



République Algérienne Démocratique et Populaire

Université KASDI Merbah - Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

**Master en Génie Civil**

**Option : Constructions civiles et industrielles (C.C.I)**

Présenté par :

**BELHOCINE AIDA**

**NAGOUDI NADJAT**

Thème

# **Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux**

Soutenu Publiquement le: ..../06/2014

devant le jury:

Mr.MOKHTARI. Abdessamed	M.A.A	UKM Ouargla	Président
Mr.DJOUHRI. Mohamed	M.A.A	UKM Ouargla	Examineur
Mr. LOGBI. Abdelaziz	M.A.A	UKM Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2013/2014

# REMERCIEMENTS

*En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser ici*

*Nos remerciements à :*

*Notre créateur (DIEU) pour nous avoir donné de la force à*

*Accomplir ce travail.*

*Notre promoteur LOGBI Abdelaziz, pour l'implication*

*Qu'il a pu avoir tout au long de ce projet, son suivi ses*

*Conseils et ses orientations.*

*Nous remercions Mr.DJOUHRI.M. et Mr.HACHMI et Mr.FOULANI.M*

*pour leurs aides*

*Tous les membres des jurys, pour l'honneur qu'ils nous font*

*En acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur*

*Bienveillante attention*

*Tous les travailleurs de la boratoire d'hydraulique et génie civile, L.T.P.S.*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous*

*Nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et*

*Encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*AIDA et NADJAT*

## Liste des tableaux

<b>Les tableaux</b>		<b>Page</b>
<b>Tableau (I.1)</b>	Composition chimique et minéralogique du clinker	<b>5</b>
<b>Tableau (I.2)</b>	les différents types de ciment courants	<b>6</b>
<b>Tableau (I.3)</b>	caractéristique chimique de ciment courante	<b>9</b>
<b>Tableau (I.4)</b>	caractéristique mécanique des ciments courants	<b>9</b>
<b>Tableau (I.5)</b>	Résistances garanties des ciments courants	<b>10</b>
<b>Tableau (I.6)</b>	Les anhydres et les hydrates de ciment	<b>10</b>
<b>Tableau (I.7)</b>	Classification des ajouts selon leur réactivité.	<b>13</b>
<b>Tableau (I.8)</b>	composition chimiques de la fumée de silice	<b>15</b>
<b>Tableau (I.9)</b>	Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	<b>16</b>
<b>Tableau (I.10)</b>	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	<b>20</b>
<b>Tableau (II.1)</b>	les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable	<b>25</b>
<b>Tableau (II.2)</b>	résultats d'analyse granulométrique du sable de LAGHOUAT.	<b>27</b>
<b>Tableau (II.3)</b>	Caractéristiques physiques du sable de LAGHOUAT	<b>28</b>
<b>Tableau (II.4)</b>	l'analyse chimique du sable utilisé	<b>28</b>
<b>Tableau (II.5)</b>	compositions chimiques et caractéristique physiques de la pouzzolane.	<b>29</b>
<b>Tableau (II.6)</b>	compositions chimiques et caractéristique physiques de laitier de haut fourneau	<b>30</b>
<b>Tableau (II.7)</b>	Composition chimique de filler calcaire	<b>30</b>
<b>Tableau (II.8)</b>	Composition chimique de l'eau de gâchage (robinet) et de la nappe (Cité NASRE-ouargla).	<b>32</b>
<b>Tableau (II.9)</b>	L'analyse chimique du ciment	<b>32</b>
<b>Tableau (II.10)</b>	caractéristique physico-mecanique du ciment (Annexe A).	<b>32</b>

<b>Tableau (II.11)</b>	Classe de consistance selon la durée d'écoulement	<b>35</b>
<b>Tableau (III.1)</b>	la maniabilité des mortiers (temps de vibration en (seconde))	<b>41</b>
<b>Tableau (III. 2)</b>	Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation	<b>42</b>
<b>Tableau (III. 3)</b>	Evolution de la résistance à la traction par flexion du mortier étudié	<b>43</b>
<b>Tableau (III. 4)</b>	Evolution de la résistance à la compression des différents mortiers	<b>48</b>
<b>Tableau (III. 5)</b>	Effet des ajouts minéraux sur l'absorption de mortier à 72 heures	<b>53</b>
<b>Tableau (III. 6)</b>	Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation	<b>54</b>
<b>Tableau (III. 7)</b>	Evolution de la résistance à la traction par flexion à 60 jours.	<b>55</b>
<b>Tableau (III.8)</b>	Evolution de la résistance à la compression.	<b>56</b>

