fe_3O_3$  forment un film passif à la surface de l'acier en réduisant la vitesse de corrosion à un niveau négligeable ; il est dit « passivé ». La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le pH de la solution interstitielle de la pâte du ciment durcie.[9]

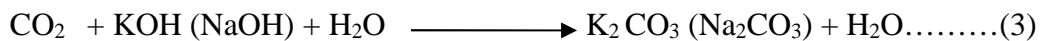
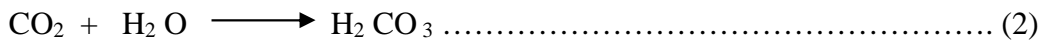
#### III-3-2 Mécanisme de carbonatation

L'air contient de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) à un taux moyen de 0,03 % en volume. Cette teneur dépend de la pression et de la température ; elle est plus importante dans les agglomérations urbaines qu'en milieu rural. Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates, principalement sur la portlandite et les silicates de calcium hydratés pour former du carbonate de calcium, la réaction provoque la diminution du pH de la solution

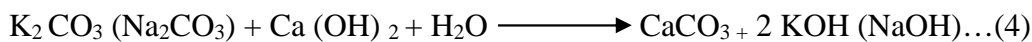
interstitielle et les armatures en acier ne sont alors plus passivées. En présence de dioxygène, leur corrosion peut alors débiter:



La carbonatation s'effectue à partir du  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau (1.3.2) qui réagit sur la chaux passée en solution (1.3.3):



La carbonatation des bases augmente alors la solubilité de la chaux peut réagir en quantité suffisante :



Les grandeurs qui peuvent donc permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et le pH de la solution interstitielle du béton. [10]

### III-3-3 Action des chlorures :

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers, les chlorures peuvent être d'origine du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés ; le chlorure de magnésium réagit également avec la portlandite (1.3.5) :



### III-3-4 Pénétration des chlorures :

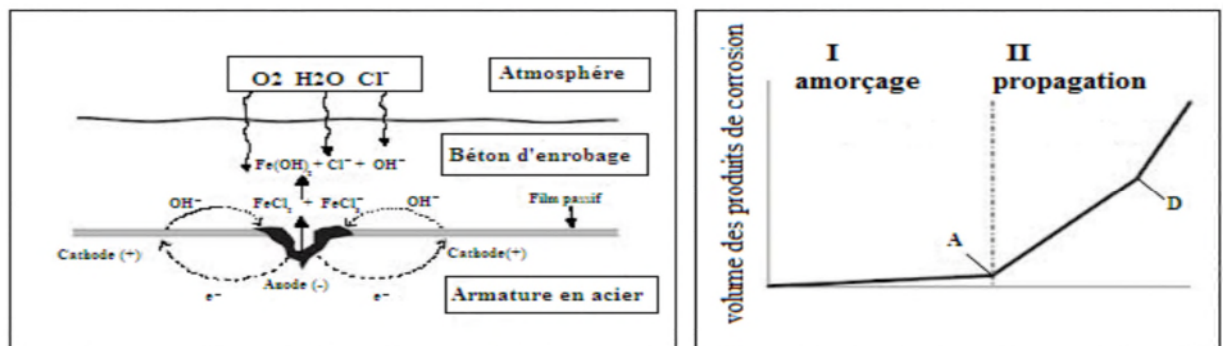
Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit au gâchage à partir des constituants de base lors de la confection, soit plus tardivement si l'ouvrage est exposé à des embruns marins ou à des sels fondants. L'état sous lequel se trouvent les ions chlore dans le béton est élément considérable :

- ✓ **Les chlorures liés** : se trouvent dans le béton sous deux formes principales : physiquement adsorbés sur les parois solides dans les pores ou chimiquement fixés par réactions avec certains composés du ciment.

Ce dernier cas: les composés formés sont le monochloroaluminate hydraté ou sel de Friedel, de formule  $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ , le trichloroaluminate  $C_3A \cdot 3CaCl_2 \cdot 30H_2O$ . Dans les conditions habituelles de concentration des ions chlorures dans les bétons, on ne rencontre que le sel de Friedel.

✓ **Les chlorures libres :**

Ils ne sont pas fixés chimiquement ou physiquement peuvent migrer plus en moins facilement à l'intérieur du béton, par capillarité, sous l'effet des variations d'humidité, et par diffusion sous l'effet de gradient de concentration à partir de milieu environnant ; ces chlorures libres sont susceptibles d'atteindre en quantité suffisante l'armature pour la dépassiver.



**Figure III.2 : Schéma de la corrosion par infiltration des chlorures.[8]**

Le gonflement des produits d'oxydation des armatures qui en résulte pourra à terme entraîner l'éclatement du béton d'enrobage, le volume d'armature passivée est deux fois le volume de l'armature initiale, ce qui entraîne une pression sur la surface de béton environnante.

#### III-4 Les sulfates [8]

Ils sont présents naturellement dans les sols ou ils constituent un élément nutritif important. Leur concentration habituelle varie entre 0,01 et 0,05 % du sol sec. Toutefois, il n'est pas rare de rencontrer des valeurs supérieures à 5% dans certaines régions ou le sous-sol peut contenir de gypse ou de l'anhydrite (bassin parisien, Afrique de nord).

De même le sous-sol des vastes étendues canadiennes peut renfermer plusieurs pourcentages de sulfates de sodium, de potassium, de magnésium et de calcium. Les sols alluviaux et argileux contiennent des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et l'humidité avec formation d'acide sulfurique. Ce dernier, par réaction avec le carbonate de calcium finement répartie dans le sol, peut à son tour donner naissance à du gypse. Ils peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substance organique contenant du soufre : engrais, plantes ; le sulfate d'ammonium agressif résulte de l'utilisation intensive des engrais dans l'agriculture.

### III-4-1 Solubilité des sulfates dans les eaux

La solubilité des sulfates dans les eaux dépend de la température et de la présence des éventuels d'autre sel ; voir le tableau ci-dessous.

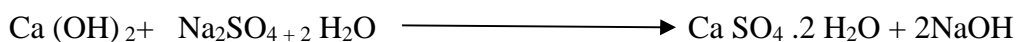
**Tableau III.1 : Solubilité de différents sulfates dans l'eau, à 20 °C.[8]**

Nom	Thénardité	Mirabilite	Cristal de sulfate ferreuxheptahydraté	Anhydrite	Gypse
Compositions	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	Fe SO <sub>4</sub> .7 H <sub>2</sub> O	Ca SO <sub>4</sub>	Ca SO <sub>4</sub> .2 H <sub>2</sub> O
Solubilité (g/l)	58	194	260	2,1	1 ,2

### III-4-2 Processus d'attaque par les sulfates :

La dégradation des bétons par les sulfates se fait par les phénomènes de cristallisation d'étrangéité qui se forme en deux étapes résumées ci-après :

- a) **Formation de gypse secondaire** : résultant de la réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate :



- b) **Formation de l'ettringite** : par la réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment, qui à son tour se cristallise et exerce une pression sur le béton qui provoquera des fissurations par « effet de coin »



Les sulfates les plus agressifs sont les sulfates de magnésium, d'ammonium, de calcium et de sodium. Les sulfates de potassium ont une action voisine de celle du sulfate de sodium, mais la vitesse d'attaque est un peu plus lente.[8]

### III-4-3 Pression de cristallisation de quelque sel :

Lorsque la concentration d'une solution dépasse la limite de saturation pour une espèce donnée, la formation des cristaux suivant les conditions de sursaturation de la solution environnante, peut engendrer des pressions suffisantes pour la fissuration d'un matériau. La relation de Winkler permet de calculer la pression  $p$  d'un sel :  $P = \frac{RT}{V_s} \text{Log} \frac{C}{C_s}$

**R** : constante de gaz parfait ; **T** : température en K° ; **V<sub>s</sub>** : volume molaire du sel

Dans le tableau III.2 les Pressions sont données à partir de concentration  $C$ , sachant que la saturation est atteinte à une concentration  $C_s$  et les valeurs de rapport  $C/C_s = (2 \cdot 10^{-5})$  à la température (0° et 50°)

**Tableau III.2 : Pression de cristallisation de quelques sels.[8]**

		0°	55°	0°	55°	0°	55°
Anhydrite	Ca SO <sub>4</sub>	33,5	39,8	112	132,5	190	226,2
Gypse	Ca SO <sub>4</sub> .2 H <sub>2</sub> O	28,2	33,4	93,8	111	159,5	190
Kiesérite	MgSO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O	27,2	32,4	91	107,9	154,3	184
Thénardité	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	29,2	34,5	97	115	165	196,5
Mirabilite	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	7,2	8,3	23,4	27,7	39,7	47,3
Bischofite	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	11,9	14,2	39,7	47	67,7	80,3
Halite	NaCl	55,4	65,4	184,5	219	313,5	373,7
Thémonatrite	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	28	33,3	93,5	110,9	159	189,1

### III-5 Quelques paramètres chimiques

- **pH**

Est une grandeur qui se mesure et se calcule pour quantifier l'acidité d'une solution. Il reflète la concentration d'une solution en ions H<sup>+</sup>. Plus une solution est concentrée en ions H<sup>+</sup>, plus elle est acide et plus son pH est bas. L'échelle de pH s'étend de 0 à 14 :

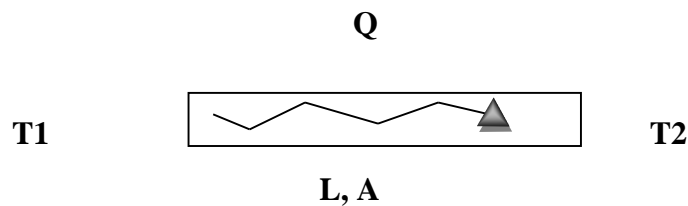
→ Si le pH est inférieur à 7, la solution est acide

→ Si le pH est égal à 7, la solution est neutre.

→ Si le pH est supérieur à 7, la solution est basique.

- **La conduction**

C'est le mode de transfert lent de la chaleur dans un solide ou encore dans un liquide (ou d'un gaz). Un exemple : propagation de la chaleur dans une paroi entre un intérieur d'un bâtiment chauffé et l'extérieur. Un autre exemple simple est celui d'un barreau de longueur  $L$  et de section  $A$  dont on chauffe une extrémité à une température  $T_1$  supérieure au reste du barreau qui est à température  $T_2$ .



que la porosité est importante et la masse volumique est peu élevée, donc plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau transmet la chaleur et s'est ainsi un mauvais isolant.

On va citer quelques définitions de la conductivité thermique :

La conductivité thermique est la vitesse d'écoulement de la chaleur (flux thermique) dans des conditions bien définies, rapporté à l'unité de surface (soit le m<sup>2</sup>), traversant un corps de 1m d'épaisseur par unité de variation de température dans une direction perpendiculaire à la surface. [12]

La conductivité est la propriété physique intrinsèque des matériaux. Pour les matériaux du bâtiment, la détermination de  $\lambda$  est complexe car elle dépend :

- Du matériau : exemple ordres de grandeur de conductivité thermique pour divers types de milieux
- De la température : exemples mousse de polyuréthane et béton
- De sa densité : exemples liège et polystyrène
- De l'humidité : exemple influence de l'humidité sur les matériaux minéraux (brique, béton).

Le (tableau III.3) donne quelques valeurs de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) pour différents matériaux :

**Tableau III.3 : Valeurs moyennes de conductivité thermique de différents types matériaux ou produits [12]**

MATERIAUX	W/m.K	OBSERVATIONS
BITUME	0.17	23°C
PIERRE	4.7	23°C
TERE (sol), sèche	0.4	23°C
SABLE	0.55 à 1.85	23°C
BETON	1.5 à 2	23°C
BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE	0.1 à 0.3	
VERRE	1	23°C

#### ✓ La conductivité électrique (CE)

La conductivité est la propriété que possède une eau pour favoriser le passage d'un courant électrique, elle fournit une indication précise de la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité s'exprime en micro siemens par centimètre, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau.

Sa mesure est utile car au-delà de la valeur limite de la salinité correspond à une conductivité de 2500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , la prolifération de microorganismes peut être réduite.

- **La température [13]**

La température est la traduction à l'échelle macroscopique d'un état énergétique de la matière à l'échelle microscopique et on distingue :

- Pour les solides : c'est l'état de vibration des atomes à l'intérieur d'un réseau cristallin ou de mouvement d'électrons pour les matériaux qui ont la faculté d'échanger des électrons
- Pour les fluides : c'est l'état d'agitation des molécules.

### **Conclusion**

Pour réaliser des bétons durables, il suffit, dans la majorité des cas courants, de confectionner un béton très résistant aux agressions chimiques. Le respect d'exigences supplémentaires concernant la composition chimique du béton est nécessaire pour maîtriser des situations plus sévères.



# **CHAPITRE I**

## **CARACTERISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX**



## Introduction

Pour confectionner un béton selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des différents constituants. La caractérisation des matériaux est indispensable pour toute recherche ou étude d'investigation, parce que chacune de ces caractéristiques a une influence importante sur les résultats d'étude.

### I.1.Présentation générale

La désagrégation des roches primitives par l'eau, le vent et le gel, entraîne la formulation de dépôts sédimentaire en couches meubles plus ou moins épaisse d'éléments de grosseur très variable, allant du sable sin aux gros blocs.

Ces dépôts sont caractérisés par leur composition minéralogique, leur texture, leur état d'altération, et leur porosité.de ces caractéristiques dépendront les propriétés des granulats.

### I.2 Essais sur les granulats

#### I.2.1 Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533) [14]

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur les quantités réduites des matériaux. Ces quantités doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble des matériaux dans lequel on a fait un prélèvement. On dit qu'il faut que l'échantillon soit représentatif.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire: prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui doit être également représentative de l'échantillon de départ.

Chacun de ces deux échantillonnages doit donner un prélèvement aussi représentatif que possible de l'ensemble. Le premier est beaucoup plus embarrassant que le second.

#### ↳ Prélèvement sur le tas (sable et gravier) [14]

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas effectués au niveau :

- De la carrière Sotramest BIR HADDADA, Sétif pour les graviers et les sables.
- Il s'agit de granulats qui sont mis en stock sous forme de tas. Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

### ↪ Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

### ↪ Quartage

Comme le nom l'indique, on divise l'échantillon en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés.

Si cette quantité (1/2) est encore importante, Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (figure I.1).

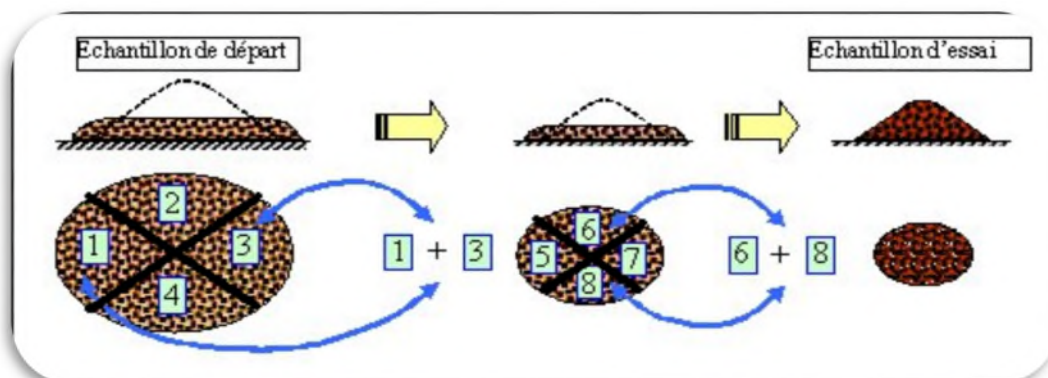


Figure I.1 : Opération de quartage

### I.2.2 Analyse granulométrique (NF P 18-560)[14]

#### ↳ **But de l'essai**

Pour de nombreux travaux et pour l'exécution de nombreux essais, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques de matériaux utilisés, caractéristiques qui représentent:

- Les dimensions.
- La forme.
- La masse volumique.
- La porosité.
- La teneur en impureté, de l'échantillon qui a été prélevé.

L'analyse granulométrique est la première de ces recherches, elle caractérise ces granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent, et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

#### ↳ **Principe de l'essai**

L'analyse consiste à séparer et à classer les grains constituant l'échantillon selon leur grosseurs en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

#### ↳ **Matériel utilisé**

Ce sont des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 80mm. Les

Dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement selon la norme (NF P 18-560), sont les suivantes :

Tableau I.1: Dimensions nominales des tamis[14]

Module	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Tamis (mm)	0.063	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630
Module	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tamis (mm)	0.800	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00
Module	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/
Tamis (mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	/

### ↳ Conduite de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C, et après avoir pris le poids de l'échantillon, on emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'éviter toute perte de matériau pendant le tamisage (Figure I.2).



Figure I.2 : Colonnes de tamis

On appellera tamisât, le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé sur le tamis supérieur et on met le couvercle pour éviter la dispersion de la poussière. On agite manuellement ou mécaniquement cette colonne de tamis.

Puisque cette répartition ne sera pas complète, on prend chaque fois un tamis en adoptant un fond et un couvercle et en agitant ce tamis horizontalement en le tenant d'une main et en le frappant par l'autre. On pèse le refus jusqu'au dernier tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit  $R_1$  la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, soit  $R_2$  la masse du deuxième refus.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés  $R_n$  aux différents niveaux de la colonne de tamis.

#### ↳ Dimensions des tamis utilisés

Pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

0,063 – 0,08 – 0,125 – 0,250 – 0,315 – 0,500 – 1 – 2 – 4 – 6,3.

Pour les graviers, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

0,063 – 0,08 – 0,125 – 0,250 – 0,315 – 0,500 – 1 – 2 – 4 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31,5.

#### ↳ Préparation de l'échantillon

La prise de l'échantillon est effectuée par quartage.

La masse du matériau utilisé sera tel que :  $M \geq 0.2 D$  selon la norme (NF 18-560)

Tel que : **M** : Masse de l'échantillon en kilogrammes (kg).

**D** : Diamètre du plus gros granulat, exprime en millimètre (mm).

Les masses des échantillons soumises à l'essai, sont les suivantes :

15/25  $M \geq (0.2).25 = 5 \text{ kg}$

8/15  $M \geq (0.2).15 = 3 \text{ kg}$

Sable 0/4  $M \geq (0.2).4 = 0.8 \text{ kg}$

### I.2.2.1 Analyse granulométrique des gravillons

Les résultats des analyses granulométriques pour les gravillons 15/25 et 8/15 sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau I.2: Analyses granulométriques du gravier 15/25.**

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 5150g$			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
31.5	0	0	100
25	0	0	100
20	979	19	81
16	4402	85	15
14	5024	97	3
12.5	5095	99	1
10	5116	99	1
8	5120	99	1
6.3	5122	99	1
4	5122.5	99	1
2	5127	99	1
1	5128	99	1
0.500	5129	99	1
0.315	5132	99	1
0.250	5133	99	1
0.125	5138	99	1
0.080	5142	100	0
0.063	5145	100	0



Tableau I.3 : Analyses granulométriques du gravier 8/15.

Ouverture des tamis (mm)	Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}} = 6731\text{g}$		
	Refus cumulés $R_n$ (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
31.5	0	0	100
25	0	0	100
20	0	0	100
16	540	08	92
14	2350	34	66
12.5	3290	48	52
10	5240	77	23
08	6368	93	7
6.3	6641	97	3
4	6667	97	3
2	6670	97	3
1	6672	97	3
0.500	6676	98	2
0.315	6678	98	2
0.250	6680	98	2
0.125	6685	98	2
0.080	6696	98	2
0.063	6700	98	2

### I.2.2.2 Analyses granulométriques du sable

#### ↳ Préparation de l'échantillon

On prend le poids du sable à son état naturel humide. Séché à l'étuve à une température de 105°C. Soit ( $M_{\text{éch}}$ ) sa masse sèche.

#### ↳ Exécution de l'essai

Le mode opératoire de l'analyse granulométrique du sable est le même que pour les gravillons, le résultat de cette analyse est représenté dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Analyses granulométriques du sable 0/4.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 979g$			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
<b>6.3</b>	1.24	0	<b>100</b>
<b>4</b>	50.66	4	<b>96</b>
<b>2</b>	404.10	35	<b>65</b>
<b>1</b>	617.72	54	<b>46</b>
<b>0.500</b>	790.51	69	<b>31</b>
<b>0.315</b>	841.51	73	<b>27</b>
<b>0.250</b>	865.31	75	<b>25</b>
<b>0.125</b>	928.89	81	<b>19</b>
<b>0.08</b>	960.87	84	<b>16</b>
<b>0.063</b>	974.81	85	<b>15</b>

### I.2.2.3 Expression des résultats

Les pourcentages des tamisâts cumulés, sont représentés sous forme d'une courbe granulométrique sur un graphique semi-logarithmique, en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique et les pourcentages des tamisâts en ordonnée, sur une échelle arithmétique. Les courbes sont tracées de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Les représentations graphiques des analyses granulométriques des tableaux (I.2, I.3 et I.4), sont données par la (figure I.3).

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse **MF**. Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules (22, 25, 28, 31, 34, 37). Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

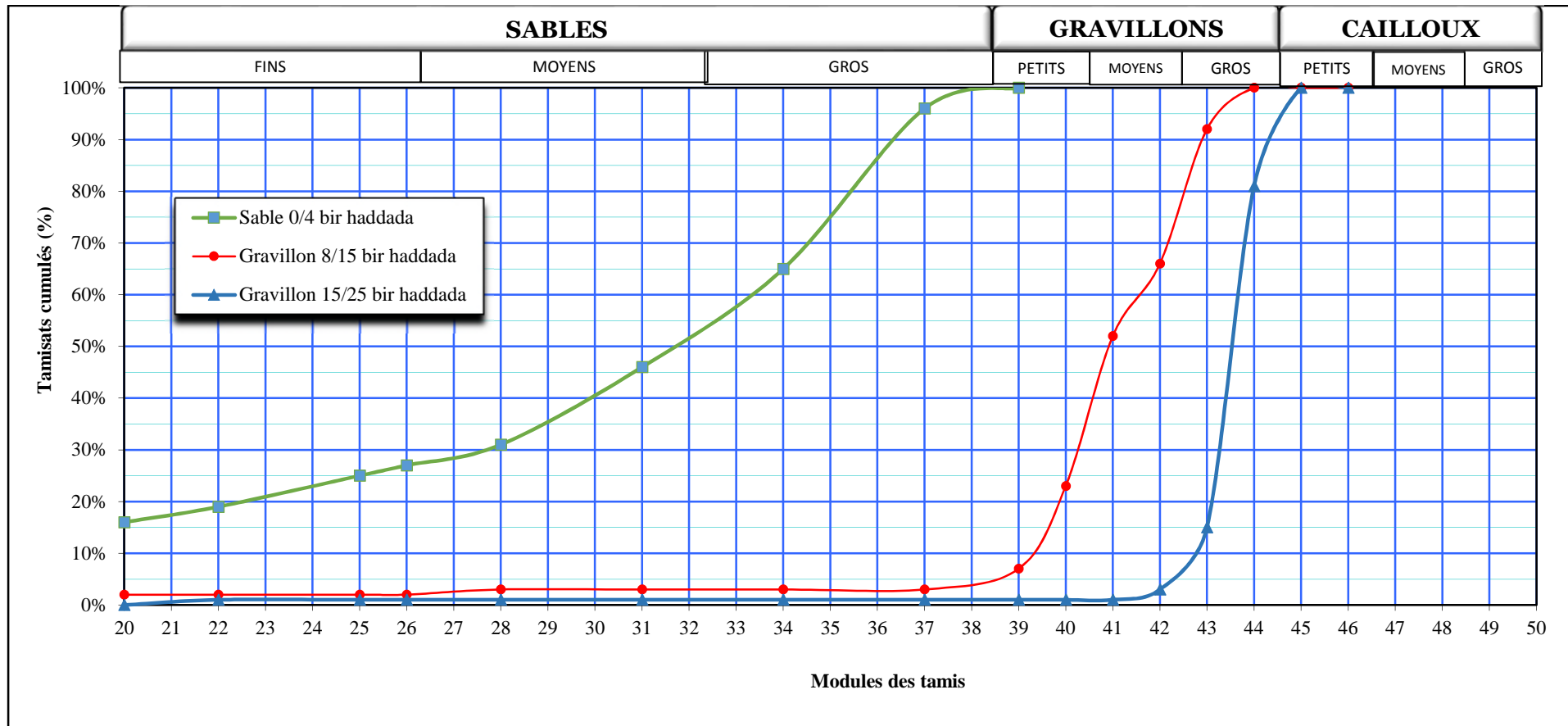


Figure I.3 : Analyses granulometriques de sable et graviers.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable présenté précédemment, son module de finesse est égal à:

$$MF = \frac{4+35+54+69+75+81}{100} = 3,18 \text{ Notre sable est moyen}$$

$$1,8 < MF < 3,2$$

### I.2.3 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF P 18-561) [15]

#### ↳ But de l'essai

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessite de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts, et par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

#### ↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer une double opération de tamisage :

Le tamisage classique (analyse granulométrique) sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées, pour classer l'échantillon de granulats étudié en différentes classes granulaires  $d/D$  dont les dimensions sont telles que  $D = 1.25 d$  ; suivant la grosseur  $G$ .

De ce fait, les classes de grosseur  $G$  ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

Le tamisage des différentes classes granulaires  $d/D$ , ainsi isolées, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement  $E = d / 1.58$ .

On peut donc associer à chaque classe granulaire  $d/D$  un tamis à fente correspondant de largeur  $E$ , ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement  $A_i$  Partiels. Il est ensuite possible de déterminer le coefficient d'aplatissement global  $A$  de l'échantillon, qui est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différents classes granulaires  $d/D$  composants l'échantillon.

La correspondance entre classes granulaires  $d/D$  et grilles à fentes de largeur  $E$  est donnée dans le (Tableau I.5) suivant :

Tableau I.5 : Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées

Classes granulaires d/D (mm)	Ecartement E des grilles à fentes (mm)
>50	13.5
40 – 50	25
31.5 – 40	20
25 - 31.5	16
20 – 25	12.5
16 – 20	10
12.5 - 16(1)	8
10 - 12.5	6.3
8 – 10	5
6.3 – 8	4
5 - 6.3	3.15
4 – 5	2.5
(1) Ou 14 pour la 10-14 mm	

### ↳ Equipement nécessaire

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat :

Une série de tamis normalisés à mailles carrées, utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme **NF P 18-560**.

On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

50 – 40 - 31,5 – 25 – 20 – 16 – 14 - 12,5 – 10 – 8 - 6,3 – 5 et 4 mm.

Une série de tamis à fentes de largeur normalisées (grille). Constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré (Figure I.4).

Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

31,5 – 25 – 20 – 16 – 14 - 12,5 – 10 – 8 - 6,3 – 5 – 4 - 3,15 et 2,5 mm.



Figure I.4 Grilles à fentes.

#### ↳ Conduite de l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **NF P 18-533**.

On opère, comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon représentatif de matériaux de masse  $M$  qui doit être supérieure à  $0.2 D$  ( $M \geq 0.2 D$ ), avec :

**M** : la masse de l'échantillon exprimé en (kg).

**D** : le diamètre maximum des granulats exprimé en (mm).

Procéder au tamisage de l'échantillon sur tamis à mailles carrées par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme **NF P 18 560**. Puis tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous.

#### Expression du coefficient d'aplatissement « A »

Pour une classe granulaire  $d/D$  donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel :

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} * 100$$

Avec :

**M<sub>gi</sub>** : masse de la classe granulaire d/D.

**Me<sub>i</sub>** : masse du passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global **A** s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n Me_i}{\sum_{i=1}^n M_{gi}} * 100$$

Remarque

Il faut que la perte de matériaux pendant le tamisage soit telle que :

$$\sum_{i=1}^n M_{gi} \geq 0.98M_0$$

- **Calcul du coefficient d'aplatissement « A » pour les gravillons**

On a effectué l'essai d'aplatissement pour les gravillons 8/15 et 15/25, et on a calculé leurs coefficients d'aplatissement.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les (Tableaux I.6 et I.7) suivants :

Tableau I.6 : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaires d/D (mm)	Mgi (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Mei (g)	$A_i = \frac{Me_i}{M_{gi}} * 100$
25 – 31.5	00	16	-	-
20 – 25	1111	12.5	66	6
16 – 20	3300	10	163	5
12.5 – 16	764	08	46	6
10-12.5	57	6.3	03	5
8-10	6	5	0.8	1
6.3-8	1	4	0	0
5-6.3	0	3.15	0	0
4-5	0	2.5	0	0
$\sum M_{gi} = 5239g$		$\sum M_{gei} = 279g$		
$\sum M_{gi} = 5239g > 0.98 * 5245 = 5140.1g$				
$A = \frac{\sum_{i=1}^n Me_i}{\sum_{i=1}^n M_{gi}} * 100 = 5$				



Tableau I.7 : Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 08/15

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaires d/D (mm)	Mgi (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Mei (g)	$A_i = \frac{Me_i}{M_{gi}} * 100$
16 – 20	562	10	42	7
12.5 – 16	2532	08	225	9
10-12.5	1589	6.3	110	7
8-10	923	5	53	6
6.3-8	168	4	0.9	1
5-6.3	0.5	3.15	0	0
4-5	0.2	2.5	0	0
$\sum M_{gi} = 5774.7g$		$\sum M_{gei} = 431g$		
$\sum M_{gi} = 5774.7g > 0.98 * 5800 = 5684g$				
$A = \frac{\sum_{i=1}^n Me_i}{\sum_{i=1}^n M_{gi}} * 100 = 7$				

Les coefficients d'aplatissements des deux graviers (8/15 et 15/25) sont inférieurs à 20, donc nos gravillons sont massifs.

#### I.2.4 Détermination de la propreté superficielle [16]

##### I.2.4.1 Calcul de la teneur en impuretés (pour les graviers) (NF P 18-591)

###### ↳ Définition

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

###### ↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer par lavage sur le tamis 0.5 mm, les particules inférieures à 0.5mm contenues dans l'échantillon pour essai.

###### ↳ Matériels utilisés

- Un tamis de 0.5 mm.
- Un tamis de décharge.

- Une balance.
- Une étuve réglée à 105°C.

#### ↳ Préparation de l'échantillon soumis à l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les perspectives de la norme (NF P 18-533) c'est-à-dire par quartage.

La masse (M) de l'échantillon pour essai doit être comprise entre 200D et 600D. (M) étant exprimée en grammes, et (D) la dimension maximale des plus gros éléments en millimètres.

#### ↳ Exécution de l'essai

- Préparer l'échantillon tel qu'il est (dans son état humide). Soit ( $M_h$ ) sa masse humide.
- Laver l'échantillon après l'avoir peser sur le tamis de 0.5mm sous un jet d'eau.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser l'échantillon sec. Soit ( $M_s$ ) sa masse.

#### ↳ Expression des résultats

La teneur en impuretés des granulats « P » est obtenue par le rapport :

$$P = [M / M_{1s}] \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

**Tableau I.8 : Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15.**

Echantillons Caractéristiques	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Masse sèche $M_{1s}$ (g)	3000	5000
Masse sèche $M_s$ (g)	/	/
Masse sèche $m'$ (g)	2950	4976
Masse sèche $m$ (g)	50	24
Propreté superficielle P (%)	1.66	0.48

On remarque que la teneur en impureté P (15/25) < 1,5  $\Rightarrow$  Donc nos gravillons sont propres, il ne nécessite pas un lavage.

#### I.2.4.2 Détermination de propreté de sable

Pour les sables, la propreté peut se contrôler comme pour les graviers, mais la mesure la plus pratiquée et la plus représentative demeure de l'essai dit «Equivalent de Sable » réalisé

dans des éprouvettes, à l'aide d'une solution lavante et dont le principe se base sur la vitesse de sédimentation des grains.

#### ↳ **Equivalent de sable (NF P 18-598) [16]**

##### ✓ **Définition**

La détermination de l'ES s'effectue sur la fraction de sable passants au tamis à mailles carrés de 5 mm et compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argiles, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100 de la hauteur sédimentée à la hauteur totale du floculat.

Ces hauteurs sont mesurées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution lavante capable de faire flocculer les éléments fins l'équivalent de sable s'exprime par:

- **ESP** : Equivalent de sable mesuré au piston (le sable est compacté dans l'éprouvette).
- **ESV** : Equivalent de sable mesuré a vue (les hauteurs mesurées directement par la règle).

##### ✓ **But de l'essai**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable si le pourcentage de fine ne dépasse pas les 10%.

Dans notre cas, le pourcentage en fine du sable BIR HADDADA est de 15% alors, on effectuera cet essai.

##### ✓ **Matériels utilisés**

- Prise d'essai correspondant à une masse sèche de  $120\text{g} \pm 1\text{g}$  de sable passant au tamis de 5mm.
- Eprouvettes graduées.
- Un tube laveur (tuyau souple, robinet).
- solution lavante.
- Une règle graduée.
- Un piston.
- Un chronomètre.
- Un agitateur électrique.

**✓ Préparation de l'échantillon pour essai**

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **(NF P 18-553)**.

Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g.

L'essai s'effectue sur un sable dont la masse sèche doit être égale à  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ .

**✓ Exécution de l'essai****• Mise en place de l'essai**

- La solution lavante ayant été introduite dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait de repère inférieur, la prise d'essai, correspondant à une masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  de matériau, est versée soigneusement à l'aide d'un entonnoir, dans l'éprouvette posée verticalement.
- Laisser reposer dix minutes.

**• Agitation de l'éprouvette**

- À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.
- Faire subir à l'éprouvette  $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycle}$  en  $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ .
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.
- Lavage
- Enlever le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait de repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintient à hauteur du trait de repère.
- Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

- Mesures

- Laisser reposer pendant  $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ .
- Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du régllet la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.
- Mesurer également la hauteur  $h_2$  du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le régllet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- Lire la hauteur du sédiment  $h'_2$  au niveau de la face supérieure du manchon.
- Arrondir les hauteurs  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h'_2$  au millimètre le plus voisin (Figure I.5).

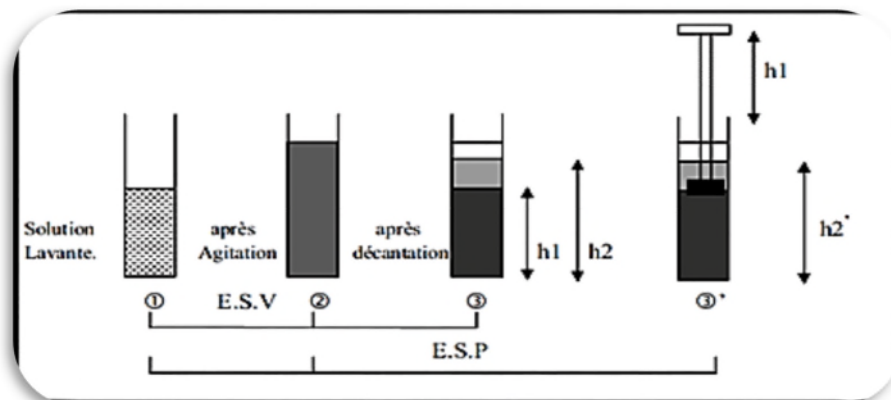


Figure I.5 : Equivalent de sable.

**1)- détermination de la teneur en eau W :**

A partir du premier échantillon, on détermine la teneur en eau W exprimée en pourcentage sur deux prises (deux échantillons) de 100g à 200g :

- on prend la masse des deux échantillons humides, soient Mh1 et Mh2.
- Mettre à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures
- On prend la masse des deux échantillons secs, soient Ms1 et Ms2.
- On déduit la teneur en eau W des deux échantillons, sachant que :

$$W1 = (Mh1 - Ms1) \times 100$$

$$W2 = (Mh2 - Ms2) / Ms2 \times 100$$

On prend la moyenne des deux valeurs W1 et W2, soit :

$$W = (W1 + W2) / 2$$

**2)- détermination de la teneur en fines f et préparation du sable correcteur Msc**

Tamiser sous eau le deuxième échantillon de masse Mh sur le tamis 0.063mm.

Sécher et peser les éléments retenus sur ce tamis pour déterminer la teneur en fines f, exprimée en pourcentages, du sable : ce refus servira de sable correcteur.

Si Ms est la masse de ce refus à 0.08 mm après passage à l'étuve, on a :

$$F = 100 - (Ms (100 + W) / Wh).$$

Si le pourcentage de fines f est inférieur ou égal à 10%, il n'y a pas lieu d'utiliser de sable correcteur et l'essai s'effectue directement de manière classique sur le troisième et le quatrième échantillon à leur teneur en fines d'origine.

La masse de chaque échantillon pour l'essai exprimée en grammes, est alors égale à :

$$M_{éch} = 120(1 + W/100).$$

Si le pourcentage de fines f est supérieur à 10%, prendre une masse égale à :

$120/f (1 + W/100)$ , ajouter à cette masse une quantité de sable correcteur sec Msc (fraction sableuse 0.08/2 mm), afin de ramener la teneur en fines du sable à 10%

La masse de sable correcteur Msc, nécessaire à cet ajustement est calculée suivant la formule

Suivante :  $M_{sc} = 120 - 1200/f$

Donc, la masse de l'échantillon pour l'essai, exprimée en grammes est alors égale à :

$$M_{éch} = M_{sc} + [1200/f (1 + w/100)].$$

## ✓ Expression des résultats

L'équivalent de sable par piston est donné par la formule :

$$Esp = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$Esv = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Le (tableau I.9) suivant récapitule les résultats de l'essai :

**Tableau I.9 : Calcul de teneur en eau W du sable 0/4**

Echantillon 1	Echantillon 2
Mh1=122.31	Mh2=120.91
Ms1=118.5	Ms2=117.21
W1= 3.21	W2=3.15
W=3.18%	

**Tableau I.10 : Détermination de f et M<sub>sc</sub> ainsi que M<sub>ech</sub>**

Masse humide du sable Mh (g)	667.1
Masse sèche du sable Ms (g)	527.49
Teneur en fines du sable f (%)	18.41
Masse du sable correcteur Msc (g)	54.81
Masse de l'échantillon soumis à l'essai Méch (g)	122.06

**Tableau I.11 : calcul d'ES pour le sable 0/4**

Eprouvettes	Hauteur total du flocculat h1 (cm)	Hauteur du sable visible h2 (cm)	Hauteur du sable par piston h'2 (cm)	Expression des résultats		Moyenne	
				ESV (%)	ESP (%)	ESV <sub>moy</sub> (%)	ESP <sub>moy</sub> (%)
1	11	8.9	8.6	80.90	78.18	80.73	77.00
2	10.6	8.7	8.2	82.07	77.35		
3	10.6	8.4	8	79.24	75.47		

Dans notre étude on prendra en considération que la valeur de l'équivalent de sable par piston ESP donc :

ESP > 70 ; sable propre à faible pourcentage de fines argileux.

#### ↳ **Essai au bleu de méthylène dit aussi essai à la tache NF P 18-592 [14] [16]**

##### ✓ **Définition et but de l'essai :**

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sable à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. On appelle valeur au bleu des fines, la quantité de bleu de méthylène adsorbée par une quantité de fines.

##### ✓ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fixer sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé.

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylènes dans un bain aqueux contenant la prise d'essai.

On contrôle la capacité d'adsorption du bleu après chaque ajout en effectuant une tache sur un papier filtre (teste à la tache).

##### ✓ **Equipement nécessaire :**

- Une balance de portée suffisante (capacité minimal de 300g), et d'une précision relative de 0.1 %.
- Un chronomètre au 1/10<sup>e</sup> de seconde.
- Tamis de mailles carrées d'ouvertures 5mm et 2 mm.
- Un bécher en plastique ou en verre de 1000 cm<sup>3</sup>, doit avoir les dimensions approximatives suivantes : 140 mm de hauteur et 100 mm de diamètre.
- Un agitateur magnétique, de vitesse de rotation est d'au moins 400 tours/minute, muni d'un aimant de 8 mm de diamètre et de 60 mm de longueur.
- Burette de 50 ml, ou une burette automatique, graduée en 1/10<sup>e</sup> ml.



- Papier filtre sans cendre, de  $95 \text{ g/cm}^3$  de poids et de 0.2 mm d'épaisseur.
- Solution de bleu de méthylène, de quantité médicinale a 10 g/l plus ou moins 0.1 g/l.
- Eau distillée.
- Une baguette en verre, qui doit avoir une longueur approximative de 300 mm et de diamètre de 8 mm.

✓ **Conduite de l'essai :**

- **Préparation de la solution du bleu de méthylène a 10g/l**

Préparer la solution de bleu de méthylène en mélangeant, a raison de 10g de poudre de bleu de méthylène par litre de solution, des cristaux de bleu de méthylène a de l'eau distillée. Porter à 40 °C et agiter pendant 3h à environ 300 tours par minute, à cette fin utiliser l'agitateur magnétique combiné de plaque chauffante.

- **Préparation de l'échantillon :**

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/2 mm du matériau ; car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 mm). Qui contiennent la fraction argileuse.

Celle-ci donne l'essentielle de la réaction au bleu de méthylène.

- **Mise en place de la prise d'essai :**

On prépare 20g de la fraction 0/2 mm du sable sec que l'on met à tremper dans un bêcher de 100 ml d'eau déminéralisée. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur pendant 3 min, à 400 tr/min.

- **Test de la tâche :**

Il consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension du sable jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Et le test de la tache permet de repérer l'instant de saturation.

Pour cela, on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sable imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre.

Deux cas possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) incolore :

**Le test est négatif.**

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) teintée de bleu : **Le test est positif.**

- **Dosage :**

A l'aide de la burette, on injecte dans le récipient une dose de  $2 \text{ cm}^3$  de solution de bleu de méthylène, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre.

On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu tout en effectuant des tests de minute en minute.

Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute.

- ✓ **Expression des résultats :**

La valeur de bleu du sable est donnée par la formule :  $V_B = \frac{V}{M}$  ; avec :

V : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif (en  $\text{cm}^3$ ).

M : masse sèche de la prise d'essai (en g).

- ✓ **Résultats de l'essai :**

(Voir la figure I.6).

$$V_B = \frac{4}{30} = 0.13$$

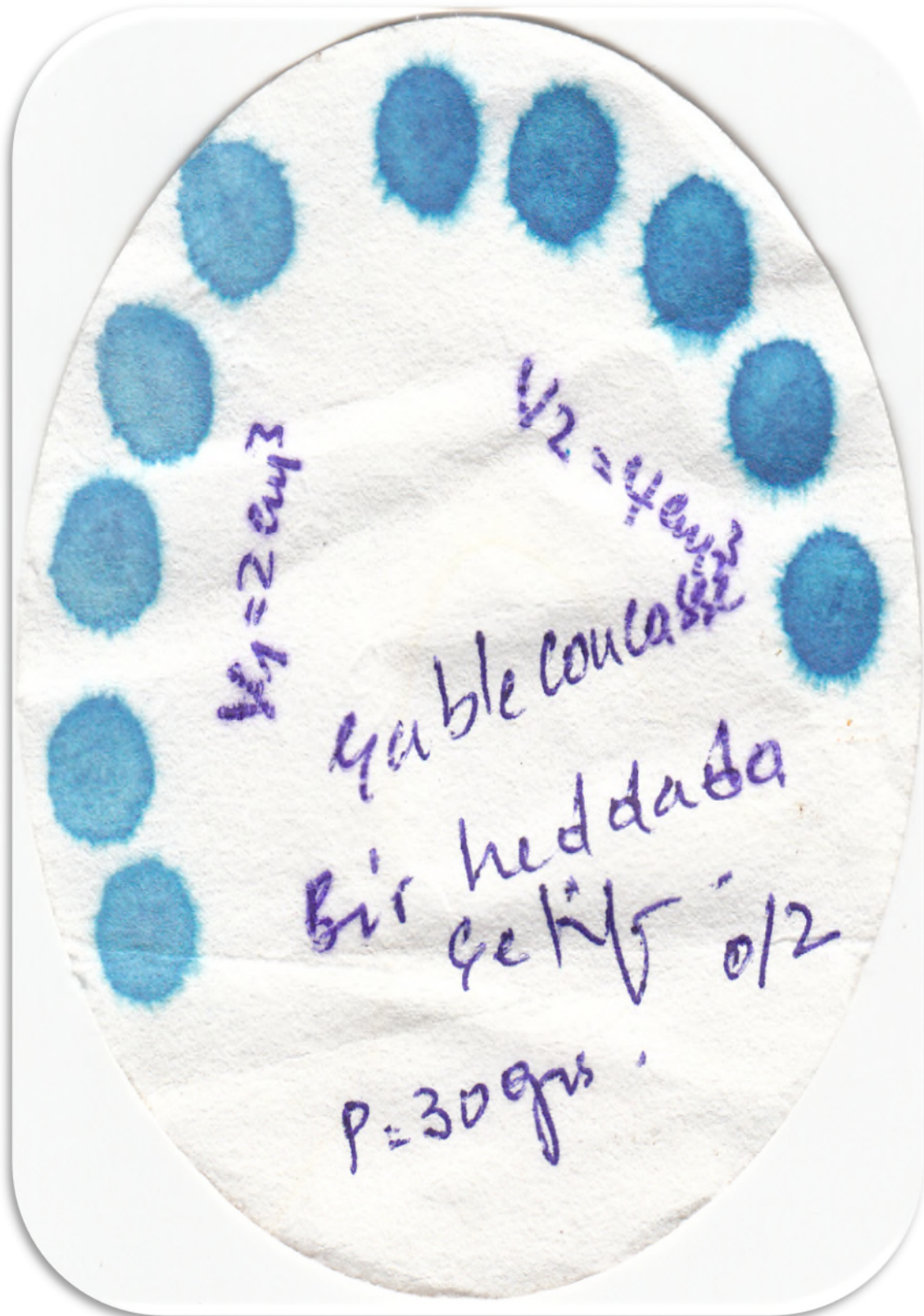


Figure I.6 : résultats de l'essai à la tache

**✓ Interprétation des résultats :**

Comme  $V_B < 1 \rightarrow$  sable non argileux.

**I.2.5 L'essai de friabilité de sable [17]****✓ But de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau.

Les éléments fins du sable, inférieurs à 0.2 mm, ne sont étudiés.

Le sable est écrêté à 2 ou 4 mm.

**✓ Définition :**

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai.

Si  $M$  est la masse de matériau soumis à l'essai et  $m$  la masse des éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

$$F_S = 100 \frac{m}{M}$$

**✓ Préparation de l'échantillon soumis à l'essai :**

Tamiser par voie humide le matériau sur les tamis 0.2mm ou 4 mm.

Sécher à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0.1%.

Homogénéiser et peser l'échantillon pour essai qui doit être de  $500g \pm 2g$ .

Préparer la charge broyant de façon suivante :

Pendre 9 billes de 30mm de diamètre, dont la masse doit être comprise entre 925g et 985g, ajouter 21 billes de 18 mm de diamètre, dont la masse doit être comprise entre 440g et 500g et compléter avec des billes de 10mm de diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de  $2500g \pm 4g$ .

L'usure de la charge doit être contrôlée périodiquement. Les billes de 18 mm et 30mm sont contrôlées par pesée de l'ensemble et remplacement des plus usées par pesées élémentaires, jusqu'à se retrouver à l'intérieur des tolérances. Les billes de 10mm sont contrôlées en les pesants par lot de dix, en deçà d'une masse de 34 g par lot elles sont remplacées par des billes conformes.

**✓ Exécution de l'essai :**

Introduire la charge dans le cylindre d'essai, puis les 500g de matériau préparé.

Ajouter 2.5l d'eau.

Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de  $100tr/min \pm 5tr/min$  pendant 1500 t ou 15 min.

Verser ensuite lentement la totalité du cylindre sur deux tamis superposés de 8mm (pour recueillir la charge abrasive) et de 0.1mm.

Laver l'ensemble sous un jet d'eau, jusqu'à eau claire, puis enlever le tamis de 8 mm.

Sécher le refus au tamis de 0.1 mm a l'étuve a 105 °C, jusqu'à masse constante.

Tamiser à sec le refus a 0.1 mm.

Peser a 0.1% près le refus sur le tamis de 0.1 mm, soit  $m'$  cette masse.

✓ **Expression des résultats :**

La masse des éléments inférieurs à 0.1 mm produit durant l'essai est égale à  $m = 500 - m'$ .

Le coefficient de friabilité mesuré est alors :

$$F_s = 100 \frac{500 - m'}{500} = \frac{m}{5}$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le (tableau I.10) ci-dessous :

**Tableau I.12 : Résultats de la friabilité de sable 0/4**

Classe granulaire	Masse sèche du refus à 0.1mm $m'$ (gr)	Masse des éléments < 0.1mm $m = 500 - m'$ (gr)	Coefficient de friabilité
0.2/4	284.29	215.71	43.142

### I.2.6 Détermination des masses volumiques NF P 18 – 555 [17]

✓ **Définition**

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps.

Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent, il faut distinguer de même :

Masse volumique absolue.

Masse volumique apparente.

Les masses volumiques s'expriment en  $t/m^3$ , en  $kg/dm^3$ , ou en  $g/cm^3$

**✓ Principe de la détermination**

Il suffit de déterminer le volume (absolu ou apparent) occupé par une certaine masse du corps étudié.

La détermination des masses ne présente en général aucune difficulté.

Il n'en est pas de même pour les volumes. Et le problème est très différent suivant qu'il s'agit de volumes absolus ou apparents : nous traiterons chacune de ces questions séparément.

**I.2.6.1 Détermination de la masse volumique absolue <<pa>>****✓ Généralités**

Le volume absolu du corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

**✓ Définition**

La masse volumique absolue <<pa>>est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides existant dans ou entre les grains.

↳ **Méthode de la mesure au pycnomètre**(pour les sables) :

**✓ Equipement nécessaire**

Le pycnomètre est un petit ballon d'environ 50 à 100 cm<sup>3</sup>, fermé dans sa partie haute par un bouchon bien rodé, ce qui permet d'isoler un volume d'eau caractéristique à l'appareil, identique à chaque utilisation.



**Figure I.7 : pycnomètre**

**✓ Préparation de la prise de l'essai**

Les granulats doivent être échantillonnés conformément à l'EN 932-1, puis réduits conformément à l'EN 932-2. La masse de la prise d'essai de granulats doit être supérieure ou égale à 1 Kg.

Laver la prise d'essai sur un tamis de 4 mm et de 0.063 mm afin d'éliminer les grains les plus fins. Rejeter les grains refusés au tamis 4 mm.

**✓ Conduite de la mesure**

Immerger la prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à  $(22\pm 3)$  °C et éliminer l'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre en position inclinée. Placer le pycnomètre dans le bain d'eau et maintenir la prise d'essai à une température de  $(22\pm 3)$  °C pendant  $(24\pm 0,5)$ . A l'issue du trempage, retirer le pycnomètre du bain d'eau et éliminer tout reste d'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre. (l'air occlus peut également être éliminé en faisant le vide).

Faire déborder le pycnomètre en rajoutant de l'eau et placer le couvercle en évitant piéger de l'air dans le récipient. Puis sécher l'extérieur du pycnomètre et peser (**M<sub>2</sub>**).

Laisser décanter la majeure partie de l'eau recouvrant la prise d'essai et vider le pycnomètre sur un plateau.

Remplir à nouveau le pycnomètre avec de l'eau et remettre le couvercle comme précédemment. Puis sécher l'extérieur du récipient et le peser (**M<sub>3</sub>**).

Étaler la prise d'essai imbibée pour obtenir une couche régulière au fond du plateau. Exposer les granulats à un faible courant d'air chaud pour évaporer l'humidité en surface. Remuer fréquemment. Les granulats afin de bien les sécher tous jusqu'à ce qu'on ne puisse plus voir de l'humidité en surface et que les grains n'adhèrent plus les uns aux autres. Laisser l'échantillon refroidir à température ambiante tout en le remuant.

Pour s'assurer que le séchage de surface est atteint, poser le moule tronconique sur le fond du plateau, le plus grand diamètre dirigé vers le bas. Remplir le moule avec une partie de la prise d'essai en cours de séchage et la tasser légèrement à 25 reprises à l'aide du pilon. Ne pas rajouter de granulats après les avoir tassés. Soulever doucement le moule. Si le cône de granulats ne s'effondre pas, il faut poursuivre le séchage et recommencer l'essai jusqu'à ce que le cône s'effondre une fois le moule retiré.

Sécher les granulats dans une étuve ventilée à une température de  $(110\pm 5)$  °C jusqu'à masse constante (**M<sub>4</sub>**).

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés, et on déduit la masse volumique absolue  $\rho_a$  du matériau ; telle que :

$$\rho_a = M_4 / [ M_4 - ( M_2 - M_3 ) ] \cdot \text{g/cm}^3$$

La masse du pycnomètre rempli d'eau :  $M_3 = 1515,23 \text{ gr.}$

✓ **Résultats obtenus**

Les résultats obtenus sont donnés dans le (tableau I.11) suivant

**Tableau I.13 : Résultats de la masse volumique absolue du sable 0/4**

Matériau	$M_2$ (g)	$M_3$ (g)	$M_4$ (g)	$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Sable 0/4	2025.52	1515.23	815.46	2.67

↪ **Détermination de la masse volumique absolue pour les graviers (FN P 18 – 554) [17]**

✓ **Appareillage :**

Appareillage d'usage courant nécessaire à la préparation d'un échantillon pour essai (voir la norme de l'échantillonnage) :

- Etuve ventilée réglée à  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1%.
- Panier en toile métallique à mailles  $\leq 3 \text{ mm}$  ou récipient en tôle perforée à perforations  $\leq 3 \text{ mm}$  de dimensions adéquates, muni d'anses métalliques servant à le suspendre au fléau de la balance.
- Récipient dans lequel on peut suspendre librement le panier ou le récipient en tôle perforée.
- Tamis de 4 mm.
- Chiffons absorbants de dimensions adéquates.

✓ **Matériau soumis à l'essai**

L'échantillon pour essai doit être préparé suivant les prescriptions de la norme de l'échantillonnage.

La masse de l'échantillon pour essai doit avoir une masse **M** supérieur à  $0.2 \text{ D}$ . avec **M** exprimé en kilogrammes et **D** en millimètre.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Laver l'échantillon sur le tamis de 4 mm.



- Le sécher à l'étuve à  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  jusqu'à masse constante c'est-à-dire jusqu'à ce que deux successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1%.
  - La laisser refroidir et le peser ; soit  $M_s$  sa masse.
  - Immerger l'échantillon dans l'eau 24 h à  $20^{\circ}\text{C}$  à la pression atmosphérique.
  - Peser ensuite l'échantillon après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, l'élément étant essuyés individuellement, soit  $M_a$  sa masse.
  - Après la pesée précédente, placer l'échantillon imbibé dans le panier en toile métallique, l'immerger dans l'eau à  $20^{\circ}\text{C}$  à l'aide du récipient prévu.
  - Peser ensuite l'échantillon soit  $M'_a$  sa masse.
- Les résultats obtenus sont établis dans le (tableau I.12) qui suit.

**Tableau I.14 : Résultats de la masse volumique absolue des graviers.**

Matériau	$M_s$ (g)	$M_a$ (g)	$M'_a$ (g)	$\rho_a = \frac{M_s}{(M_a - M'_a)}$ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Gravier 8/15</b>	1422.05	1429.77	891.14	<b>2.64</b>
<b>Gravier 15/25</b>	1075.24	1079.50	679.05	<b>2.68</b>

### I.2.6.2 Détermination de la masse volumique apparente $\rho_p$ (NF P 18-554) [14]

#### ✓ Définition

On appelle masse volumique apparente, la masse de l'unité de volume du matériau en vrac, c'est-à-dire vide compris.

#### ✓ Matériels Utilisés

- Un récipient.
- Une règle à araser.
- Une balance.



Figure I.8 : mesure de la masse volumique apparente

## ✓ Conduite de l'essai

- On pèse d'abord le récipient vide ( $M$ ) pour éliminer son poids propre, dans la balance.
- On prend une quantité du matériau, pour faire l'échantillonnage.
- On met le matériau échantillonné dans les mains formant un entonnoir.
- On laisse le matériau couler dans le récipient afin d'avoir un débordement.
- On arase le surplus du matériau à l'aide d'une règle à araser.
- On pèse le récipient rempli. Soit  $M'$  la masse de l'ensemble.

L'opération doit être effectuée trois fois pour chaque échantillon.

Telle que :  $\rho_p = (M' - M) / V_r$  avec :

$M$  : la masse du récipient vide qui est égale à 2657g.

$M'$  : la masse du récipient plein.

$V_r$  : volume du récipient  $V_r = 4693 \text{ cm}^3$ .

Les résultats obtenus sont donnés dans le (tableau I.15) suivant :

Tableau I.15 : Résultats de la Masse volumique apparente.

Matériau	N° échantillon	Masse pleine(g)	$M' - M$ (g)	Volume du récipient ( $\text{cm}^3$ )	$\rho_p = \frac{M' - M}{V}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\rho_{p\text{moy}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
<b>Gravier 15/25</b>	1	9423	6766	4693	1.44	<b>1.45</b>
	2	9472	6815	4693	1.45	
	3	9544	6887	4693	1.46	
<b>Gravier 8/15</b>	1	9815	7158	4693	1.52	<b>1.51</b>
	2	9778	7121	4693	1.51	
	3	9760	7103	4693	1.51	
<b>Sable 0/4</b>	1	9950	7293	4693	1.55	<b>1.60</b>
	2	10200	7543	4693	1.60	
	3	10392	7735	4693	1.64	

**I.2.7 Mesure de la compacité [18]****✓ Définition**

On appelle compacité le rapport du volume absolu au volume du récipient.

$$C = (V_s / V) \leq 1 \quad \text{avec :}$$

C : la compacité.

$V_s$  : volume absolu du solide.

V : volume du récipient.

$$\text{Comme : } M = V \times \rho_p$$

$$\text{Et } M = V_s \times \rho_a$$

$$\text{Il en est que } C = \frac{\rho_p}{\rho_a} = \frac{\text{Masse volumique apparente}}{\text{Masse volumique absolue}}$$

La compacité se déduit donc, directement des mesures de masse volumique apparente et masse volumique absolue.

**I.2.8 Mesure de la porosité P [18]****✓ Définition**

La porosité est le complément à l'unité de la compacité.

$$P = 1 - C$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le (tableau I.16) suivant :

**Tableau I.16 : Mesure de compacité et de la porosité des granulats**

Echantillons	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Compacité	Porosité
Gravier 15/25	1.45	2.68	0.54	0.46
Gravier 8/15	1.51	2.64	0.57	0.43
Sable 0/4	1.60	2.67	0.59	0.41

**I.2.9 Essai de résistance à l'usure et au choc****↳ But des essais**

Lors de la fabrication d'un béton, le malaxage est source de frottements intenses entre grains.

Si ces derniers ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de résistance au choc et à

l'usure, afin que les granulats puissent répondre aux spécifications de fabrication des bétons et aussi aux impératifs de pérennité des chaussées.

### I.2.9.1 Essai Micro – Deval (NF P 18-572) [14] [17]

#### ↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive dans un cylindre en rotation.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires : 4 à 6.3mm ; 6.3 à 10mm ; 10 à 14mm de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Si (**M**) est la masse du matériau soumis à l'essai, (**m**) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité :  $\frac{m}{M} \times 100$

Par définition, cette quantité sans dimension est appelée, suivant la méthode employée : coefficient Micro-Deval en présence d'Eau tel que :  $MDE = \frac{m}{M} \times 100$

#### ↳ Matériel utilisé

L'appareil Micro-Deval comporte 1 à 4 cylindres d'essai en acier ; ils sont entraînés en rotation par l'intermédiaire de deux arbres horizontaux. Chaque cylindre permet d'effectuer 1' essai (Figure I.9).

- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques en acier.
- Un moteur doit assurer aux cylindres une vitesse de rotation régulière de  $100 \pm 5$  tours/min.
- Un jeu de tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10 et 14 mm.



Figure I.9 : Appareil de Micro-Deval

### ↳ Matériau soumis à l'essai

Pour effectuer un essai en présence de l'eau :

- Tamiser l'échantillon sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera  $500\text{g} \pm 2\text{g}$ .

### ↳ Exécution de l'essai

- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé d'une ouverture vers le haut, la charge abrasive, les 500 g du matériau préparé.
- La charge abrasive est fixée conformément aux indications du (tableau I.17) ci-après :

**Tableau I.17 : Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire.**

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 – 6.3	2000±5
6.3 – 10	4000±5
10 – 14	5000±5

- Après la préparation du matériau on introduit les échantillons dans les cylindres avec 2.5 L d'eau dans Chaque cylindre.
- On ferme les cylindres avec les couvercles, puis on met les cylindres dans l'appareil et on met la machine on marche avec une vitesse de  $100 \pm 5$  tours /min et pendant 2 heures.
- Après essai, on ouvre le cylindre en élevant leur couvercle puis à l'aide d'un bac on récupère le contenu de cylindre.
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive, procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à  $105^{\circ}\text{C}$  jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près, soit  $m'$  le résultat de la pesée.