## Liste des figures

Les figures		page
<b>Figure (I.1)</b>	Ciment courant	<b>3</b>
<b>Figure (I.2)</b>	Fabrication du ciment	<b>4</b>
<b>Figure (I.3)</b>	Microphotographie d'un clinker	<b>5</b>
<b>Figure (I.4)</b>	Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire	<b>12</b>
<b>Figure (I.5)</b>	Pouzzolane naturelle	<b>15</b>
<b>Figure(II.1)</b>	Colonne de tamis	<b>22</b>
<b>Figure(II.2)</b>	tamiseur électrique.	<b>22</b>
<b>Figure (II.3)</b>	courbe granulométrique dans différents cas	<b>23</b>
<b>Figure (II.4)</b>	Essai d'équivalent de sable	<b>24</b>
<b>Figure (II.5)</b>	Essai de la détermination de la masse volumique absolue	<b>26</b>
<b>Figure (II.6)</b>	Essai de détermination de la masse volumique apparente	<b>26</b>
<b>Figure (II.7)</b>	la courbe granulométrique du sable de LAGHOUAT	<b>27</b>
<b>Figure (II.8)</b>	Eau de la nappe phréatique de(Citè NASRE-Ouargla)	<b>31</b>
<b>Figure (II.9)</b>	Principe de fonctionnement du maniabilimètre B	<b>34</b>
<b>Figure (II.10)</b>	Maniabilimètre B	<b>34</b>
<b>Figure (II.11)</b>	Appareil de malaxage	<b>35</b>
<b>Figure (II.12)</b>	Moule d'éprouvettes prismatiques (40x40x160)mm	<b>36</b>
<b>Figure (II.13)</b>	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	<b>37</b>
<b>Figure (II.14)</b>	L'essai de résistance à la flexion	<b>37</b>
<b>Figure (II.15)</b>	Dispositif pour l'essai de résistance à la compression	<b>38</b>
<b>Figure (II.16)</b>	Appareil d'OHELGASS (essai de compression).	<b>38</b>
<b>Figure (II.17)</b>	Essai d'absorption d'eau de la nappe phréatique	<b>39</b>

<b>Figure(II.18)</b>	Gonflement et éclatement des éprouvettes	<b>40</b>
<b>Figure (III.1)</b>	Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau.	<b>42</b>
<b>Figure (III.2)</b>	Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de fillers calcaires	<b>43</b>
<b>Figure (III.3)</b>	Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de sable de dune.	<b>44</b>
<b>Figure (III.4)</b>	Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de pouzzolane	<b>45</b>
<b>Figure (III.5)</b>	Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de fumé de silice	<b>46</b>
<b>Figure (III.6)</b>	Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de laitier de hauts fourneaux	<b>47</b>
<b>Figure (III.7)</b>	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire	<b>48</b>
<b>Figure (III.8)</b>	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de sable de dune	<b>49</b>
<b>Figure(III.9)</b>	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de pouzzolane	<b>50</b>
<b>Figure(III.10)</b>	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de fumé de silice	<b>51</b>
<b>Figure(III.11)</b>	Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de laitier de haut fourneau	<b>52</b>
<b>Figure(III.12)</b>	Effet des ajouts minéraux sur l'absorption de mortier à 72 heures	<b>53</b>
<b>Figure(III.13)</b>	la masse volumique d'éprouvette à 60 jours	<b>54</b>
<b>Figure(III.14)</b>	Résistance à la traction par flexion	<b>55</b>
<b>Figure(III.15)</b>	Résistance à la compression	<b>56</b>

# Table des matières

Liste des tableaux.....	I
Liste des figures.....	III
Introduction générale.....	1