### ↳ Expression des résultats

Le coefficient micro-Deval est par définition le rapport : 
$$\text{MDE} = \frac{500 - m'}{500} \times 100$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le (tableau I.18) ci-dessous :

**Tableau I.18 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25**

Matériau	Classe granulaire (mm)	Charge abrasive	Masse(g)			MDE
			Initiale	Supérieur au tamis 1.6mm	Inférieur au tamis 1.6mm	
<b>15/25</b>	10/14	5000	500	415.20	84.80	<b>16.96</b>
<b>8/15</b>	10/14	4000	500	414.71	85.29	<b>17.05</b>

### I.2.9.2 Essai los Angeles (NF P 18-573) [14] [17]

#### ↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité inférieure à 1.6 mm en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15 minutes.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires : 4-6,3 mm, 6,3-10 mm, 10-14 mm, 10-25 mm, 16-31.5 mm, 25-50 mm.

- La classe 10/25 mm doit contenir 60% de 10-16 mm.
- La classe 16/31,5 mm doit contenir 40% de 16-25 mm.
- La classe 25/50 mm doit contenir 60% de 25-40 mm.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires, comme indiqué dans le (tableau I.19) suivant :

Tableau I.19 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Masse de l'échantillon (g)	Nombre de boulets
4 - 6.3	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$ : 5000g	7
6.3 - 10	Tamis $\frac{10\text{mm}}{6.3\text{mm}}$ : 5000g	9
10 - 14	Tamis $\frac{14\text{mm}}{10\text{mm}}$ : 5000g	11
10 - 25	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$ : 3000g Et $\frac{25}{16}$ : 2000g	11
16 - 31.5	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$ : 2000g Et $\frac{31.5}{25}$ : 3000g	12
25 - 50	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$ : 2000g Et $\frac{50}{40}$ : 3000g	12

Si (M) est la masse du matériau soumis à l'essai, (m) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par

$$\text{la quantité : } LA = \frac{m}{M} \times 100$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles.

#### ↳ Matériels utilisés

La machine Los Angeles comporte :

- Un cylindre creux en acier de  $12 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$  d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre inférieur à  $711 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  et une longueur inférieure à 508 mm. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre.
- Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre permet d'introduire l'échantillon. (Figure I.10).



**Figure I.10 : Appareil de Los Angeles**

Charge de boulets :

- La charge est constituée par des boulets sphériques de  $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  de diamètre et pesant entre 420 et 445 g en acier.
- Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.
- Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
- Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.
- Un jeu de tamis de diamètres convenables.

#### ↳ Préparation de l'échantillon pour l'essai

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulairé choisie, en commençant par le tamis le plus grand. Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à  $105^{\circ}\text{C}$  jusqu'à masse constante.

La masse de L'échantillon est de  $5000 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ .

#### ↳ Exécution de l'essai

- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulairé choisie, puis l'échantillon pour essai.
- Placer le couvercle.
- Effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/mn et 33 tr/mn.



- Recueillir le matériau 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 matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser ce refus une fois séché. Soit (m') le résultat de la pesée.

### ↳ Expression de résultat

Le coefficient Los Angeles se définit par le rapport :  $\frac{m}{5000} \times 100$

Où  $m = 5000 - m'$  : masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de

1.6mm, et  $LA = \frac{5000 - m'}{5000} \times 100$

Les résultats obtenus sont inscrits dans le (tableau I.20) suivant :

**Tableau I.20 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15**

Nature du matériau	Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse(g)			Coefficient Los Angeles « LA »
			Initial	Supérieur au tamis 1.6mm	Inférieur au tamis 1.6mm	
<b>15/25</b>	10/25	11	5000	3590.45	1410	<b>28</b>
<b>8/15</b>	10/14	11	5000	3441.12	1559	<b>31</b>

## I.3 Classification des granulats (XP P 18 – 540)

### I.3.1 Résultats des essais effectués au laboratoire

Le (tableau I.21) ci-dessous, résume les résultats de tous les essais effectués au laboratoire.

**Tableau I.21 : Récapitulatif de tous les résultats des essais**

Echantillons	Granulométrie			ES	P(%)	MF	A	LA	MDE	Masses volumiques	
	%>D	%<d	%<63µm							ρ <sub>P</sub>	ρ <sub>a</sub>
<b>Sable 0/4</b>	04	/	15	77	/	3,18	/	/	/	1.60	2.67
<b>Gravier 8/15</b>	21	07	02	/	1.66	/	07	31	17.05	1.51	2.64
<b>Gravier 15/25</b>	00	09	00	/	0.48	/	05	28	16.96	1.45	2.68

### ↪ Caractéristiques applicables aux gravillons

#### ✓ Los Angeles (NF P 18-573) [19]

Tableau I.22 : Los Angeles

Catégorie	V <sub>ss</sub>
LA <sub>A</sub>	30
LA <sub>B</sub> et LA <sub>C</sub>	40
LA <sub>D</sub>	50

D'après ce tableau (I.20), c'est à dire du point de vue de dureté, le gravillon 15/25 peut être classé en catégorie LA<sub>A</sub> et le gravillon 8/15 peut être classé en catégorie LA<sub>B</sub>

#### ✓ Granularité (NF P 18-560)

Tableau I.23 : Granularité des graviers

Catégorie	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2	d	0.63d
Gr <sub>A</sub>	V <sub>si</sub> 100	V <sub>si</sub> 99	Li 80	Li 25	Li 1	V <sub>ss</sub> 5
Gr <sub>B</sub>			Ls 99	Ls 75		
Gr <sub>C</sub>			e 15	e 35	e 15	
			e 19		e 19	

A partir du tableau (I.23) ci-dessus, on déduira les pourcentages des différentes classes granulaires indiquées dans le (tableau I.24) suivant :

Tableau I.24 : Résultats sur la granularité des graviers

Catégorie	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2	d	0.63d
8/15	100	100	79	40	07	03
15/25	100	100	100	81	09	01

A partir des deux tableaux (I.24) précédant, ces gravillons peuvent être classés comme suit :

- 8/15 en catégorie Gr<sub>A</sub>.
- 15/25 en catégorie Gr<sub>C</sub>.

✓ **Propreté (NF P 18-591)**

On a  $V_{ss1.5} = 1.5\%$  (valeur spécifiée supérieure).

- $P(\%) \ 8/15 = 1.66 \longrightarrow 8/15$  est propre.
- $P(\%) \ 15/25 = 0.48 < 1.5 \longrightarrow 15/25$  est propre.

✓ **Coefficient d'aplatissement (A, P 18-561) : article 10.1.5**

**Tableau I.25 : Coefficient d'aplatissement**

Catégorie	$V_{ss}$
$A_A$	20
$A_B$ et $A_C$	30
$A_D$	40

D'après ce tableau (I.25) ; du point de vue forme, ces gravillons peuvent être classés comme suit :

- 8/15 en catégorie  $A_A$ .
- 15/25 en catégorie  $A_A$ .

↪ **Caractéristiques applicables aux sables**

✓ **Granularité (NF P 18-560).**

**Tableau I.26: Granularité du sable**

Catégorie	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
$Gr_A$ à $Gr_D$	$V_{si} \ 100$	$V_{si} \ 99$	$V_{si} \ 85 \ V_{ss} \ 99$

**Tableau I.27 : Résultats sur la granularité du sable**

Sable	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
0/4	100	100	96

A partir des deux tableaux (I.26 et I.27) précédant, on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/4 en catégorie  $Gr_A$ .

✓ **Module de finesse.****Tableau I.28 : Module de finesse**

Catégorie	MF	
MF <sub>A</sub>	Li 1.8 Ls 3.2	e 0.6
MF <sub>B</sub>		e 0.7
MF <sub>C</sub>	e 0.7	
MF <sub>D</sub>	e 0.8	

Le module de finesse (MF) du sable 0/4 est égal à 3,18, on remarque que cette valeur est comprise entre  $Li = 1.8$  et  $Ls = 3.2$  ( $Li=1.8 < MF < Ls=3.2$ ), alors on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/4 en catégorie MF<sub>B</sub>.

✓ **Teneur en fines (f).****Tableau I.29 Teneur en fines**

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0.08 mm
f <sub>A</sub>	L <sub>s</sub> 12 e 3 ou CV ≤ 20%
f <sub>B</sub>	L <sub>s</sub> 15 e 5 ou CV ≤ 20%
f <sub>C</sub>	L <sub>s</sub> 18 e 6 ou CV ≤ 20%
f <sub>D</sub>	pas de spécifications mais FTP renseigne

D'après le tableau (Analyses granulométriques du sable 0/4) on constate que la teneur en fines du sable 0/4 est égale à 15%, alors on peut le classer comme suit :

- Sable 0/4 en catégorie f<sub>B</sub>.

✓ **Propreté (PS ou VB, P 18-597) : article 10****Tableau I.30 : propreté du sable ou VB**

Catégorie	PS(%) ou		
	Sable d'extraction alluvionnaire et marine	Autres sables	VB <sub>0/D</sub>
PS <sub>A</sub>	V <sub>si</sub> 65	V <sub>si</sub> 60	V <sub>ss</sub> 1
PS <sub>B</sub> , PS <sub>C</sub> et PS <sub>D</sub>	V <sub>si</sub> 60	V <sub>si</sub> 50	

A partir du tableau précédent on a :

ES = 77%, donc on peut classer ce sable comme suit :

- Sable 0/4 en catégorie **PS<sub>A</sub>**.

### I.3.2 Classification

D'après les résultats obtenus lors de la classification des granulats on conclut que :

- **Sable 0/4** : Catégorie **B** sauf pour sa granularité et sa propreté il est de catégorie **A**.
- **Gravillon 8/15** : Catégorie **A** sauf pour les Angles il est classé dans la catégorie **B**
- **Gravillon 15/25** : Catégorie **A** sauf pour la granularité il est de catégorie **C**.

### I.4 Essais sur les ciments [20]

Le ciment utilisé, est le ciment CPA CEM I-42.5 NA443 (voir l'annexe D)

#### I.4.1 Masses spécifiques

##### I.4.1.1 La masse volumique apparente EN 459-2 :

###### ◆ Définition :

La masse volumique apparente du ciment désigne le rapport entre la masse du ciment et le volume apparent correspondant.

###### ◆ Matériel nécessaire :

- Un récipient de volume connu.
- Une règle à araser métallique.
- Un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un
- Opercule mobile.
- Une balance.

###### ◆ Conduite de l'essai :

On utilise un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile, placé au-dessus d'un récipient de volume **V** connu.

- Placer l'entonnoir au-dessus du centre du récipient calibré et fermer l'opercule.
- Verser une petite quantité de ciment sur la passoire et la faire descendre dans l'entonnoir à l'aide d'une spatule.
- Ouvrir l'opercule (le ciment tombe dans la mesure de volume **V** connu, et refermer l'opercule quand l'entonnoir est vide (tout le ciment s'est écoulé).
- Recommencer avec de nouvelles quantités de ciment, jusqu'à ce qu'il y ait débordement.

- Araser à la règle.
  - Peser le contenu (la masse du ciment contenu dans le récipient), soit **M**.
  - Calculer la masse volumique apparente du ciment :  $\rho_{cp} = \frac{M}{V}$
- Reprendre l'essai 03 fois.

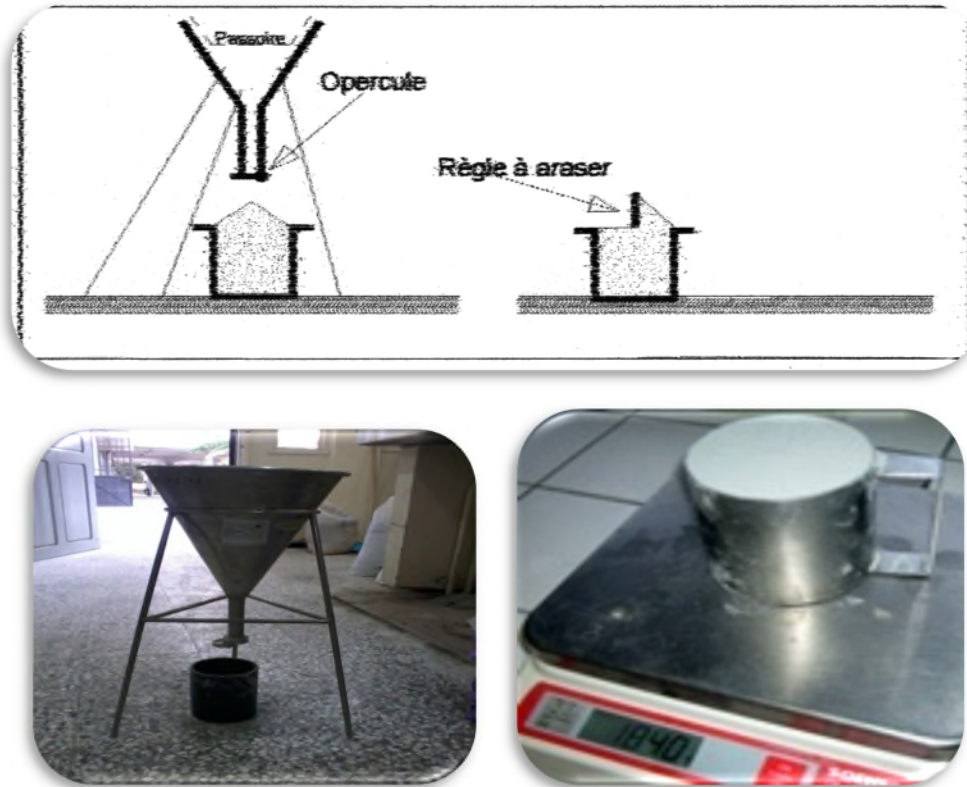


Figure I.11 : appareil de masse volumique apparente.

◆ Résultats obtenus

**Tableau I.31 : Mesure de la masse volumique apparente.**

	Mesure N°1	Mesure N°2	Mesure N°3
Volume de récipient (cm <sup>3</sup> )	1059.75	1059.75	1059.75
Masse de récipient vide (gr)	444.72	444.72	444.72
Masse de l'échantillon (gr)	1068.17	1045.47	1077.45
$\rho_{cp} = \frac{M}{V} (\text{gr/cm}^3)$	1.00	0.98	1.01
<b>Moyenne (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	0.99		

**I.4.1.2 La masse volumique absolue: EN196-60 [20]**

◆ **Définition :**

La masse volumique absolue du ciment désigne le rapport entre la masse du ciment et le volume absolu correspondant.

◆ **Matériel nécessaire :**

- Un Densimètre "Le Chatelier"
- Une balance.

◆ **Conduite de l'essai :**

La méthode du volumétre (ou densimètre) Le Chatelier est la plus pratique et c'est celle que nous utiliserons.

Il s'agit d'un récipient composé d'un ballon surmonté d'un renflement (de 20 cm<sup>3</sup> environs) puis d'un colétreit gradué.

- Introduire l'essence(ou le toluène, ou bien le pétrole...etc.) jusqu'au niveau **V1** voisin de 0. Noter **V1**.
- Peser le tout **M1**.
- Introduire le ciment (env. 60 g), pour faire augmenter ce volume approximativement de 20ml.

- Chasser les bulles d'air. Noter  $V_2$ .
- Le ciment doit être introduit très lentement en vérifiant tout au long de son introduction qu'il ne se bloque pas dans le tube du volumétre ou de l'entonnoir en verre placé à l'embouchure du tube.
- Peser le tout :  $M_2$ .
- Calculer la masse volumique absolue du ciment :  $\rho_{ca} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$

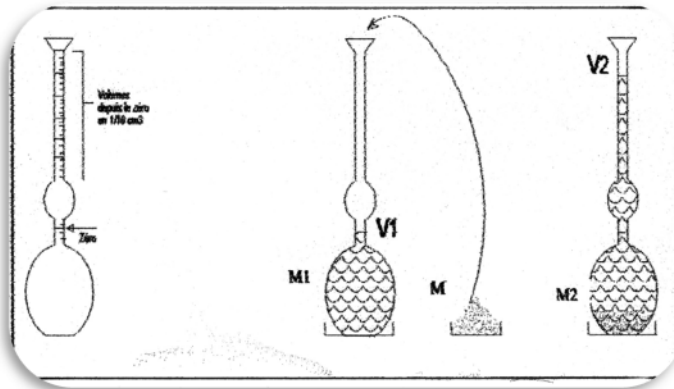


Figure I.12 : conduite de l'essai de la masse volumique absolue



Figure I.13 : le dancimetre



◆ Résultats obtenus :

Tableau I.32 : Mesure de la masse volumique absolue du ciment.

Masse	V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (gr)	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	M <sub>2</sub> (gr)
volume	0	339.22	23	398.54
$\rho_{cs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2.57			

#### I.4.2 Essai de prise

- Mesure des temps de début et de fin de prise (EN 196-3) [6]

◆ Définition

Par addition d'eau en quantité convenable donne formation d'une pâte plastique qui se solidifie au bout d'un temps. Le nom de prise est donné à la phase de cristallisation.

◆ L'objectif de l'essai

L'objectif de l'essai est de déterminer le temps de début et de fin de prise d'un ciment.

◆ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de **Vicat** équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre, quand sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance **d** du fond du moule telle que;  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . (Figure I.14)

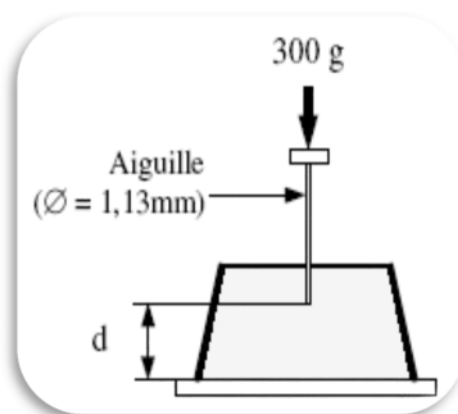


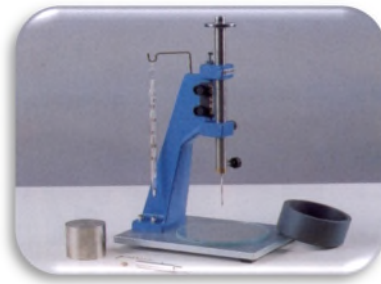
Figure I.14 : caractéristiques d'appareil de vicat

On dit que le début de prise est atteint, ce moment, mesuré à partir du début de malaxage, est appelé "temps de début de prise".

Le "temps de fin de prise" est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

◆ **Equipement nécessaire**

- Une salle climatisée. L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  et dont l'humidité relative soit supérieure à 90 %.
- Un malaxeur normalisé décrit dans la norme EN 196-1. Ce malaxeur est muni d'une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente et rapide) ; 140 et 285 tr/min.
- Un appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13 mm.(Figure I.15)



**Figure I.15 : appareil de vicat**

- Un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de 70 à 80 mm de diamètre, avec une plaque en verre servant à supporter le moule.
- Une balance permet de peser à 1 g près.
- Une truelle.
- Un chronomètre.

◆ **Conduite de l'essai**

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée ; soit 400g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est de 112g, elle est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes (auquel cas E/C = 0.28).

Le temps zéro est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment dans la cuve du malaxeur. La pâte une fois malaxée est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque en verre, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon est relâcher sans vitesse initiale.

Après 30 secondes d'attente, on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base, et on note l'heure.

On Répète l'opération à intervalles de temps convenablement espacés. (Figure I.16)

Après chaque essai de pénétration, l'aiguille doit être remontée et nettoyée.

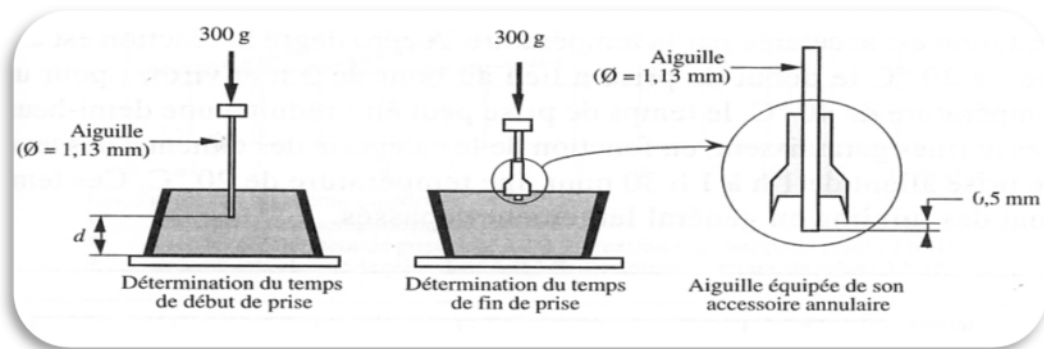


Figure I.16 : Méthode de mesure du temps de début et de fin de prise.

#### ◆ Résultats Obtenus.

Tableau I.33 : temps de début et de fin de prise.

Temps de début de prise	2 heures et 14 minutes (2h 14')
Temps de fin de prise	5 heures et 20 minutes (5h 20')

#### ◆ Interprétation des résultats

Le début de prise se manifeste après 2h 14'. Ce ciment est donc classé en catégorie des liants à prise très lente.

### I.4.3 Détermination de la stabilité par l'essai Le Chatelier ou essai d'expansion (EN 196-3) [14]

#### ◆ Définition

Il s'agit de déterminer dans quelle mesure le mortier fabriqué avec un liant hydraulique déterminé réagit sous l'effet des corps susceptibles de provoquer son expansion.

#### ◆ Objectif de l'essai

Les essais d'expansion, à froid ou à chaud, ont pour but de déterminer la stabilité aux expansifs des liants hydrauliques.

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptibles de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation. Les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment sont responsables de cette augmentation de volume. La teneur en sulfate est aussi responsable.

#### ◆ Principe de l'essai

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

#### ◆ Equipement nécessaire

- Un malaxeur normalisé.
- Moules en laiton élastique de 0.5 mm d'épaisseur ; deux aiguilles soudées de part et d'autre. Si le matériau placé dans le moule gonfle (augmentation de volume de la pâte) ; l'extrémité des aiguilles s'écarte. Ces moules sont appelés "appareil Le Chatelier". (Figure I.17)
- Un bain d'eau muni d'un moyen de chauffage, dans lequel il est possible d'immerger les éprouvettes et de porter la température de l'eau de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  jusqu'à ébullition en  $30\text{ min} \pm 5\text{ min}$ .
- Une salle ou une armoire humide maintenue à une température de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  et à au moins 98 % d'humidité relative.



**Figure I.17: Appareil Le Chatelier**

### Conduite de l'essai

Le mode opératoire est décrit par la norme EN 196-3.

Il faut confectionner une pâte de consistance normalisée, à l'aide d'un malaxeur normalisé.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ciment} = 200\text{g.} \\ \text{E/C} = 0.28 \end{array} \right\}$$

Eau = 56g.

Cette pâte sera introduite dans trois (03) moules, en les posant sur une plaque en verre ; recouvrir d'une autre plaque de verre. Ces moules sont conservés 24 h dans la salle ou l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer l'écartement **A** entre les pointes des aiguilles. Après prise les moules sont alors entreposés dans le bain d'eau à 20 °C qui doit être porté à ébullition en 30 min ± 5 min. Ce bain sera maintenu à la température d'ébullition pendant 3h ± 5mn.

- Soit **B** l'écartement entre les pointes des aiguilles au bout de ce temps.
- Soit **C** l'écartement des aiguilles lorsque le moule, après refroidissement, est revenu à la température de 20 °C.
- La stabilité est caractérisée par la valeur **C-A** exprimée en mm à 0,5 mm près :

$$\text{Stabilité (ST)} = (\text{C-A}) \pm 0,5 \text{ mm.}$$

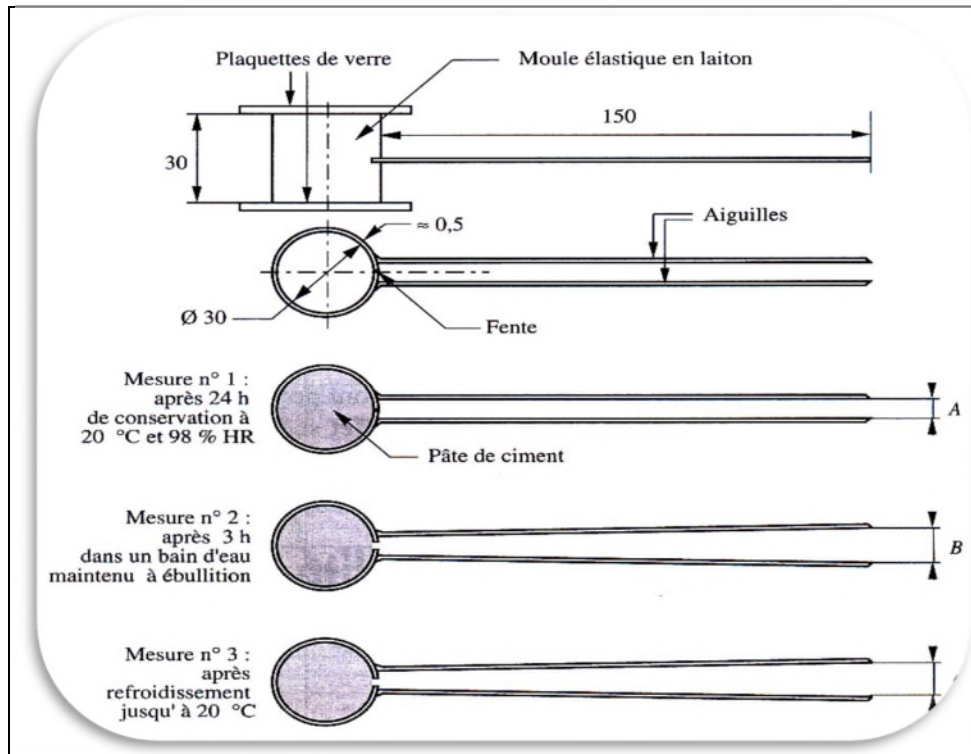


Figure I.18 Mesure d'écartement A, B et C



Figure I.19 : les moules le chatelier

◆ **Résultats obtenus.**

Les résultats obtenus sont dans le (tableau I.34) suivant :

**Tableau I.34 : Les résultats obtenus à partir de l'essai chatelier.**

N° du moule	Mesure N°1 : A (mm)	Mesure N°2 : B (mm)	Mesure N°3 : C (mm)	Stabilité (ST) : C - A (mm)
<b>1</b>	4	3.5	4	0
<b>2</b>	5	4	6	1
<b>3</b>	6	5	7	1

On prend la valeur moyenne des gonflements des 3 moules :

D'après la norme, le gonflement ou l'expansion devront être inférieur à **10 mm**, pour toutes les classes de ciments, et c'est le cas dans notre ciment étudié.

◆ **Interprétation des résultats**

On a obtenu une stabilité égale à  $1 \pm 0,5$  mm, qui est très inférieure à 10 mm ; ce qui nous laisse dire que notre ciment est à une stabilité très acceptable. Les teneurs en Cao, MgO et SO3 sont optimales, les retraits à mesurer sur les mortiers ne seront pas influencés par l'expansion de ciment.

## I.5 Méthodes physiques d'analyses

### I.5.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) [21]

◆ **Définition**

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés. Elle s'applique sur des poudres ou des échantillons massifs pour déterminer la nature des phases minérales et de les quantifier. Actuellement la diffraction des rayons x intervient dans la quasi-totalité des thématiques et constitue un complément indispensable aux observations optiques, microscopiques ou spectroscopiques.

Les rayons x sont indissociables de quelques grands noms de la physique tels Röntgen le découvreur de ce rayonnement électromagnétique en 1895, Bragg, Laue, Debye, Scherrer, Miller et tant d'autres noms qui évoquent, une loi physique découverte ou une méthode expérimentale.

La condition de la réflexion est donnée par l'équation de Bragg :

$$n \cdot \lambda = 2 d \sin \theta$$

Avec  $n$  : ordre de la diffraction (entier) ;

$\lambda$  : La longueur d'onde des rayons  $x$  ;

$\Theta$  : L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant, il dépend que du réseau du cristal ;

$d$  : La distance inter réticulaire entre deux plans diffractant d'un cristal ;

#### ◆ Principe

La méthode générale consiste à bombarder le matériau par un faisceau de rayons X monochromatique ( $0,1 \text{ \AA} < \lambda < 10 \text{ \AA}$ ) de longueur d'onde  $1,54051 \text{ \AA}$ , produit par une anticathode de cuivre, à mesurer l'angle par rapport au rayonnement incident des rayons X diffractés et l'intensité des rayonnements X diffractés au moyen d'un compteur à scintillation. Celui-ci tourne autour du même axe que l'échantillon mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence  $\Theta$ , l'angle mesure par le déplacement du compteur sera donc de  $2\Theta$ .

Le traitement des diffractogrammes ou spectres s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les fiches d'une base de données faisant correspondre les distances inter réticulaires  $d$  aux angles  $2\Theta$  enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon analysé.

L'un des principaux intérêts de cette méthode est la mesure précise d'intensité et la possibilité d'effectuer des estimations semi quantitatives, en considérant que l'intensité d'une raie est proportionnelle à la quantité de la substance correspondant dans l'échantillon. Cependant, les substances mal cristallisées ou amorphes ne pourront pas être observées par cette technique.

Les analyses par DRX sont effectués dans le laboratoire de LTMGP de l'université A/Mira de Bejaia à l'aide d'un diffractomètre.