## Chapitre I :

### Le ciment et les ajouts minéraux

<b>I.1</b> Introduction .....	3
<b>I.2-</b> Définition du ciment.....	3
<b>I.3-</b> Principe de fabrication des ciments courants.....	4
<b>I.4-</b> Les constituants du ciment.....	4
<b>I.4.1-</b> Le clinker.....	4
<b>I.4.2-</b> Le gypse $\text{CaSO}_4$ .....	5
<b>I.5-</b> Classification des ciments courants.....	5
<b>I.6-</b> Propriété des ciments.....	6
<b>I.6.1-</b> Caractéristiques physiques.....	6
<b>I.6.2-</b> Caractéristiques chimiques.....	9
<b>I.6.3-</b> Caractéristiques mécaniques des ciments courants.....	9
<b>I.7-</b> L'hydratation du ciment.....	10
<b>I.7.1-</b> Introduction.....	10
<b>I.7.2-</b> Hydratation des composants du ciment portland.....	11
<b>I.7. 3-</b> Conclusion.....	11
<b>I.8.1-</b> Introduction.....	12
<b>I.8.2-</b> Rôle de l'ajout cimentaire.....	12
<b>I.8.3-</b> Classification des ajouts minéraux.....	13
<b>I.8.4-</b> Principaux ajouts minéraux inertes.....	14
<b>I.8.5</b> Principaux ajouts minéraux actifs.....	14
<b>I.8.6-</b> L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	17
<b>I.8.7-</b> Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....	17
<b>I.8.8-</b> Effets des ajouts sur les propriétés des bétons.....	18

<b>I.8.9-</b> L'utilisation des ajouts en Algérie.....	<b>19</b>
<b>I.9-</b> Conclusion.....	<b>20</b>

## **Chapitre II :**

### **Méthodes d'essai et matériaux utilisés**

<b>II.1-</b> Introduction.....	<b>21</b>
<b>II.2-</b> Caractéristiques des matériaux.....	<b>21</b>
<b>II.2.1-</b> Le Sable.....	<b>21</b>
<b>II.2.2-</b> Pouzzolane.....	<b>28</b>
<b>II.2.3-</b> Laitier de haut fourneau.....	<b>29</b>
<b>II .2.4-</b> Fillers calcaires.....	<b>29</b>
<b>II .2.5-</b> La fumée de silice.....	<b>30</b>
<b>II .2.6-</b> Sable de dune.....	<b>30</b>
<b>II .2.7-</b> Eau.....	<b>30</b>
<b>II.2.8-</b> ciment.....	<b>32</b>
<b>II.2.9-</b> Formulation de mortier normal.....	<b>32</b>
<b>II.2.10-</b> Essai au maniabilimètre B.....	<b>33</b>
<b>II .3-</b> Essais de résistances mécaniques.....	<b>35</b>
<b>II.3 .1-</b> Résistance à traction par flexion.....	<b>36</b>
<b>II.3 .2-</b> Résistance à la compression.....	<b>37</b>
<b>II.3.3-</b> Essais durabilité.....	<b>38</b>
<b>II.3.4-</b> Effet de la nappe phréatique.....	<b>39</b>
<b>II.4-</b> Conclusion.....	<b>40</b>

## **Chapitre III**

### **Résultats et discussions**

<b>III.1-</b> Introduction.....	<b>41</b>
<b>III.2-</b> Caractérisation des mortiers.....	<b>41</b>
<b>III.2.1-</b> Maniabilités.....	<b>41</b>
<b>III.2.2-</b> La masse volumique de mortier.....	<b>42</b>
<b>III .3-</b> Résultats de l'essai mécaniques.....	<b>43</b>
<b>III.3.1.</b> Résistance à la traction par flexion.....	<b>43</b>

---

<b>III.3.2- Résistance à la compression.....</b>	<b>48</b>
<b>III .3.3- Durabilité.....</b>	<b>52</b>
<b>III.4-Conclusion.....</b>	<b>57</b>



---

# INTRODUCTION GENERALE

---



## Introduction générale

### Contexte générale de l'étude:

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques demandées.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. Dans cette étude, on a utilisé deux sortes d'ajouts ; des ajouts actifs comme le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, et la fumée de silice ; des ajouts inertes comme le calcaire, et le sable de dune.

### Objectif de l'étude :

L'étude entreprise dans ce mémoire vise à atteindre un objectif principal suivant :

Etude des effets de l'incorporation des ajouts minéraux (actifs et inertes) : pouzzolane naturelle, laitier, fumée de silice, fillers calcaires, et sable de dune sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers confectionnés à base de ciment binaire.