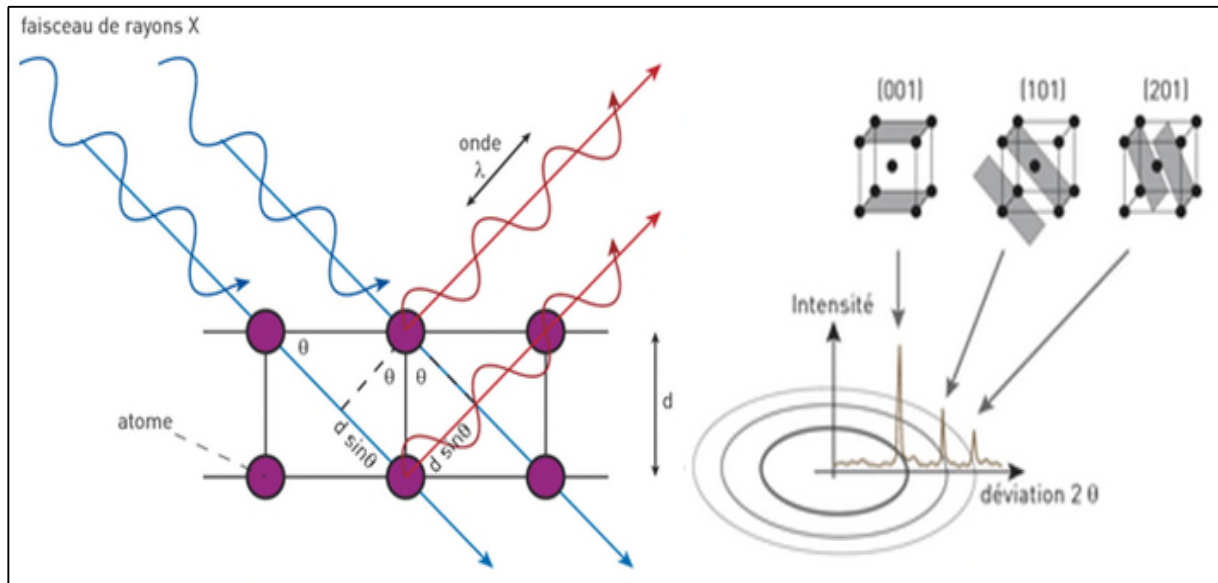


Figure I.20 Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X.

### I.5.1.1 Analyse granulométrique des fibres métalliques utilisées

#### ✦ Analyse granulométrique par tamisage NF P 18 – 560 et NF EN 933 – 1

L'analyse granulométrique consiste à fractionner un matériau en différentes coupures au moyen de tamis. Les masses des différents refus (ou des tamisats) sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme d'une courbe granulométrique.

#### ✦ Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse  $M$  de l'échantillon pour essai doit être supérieure à  $0,2 D$ , avec  $M$  exprimé en kilogrammes et  $D$  plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Les résultats de l'analyse granulométrique des fibres métalliques (déchet BCR) sont représentés dans le (Tableau I.35) suivant :

Tableau I.35 : Classement dimensionnel par tamisage des fibres métalliques.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : M = 1995 gr			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (gr)	Refus cumulés en (%) $R(\%) = (R_i/M) \times 100$	Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$
6,3	0	0	100
4	20	1	99
2	273	14	86
1	1098	55	45
0,500	1944	97	3
0,315	1986	100	0
0,250	1994	100	0
0,125	1995	100	0
0,080	0	0	0
0,063	0	0	0
Fond du tamis	0	0	0

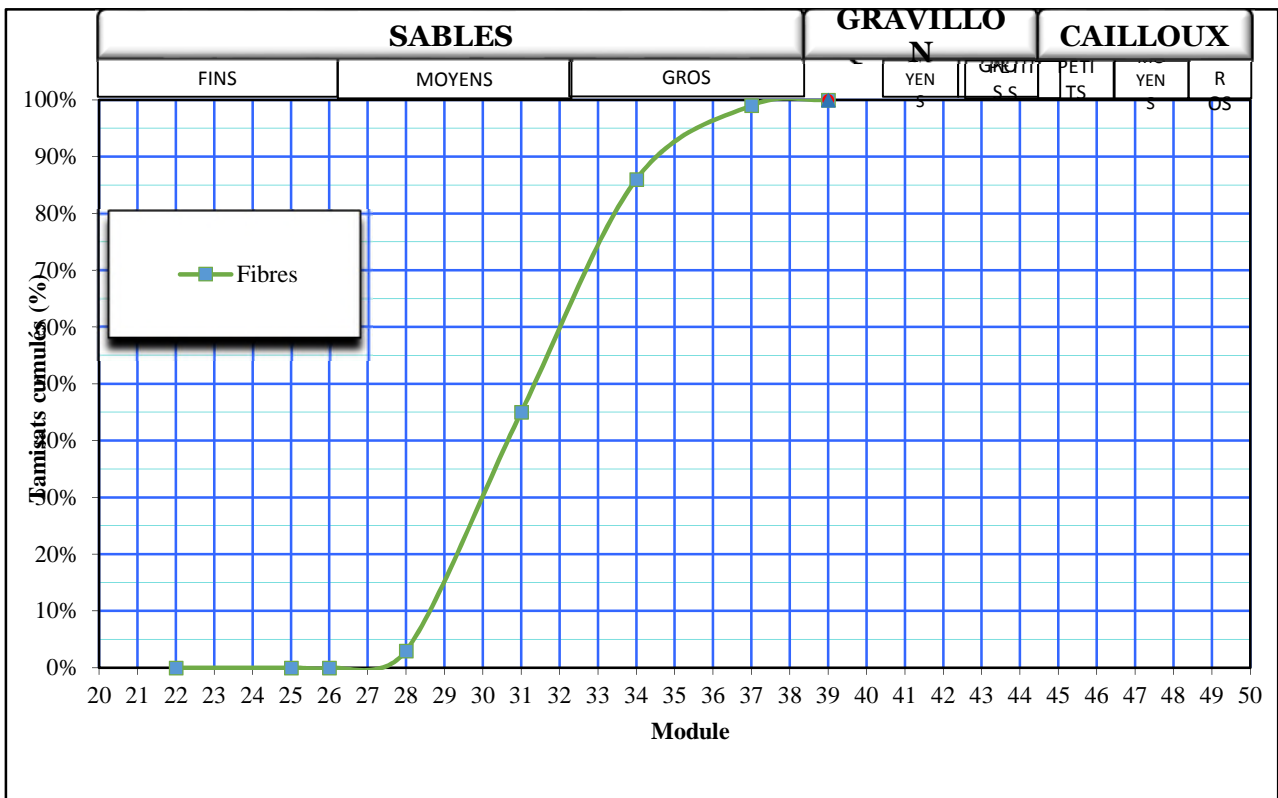


Figure I.21 analyse granulométrique des fibres métalliques

### I.5.1.2 Masses Volumiques des fibres métalliques B.C.R

La masse volumique absolue des fibres métalliques est :  $\rho_s = 3 \text{ g/cm}^3$ .

La masse volumique apparente des fibres métalliques est :  $\rho_p = 0.25 \text{ g/cm}^3$ .

### I.5.1.3 Caractérisation des matériaux par des rayons X (DRX) [21]

Cette méthode a pour objectif la détermination des distances interreticulaires et l'identification des principales phases cristallisées présentées dans les fibres métalliques, le ciment et le sable normalisé ainsi que la caractérisation de l'arrangement des réseaux cristallins.

Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X sont illustrés dans les (figure I.22, figure I.23 et la figure I.24).

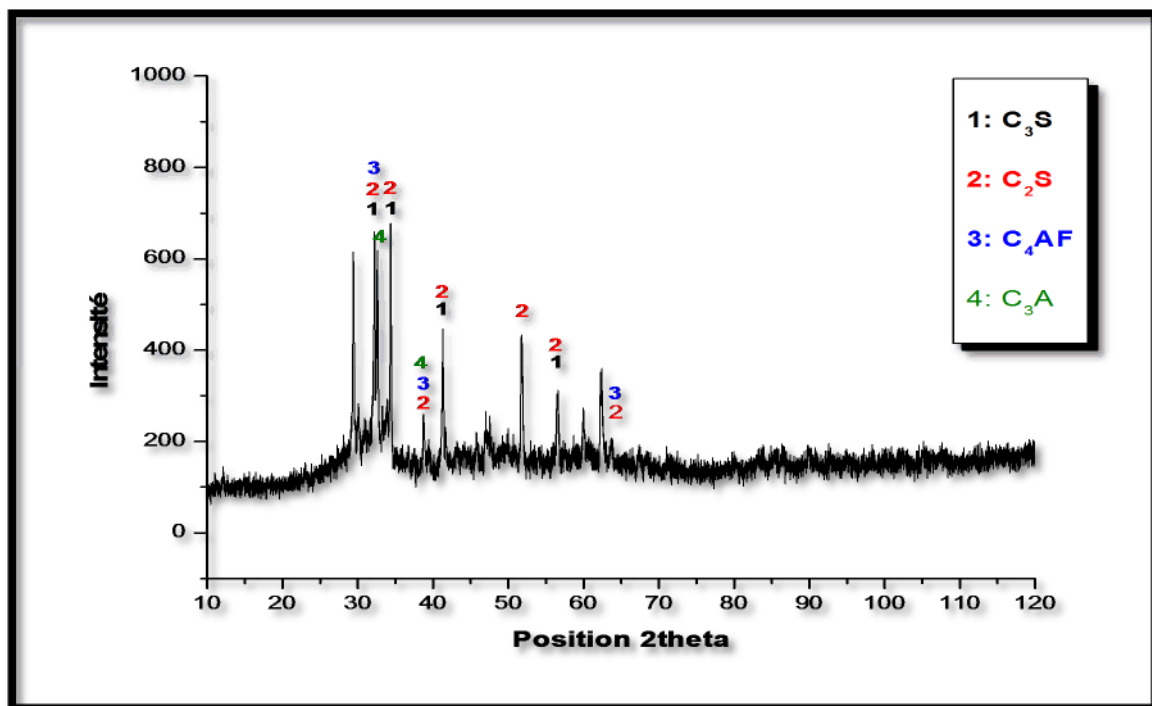


Figure I.22 spectre obtenu par DRX pour le liant hydraulique utilisé ; ciment CPA CEM I

D'après le spectre DRX obtenu pour le ciment, les principaux constituants du ciment sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- ♦ C<sub>2</sub>S à  $2\theta = 32.601^\circ, 34.351^\circ, 38.740^\circ, 41.301^\circ, 51.723^\circ$  et  $56.464^\circ$ .
- ♦ C<sub>3</sub>S à  $2\theta = 32.599^\circ, 34.349^\circ, 41.300^\circ$  et  $56.464^\circ$ .

- ♦  $C_3A$  à  $2\theta = 32.207^\circ$  et  $38.742^\circ$ .
- ♦  $C_4AF$  à  $2\theta = 32.206^\circ, 38.741^\circ$  et  $67.388^\circ$ .

D'après le spectre DRX obtenu pour le ciment, les principaux constituants du ciment sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

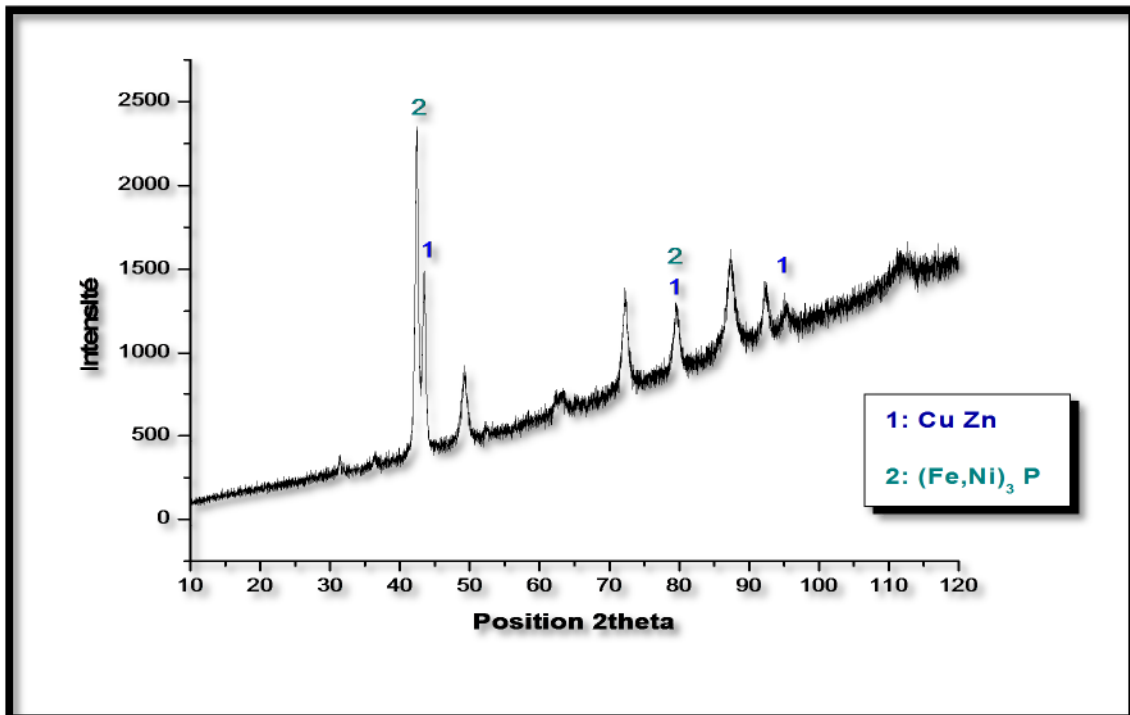
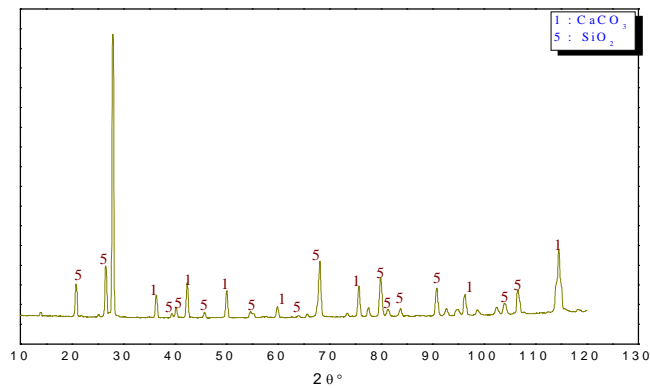


Figure I.23 spectre obtenu par DRX pour les fibres métalliques.

D'après le spectre DRX obtenu pour les fibres métalliques, les phases minéralogie détecté à des angles de diffractions différents :

- ♦  $Cu,Zn$  à  $2\theta = 43.449^\circ, 79.542^\circ$  et  $95,258^\circ$ .
- ♦  $(Fe,Ni)_3P$  à  $2\theta = 42.466^\circ$  et  $79,543^\circ$ .



**Figure 1.24. DRX du sable normalisé**

- ♦ Le spectre DRX obtenu pour le sable (figure 1.24) indique l'existence de deux phases majoritaires : le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) détecté en quantité importante à  $2\theta = 26,36^\circ$  et les carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) à  $2\theta = 36,14^\circ$ .

### I.5.2 Microscopie électronique à balayage MEB couple a l'EDX [22]

Le principe du MEB consiste à utiliser des électrons émis par la surface d'un solide, lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelque keV. Le faisceau d'électrons émis par un filament de tungstène est d'abord accéléré puis concentré sur une partie de la surface d'un matériau. Un dispositif intermédiaire permet au faisceau de balayer la surface à examiner. Au point d'impact, plusieurs rayonnements sont émis, mais seuls les électrons secondaires et rétro diffusés contribuent à la formation de l'image et de la topographie de l'échantillon. Cette technique apporte des informations sur la morphologie des minéraux et des matériaux, des produits de calcination et des hydrates formés au cours du durcissement par chauffage.

Les observations en microscopie électronique à balayage ont été réalisées avec un microscope de type FEI Quanta 200. Les échantillons déchet et matériaux stabilisé/solidifié sont analysés en état solide (pastille) afin d'exposer le maximum de la couche superficielle aux électrons incidents. (Voir la figure I.25)



Figure I.25 : Appareil du MEB

## Les résultats obtenus pour les fibres par le MEB

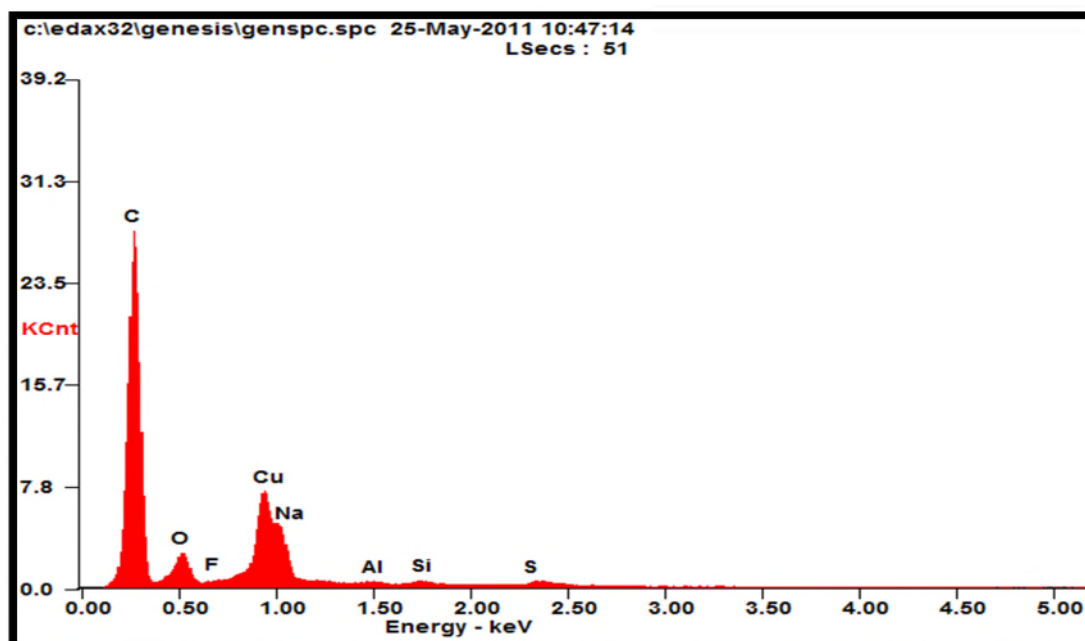


Figure I.26 : spectre EDX des fibres métalliques

Tableau I.36 : Analyse des fibres par l EDX

Elément	Wt%	At%
C	68.97	86.40
O	05.00	04.71
F	00.18	00.15
Cu	18.96	04.49
Na	05.18	03.39
Al	00.29	00.16
Si	00.55	00.29
S	00.87	00.41

### ↳ Expression des résultats

L'analyse EDX montre que la composition élémentaire de la surface examinée est de 18,96 pour le cuivre (Cu) qui est le composé majoritaire des fibres métalliques utilisé dans notre étude.

## I.6 Méthodes chimiques d'analyses

### I.6.1 Résultats des analyses chimiques

#### I.6.1.1 Analyses chimiques du sable.

Tableau I.37 Analyse chimique du sable 0/4

Désignation de l'échantillon	% de SiO <sub>2</sub>	% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% de CaO	% de MgO	% de K <sub>2</sub> O	% de Na <sub>2</sub> O	% de SO <sub>3</sub>
Sable 0/4 BIR HADDADA	4,52	6,15	13,56	64,78	2,56	0,15	2,34	<b>1,15</b>

Les Analyses chimiques du sable BIR HADDADA a été réalisées au niveau du laboratoire LTP-Est (Direction régional Sétif).en constate que c'est un sable calcaire

#### Conclusion :

Après avoir analysé et identifié les différents constituants (matériaux) entrants de la composition des mortiers et bétons, nous présenterons les formulations dans le chapitre suivant.



## **CHAPITRE II**

# **FORMULATIONS DES BETONS ET MORTIERS**

## Introduction

La formulation d'un mortier ou un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants dont on dispose afin de réaliser un mortier ou un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la réalisation d'un ouvrage résistant avec une durabilité accrue.

## II.1 Mortiers

### II.1.1 Caractéristiques des matériaux utilisés :

#### ↳ Le ciment :

Le ciment utilisé est : le ciment portland artificiel NA 442 ; CPA – CEM I/ 42.5, importé fabriqué par Galatina, Italie.

#### ↳ L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est l'eau potable de robinet de la ville de Bejaia.

#### ↳ Granulats :

Le sable utilisé est:

- un sable normalisé CEN EN 196-1, est commercialisé en sac plastique de 1350± 5g.

Ça courbe granulométrique est situé à l'intérieur du fuseau indiqué sur la (figure II.1).

Les analyses chimiques de ce sable sont données par le (tableau II.1)

**Tableau II.1 : Analyses chimiques du sable normalisé**

Désignation de l'échantillon	% de SiO <sub>2</sub>	% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% de CaO	% de MgO	% de K <sub>2</sub> O	% de Na <sub>2</sub> O	% de SO <sub>3</sub>
Sable normalisé	97.22	nd	nd	1.34	nd	nd	nd	nd

On remarque que c'est un sable quartzueux

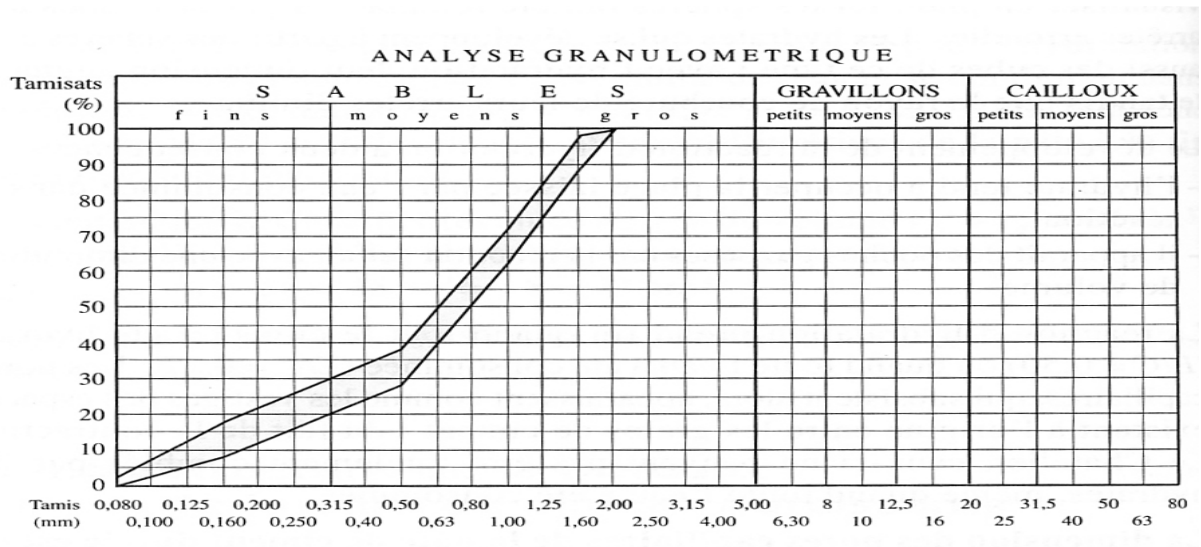


Figure II.1 : Composition granulométrique du sable normalisé



Figure II.2 : Sable normalisé

**↳ Les fibres :**

Les fibres utilisées sont récupérées de l'unité BCR de Ain – El Kebira (Wilaya de Sétif) :

Se sont des fibres plates



**Figure II.3 : les fibres métalliques**

**II.1.2 Dosage ou pesée des constituants :**

Dans le cas de la préparation de trois éprouvettes (40\*40\*160) mm, les quantités sont respectivement les suivant :

✓ Sables + fibres	—————>	1350g ± 5g.
✓ Ciment	—————>	450g ± 2g.
✓ Eau	—————>	225g ± 1g.

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50.

Dans le but de connaître les effets des fibres sur les caractéristiques mécaniques des mortiers, nous réaliseront pour chaque âge de rupture :

- 5 séries d'éprouvettes, confectionnées avec le sable normalisé CEN EN 196-1, et les fibres métalliques et d'une série éprouvette à l'autre nous allons faire varier la teneur en fibres (0%, 5%, 10%, 15% et 20%) par rapport au poids du sable.

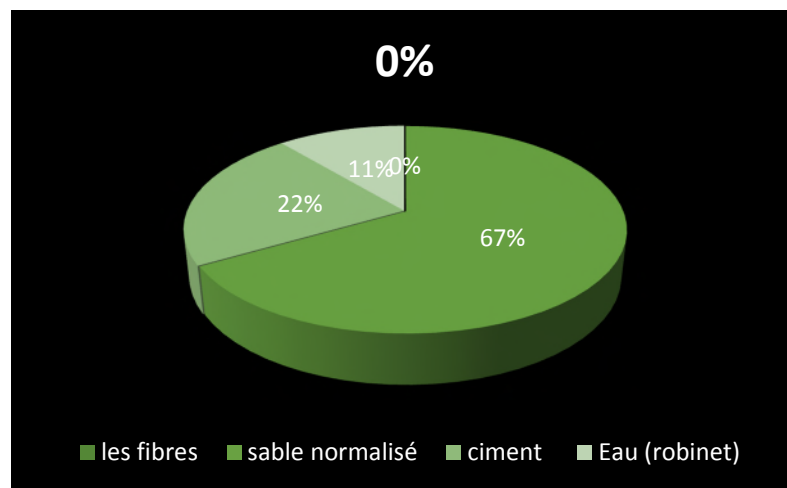
↳ **Détermination des poids des fibres :**

Les fibres sont rajoutées en pourcentages (0% 5% 10% 15% 20%).celui de 0% est un mortier témoin, les masses des fibres sont déterminés en substitution de la masse de sable.

- **Sable à 0% de fibre :**

Poids des fibres :  $P_f = 0g$ .

Pois de sables :  $P_s = 1350g$ .



**Figure II.4 : les pourcentages des déférentes fractions granulaires entrant dans la composition du mortier à 00% de fibre métallique**

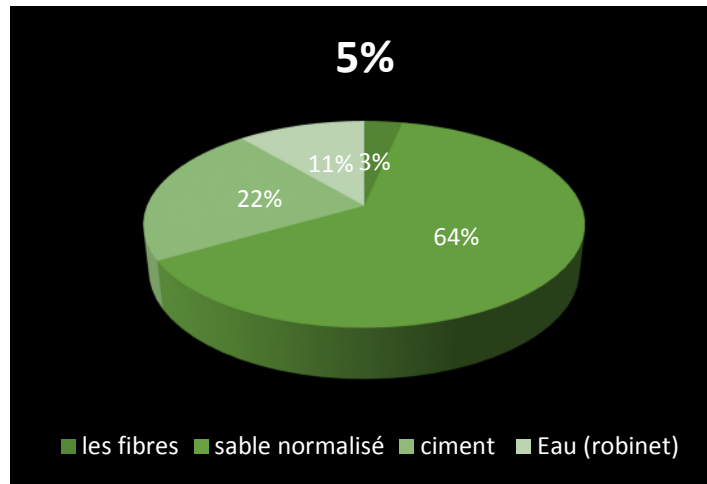
- **Sable à 5% de fibre :**

$$P_{total} = (P_f + P_s) = 1350g.$$

$$\text{Comme } P_{t100\%} \longrightarrow 1350g$$

$$P_f \longrightarrow 5\%$$

On aura  $P_f = 67.5 g$  ; ce qui nous donne  $P_s = 1282.5g$ .



**Figure II.5 : les pourcentages des différentes fractions granulaires entrant dans la composition du mortier à 05 % de fibre métallique.**

De la même manière, on détermine le poids des fibres et le poids du sable pour les pourcentages restants (10%, 15%, et 20%) (Voir tableaux II.2).

**Tableau II.2 : proportions des matériaux utilisées pour les mortiers**

N° de la série	% des fibres	Poids des fibres (g)	Sable normalisé(g)	Ciment (g)	Eau (g)
MR	0	0	1350	450	225
MFM (5%)	5	67.5	1282.5	450	225
MFM(10%)	10	135	1215	450	225
MFM(15%)	15	202.5	1147.5	450	225
MFM(20%)	20	270	1080	450	225

### II.1.3 Malaxage de mortier

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur. Avant d'être utilisé pour les différents essais de maniabilité, de prise, de résistance ou de retrait, ces mortiers sont malaxés pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur, y verser ensuite le ciment, aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

- après 30 secondes de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s pendant les 15 premières secondes enlever au moyen repoussant vers le milieu de celui-ci.
- reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.



Figure II.6 : Malaxeur

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.3 : les étapes de malaxage du mortier

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

### ↪ Moulage des éprouvettes

Avec le mortier préparé pour chaque série d'éprouvette, on remplit le moule 4x4x16.

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareille a chocs conformément au mode opératoire suivant :Le malaxage du mélange étant terminé, on dispose celui-ci sur une plaque non réactive au ciment et non absorbante, on forme une galate approximativement rectangulaire, on la partage en six (06) fractions sensiblement égales.

Le moule ayant été muni de sa hausse, on le fixe sur la table a chocs, on introduit dans chacun des trois (03) compartiments une fraction de la galette .on met la machine en marche pour 60chocs.

On recommence les mêmes opérations pour la 2ème couche après 60 nouveaux chocs le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier.

Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de la hausse, on arase le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale et déplacée par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvette.



**Figure II.7: table à choc**

### ↪ Conservation des éprouvettes :

- **Avant démoulage**

Le moule rempli de mortier, marqué et placé jusqu'au moment du démoulage dans une salle humide a la température de  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  dont l'humidité relative, est d'au moins 90%.



Chaque moule est extrait de la salle de conservation à l'heure prévue pour son démoulage.



**Figure II.8 : la conservation et le démoulage des éprouvettes**

↳ **Démoulage des éprouvettes prismatiques :**

Le démoulage est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule

Le démoulage doit être effectué avec précaution.

↳ **Conservation des éprouvettes :**

a. **Conservation pour la résistance à la compression :**

Une fois démoulé et marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservés entièrement immergées dans l'eau à  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ , jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Elles doivent être sorties de l'eau moins de 15 minutes avant les essais, elles sont alors essuyées avec un chiffon propre.

• **Age des éprouvettes pour les essais de résistance mécanique :**

Au jour prévu, les trois éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes EN V 197-1 et NF P 15-301 définit la classe de résistance à 28j.

b. **Conservation pour le gonflement :**

Même procédé de conservation que celui de la résistance a la compression (dans de l'eau distillée).



**Figure II.9 : Conservation des éprouvettes du gonflement dans l'eau distillée.**

**c. Conservation pour le retrait :**

La conservation des éprouvettes pour le retrait se fait à l'air libre sans aucune condition.



**Figure II.10 : Conservation des éprouvettes pour le retrait à l'air libre**

## II.2 Bétons

### II.2.1 Composition du béton

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher la consistance, la durabilité et la résistance à la compression ; or la résistance et l'ouvrabilité sont deux qualités liées l'une à l'autre, quant aux facteurs dont elles dépendent varient en sens inverse comme indiqué le (tableau II.4) suivant :

**Tableau II.4 : Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton. [23]**

Facteurs de composition du béton	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	Plutôt fin	Plutôt grossier
Rapport G/S (gravier/Sable)	A diminuer	A augmenter
Dosage en eau	A augmenter	A diminuer
Granularité	Continue préférable	Discontinue, légèrement préférable
Dimension maximale des granulats	Plutôt petite	Plutôt forte

### II.2.2 Quelques méthodes de composition de béton

Pour déterminer la composition des bétons à mettre à en œuvre, il existe plusieurs méthodes, telles que :

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de VALLETTE.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de DREUX-GORISSE.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.
- Méthode de BARON-LESAGE.

Dans ce qui suit, nous n'allons exposer qu'une seule méthode : la Méthode de DREUX-GORISSE ; celle qu'on a utilisé pour la détermination des dosages de nos bétons.

### II.2.3 Méthode dreux-gorisse [23]

Cette méthode à l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier, et ayant données satisfaction. Elle est d'autre part rapide et très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés. Et c'est une méthode adapté aux bétons de fibres.

#### ↳ Détermination de la composition du béton pour les granulats de la carrière de BIR HADDADA SETIF.

Sur le graphique semi-logarithmique, on trace les courbes granulométriques des granulats 0/4, 8/15 et 15/25.

#### ↳ Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des entrants dans la composition du béton.

#### ↳ Coordonnées des points O, A et B :

##### ➡ Le point d'origine O :

- Abscisse :  $X_O = 0$  mm
- Ordonnée :  $Y_O = 0\%$

##### ➡ Le point d'extrémité B :

A l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat.

- Abscisse :  $X_B = D = 25$  mm
- Ordonnée :  $Y_B = 100\%$

##### ➡ Le point A :(point de brisure), à des coordonnées ainsi définies :

- En abscisse :

Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse  $X_A = D/2$

Si  $D > 20$  mm, l'abscisse  $X_A$  est située au milieu du segment délimité par  $D$  et le tamis de maille 5 mm

Dans notre cas :  $D > 20$  mm ( $D = 25$  mm)

Alors l'abscisse du point A est située au milieu du segment délimité par 25 mm et par le tamis 5 mm ; donc entre les tamis de mailles 10 mm et 12.5 mm.

- Ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D + K + K_s}$$

$K$  : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage et de la forme des granulats roulés ou concassés. Voir le (Tableau II.5) ci-dessous

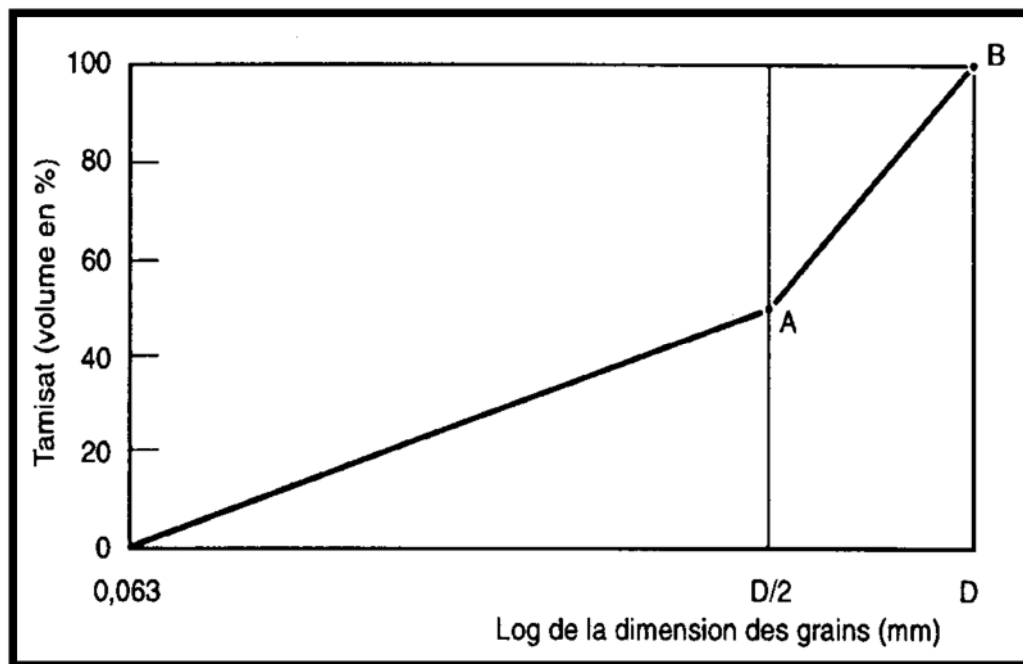


Figure II.11 Courbe de référence

Tableau II.5 Valeurs de K [24]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400+Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Sachant que le dosage en ciment est de 350 Kg/m<sup>3</sup> et que notre sable est concassé et choisissant une vibration normale, donc d’après le tableau : K = +2

K<sub>s</sub> : correction supplémentaire.

$$K_s = 6 \text{ MF} - 15$$

$$K_s = 6 \times 3.18 - 15 = 4.08$$

$$YA = 50 - \sqrt{25 + 2 + 4.08} = 51.08\%$$

D’après le graphe on aura

$$G1 \text{ (pourcentage des graviers } 15/25) = 26\%$$

$$G2 \text{ (pourcentage des graviers } 8/15) = 30\%$$

$$S \text{ (pourcentage du sable } 0/4) = 44\%$$

$$G1 + G2 + S = 100\%$$

Les pourcentages sont représentés par la (figure II.12) suivante

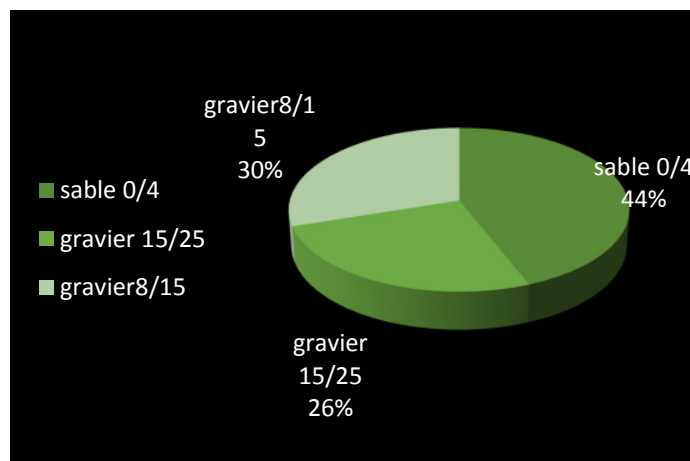


Figure II.12 : Les pourcentage des différentes fractions granulaires

↳ Trace de la courbe du mélange des granulats

Les valeurs des tamisats en % de la courbe de mélange, sont calculées à partir des analyses granulométriques des granulats et des pourcentages de ces derniers, obtenus précédemment. Ces valeurs des tamisats sont données par le (tableau II.6) suivant :

**Tableau II.6: Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange**

Tamis (mm)	Tamisats (%) S (0/4)	Tamisats(%) G <sub>2</sub> (8/15)	Tamisats(%) G <sub>1</sub> (15/25)	Mélange 0.44S +0.26 G <sub>1</sub> +0.30 G <sub>2</sub>
<b>31.5</b>	100	100	100	100
<b>25</b>	100	100	100	100
<b>20</b>	100	100	81	95
<b>16</b>	100	92	15	75
<b>14</b>	100	66	3	65
<b>12.5</b>	100	52	2	60
<b>10</b>	100	23	1	51
<b>8</b>	100	7	1	46
<b>6.3</b>	100	3	1	45
<b>4</b>	96	3	1	43
<b>2</b>	65	3	1	30
<b>1</b>	46	3	1	21
<b>0.500</b>	31	2	1	14
<b>0.315</b>	27	2	1	13
<b>0.250</b>	25	2	1	12
<b>0.125</b>	19	2	1	9
<b>0.080</b>	16	2	0	8
<b>0.063</b>	15	2	0	7

D’après le tracé de la courbe de mélange (voir la courbe de mélange sur la figure II.13), on remarque que cette dernière s’approche bien de la courbe de référence (elles sont presque confondues) ; donc la granulométrie du mélange est bonne.

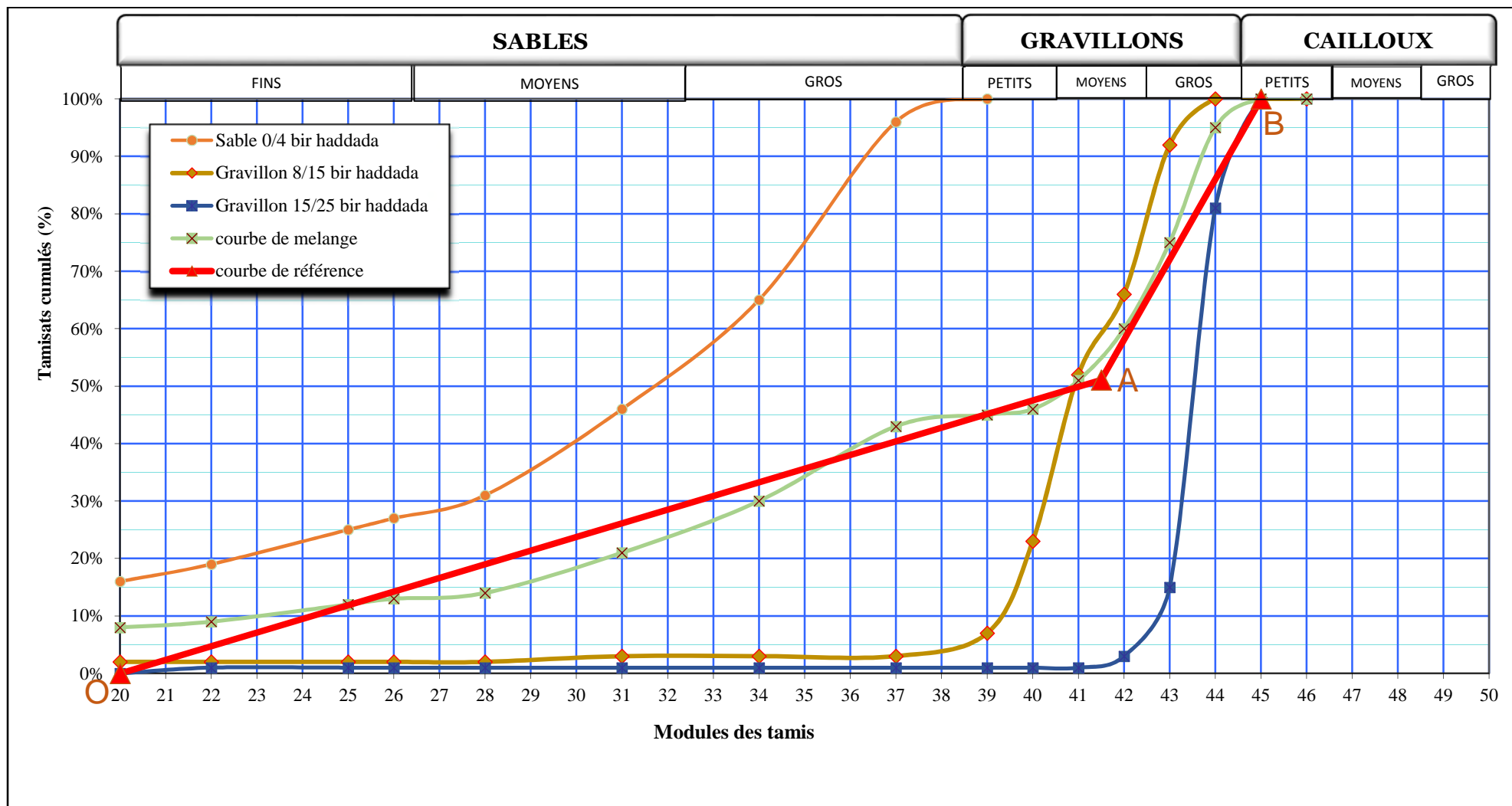


Figure II. 13 Courbe de mélange selon Dreux-Gorisse



### II.2.3.1 Dosage en ciment

Le dosage en ciment le plus courant pour un béton de qualité est général de 350 Kg/m<sup>3</sup>. Nous allons donc, adopter cette valeur que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique.

### II.2.3.2 Dosage en eau :

Connaissant le dosage en ciment ( $C=350 \text{ Kg/m}^3$ ), et fixant un rapport d'eau sur ciment égal à 0.5 ( $\frac{E}{C}=0.5$ ), on peut déterminer la quantité d'eau à utiliser pour 1 m<sup>3</sup> de béton.

$$\text{On a: } \frac{E}{C} = 0.5 \Rightarrow E = 175 \text{ Kg/m}^3.$$

### II.2.3.3 Dosage des granulats :

#### ↳ Calcul du coefficient de compacité ( $\gamma$ )

##### ✓ Définition :

Le coefficient de compacité  $\gamma$  est le rapport d'un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais.

$$\gamma = V_m / 1000$$

Avec :

- $V_m$  : volume absolu des matières solides.
- $V_m = V_G + V_S + V_C$  (litres).
- $V_G$  : volume des gravillons.
- $V_S$  : volume du sable.
- $V_C$  : volume du ciment.

Les valeurs du coefficient de compacité ( $\gamma$ ) sont données dans le tableau E.

D'après ce dernier tableau, on détermine  $\gamma$  comme suit :

$$\text{Pour } D=20 \text{ mm} \Rightarrow \gamma=0.825$$

$$\text{Pour } D=25 \text{ mm} \Rightarrow \gamma=?$$

$$\text{Pour } D=30 \text{ mm} \Rightarrow \gamma=0.830$$

Et ça, pour une consistance plastique et un serrage de vibration normale.

Donc, on aura  $\gamma=0.827$  Pour  $D=25$  mm.

#### ↪ Volumes absolus des constituants solides

- Volume total absolu =  $1000 \times \gamma = 797$  litres
  - Volume absolu du ciment =  $350/3.1=113$  litres (la valeur moyenne spécifique des grains de ciment est 3.1)
  - Volume absolu des trois (03) granulats est :  $797-113 = 684$  litres
- ☞ Alors les volumes absolus des constituants sont les suivants :

-Volume absolu du sable 0/4..... $684 \times 0.44 = 300.96$  litres

-Volume absolu du gravier 8/15..... $684 \times 0.30 = 205.2$  litres

-Volume absolu du gravier 15/25.....  $684 \times 0.26 = 177.84$  litres

-Volume absolu du ciment..... $113.00$  litres.

---

Total= $797$  litres.

#### ↪ Dosage des granulats et de ciment ( $\text{Kg/m}^3$ )

On obtient ces dosages, en multipliant le volume absolu de chaque granulat par sa masse volumique absolue ( $\rho_s$ ).

-Sable 0/4..... $300.96 \times 2.67 = 803.56 \text{ Kg/m}^3$

-Gravier 8/15..... $205.2 \times 2.64 = 541.73 \text{ Kg/m}^3$

-Gravier 15/25..... $177.84 \times 2.68 = 476.61 \text{ Kg/m}^3$

-Ciment..... $113.00 \times 3.10 = 350 \text{ Kg/m}^3$

#### ☞ Influence du rapport G/S

Pour garantir une bonne résistance du béton, Dreux recommande d'avoir un rapport en masse G/S (Gravier/Sable) voisin de 2

- Calcul de G/S :

$$\text{G/S} = (541.73 + 476.61) / 803.56 = \mathbf{1.27}$$

Le rapport G/S est loin de la valeur 2, on ne va pas modifier les pourcentages des granulats pour avoir une valeur proche de 2 puisque dans notre travail lors de la diminution des pourcentages du sable et le remplacé avec un pourcentage de fibres le rapport G/S augmente (allant de 1.27 pour 0% de fibres à 2.32 pour 20% de fibres). Les résultats sont représentés en annexe A.

#### II.2.4 Densité théorique du béton frais ( $\Delta_0$ )

La densité théorique du béton frais est égale à la somme des densités de tous les constituants du béton (eau, ciment, sable, graviers 8/15, graviers 15/25).

- sable 0/4.....	803.56 Kg/m <sup>3</sup>
- gravier 8/15.....	541.73 Kg/m <sup>3</sup>
- gravier 15/25.....	476.61 Kg/m <sup>3</sup>
- Ciment.....	350Kg /m <sup>3</sup>
- Eau.....	175 Kg /m <sup>3</sup>

---


$$\Delta_0 = 2346.9 \text{ Kg/m}^3.$$

#### II.2.5 Dosage des granulats (litres/m<sup>3</sup>)

Les dosages des granulats, en « litres/m<sup>3</sup> », sont obtenus en divisant le dosage de chaque granulat par sa masse volumique apparente ( $\rho_p$ ).

$$\text{Sable 0/4} \dots\dots\dots 803.56 / 1.60 = 502.22 \text{ litres/m}^3$$

$$\text{Gravier 8/15} \dots\dots\dots 541.73 / 1.51 = 358.76 \text{ litres/m}^3$$

$$\text{Gravier 15/25} \dots\dots\dots 476.61 / 1.45 = 328.69 \text{ litres/m}^3$$

## II.2.6 Récapitulation de la composition du béton

Tableau II.7 Récapitulatif de la composition du béton

Composants	%des granulats	Volume absolu des composants (litres)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	Dosage des composants (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	volume des composants (litres/m <sup>3</sup> )
Eau	-	175.00	1	175.00	1	175
Ciment	-	113.00	3.1	350.00	-	-
Sable 0/4		300.96	2.67	803.56	1.60	502.22
Gravier 8/15	44	205.2	2.64	541.73	1.51	358.76
Gravier 15/25	30	177.84	2.68	476.61	1.45	328.69
	26					
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>972</b>	<b>12.09</b>	<b>2346.9</b>	<b>5.56</b>	<b>1364.67</b>

## II.2.7 Confection des éprouvettes

## ➤ Dimension des moules (NF P18-400)

Les moules les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques. Leurs dimensions doivent être choisis en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Pour notre étude, on utilisera des moules de 16×32 cm<sup>2</sup> voir la (figure II.14).

Figure II.14 : les moules 16 x 32 cm<sup>2</sup>.

### ☞ Gâchée d'essai

La gâchée exécutée au laboratoire, doit permettre d'obtenir un volume de béton frais excédant celui des éprouvettes.

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

Gravillons, sable fibres, ciment et enfin eau.

L'eau de gâchage doit être rajoutée après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min ; le malaxage est alors poursuivi pendant 2 min.

#### • Remarque

Dans notre étude, on compte réaliser des bétons plastiques avec un affaissement voisin de 8 cm. Sachant qu'on a besoin pour chaque gâchée d'essai de :

- Remplir 4 cylindres de  $16 \times 32 \text{ cm}^2$
- Remplir le cône d'Abrams (ce cône prend presque le même volume qu'un cylindre de  $16 \times 32$ )

Donc on a besoin de remplir un volume à voisinant 4 cylindres

Pour remplir un cylindre ( $16 \times 32 \text{ cm}$ ) de béton on aura besoin d'un poids **P** (Kg), qu'on calculera comme suit :

$M = V \times D_0$ , tel que :

V : volume du cylindre et  $D_0 = 2.34$ : densité théorique du béton frais. Alors :

$$P = \pi r^2 \times \Delta_0 = (3.14 \times 8^2 \times 32 \times 2.34) \frac{1}{1000} = 15.04 \text{ Kg} ; 15 \text{ Kg}$$

#### • Masse total de la gâchée

Pour une série de trois (03) éprouvettes :

$$P' = 3 \times P = 45 \text{ Kg.}$$

Lors de malaxage du béton, on mesurera son affaissement au cône d'Abrams, ce cône prend presque le même poids qu'une éprouvette de  $16 \times 32 \text{ cm}^3$  Alors le poids total de la gâchée est :

$$P_t = 15 \times 4 = 60 \text{ Kg.}$$

Ce poids total, est celui du béton frais qu'on doit obtenir à la fin de la gâchée. Il reste à déterminer le poids nécessaire pour chaque composant de ce béton (gravier, sable, ciment et eau). Il est obtenu, en divisant Ce poids total (Pt) par un coefficient  $\xi$ . tel que :

$$\xi = \frac{\text{poidstotaldescomposantsparunmètrecubedebéton}}{\text{poidstotaldubétonfrais}}$$

$$\xi = \frac{\Delta 0}{Pt}$$

$$\xi = 2346.9/60 = 39.11 \approx 40$$

Donc, pour une gâchée, la masse nécessaire de chaque composant est de :

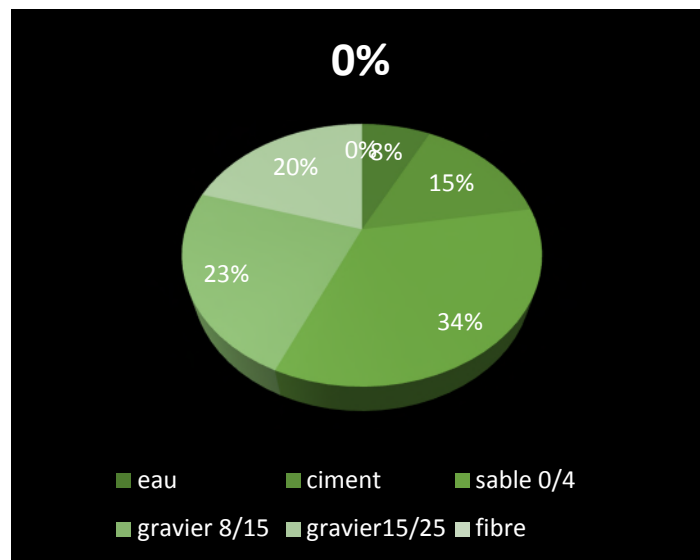
- Eau..... (175/40) = 4.375 Kg/m3
- Ciment..... (350/40) = 8.750 Kg/m3
- Sable 0/4.....(803.56/40) = 20.089 Kg/m3
- Gravier 8/15..... (541.73/40) = 13.543 Kg/m3
- Gravier 15/25.....(476.61/40) = 11.915 Kg/m3

↪ **Dosages en fonction de l'ajout des fibres métalliques :**

Connaissant le dosage en sable (20.089 Kg/m<sup>3</sup>) pour un béton témoin (avec 0% de fibres métalliques) nécessaire pour une gâchée, on peut déterminer la masse de sable et les masses des fibres métalliques aux différents pourcentages

- **Sable à 0% de fibres métalliques**

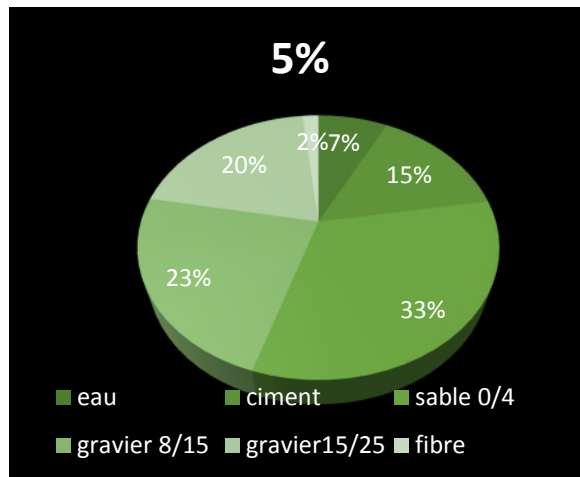
Poids du sable : P<sub>s</sub> = 20.089  
 Poids des fibres métalliques: P<sub>fm</sub> = 0 Kg



**Figure II.15 : Le pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 0% de fibre.**

- **Sable à 5% de fibres métalliques**

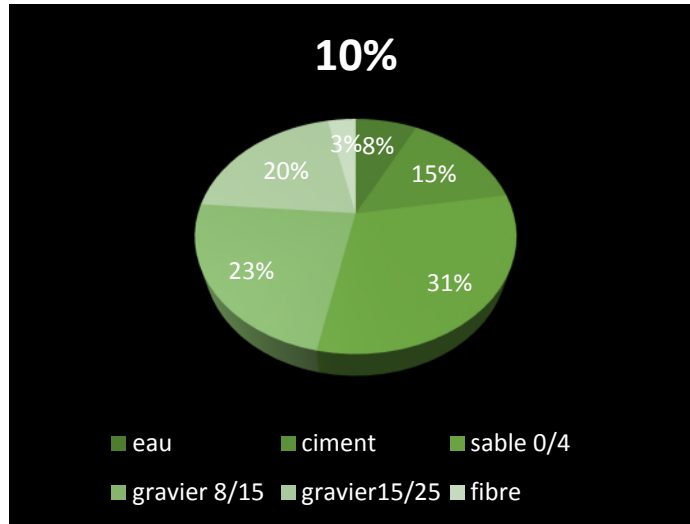
$$\left\{ \begin{array}{l} P_{total} = (P_c + P_{fm}) = 20.089 \text{Kg.} \\ P_t \rightarrow 100\% \\ P_{fm} \rightarrow 5\% \\ P_{fm} = 1 \text{Kg} \end{array} \right.$$



**Figure II.16 : Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 05% de fibre**

- **sable à 10% de fibres métalliques**

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{total} = (P_c + P_{fm}) = 20.089 \text{Kg.} \\ P_t \rightarrow 100\% \\ P_{fm} \rightarrow 10\% \\ P_{fm} = 2 \text{Kg} \end{array} \right.$$

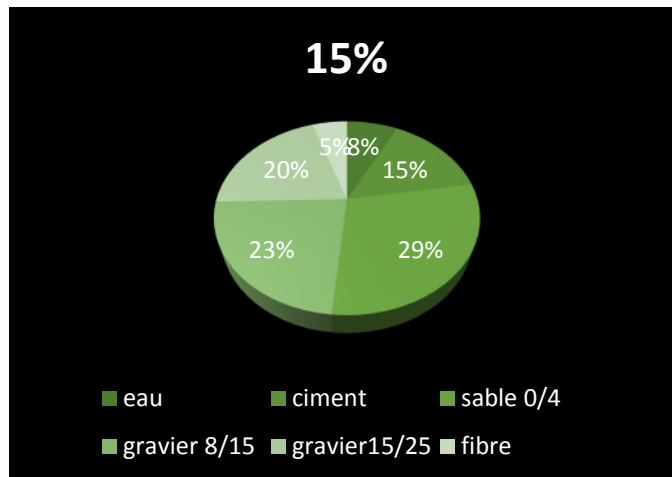


**Figure II.17 : Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 10% de fibre**

- Sable à 15% de fibres métalliques

$$P_{total} = (P_c + P_{fm}) = 20.089 \text{ Kg.}$$

$P_t \rightarrow 100\%$   
 $P_{fm} \rightarrow 15\%$



**Figure II.18 : Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 15% de fibre**



- **Sable à 20% de fibres métalliques**

$$P_{total} = (P_c + P_{fm}) = 20.089 \text{ Kg.}$$

$$P_t \rightarrow 100\%$$

$$P_{fm} \rightarrow 20\%$$

$$P_{fm} = 4 \text{ Kg}$$

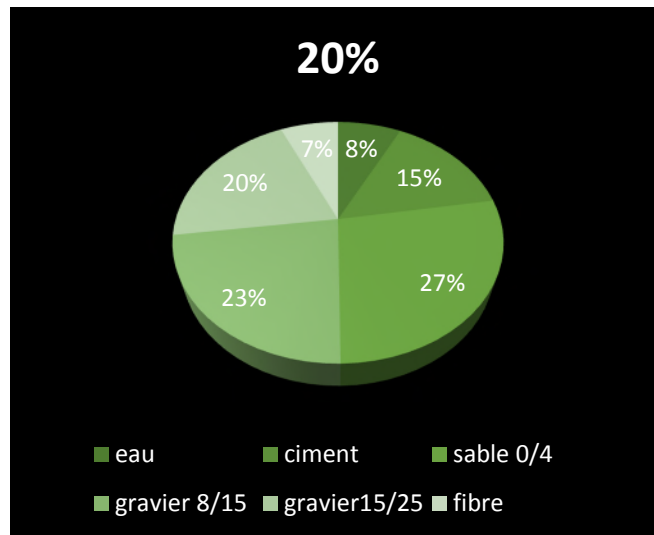


Figure II.19 : Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 20% de fibre

II.2.8 Récapitulation de la composition des différentes gâchées

Tableau II.8 Récapitulatif de la composition des gâchées

N° Série	Gravier 15/25 (Kg)	Gravier 8/15 (Kg)	Sable 0/4 (Kg)	Ciment (Kg)	Eau (Kg)	Fibres métalliques BCR (Kg)
<b>BR (00%)</b>	11.915	13.543	20.089	8.750	4.375	-
<b>BFM(5%)</b>	11.915	13.543	19.089	8.750	4.375	<b>1</b>
<b>BFM (10%)</b>	11.915	13.543	18.089	8.750	4.375	<b>2</b>
<b>BFM(15%)</b>	11.915	13.543	17.089	8.750	4.375	<b>3</b>
<b>BFM (20%)</b>	11.915	13.543	16.089	8.750	4.375	<b>4</b>

**CONCLUSION :**

Après avoir présenté dans ce chapitre, les méthodes de formulation de bétons et mortiers que nous avons utilisé durant cette étude, nous allons présenter dans le prochain chapitre les différents essais effectués sur les bétons et les mortiers, afin de déterminer leur comportement.

## **CHAPITRE III**

# **ESSAIS ET PROCEDURES EXPERIMENTALS**

## Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter des essais sur le comportement mécanique, et la variation dimensionnelle sur les différents mortiers et bétons.

Nous présentons également des tests expérimentaux dont ils doivent fournir des paramètres physico-chimiques nécessaires à la modélisation de comportement à la lixiviation. Les procédures expérimentales sont présentées dans ce qui suit selon leurs objectifs, principes expérimentales et modes opératoires.

### III.1.Essai sur les mortiers

#### III.1.1.Essais mécaniques :

- **Équipement nécessaire utilisé**

- L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme **EN 196-1**. Il est énuméré ci-dessous.
- Le laboratoire où a eu lieu la préparation des éprouvettes, qui doit être maintenu à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés à trois compartiments horizontaux permettant la préparation de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de  $4 \times 4\text{ cm}^2$  et de 16 cm de longueur.
- Un appareil à choc, la hauteur de chute est de  $15\text{ mm} \pm 0,3\text{ mm}$  à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de  $50\text{ N/S} \pm 10\text{ N/S}$ .
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus) avec une vitesse de charge de  $2400\text{ N/S} \pm 200\text{ N/S}$ .