### Organisation du mémoire :

Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

Une introduction générale

- **Le premier chapitre :** Est une synthèse consacrée à l'élément principal du mortier qui est le ciment et les ajouts minéraux (filler calcaires, pouzzolane, laitier de haut fourneau, sable de dune et fumée de silice) .les étapes de fabrication, les constituants, l'hydratation du ciment ainsi que la classification des ajouts minéraux, les intérêts d'utilisation des ajouts.
- **Le deuxième chapitre :** Traite l'ensemble des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents mortiers, les résultats des essais servant à leur identification ainsi que les différentes méthodes et techniques utilisées dans cette étude.

- **Le troisième chapitre :** Contient les résultats des essais mécaniques, de la durabilité (l'absorption capillaire et effet de la nappe phréatique),
- **Et enfin une conclusion générale et quelques recommandations et perspectives.**



---

# ***CHAPITRE I***

---

# ***LE CIMENT ET LES AJOUTS MINÉRAUX***

## Chapitre I

### Le ciment et les ajouts minéraux

#### 1<sup>ère</sup> partie: le ciment

##### I.1-Introduction :

L'écossais " Aspdin " prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon.

##### I.2-Définition du ciment :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C° , température de fusion .

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pate liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

Ce durcissement est du à l'hydratation de certain composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.



**Figure (I.1) :** Poudre de ciment courant.

### I.3-Principe de fabrication des ciments courants :

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

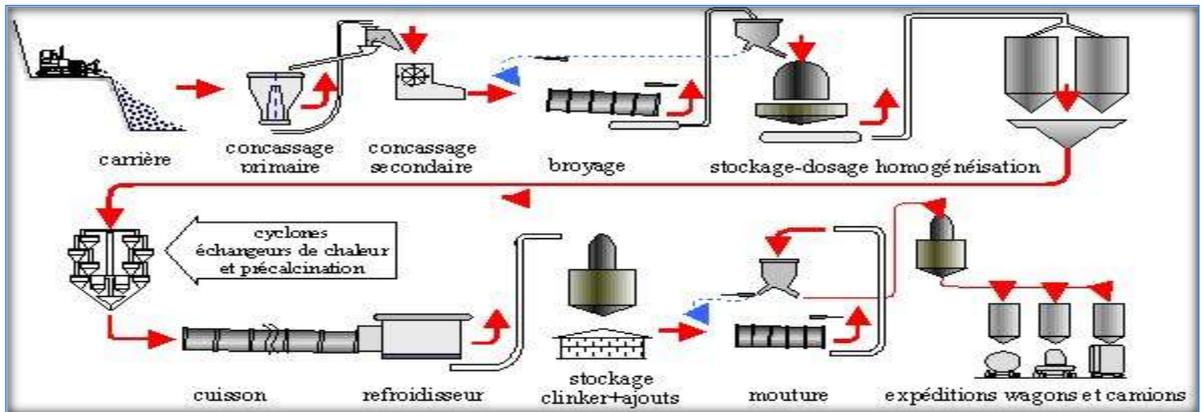


Figure (I.2) : Fabrication du ciment.

### I.4-Les Constituants du ciment:

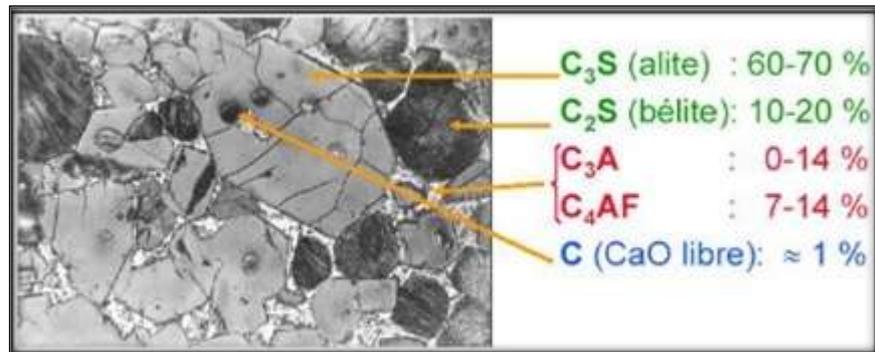
#### I.4.1-Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO<sub>2</sub>) et de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [1]

Les éléments simples (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants (Figure (I.2)).

- Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) : 3CaO.SiO<sub>2</sub> (Alite).
- Silicate bicalcique (C<sub>2</sub>S) : 2CaO.SiO<sub>2</sub> (Belite).
- Aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) : 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Ferroaluminate calcique (C<sub>4</sub>AF): 4CaO .Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite).