- **Préparation des éprouvettes**

La norme **EN 196-1** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant la préparation des éprouvettes.

- On prépare le mortier comme indiqué au chapitre 1.
- On remplit un moule  $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$  de mortier préparer en deux couches en appliquant à chaque couche 60 chocs à l'aide d'appareil à chocs.
- La face supérieure arasée, les moules sont mis à l'abri.
- Après 24 h du coulage, les éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  en attendant le moment de l'essai de rupture à 28 jours.

### ➤ Essai de traction par flexion

La flexion centrée de l'éprouvette  $4 \times 4 \times 16 \text{ mm}^3$  est effectuée sur une machine de flexion décrite par la norme **NF EN 196-1**.

Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Dans notre cas les valeurs sont lues directement sur l'afficheur de l'appareil d'essai.

\*charge de rupture :  $P$  en N

\*la contrainte de traction :  $R_t$  en  $\text{N/cm}^2$

\*Contrainte de flexion :  $R_f$  en  $\text{N/cm}^2$ .

### ➤ Essai de compression

La machine utilisée est une presse hydraulique figure (III.1) décrite par la norme **NF EN196-1**.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression.

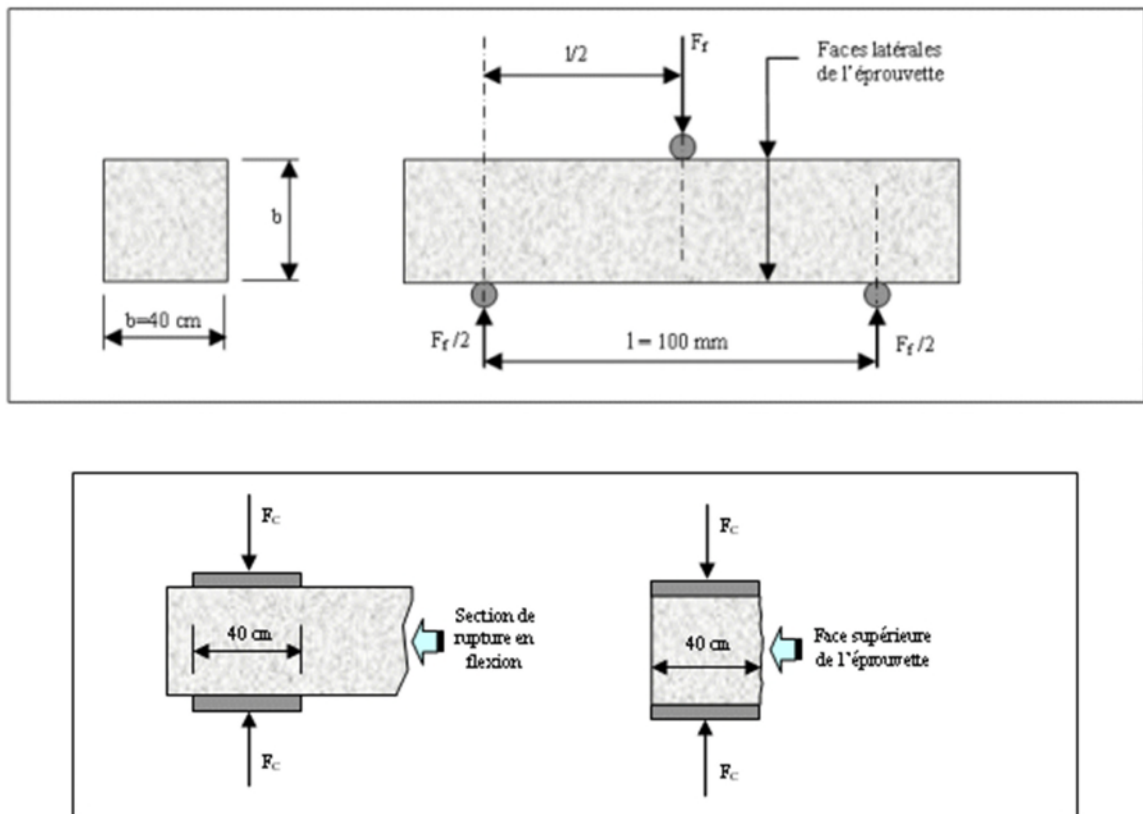


Figure III.1 : Le dispositif de rupture en flexion et en compression

La résistance à la compression:

$$R_c(\text{Mpa}) = F_c / 1600 \text{ (N /mm}^2\text{)}$$

$F_c$  : est la charge de rupture de l'éprouvette en compression

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 Mpa près et on fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de  $\pm 10\%$  de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de  $\pm 10\%$  de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.



**Figure III.2 : Presse hydraulique**

### **III.1.2 Mesure du retrait et du gonflement sur éprouvettes du mortier (NF P15-433)**

- **Objectif de l'essai :**

Il s'agit d'évaluer le retrait ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur de éprouvettes du mortier normal.

- **Principe de l'essai :**

On compare, à différent temps  $t$ , la variation de longueur d'une éprouvette  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , par rapport à un temps  $t_0$  pris pour origine.

- **Équipement nécessaire :**

Il est décrit dans la norme **NF P15-433**

-Une salle dont la température est maintenue à  $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  et l'humidité dite relative à  $50\%\pm 2\%$ .

-Un malaxeur normalisé.

-Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moules au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes  $4\times 4\times 16\text{ cm}^3$  sont donc munies à leurs deux extrémités de plots.

-Un déformètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à  $0,005\text{ mm}$ . Une tige de  $16\text{ cm}$  de longueur doit permettre à régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

- **Conduite de l'essai :**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis à zéro sur la tige étalon en Invar de longueur  $L=160\text{ mm}$ . Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$  ; l'éprouvette à une longueur au temps considéré :

$$l=L+dl(t).$$

soit  $l(t_0)$  la longueur de l'éprouvette au temps  $t_0$  choisis pour l'origine. En général cette origine est prise au moment de démoulage, soit  $24\text{ h}$  après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps  $t$  sera :

$$\Delta l=l(t)-l(t_0)=dl(t)-dl(t_0)$$

$\Delta l(t)$  est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air  $\Delta l(t)$  est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau,  $\Delta l(t)$  peut être positif : il y a alors gonflement



**Figure III.3 : Appareil de mesure du retrait et gonflement**

✓ **Mesure de la variation de masse des éprouvettes**

↪ **Définition**

En plus du retrait ou du gonflement on désire mesurer la variation de masse, pesée à 0,1g pour chaque série d'éprouvettes.

Éventuellement, la masse de l'éprouvette est déterminée à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.

La différence entre cette valeur et le masse au démoulage, exprimée en pourcentage de cette dernière, représente la perte de masse au retrait, ou augmentation de masse pour le gonflement.

A chaque fois qu'on mesure le retrait et le gonflement on pèse les éprouvette les résultats sont regroupés dans l'annexe :

Pour chaque prisme des séries d'éprouvettes il faut calculer le rapport :  $\frac{\Delta M}{M} \times 100$

Avec :

$\Delta M$  = variation de masse par rapport à la masse au moment du démoulage.



M= masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

✓ **Mesure du pH :**

A chaque fois qu'on mesure la variation de la masse pour gonflement, on prend une quantité de l'eau distillée pour mesurer le pH à l'aide d'un appareil multi-paramètres (figure III.4). La mesure du pH s'effectue directement par une électrode en verre combiné relié à cet appareil.



Figure III.4 : Appareil multi-paramètres

✓ **Mesure de la conductivité électrique (CE)**

↪ **Définition**

La conductivité est la propriété que possède une eau pour favoriser le passage d'un courant électrique, elle fournit une indication précise de la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité s'exprime en micro siemens par centimètre, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. Sa mesure est utile car au-delà de la valeur limite de la salinité correspond à conductivité de 2500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , la prolifération de microorganismes peut être réduite.

↪ **Mode opératoire**

Pour la mesure de la conductivité électrique nous avons utilisé le même multi paramètres que le pH, seulement avec une autre sonde destinées pour la conductivité.

## III.2 Essais sur les bétons

### III.2.1 Essais sur les bétons frais

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont les suivants :

L'ouvrabilité, le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique.

#### ➤ Essai de consistance

Le problème est de quantifier la maniabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du béton avant prise.

C'est le but des essais de consistance qui classe (en 04 classes) les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme, plastique, très plastique et fluide (F, P, TP, Fl).

**Tableau III.1 : les quatre classes de consistances [24]**

Affaissement	Classe de consistance	Désignation simplifiée	Ecart toléré
<b>de 0 à 4 cm</b>	Béton ferme	F	$\pm 1$ cm
<b>de 5 à 9 cm</b>	Béton plastique	P	$\pm 2$ cm
<b>de 10 à 15 cm</b>	Béton très plastique	TP	$\pm 3$ cm
<b><math>\geq 16</math> cm</b>	Béton fluide	Fl	$\pm 3$ cm

#### ➤ Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il peut être effectué directement sur chantier. Il est utilisable à tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

#### ➤ Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand, plus le béton sera fluide.

### ↪ Matériel utilisé

L'appareillage se compose de 4 éléments :

- un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ;
- une plaque d'appui.
- une tige de piquage.
- un portique de mesure.



**Figure III.5 : Cône d'Abrams**

### ↪ Conduite de l'essai

La plaque d'appui et le moule (fixé sur la plaque) sont légèrement humidifiés. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche.

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieure du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance.

Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté (A), mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

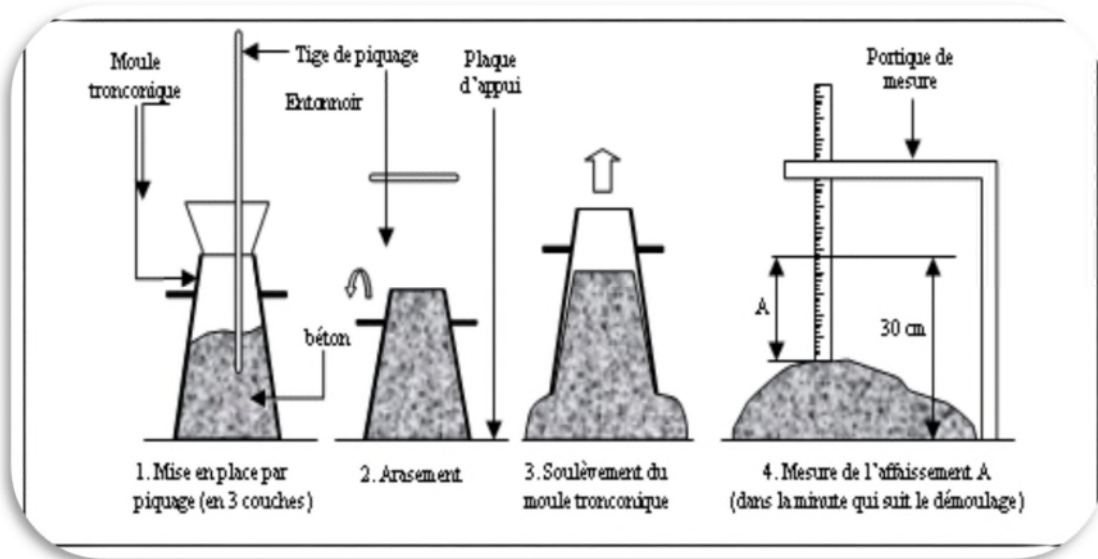


Figure III.6 : Mesure de L'affaissement au cône d'Abrams

#### ➤ Mesure des masses volumiques fraîches.

Cet essai consiste à :

- Peser le récipient (cylindre de volume V) à vide, soit  $M$  sa masse en g.
- Peser le récipient rempli, soit  $M_t$  sa masse en g.



Figure III.7 Masse du récipient vide et rempli

La masse volumique des bétons frais sont alors :

$$\rho_{bf} = \frac{M_t - M}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

- **Remarque**

La valeur de la masse volumique fraîche d'une série de béton est la moyenne de trois(03) éprouvettes.

### III.2.2 Essais sur les bétons durci

#### ↳ Conservation des bétons

- Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs.
- Après démoulage, les éprouvettes doivent être entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai.



**Figure III.8 Conservation des éprouvettes**

- Les éprouvettes seront écrasées au vingt-huitième (28) jour.

#### ↳ Mesure des masses volumiques

- On détermine les masses des bétons à l'âge de 0 h, 24 h, 3, 7, 14, 21 et 28 jours et cela pour la série d'éprouvettes.

La détermination de la masse volumique est simple :

- On pèse l'éprouvette après nettoyage, soit M sa masse en (g).
- Puis détermine le volume du récipient, soit V son volume en (cm<sup>3</sup>).
- La masse volumique sera alors calculée par l'équation suivante :

$$\rho_{BD} = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3)$$

### ➤ Essai de compression (NF P 18 – 406) [20]

C'est l'essai le plus couramment utilisé sur béton durci. Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont affectés par plusieurs paramètres : le type de l'éprouvette et ses dimensions, la préparation des faces d'essai etc.

Actuellement, cet essai est le plus révélateur des décisions à prendre pour juger de la qualité d'un béton durci.

#### ↳ But de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

#### ↳ Principe de l'essai

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

#### ↳ Equipement nécessaire

- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester.
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au ciment prompt.

#### ↳ Le surfaçage des éprouvettes

Conformément à la norme (NF P 18-406), l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, La rectification consiste donc à rendre les surfaces de l'éprouvette planes.



Figure III.9 Surfaçage des éprouvettes

### ↪ Conduite de l'essai

- L'éprouvette, une fois rectifiée elle doit être centrée sur la presse d'essai.
- Appliquer le chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure III.10).
- Soit (S) la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance  $f_{cj}$ , est exprimée en MPa

et a pour expression  $f_{cj} = \frac{P}{S}$  Avec :

**P** : charge de rupture exprimée en MN.

**S** : surface de l'éprouvette exprimée en  $m^2$ .



Figure III.10 : Presse de compression



Figure III.11 : fissures des éprouvettes

### ⇒ Calcul de la masse volumique sèche

- Calcul de la masse volumique sèche théorique [25] [26]

Une formule théorique permet d'évaluer la masse volumique sèche du béton et la comparer avec celle calculée.

- La formule est :

$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25C + G'$  (Kg/m<sup>3</sup>) Avec

- $G'$  : masse des granulats sec, en Kg/m<sup>3</sup>
- $C$  : masse de ciment en Kg/m<sup>3</sup>
- 1.25 : facteur composé de 100% de la teneur en ciment + le ciment qui lie chimiquement une quantité de 25%.



Sachant que les masses des granulats  $G'$  des différentes compositions de béton sont données par le tableau 3, béton Sotramest BIR Haddada.

Rappelons que la masse «  $G'$  » contenue dans 1 m<sup>3</sup> de béton, pour les compositions de béton BIR HADDADA est  $G' = 1821.9 \text{ Kg/m}^3$

Le poids de ciment est  $C = 350 \text{ Kg/m}^3$

$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25(350) + 1821.9 = 2259.4 \text{ g/m}^3$

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 2.260 \text{ g/cm}^3$$

- **Calcul de la masse volumique sèche au 28<sup>ème</sup> jour**

Pour calculer la masse volumique sèche, on suit les étapes suivantes :

- Après l'essai destructif des éprouvettes, un échantillon de béton est immédiatement récupéré.
- On prend le poids de l'échantillon.
- On étuve ce dernier à 105 °C pendant 24h.
- Après séchage, et refroidissement, on prend son poids.
- Connaissant la masse d'une éprouvette à 28 jours, et son volume (6434 cm<sup>3</sup>), et aussi les masses calculées précédemment (avant et après étuvage), il suffit de procéder à la règle de trois ; afin de déduire la masse de l'éprouvette ''M'' à l'état sec.
- On calcul, enfin la masse volumique sèche :  $\rho_{\text{sèche}} = M/6434 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

Exemple de calcul :

- ◆ **Béton à 0% de fibres métalliques**

- La masse moyenne des éprouvettes à 28 jours est égale à 15738g (voir tableau)
- La masse de l'échantillon récupéré (après écrasement) est égale à 383.46g
- La masse de l'échantillon après étuvage est égale à 351.85g
- On peut donc, déduire la masse de l'éprouvette après étuvage. Soit ''M'' sa masse.



Avant étuvage :

Après étuvage :

383.46g.....351.85g

15738g.....M= ?

$$M=14441g \Rightarrow \rho_{\text{sèche calculée}} = 2.244 \text{ g/cm}^3$$

La même procédure pour toutes autres masses volumiques (voir le tableau IV.2)

### III.3 Tests physico-chimiques pour betons et mortiers

- **Test de Lixiviation Monolithe (TLM) [27]**

les tests de lixiviation effectués sur les blocs monolithiques sont conformes à la procédure d'évaluation approfondie des procédés de stabilisation/solidification à base de liants hydrauliques proposée par l'ADEME.

On a utiliser des monolithes de mortiers ( cubes 4x4x4) et les pastilles de béton de ( $\emptyset 6,3\text{cm}$  et  $e= 2\text{cm}$ ).



**Figure III.12 :monolithes et pastilles**

- ❖ **Objectif du test**

L'objectif de ce test dynamique (renouvellement périodique du lixiviant) est de suivre le relargage de polluants inorganique contenus dans un materiau monolithique poreux et de caractériser les mécanismes de transfert en solution de ces polluants. Des variantes de ce test peuvent également être mises en œuvre dans le but de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur l'intensité ou la dynamique de relargage des éléments contenus dans le monolithe.

### ❖ Principe du test

Pour le test TLM, un bloc monolithique de dimensions connues est mis en contact avec une solution de lixiviation de volume fixe. Le lixiviant est renouvelé à des durées de contact choisies de l'analyse des lixivants obtenus. A chaque renouvellement de la solution de lixiviation, le ratio  $L/S_f$  est maintenu constant.

### ❖ Procédure expérimentale

Les blocs monolithiques à lixivier sont obtenus en séparant les éprouvettes lors du moulage en quatre parties égales dans le but d'avoir des cubes de côtés proches de 4cm. On prend les blocs de mortier à 5% de fibres métalliques, car c'est à 5% de déchet qu'on a eu la meilleure résistance mécanique.

Les masses et dimensions des blocs sont mesurées précisément afin de calculer ses paramètres physiques (volume, surface, hauteur équivalente...etc).

#### a)-Conservation du bloc dans un milieu neutre

Un cube monolithique (non séché) est mis en contact avec le lixiviant, eau déminéralisée, en choisissant le rapport volume de liquide (en  $\text{cm}^3$ )/surface de l'échantillon  $S$  (en  $\text{cm}^2$ ). A priori la valeur de  $L/S_f=10 \text{ cm}$  devrait permettre dans la plupart des cas de garantir un comportement dynamique, c'est-à-dire suffisamment éloigné des conditions où l'approche des conditions stationnaires limite le relargage. Le risque étant alors d'obtenir des compositions inférieures à certains seuils de détection ; dans le cas des matériaux très peu polluants le ratio  $L/S_f=2 \text{ cm}$  peut s'avérer plus approprié.

Dans notre cas la matrice est fabriquée par un mélange d'eau, sable normalisée, du ciment, et du déchet BCR, comme polluants plausibles. Le bloc monolithique, pour chaque matériau, est placé dans une éprouvette en verre de volume d'un (01) litre ; suspendu par un fil permettant au lixiviant de circuler librement, donc le transfert de matière peut ainsi s'effectuer par toutes les phases de bloc. Les éprouvettes utilisées sont bien fermées afin d'éviter l'évaporation des solutions et l'entrée d'air qui entraîne différents processus physico-chimiques tels que la carbonation des solutions de lixiviation ce qui donne des faux résultats. L'expérience est réalisée à température ambiante  $20\pm 1^\circ\text{C}$  et à l'abri de la lumière. Le rythme de changement des solutions est imposé par les temps de contact matrice/solution de 6h, 18h, 24h, 2j, 3jours de lixiviation à caractériser de ces paramètres physico-chimiques sont soigneusement égouttés, sur toutes ces faces, et réintroduites dans les éprouvettes de

lixiviation, Un nouveau volume d'eau déminéralisée et une nouvelle séquence de lixiviation commence.

A chaque renouvellement du lixiviant, le temps de contact du bloc avec l'air doit être réduit au maximum. Par suite, on analyse les paramètres physico-chimiques des éluates obtenus de notre matériau ; pH et la conductivité électrique, la température. La solution est ensuite divisée en deux parties ; une acidifiée et une autre non acidifiée.

#### **b)-Conservation dans un milieu sulfaté**

##### **✓ préparation de la solution**

pour la préparation on a besoin de :

- une fiole de 1L remplie d'eau distillé
- 33.8g de sulfate de sodium.

Il faut agiter le mélange jusqu'à ce que les sulfates de sodium soient complètement dissolus.

##### **✓ Conservation**

C'est la même procédure que celle de l'eau distillée, mais au lieu de conserver dans ce milieu, on conserve dans la solution préparée.



**Figure III.13 : Test Lixiviation Monolithe de béton et mortier dans deux milieux**

#### **Conclusion :**

Après avoir présenté dans ce chapitre, les différents essais effectués sur les mortiers et le béton, nous allons présenter dans le prochain chapitre les résultats obtenus durant nos différentes expérimentations ainsi que les discussions associées.

## **CHAPITRE IV**

# **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**



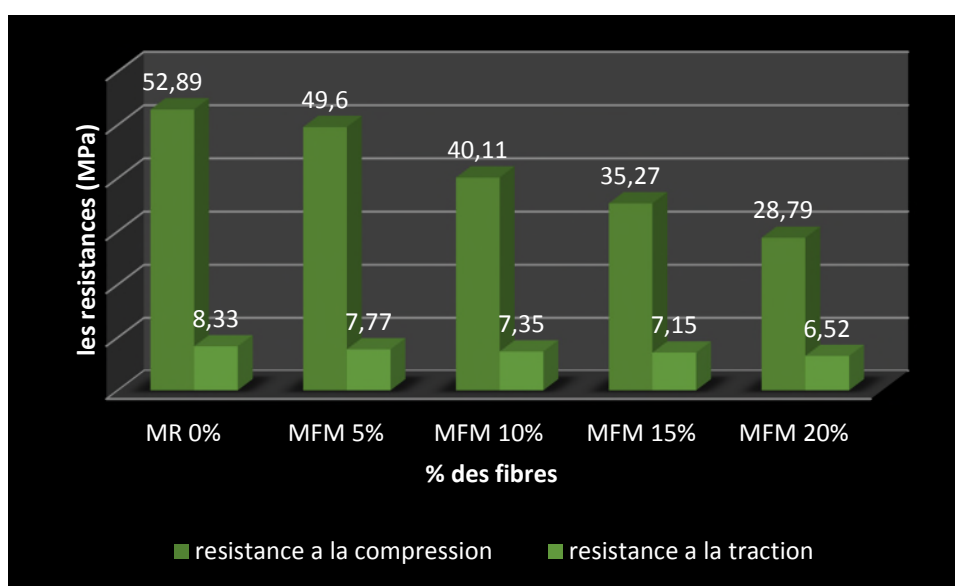
## Introduction

Les résultats des essais vont nous permettre de générer un ensemble de conclusions qui vont servir à valider le choix du pourcentage de fibres métalliques dans le béton et mortier.

### IV.1 Résultats et interprétation des essais sur les mortiers

#### IV.1.1 Comportement mécanique (résistance à la compression et à la traction par flexion)

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux des annexes B et représentés sur la (figure IV.1) :

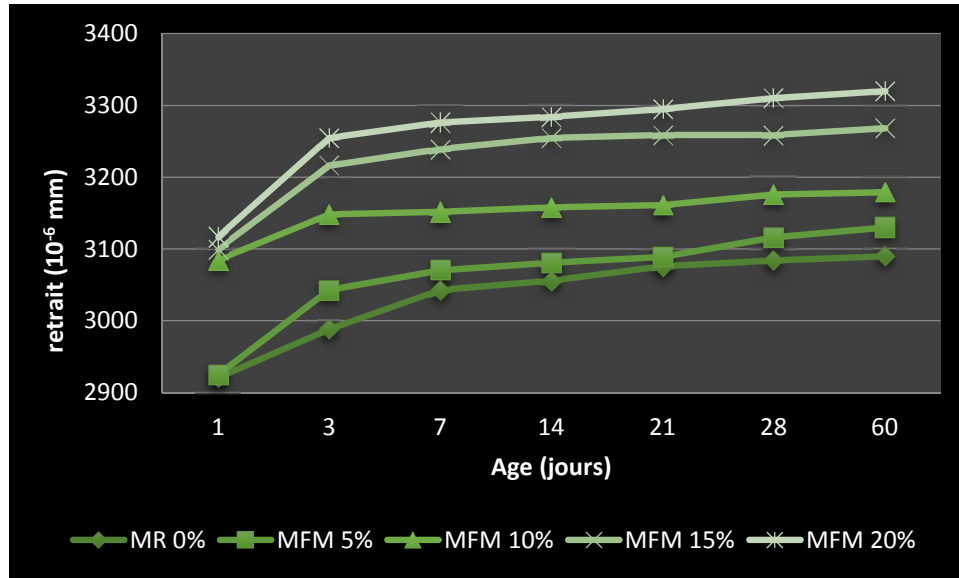


**Figure IV.1 : Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours**

D'après la figure ci-dessus, on remarque que la résistance à la compression et à la traction par flexion à l'âge de 28 jours diminue au fur et à mesure d'augmenter le pourcentage des fibres métalliques, Cet abaissement est dû à la porosité existante dans le mortier, plus on diminue le sable et on augmente les fibres le mortier devient moins compacte, implique moins résistant. Mais celle du mortier à 5% de fibres est de bonne résistance. (Proche de celle de mortier témoin).

## IV.1.2 Mesure de retrait et du gonflement sur les éprouvettes du mortier

### IV.1.2.1-Retrait de dessiccation



**Figure IV.2 : Retrait de dessiccation**

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume, appelée contraction. L'eau s'évapore d'un mortier conservé à l'air libre provoquant le retrait, qui est la conséquence de la perte d'eau libre, lorsque cette eau se retire du matériau, une contraction se produit automatiquement.

Les résultats présentés ci-dessus montrent un comportement de contraction des éprouvettes à différents âges de mesure (1j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j et 60j), et à différents pourcentages des FM (0%, 5%, 10%, 15% et 20%), les changements volumiques se produisent après la prise. La variation du retrait des éprouvettes des mortiers à différents pourcentages ont presque la même allure.

Un retrait important de 1j à 3j (au jeune âge) qui est dû à l'hydratation du ciment (dégagement de chaleur) puis une hydratation modérée de 3j à 28j.

Au-delà de 28j, on remarque qu'il y a stabilisation du retrait, ce qui revient à dire qu'il est à la phase finale. Donc on peut dire d'après ces résultats de retrait :

- Les grains fins réduisent les variations volumiques (retrait), et les chaleurs dégagés. C'est pour cela qu'à chaque fois qu'on réduit le sable le retrait augmente.

✓ Variation de la masse

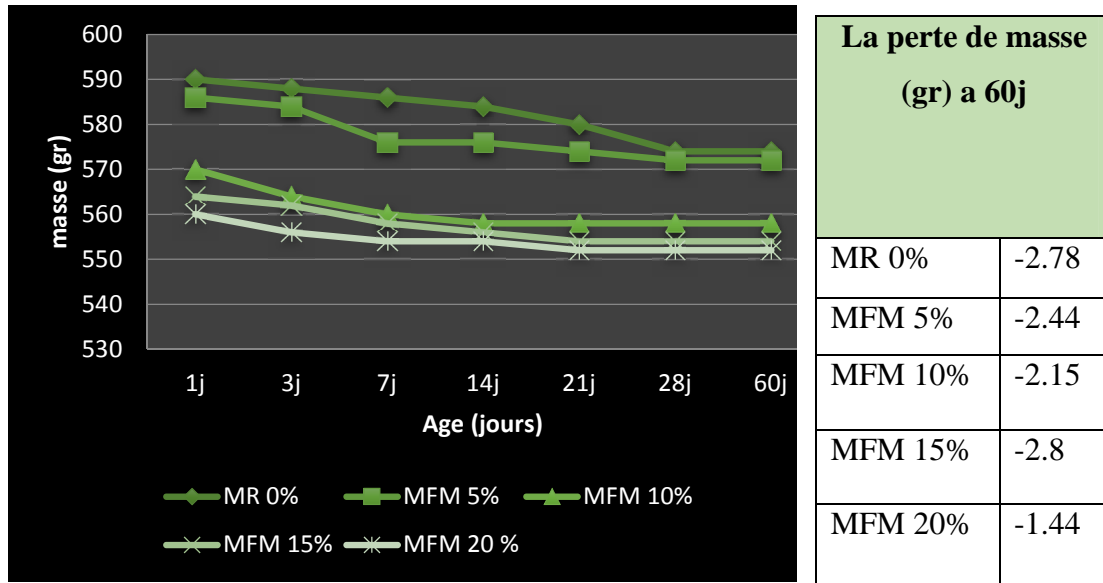


Figure IV.3 : la masse

On sait que le retrait s’accompagne systématiquement d’une diminution ou d’une perte de masse, la (figure IV.3)et l’annexe B nous montre que la masse diminue en fonction du temps, et commence à se stabiliser à partir de 28 jours pour tous les mortiers à différents pourcentages de fibres métalliques.

Le mortier sans FMI a une masse plus importante, cependant il a moins d’évaporation d’eau, ce qui dû à une hydratation moins importante du ciment.

Ces résultats sont logiques du moment que le retrait important a une perte de masse importante et c’est le cas pour le mortier qui a un faible retrait (faible de perte de masse).



## IV.1.2.2 Gonflement

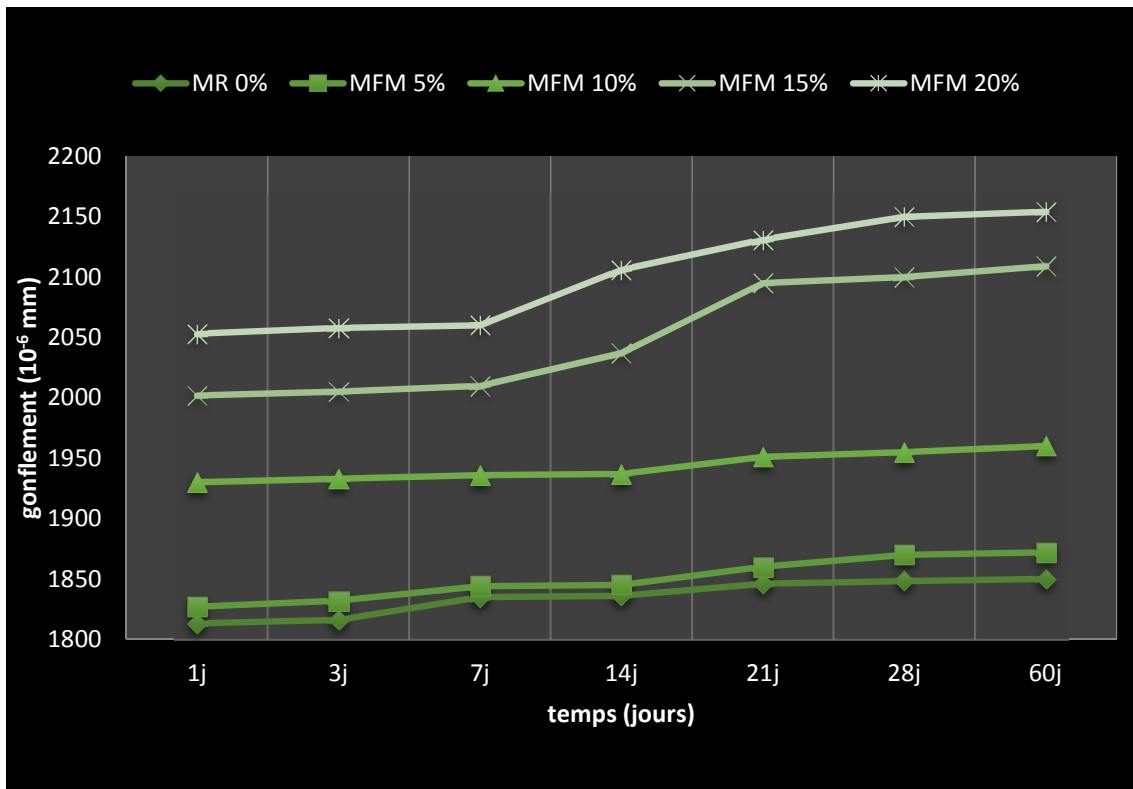


Figure IV.4 : Gonflement

Tous les mortiers représentent la même allure du gonflement. Nous remarquons une évolution continue du gonflement en fonction de l'âge de mesure (1j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j et 60j), donc on peut dire que le gonflement évolue en fonction du temps, ça est due au remplacement de sable par les fibres métallique qui a provoqué une formation des pores qui ont tendance à se remplir d'eau.

## ✓ Variation des masses

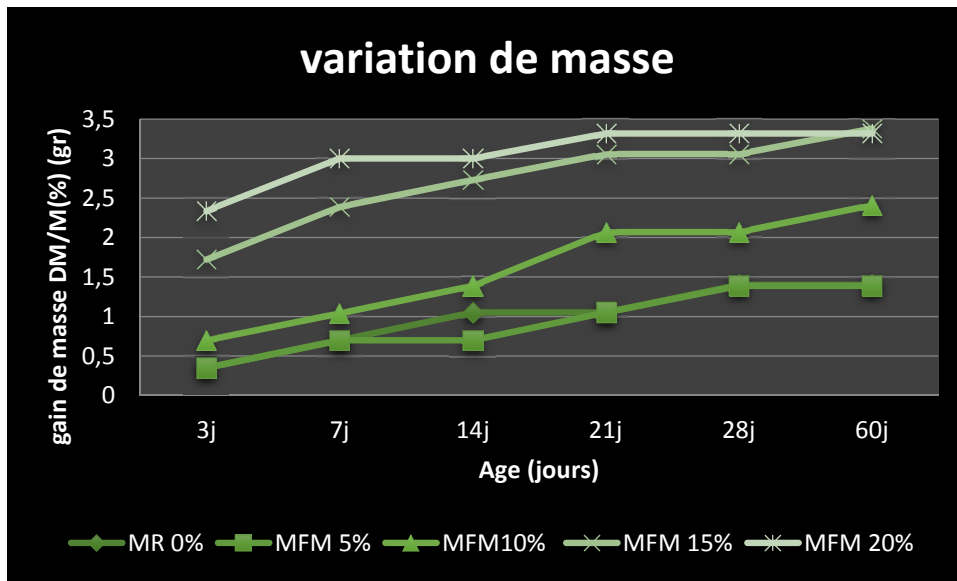
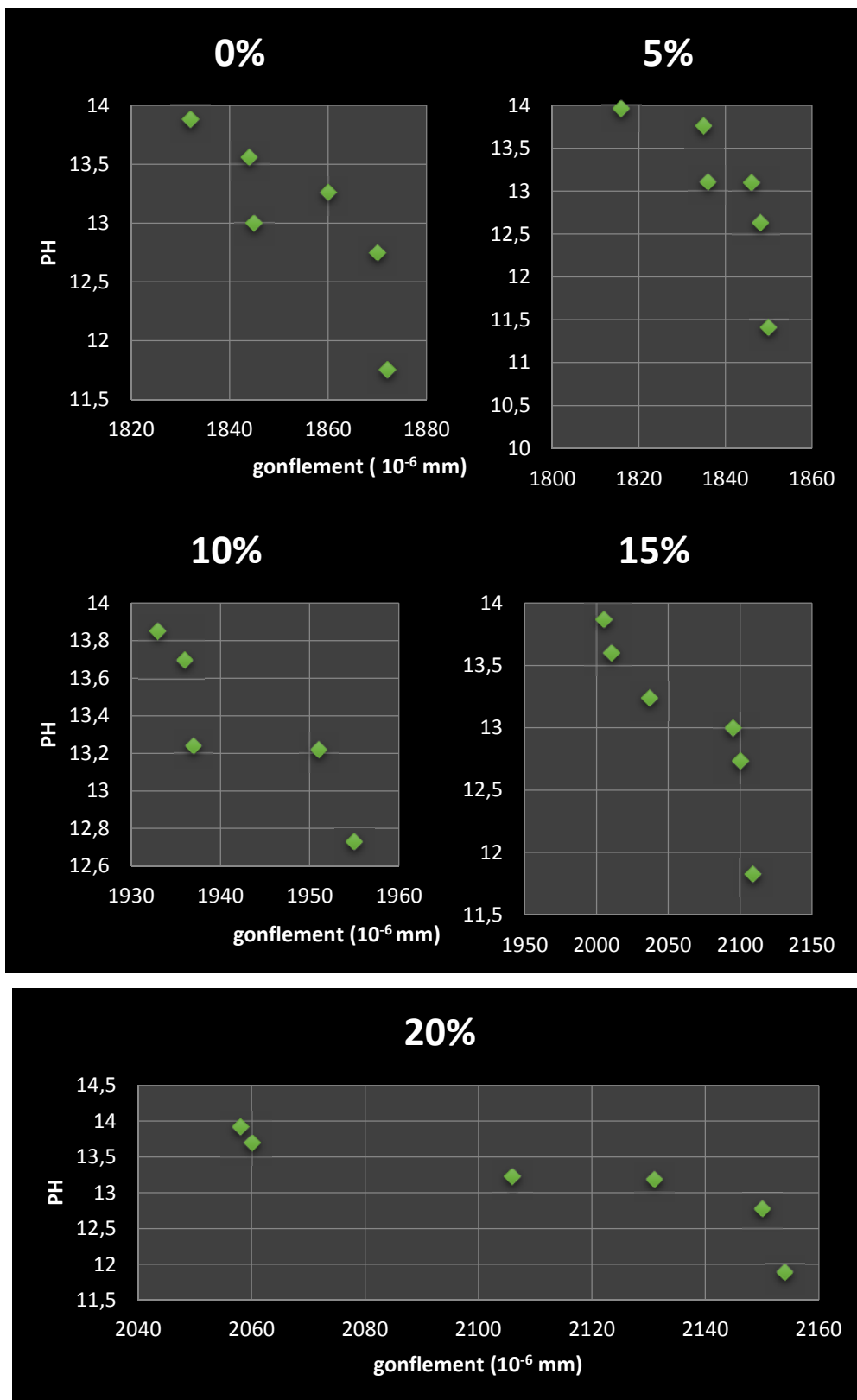


Figure IV.5 : Variation des masses

La (figure IV.5) nous montre que la variation des masses pour le gonflement est proportionnelle à celle du gonflement lui-même, l'augmentation de la masse est due à la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes du mortier.

IV.1.3 Analyses physico-chimiques des milieux de conservation

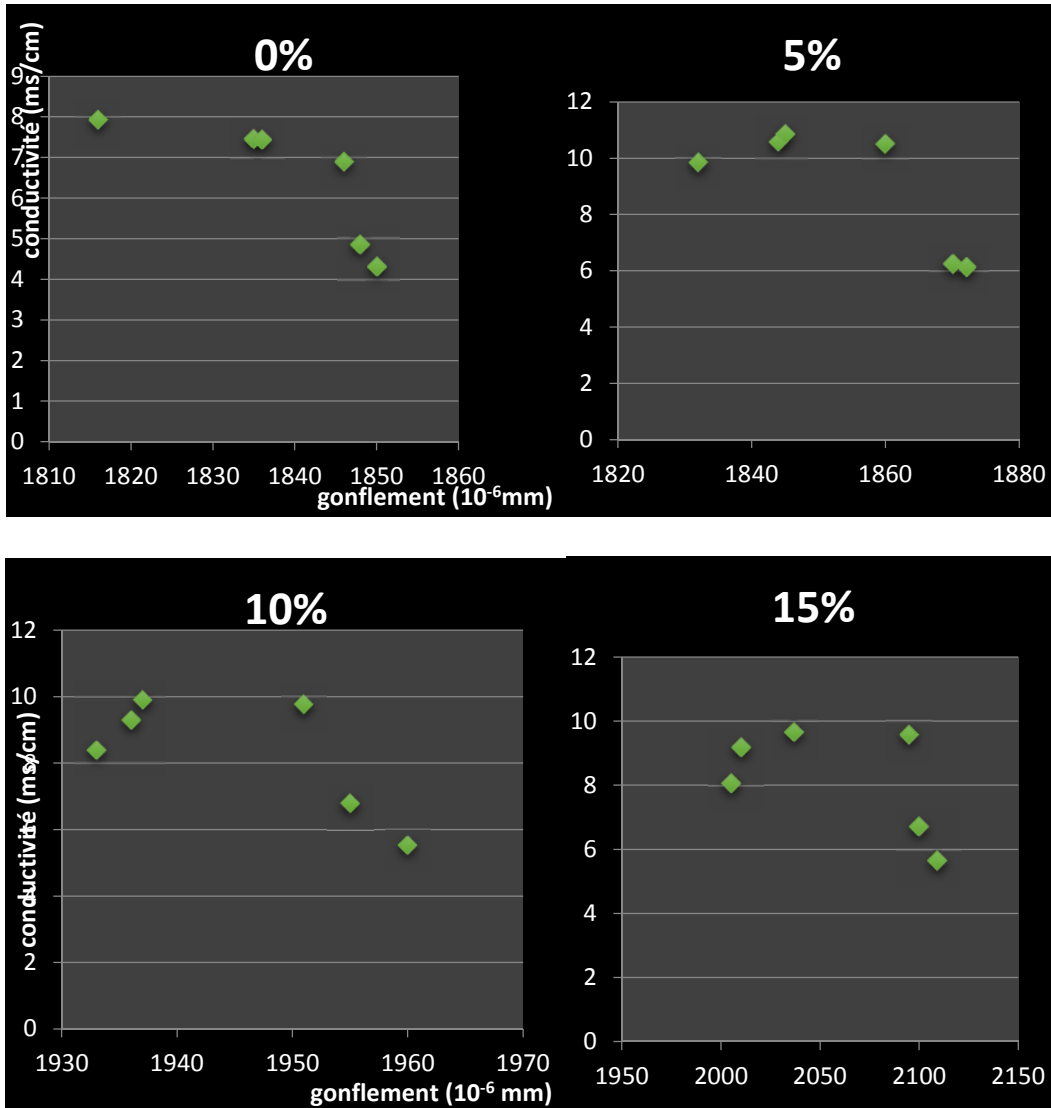
✓ L'évolution du pH

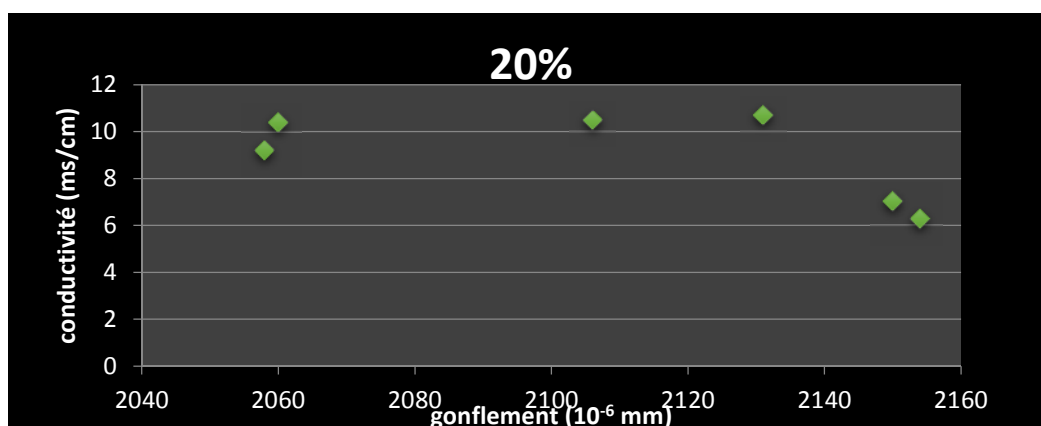


Figures IV.6 : Évolution du pH

D'après les (figures IV.6), précédentes nous remarquons que la solution est basique dans tous les mortiers (à différents pourcentages). Est cela est dû à la solution qui est riche en alcalins dont le Ph varie de 11 à 14, et on peut l'expliquer par la dissolution des ions provenant de la dissociation de la portlandite et l'ettringite, qui se décompose avec production des OH.

✓ Mesure de conductivité électrique





Figures IV.7 : Conductivité électrique

On observe d'après les (figure IV.7) précédentes un décroissement de la conductivité électrique cette diminution est due au relargage des espèces chimiques et immigration des fibres des métaux lourds (cu,zn) vers la solution de conservation.

## IV.2 Résultats et interprétation des essais sur les bétons

### IV.2.1 affaissement

#### ↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le (tableau IV.1), et ils sont schématisés sur la (figure IV.8):

Tableau IV.1 : résultats d'affaissement

N° Série	Coefficient d'affaissement (cm)	consistance
BR (00 %)	19	Fluide
BFM (5%)	18	Fluide
BFM (10 %)	16	Fluide
BFM (15 %)	6	Plastique
BFM (20 %)	5	Plastique

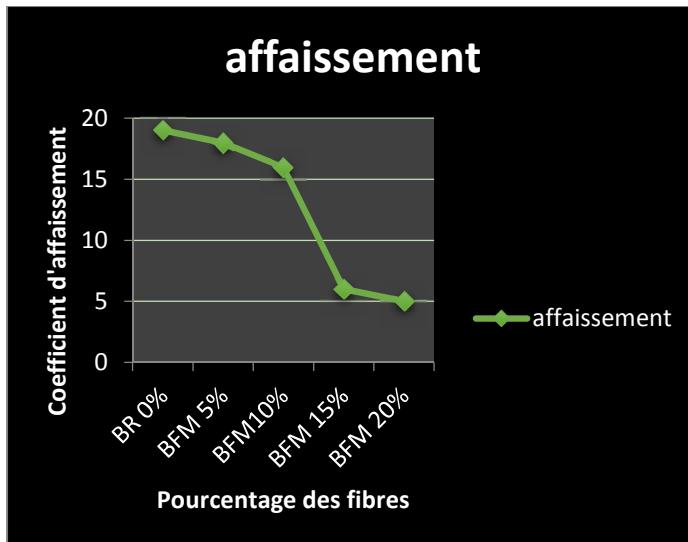


Figure IV.8 : Variation de l'affaissement en fonction de Différentes séries du béton

#### ↳ Interprétation des résultats

Cet essai est exécuté sur le béton frais pour déterminer et quantifier l'ouvrabilité du béton. Les valeurs de l'affaissement obtenus montre que :

On a obtenu une consistance fluide pour le béton témoin ainsi que pour les bétons à l'ajout des fibres métalliques ( 5 % , 10 % ) et une consistance plastique pour les bétons à l'ajout des fibres métalliques ( 15 % , 20 % ) .

### IV.2.2 Masse volumique du béton frais

#### Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe B, et ils sont schématisés sur la (figure IV.9) suivantes :

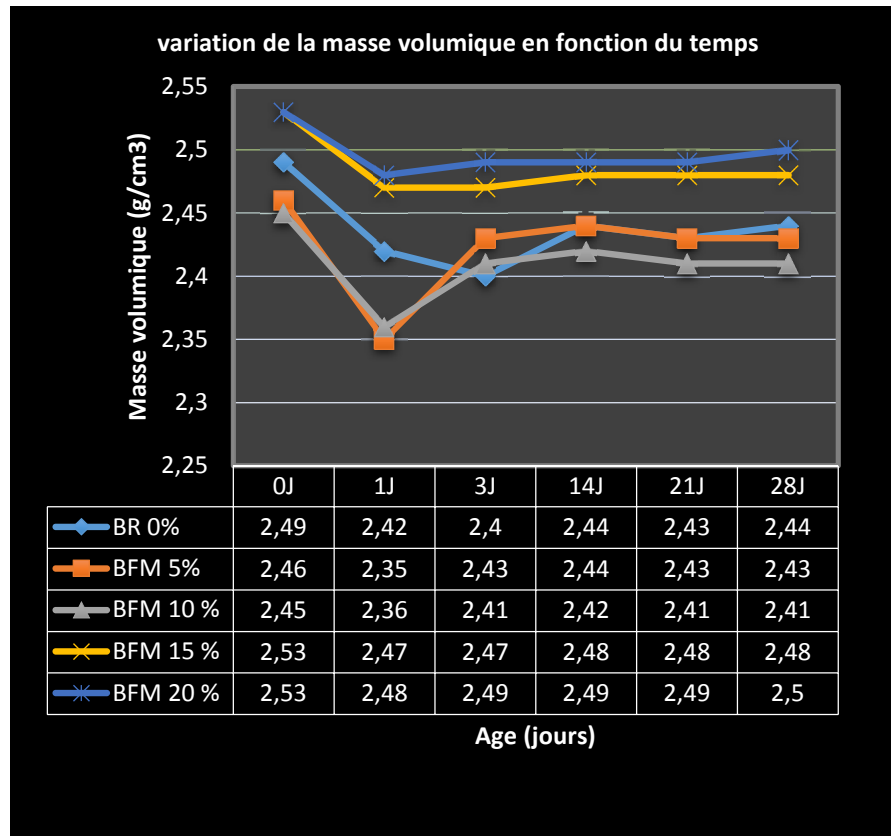


Figure IV.9 : Evolution des masses volumiques en fonction du temps

#### ↳ Interprétation des résultats

A partir des courbes tracées, nous avons remarqué que :

Entre le jour de confection (0 jour) et 1 jour, on remarque une forte diminution de la masse volumique de tous les bétons et cela revient à l'exposition des éprouvettes à l'air ambiant, ce qui dit le séchage du béton et l'évaporation de l'eau.

A partir du 1<sup>er</sup> jour jusqu'aux 3<sup>eme</sup> jours, on observe une augmentation des masses volumiques des bétons, qui s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment, sachant que les éprouvettes de bétons ont été conservées dans l'eau (absorption de l'eau).

Nous remarquons qu'à partir du 14<sup>eme</sup> jour la masse reste constante pour tous les bétons (se stabilises), donc pas d'absorption d'eau (saturation).

L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée, une petite partie de ciment reste non hydratée.

### IV.2.3 Résistance à la compression

#### ↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe B et ils sont représentés par la courbe suivante (Figure IV.10)

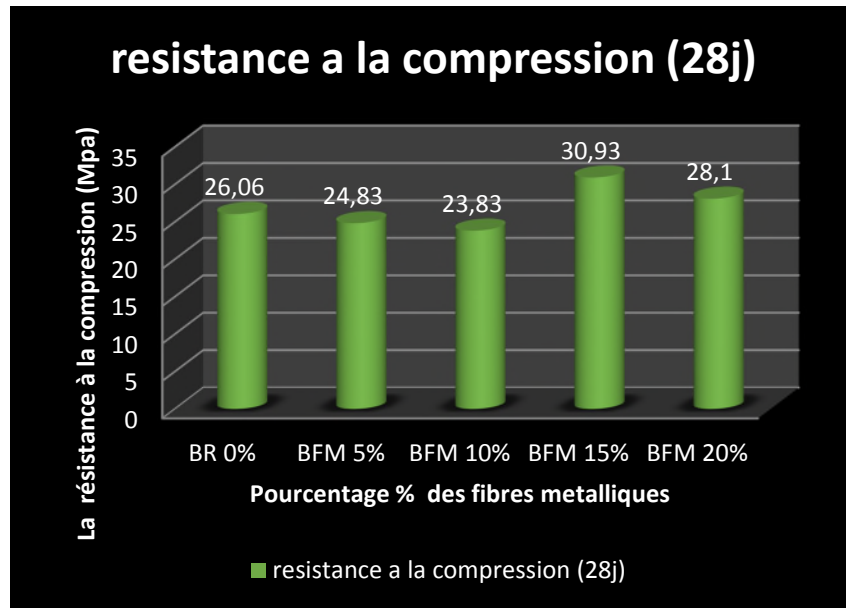


Figure IV.10 : Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton.

#### ↳ Interprétation des résultats

On remarque que le dosage à 0% de fibres métalliques « Béton Témoin » n'a pas donné une meilleure résistance à la compression.

Pour le dosage à (5% et 10%) de fibres métalliques on remarque une légère diminution de résistance par rapport au béton témoin et cela revient à la quantité de fibres métalliques qui a été ajoutée, ce qui est dû à la diminution de sable → béton moins compacte

Mais pour le dosage à (15% et 20%) on distingue qu'une forte augmentation de résistance par rapport au béton témoin.

La meilleure résistance à la compression est à 15% de fibres métalliques, et cela peut s'expliquer par une bonne distribution des fibres dans le béton (elles sont homogènes dans tout le béton).



#### IV.2.4 Masse volumique du béton durci :

Les résultats sont récapitulés dans le (tableau IV.2)

**Tableau IV.2 : Valeurs des masses volumique calculées des différents Bétons étudiés.**

N° de série	Méch avant séchage (g)	Méch après séchage (g)	Masse de l'éprouvette avant séchage (g)	Masse de l'éprouvette après séchage (g)	$\rho_{\text{sèche}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>BFM 0%</b>	383.46	351.85	15738	14441	2.244
<b>BFM 5%</b>	269.43	243.63	15683	14181	2.204
<b>BFM10%</b>	258.32	244.28	15585	14738	2.290
<b>BFM15%</b>	190.21	171.93	16023	14483	2.251
<b>BFM20%</b>	200.56	185.40	16105	14888	2.313

#### ↳ Interprétation des résultats

On constate que les masses volumiques calculées au 28<sup>ème</sup> jour sont presque égales à celles théoriques ; ce qui nous renseigne sur l'homogénéité du béton.

## Testes de lixiviation dynamique et caractérisation

- Test de Lixiviation Monolithe (TLM)
- ✓ Variation de la masse

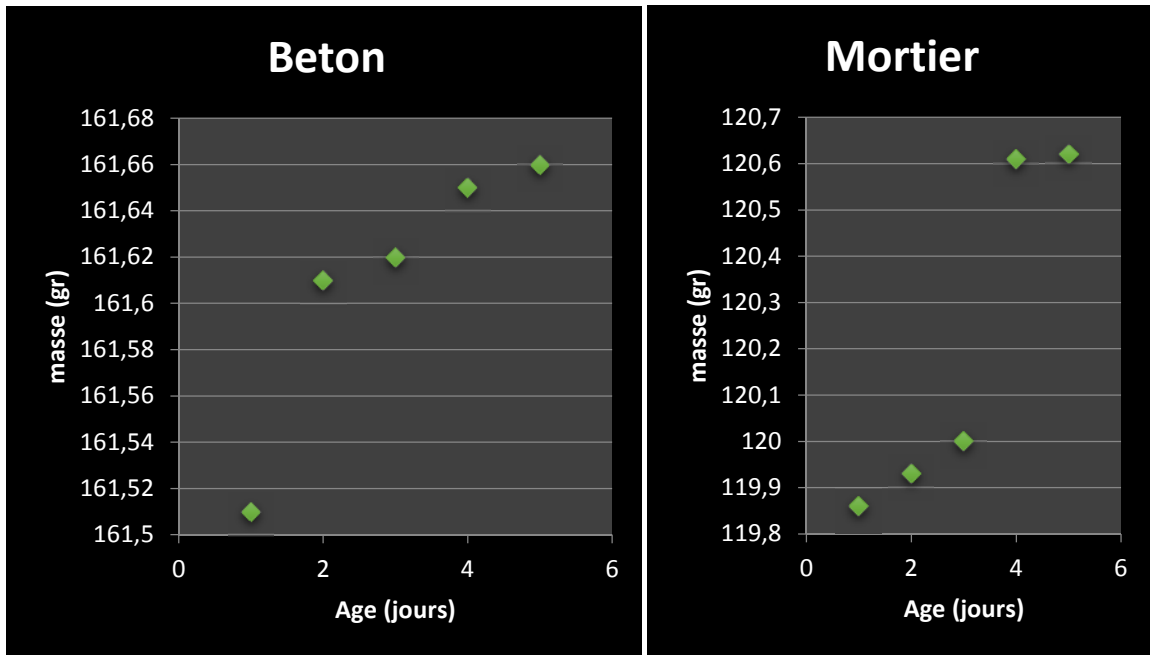


Figure IV.11 : Variation de masse (milieu neutre)

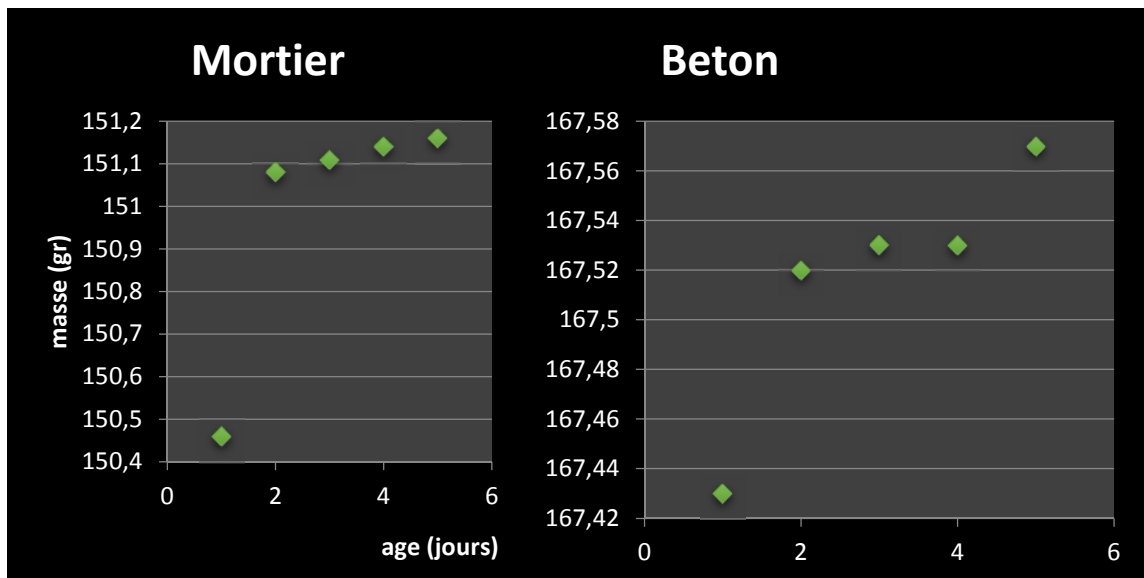


Figure IV.12 : Variation la masse (milieu sulfaté)

On remarque que la masse augmente avec le temps pour les deux milieux, et pour les deux matériaux, la présence des pores capillaires dans les blocs crée par la présence des FMI provoque l'absorption de la solution du milieu de conservation par les blocs, c'est le phénomène du gonflement qui explique l'augmentation de la masse.

✓ L'évolution du pH

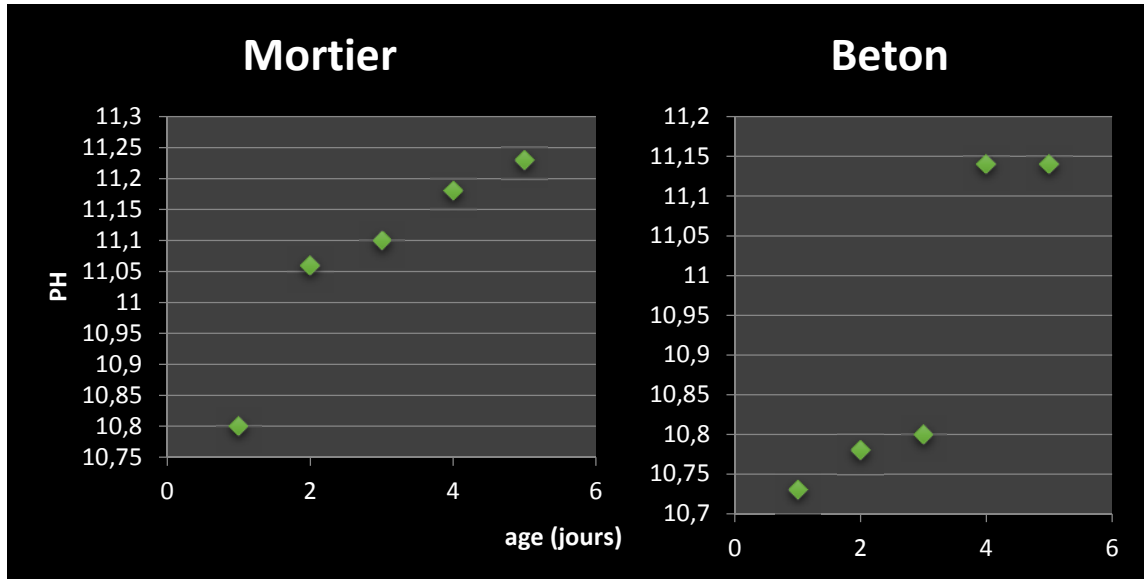


Figure IV.13 :Évolution du pH(milieu neutre)

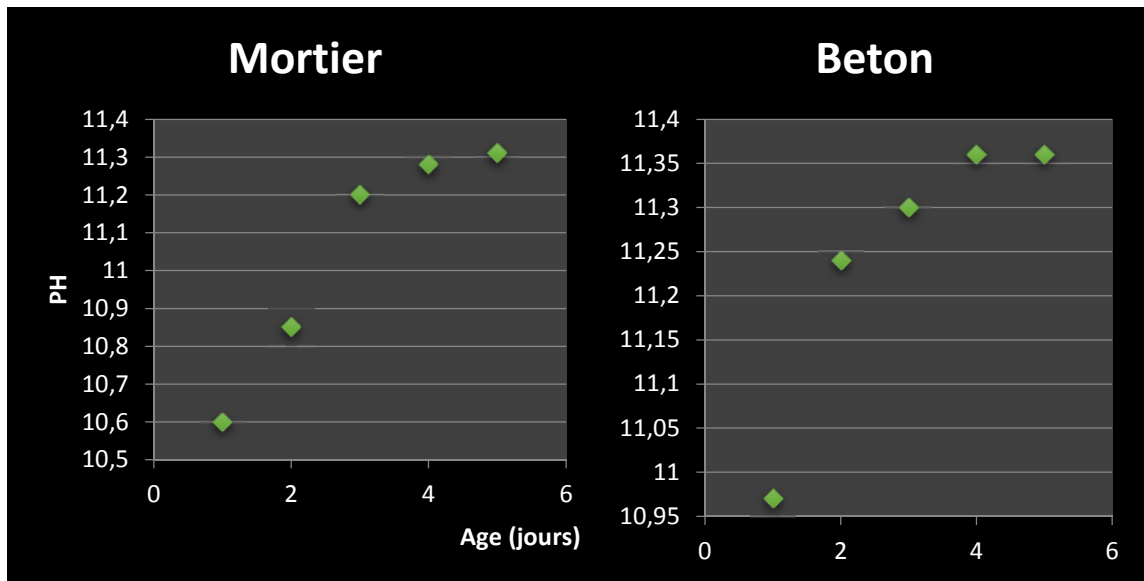


Figure IV.14 :Évolution du pH(milieu sulfaté)

Les figures montrent que le PH augmente en fonction de temps dans le milieu sulfaté jusqu'à ce que rapproche de 11.5 il commence à se stabilise, l'augmentation du ph est dû au relargage des OH<sup>-</sup> c'est la formation de gypse secondaire : résultant de la réaction de substitution entre la portlandite et les sulfates :



## ✓ Conductivité électrique

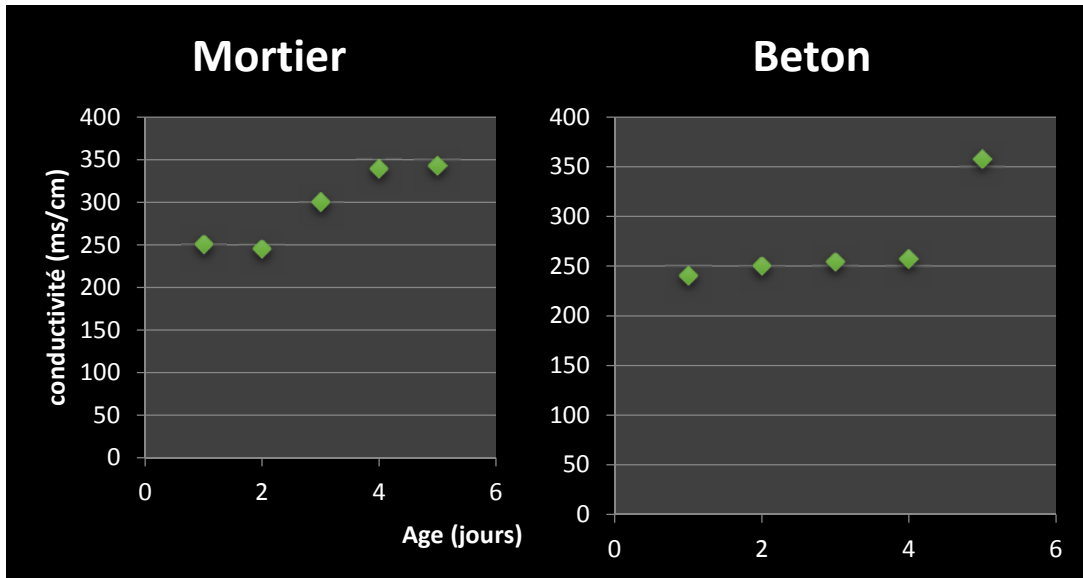


Figure IV.15 : Conductivité électrique (milieu neutre)

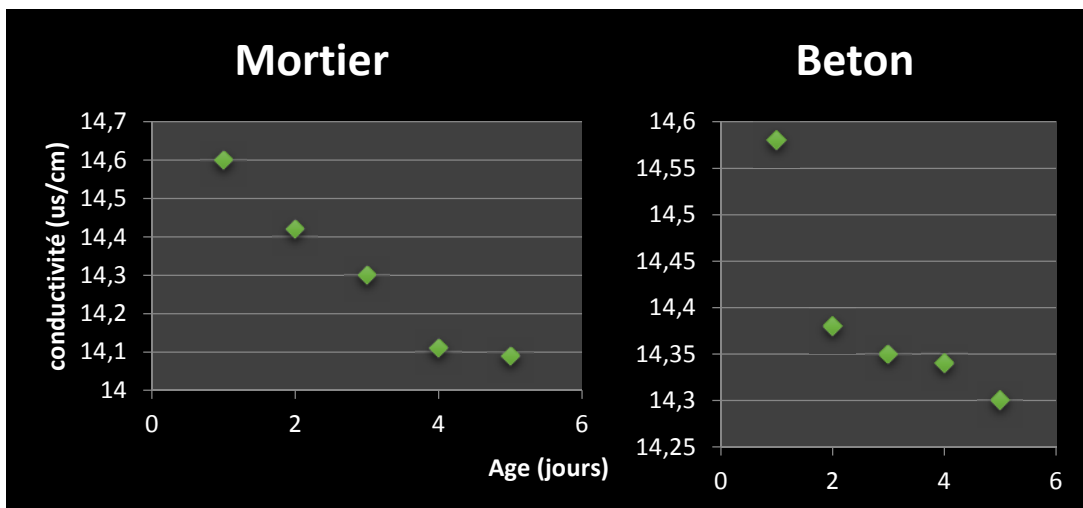


Figure IV.16 : Conductivité électrique (milieu sulfaté)

On remarque d'après les figures une augmentation de la conductivité électrique pour le milieu neutre et ça du à la présence des métaux lourds présents dans les fibres et relargué vers la solution.

Pour le milieu sulfaté, on peut dire qu'il y a le phénomène inverse, c'est-à-dire retour des métaux lourds (immigration) vers les blocs de béton et mortier.

✓ L'évolution de la température

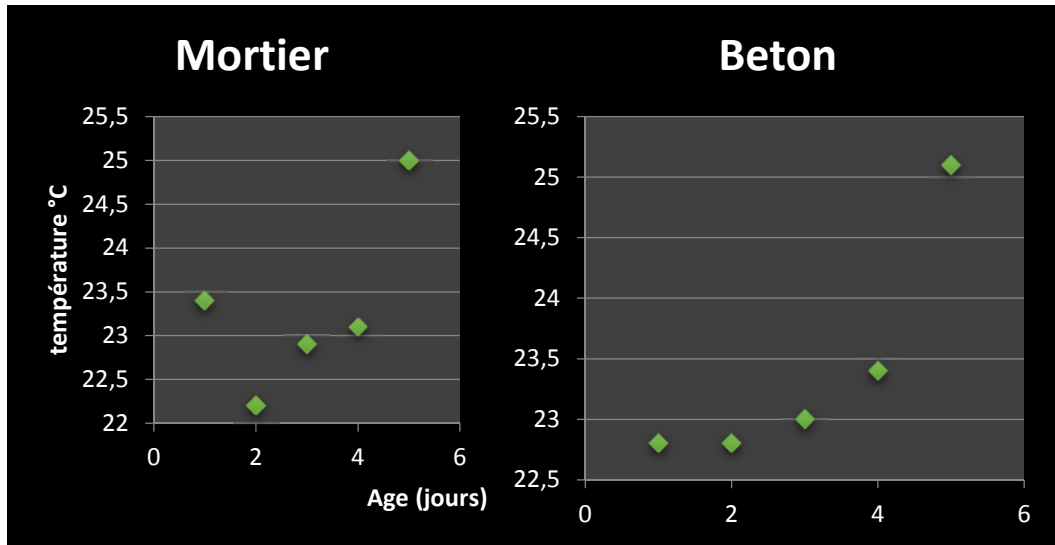


Figure IV.17 :Température (milieu neutre)

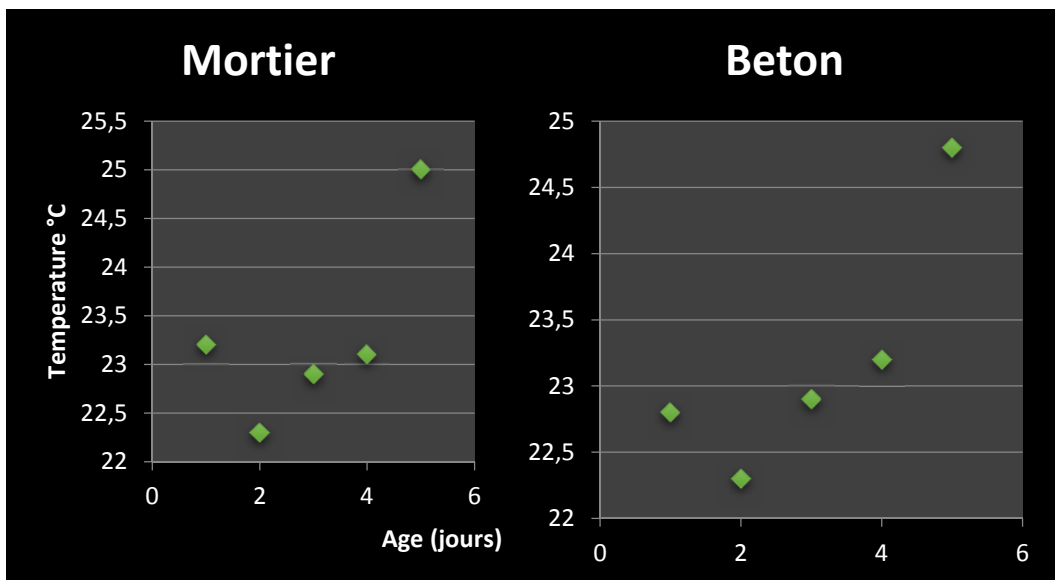


Figure IV.18 : Température (milieu sulfaté)

On remarque que la température des deux milieux est des températures ambiantes qui varient entre 22 à 25°C.

# **CONCLUSION GENERALE**

# CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été effectuée afin d'évaluer l'effet des fibres métalliques issues de l'unité BCR de Ain El Kbira (Wilaya de Sétif) vis-à-vis des valorisées tout en substituant le sable. Les résultats obtenus de l'étude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques nous permettent de conclure que :

- \* Les fibres métalliques peuvent être utilisées comme remplaçant du sable à 5% pour les mortiers et à 15% pour les bétons, après avoir présenté une résistance à la compression acceptable ( $> 25$  MPa), c'est un plus environnemental permettant de dégager des espaces de stockage au niveau de l'usine.
- \* Le retrait et le gonflement croissent proportionnellement avec l'ajout de fibre métallique et en fonction du temps. (proches de ceux de 0% mortier témoin)
- \* La variation de la masse pour le gonflement est proportionnelle à celle de gonflement lui-même, par contre celle de retrait diminue.
- \* Le béton à 15% de fibres a une bonne résistance à la compression ce qui est dû peut-être aux fibres qui sont éparpillées dans le béton (bonne distribution ou bien distribution homogène)
- \* Nous avons jugé que la formulation à 5% de fibres pour mortiers et à 15% de fibres pour les bétons est intéressante du fait qu'elle présente une bonne résistance à la compression et à la traction par flexion un retrait et gonflement acceptables et proches de celles de 0% (mortier et béton témoin). Donc ces fibres métalliques de BCR peuvent être dans le béton de structures

En ce qui concerne les orientations futures, nous pensons qu'il serait intéressant de :

- \* Diminuer les sections d'armatures en béton armé, et de les remplacer par les fibres métalliques.
- \* Analyser la répartition des fibres métalliques après l'ajout de ces dernières dans le béton et le mortier.
- \* Jouer sur le diamètre des fibres métalliques.
- \* Essayer de mettre les fibres métalliques comme un ajout.

- \* Faire l'analyse de la S.A.A des solutions de conservations des monolithes de mortiers les pastilles de bétons pour voir le relargage des métaux lourds.



# REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] V.PHOUMMAVONG «Cours en ligne Matériaux de Construction». Université national LAOS 2006.
- [2] Ecole française du béton, 92974 paris, la défense cedex.
- [3] Association de béton Québec « Guide de bonne pratique pour l'utilisation des fibres dans le béton». ISBN2 -923379-00-4.
- [4] A. Abdous « Béton renforcé de fibre ».Exposé de MDC. Université de Bejaia.
- [5] S.ELLOUZE, A.ELLOUZE et C.MEZGHANNI : «Formulation de béton à base des déchets métalliques». Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011
- [6] D.ACHOURA «Effet du dosage en fibres métalliques ondulés sur le comportement mécanique des bétons à haute performances».
- [7] Y.CHERAIT et Z.NAFA, «élément de matériau de construction et essais», I-S-B.N : 9961\_9548\_7\_4.
- [8] DURABILITE DES BETON, «Collection de l'association technique de l'industrie des liants hydraulique, sous-directeur de Jacques BARON et Jean Pierre OLLIVIER», presses de l'école nationale des ponts et chaussées – 49.rue de l'université.75007 Paris, 1992. Ligne, Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006, mis en ligne le 08 septembre 2006
- [9] G.CHANCILLARD «le matériau béton connaissances générales» Edition ALEAS, 1999.
- [10] N.KADJOUR « Propriétés et pathologie du béton» Office des publications universitaires.
- [11] IUP GENIE CIVIL « Cours Transfert Thermique (Fichier PDF, 29 pages) », 2002.

- [12] S. Bedjou « Etude du recyclage de débris de briques ». Thèse de Magister. ENP (2003)
- [13] M.BENTALHA née MALOU. « Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire -caractérisation - comportement monotone – microstructure ».thèse de doctorat, Université de Mentouri-Constantine.2007
- [14] R.DUPAIN et R.LANCHON et J.C.ARROMAN :« Granulats, sols, ciments et Bétons» .Édition Casteilla 2004.
- [15] S.KHERBACHE :« Etude de l'influence de l'ajout de particules fines dans les sables concassé sur le retrait et la résistance des bétons », thèse de magister, Université de Bejaia. 2006.
- [16] Recueil de normes françaises du « Bâtiment et travaux publics granulats ». 1ère édition .AFNOR.1982.
- [17] Document de qualité ''ISO'' de L.T.P.E de Bejaia.
- [18] MEFTAH « Cours de MDC » l'école Nationale des travaux publics.
- [19] Normalisation française pour la classification ''Granulats'' XP P 18-540
- [20] S.ATTIL : « TP 3eme année licence sur les matériaux de construction » Université de Bejaia. 2010.
- [21] Agence Française de Normalisation Qualité des sols: Sols, sédiments, boues de Station d'épuration. Mise en solution d'éléments métalliques en traces (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) par attaques acides n°X31-151, 1993, p. 7-7.
- [22] B.BENSTAALLI « Méthodes et technique d'analyses physique » 1ere édition. 2003
- [23] S.KHERBACHE et R.GOUDJIL : « Influence des fines contenus dans les sables concassé sur la résistance des bétons », thèse de l'ingénieur, Université de Bejaia. 2003
- [24] G. DREUX, J. FEST, « Nouveau Guide du Béton et de ces constituants », 8ème édition, Eyrolles, Mai 19986.
- [25] K.WESCHE; Baustoffe fur tragende bauteile ; Béton and masswerk ; Bauverlag Wiesbaden/Berlin, 1993. (Matériaux de construction pour élément de support).
- [26] G. LOHMEYER; Béton- technique ; Handbuch fur planer and konstrukteur, béton Verlag, Dusseldorf, 1989.

[27] M.MORTAHRI

«Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de TIZI-OUZOU», Thèse de doctorat, 2012.

## Annexe A (Béton)

Les pourcentages des fibres (%)	Calcul de rapport G/S		
	Les granulats	Les dosages (kg/m <sup>3</sup> )	Le rapport G/S
0%	Sable 0/4	803.56	1.27
	Gravier 8/15	541.73	
	Gravier 15/25	476.61	
	Ciment	350	
5%	Sable 0/4	712.24	1.42
	Gravier 8/15	541.73	
	Gravier 15/25	476.61	
	Ciment	350	
10%	Sable 0/4	620.93	1.64
	Gravier 8/15	541.73	
	Gravier 15/25	476.61	
	Ciment	350	
15%	Sable 0/4	529.62	1.92
	Gravier 8/15	541.73	
	Gravier 15/25	476.61	
	Ciment	350	
20%	Sable 0/4	438.30	2.32
	Gravier 8/15	541.73	
	Gravier 15/25	476.61	
	Ciment	350	

Les valeurs de masse volumique de 0j						
Série des bétons	V (cm <sup>3</sup> )	M <sub>moule</sub> (gr)	M <sub>t</sub> (gr)	M <sub>t</sub> -M <sub>moule</sub> (gr)	$\frac{M_t - M_{moule}}{V}$	$\rho_{moy}$
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	9200	25190	15990	2.48	2.49
	6433.98	9100	25160	16060	2.49	
	6433.98	9220	25460	16240	2.52	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	9040	24930	15890	2.46	2.46
	6433.98	9181	25090	15909	2.47	
	6433.98	9060	24950	15890	2.46	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	8980	24930	15950	2.47	2.45
	6433.98	9180	25000	15820	2.45	
	6433.98	9220	25030	15810	2.45	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	8980	25230	16250	2.52	2.53
	6433.98	9180	25570	16390	2.54	
	6433.98	9220	25560	16340	2.53	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	9040	25175	16135	2.50	2.53
	6433.98	9181	25625	16444	2.55	
	6433.98	9060	25500	16440	2.55	

Les valeurs de la masse volumique 1j				
Série des bétons	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	$\rho_{moy}$
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	15590	2.42	2.42
	6433.98	15585	2.42	
	6433.98	15695	2.43	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	15120	2.35	2.35
	6433.98	15170	2.35	
	6433.98	15120	2.35	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	15090	2.34	2.36
	6433.98	15100	2.34	
	6433.98	15480	2.40	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	15960	2.48	2.47
	6433.98	15925	2.47	
	6433.98	15920	2.47	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	15940	2.47	2.48
	6433.98	16135	2.50	
	6433.98	15990	2.48	

Série des bétons	Les valeurs de la masse volumique 3j			$\rho_{moy}$
	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	15625	2.42	2.40
	6433.98	15110	2.34	
	6433.98	15750	2.44	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	15635	2.43	2.43
	6433.98	15700	2.44	
	6433.98	15610	2.42	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	15540	2.41	2.41
	6433.98	15530	2.41	
	6433.98	15575	2.42	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	16000	2.48	2.47
	6433.98	15970	2.48	
	6433.98	15955	2.47	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	15970	2.48	2.49
	6433.98	16150	2.51	
	6433.98	16020	2.48	

Série des bétons	Les valeurs de la masse volumique a 7j			$\rho_{moy}$
	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	15535	2.41	2.40
	6433.98	15485	2.40	
	6433.98	15550	2.41	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	15160	2.35	2.35
	6433.98	15180	2.35	
	6433.98	15140	2.35	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	15135	2.35	2.36
	6433.98	15415	2.39	
	6433.98	15165	2.35	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	15625	2.42	2.42
	6433.98	15615	2.42	
	6433.98	15590	2.42	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	16020	2.48	2.44
	6433.98	15665	2.43	
	6433.98	15620	2.42	

Les valeurs de la masse volumique a 14j				
Série des bétons	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	$\rho_{moy}$
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	15750	2.44	2.44
	6433.98	15665	2.43	
	6433.98	15840	2.46	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	15755	2.44	2.44
	6433.98	15830	2.46	
	6433.98	15655	2.43	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	15610	2.42	2.42
	6433.98	15580	2.42	
	6433.98	15615	2.42	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	16065	2.49	2.48
	6433.98	16015	2.48	
	6433.98	15900	2.47	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	16030	2.49	2.49
	6433.98	16205	2.51	
	6433.98	16080	2.49	

Les valeurs de la masse a 21j				
Série des bétons	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	$\rho_{moy}$
<b>BR</b> <b>(0 %)</b>	6433.98	15640	2.43	2.43
	6433.98	15630	2.42	
	6433.98	15800	2.45	
<b>BFM</b> <b>(5%)</b>	6433.98	15665	2.43	2.43
	6433.98	15800	2.45	
	6433.98	15630	2.42	
<b>BFM</b> <b>(10%)</b>	6433.98	15580	2.42	2.41
	6433.98	15560	2.41	
	6433.98	15600	2.42	
<b>BFM</b> <b>(15%)</b>	6433.98	16035	2.49	2.48
	6433.98	15975	2.48	
	6433.98	15965	2.48	
<b>BFM</b> <b>(20%)</b>	6433.98	15995	2.48	2.49
	6433.98	16180	2.51	
	6433.98	16030	2.49	

Les valeurs de la masse volumique a 28j				
Série des bétons	V (cm <sup>3</sup> )	M (gr)	$\frac{M}{V}$	$\rho_{moy}$
<b>BR (0 %)</b>	6433.98	15675	2.43	2.44
	6433.98	15670	2.43	
	6433.98	15870	2.46	
<b>BFM (5%)</b>	6433.98	15670	2.43	2.43
	6433.98	15750	2.44	
	6433.98	15630	2.42	
<b>BFM (10%)</b>	6433.98	15590	2.42	2.41
	6433.98	15565	2.41	
	6433.98	15600	2.42	
<b>BFM (15%)</b>	6433.98	16060	2.49	2.48
	6433.98	16030	2.49	
	6433.98	15980	2.48	
<b>BFM (20%)</b>	6433.98	16030	2.49	2.50
	6433.98	16235	2.52	
	6433.98	16050	2.49	

Les valeurs des moyennes des masses de béton (g)							
N° séries	0 jour	1 jour	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
BR 0%	16096.67	15623.33	15495.33	15523.33	15751.67	15690	15738.33
BFM5%	15896.33	15136.67	15648.33	15160	15746.67	15698.33	15683.33
BFM10%	15860	15223.33	15548.33	15238.33	15601.67	15580	15585
BFM15%	16326.67	15935	15975	15610	15993.33	15991.67	1623.33
BFM20%	16339.66	16021.67	16046.66	15768.33	16105	16068.33	16105

La masse des éprouvettes en fonction du temps (gr)							
Les séries	Béton frais (0j)	1 <sup>er</sup> jour	3 <sup>iem</sup> jours	7 <sup>iem</sup> jours	14 <sup>iem</sup> jours	21 jours	28 jours
<b>BR (0 %)</b>	15990	15590	15625	15535	15750	15640	15675
	16060	15585	15110	15485	15665	15630	15670
	16240	15695	15750	15550	15840	15800	15870
<b>BFM (5%)</b>	15890	15120	15635	15160	15755	15665	15670
	15909	15170	15700	15180	15830	15800	15750
	15890	15120	15610	15140	15655	15630	15630
<b>BFM (10%)</b>	15950	15090	15540	15135	15610	15580	15590
	15820	15100	15530	15415	15580	15560	15565
	15810	15480	15575	15165	15615	15600	15600
<b>BFM (15%)</b>	16250	15960	16000	15625	16065	16035	16060
	16390	15925	15970	15615	16015	15975	16030
	16340	15920	15955	15590	15900	15965	15980
<b>BFM (20%)</b>	16135	15940	15970	16020	16030	15995	16030
	16444	16135	16150	15665	16205	16180	16235
	16440	15990	16020	15620	16080	16030	16050



<b>La résistance a la compression a 28j</b>		
<b>Série de béton</b>	<b>Rc à 28 jrs</b>	<b>Rc moyenne (MPa)</b>
BR (0 %)	25.4	26.06
	25.8	
	27.0	
BFM (5%)	26.2	24.83
	23.8	
	24.5	
BFM (10%)	23.2	23.67
	22.0	
	25.8	
BFM (15%)	31.0	30.93
	32.3	
	29.5	
BFM (20%)	28.2	28.1
	28.1	
	28.0	

## Annexe B (Mortier)

% des fibres métalliques	Résistances mécaniques à 28 jours	
	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction par flexion (MPa)
<b>0</b>	52.89	8.33
<b>5</b>	49.6	7.77
<b>10</b>	40.11	7.35
<b>15</b>	35.27	7.15
<b>20</b>	28.79	6.25

Les valeurs de gonflement ( $10^{-6}$ mm)							
	1j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	1813	1816	1835	1836	1846	1848	1850
MFM 5%	1827	1832	1844	1845	1860	1870	1872
MFM 10%	1930	1933	1936	1937	1951	1955	1960
MFM 15%	2002	2005	2010	2037	2095	2100	2109
MFM 20%	2053	2058	2060	2106	2131	2150	2154

Les valeurs de M (gr)							
N° de la série	1j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	562	564	566	568	568	570	570
MFM 5%	564	566	568	568	570	572	572
MFM 10%	566	570	572	574	578	578	580
MFM 15%	570	580	584	586	588	588	590
MFM 20%	582	596	600	600	602	602	602

Les valeurs de $\Delta M$ (gr)						
N° de la série	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	2	4	6	6	8	8
MFM 5%	2	4	4	6	8	8
MFM 10%	4	6	8	12	12	14
MFM 15%	10	14	16	18	18	20
MFM 20%	14	18	18	20	20	20

Les valeurs de $\frac{\Delta M}{M} \times 100$ (gr)						
N° de la série	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	0.35	0.70	1.05	1.05	1.40	1.40
MFM 5%	0.35	0.70	0.70	1.05	1.39	1.39
MFM 10%	0.70	1.04	1.39	2.07	2.07	2.41
MFM 15%	1.72	2.39	2.73	3.06	3.06	3.38
MFM 20%	2.34	3	3	3.32	3.32	3.32

Les valeurs de Retrait ( $10^{-6}$ mm)							
	1j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	2921	2988	3043	3056	3076	3084	3090
MFM 5%	2925	3043	3070	3081	3089	3116	3130
MFM 10%	3085	3148	3152	3158	3163	3176	3179
MFM 15%	3100	3216	3239	3255	3259	3259	3268
MFM 20%	3117	3255	3276	3284	3295	3310	3320

Les valeurs de M (gr)							
N° de série	1j	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	590	588	586	584	580	574	574
MFM 5%	586	584	576	576	574	572	572
MFM 10%	570	564	560	558	558	558	558
MFM 15%	564	562	558	556	554	554	554
MFM 20 %	560	556	554	554	552	552	552

Les valeurs de $\Delta M$ (gr)						
N° de série	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	-0,34	-0,68	-1,02	-1,72	-2,07	-2,78
MFM 5%	-0,34	-1,73	-1,73	-2,09	-2,44	-2,44
MFM 10%	-1,06	-1,78	-2,15	-2,15	-2,15	-2,15
MFM 15%	-0,35	-1,07	-1,43	-1,8	-1,8	-1,8
MFM 20%	-0,71	-1,08	-1,08	-1,44	-1,44	-1,44

Les valeurs de $\frac{\Delta M}{M} \times 100$ (gr)						
N° de série	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	2	4	6	10	14	14
MFM 5%	2	10	10	12	14	14
MFM 10%	6	10	12	12	12	12
MFM 15%	2	6	8	10	10	10
MFM 20%	4	6	6	8	8	8

Les valeurs de PH					
N° de la série	MR 0%	MFM 5%	MFM 10%	MFM 15%	MFM 20%
3j	13,96	13,88	13,85	13,87	13,92
7j	13,76	13,56	13,7	13,6	13,7
14j	13,11	13	13,24	13,24	13,23
21j	13,1	13,26	13,22	13	13,19
28j	12,64	12,75	12,73	12,74	12,78
60j	11,41	11,75	11,76	11,83	11,89

Les valeurs de la conductivité (ms/cm)						
	3j	7j	14j	21j	28j	60j
MR 0%	7,93	7,47	7,45	6,89	4,86	4,33
MFM 5%	9,85	10,6	10,87	10,52	6,27	6,15
MFM 10%	8,4	9,3	9,91	9,78	6,79	5,53
MFM 15%	8,08	9,18	9,66	9,57	6,71	5,66
MFM 20%	9,24	10,41	10,5	10,71	7,02	6,28

### Annexe C (TLM)

<b>Les valeurs de la masse des blocs (gr)</b>					
mortier	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	119,86	119,93	120	120,61	120,62
milieu sulfaté	150,46	151,08	151,11	151,14	151,16

<b>Les valeurs de PH</b>					
mortier	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	10,8	11,06	11,1	11,18	11,23
milieu sulfaté	10,6	10,85	11,2	11,28	11,31

<b>Les valeurs de la conductivité</b>					
mortier	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre (us/cm)	250	245	300	339	343
milieu sulfaté (ms/cm)	14,6	14,42	14,3	14,11	14,09

<b>Les valeurs de T °C</b>					
mortier	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	23,4	22,2	22,9	23,1	25
milieu sulfaté	23,2	22,3	22,9	23,1	25

<b>Les valeurs de la masse des blocs (gr)</b>					
béton	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	161,51	161,61	161,62	161,65	161,66
milieu sulfaté	167,43	167,52	167,53	167,53	167,57

<b>Les valeurs de PH</b>					
béton	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	10,73	10,78	10,8	11,14	11,14
milieu sulfaté	10,97	11,24	11,3	11,36	11,36

<b>Les valeurs de la conductivité</b>					
béton	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre (us/cm)	240	250	254	257	358
milieu sulfaté (ms/cm)	14,58	14,38	14,35	14,34	14,3

<b>Les valeurs de T °C</b>					
béton	6H	18H	24H	48H	72H
milieu neutre	22,8	22,8	23	23,4	25,1
milieu sulfaté	22,8	22,3	22,9	23,2	24,8