**Figure (I.3) :** Microphotographie d'un clinker.

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par Le tableau (I.1) ci –dessous :

**Le Tableau (I.1):** Composition chimique et minéralogique du clinker [2].

Composants	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne(%)
<b>Minéralogiques</b>		
$C_3S$	40-70	60
$C_2S$	00-30	15
$C_3A$	02-15	08
$C_4AF$	00-15	08
<b>Oxydes</b>	-	-
$CaO$	60-69	65
$SiO_2$	18-24	21
$Al_2O_3$	04-08	06
$Fe_2O_3$	01-08	03
$MgO$	< 05	02
$K_2O, Na_2O_3$	< 02	01
$SO_3$	< 03	01

#### I.4.2-Le gypse( $CaSO_4$ ) :

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.

#### I.5 -Classification des ciments courants :

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme

NF EN 197 1. Le tableau (I.2) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils comportent.

**Tableau (I.2):**les différents types de ciment courants [3].

désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l’un de constituants suivant : laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
<b>C P A- CEM I</b>	Ciment portland	95à100%		0 à 5%
<b>C PJ-CEM II/A</b>	Ciment portland Composé	80à 94%	-de 6à20% de l’un quelconque des constituants, sauf dans les cas ou les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% -de 21à35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0à5%
<b>CPJ-CEMII/B</b>		65 à79%		0à5%
<b>CHF-CEM III/A</b>	Ciment de haut-fourneau	35à64%	-35à65% de laitier de haut-fourneau	0à5%
<b>CHF-CEM III/B</b>		20à34%	-66à80% de laitier de haut-fourneau	0 à5%
<b>CLK-CEMIII/C</b>		5à19%	-81 à95% de laitier de haut-fourneau	0à5%
<b>CPZ-CEMIV/A</b>	ciment pouzzolanique	65 à90%	-10à35%de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%. -36à55%comme ci-dessus	0à5%
<b>CPZ-CEMIV/B</b>		45à64%		0à5%
<b>CLC-CEM V/A</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40à64%	-18à30% de laitier de haut-fourneau et 18 à30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. -31 à50%de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0à5%
<b>CLC-CEM V/B</b>		20à39%		0à5%

## I.6- Propriétés des ciments :

### I.6.1- Caractéristique physiques:

#### I.6.1.1-Comportement physico –chimique de la pâte :

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique :  $C_3S$
- Silicate bicalcique :  $C_2S$
- Aluminate tricalcique- :  $C_3A$
- Aluminoferrite tétracalcique:  $C_4AF$

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

### **I.6.1.2-Prise :**

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R.

1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20°C.

### **I.6.1.3-Durcissement :**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ».il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistances [3].

### **I.6.1.4-Chaleur d'hydratation :**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en  $C_3A$  que l'on intérêt à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CPA-CEM I.

### **I.6.1.5-Finesse de mouture :**

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ , certains ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieure à 4500  $\text{cm}^2/\text{g}$  [3].

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'événement du Ciment sont accrus.

### **I.6.1.6-Retrait :**

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% [3].

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32,5R.
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$  pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture ;
- le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;
- la propreté et nature des granulats ;

### **I.6.1.7-Gonflement**

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement.

Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes.

### I.6.2 - Caractéristiques chimiques du ciment :

#### ➤ Ciments courants :

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau (I.3). ci-après, quant à leur composition chimique.

**Tableau (I.3) :** caractéristique chimique de ciment courante [3].

Propriété	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en% de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤5
Oxyde de magnésium	CPA-CEM I	toutes classes	≤5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤5
Sulfates SO <sub>3</sub> limite supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II (A et B)	32,5 32,5 R 42,5	≤3,5
	CPZ – CEM IV et CLC – CEM V CHF-CEM III	42,5 52,5 52,5 R toutes classes	≤4
			≤4
			≤4
Chlorures	tous types de ciment (CHF-CEM III/A et B et les CLK-CEM III/C)	52.5 R toutes les autres classes	≤0,05 ≤0,10

### I.6.3 - caractéristiques mécaniques des ciments courants :

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes:

**Tableau (I.4):** caractéristique mécanique des ciments courants [3].

Classe de ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jour(MPa)	Résistance maximale à 28 jours(MPa)
32,5		≥32,5	≤52,5
32,5R	≥13,5	≥32,5	≤52,5
42,5	≥12,5	≥42,5	≤62,5
42,5R	≥20	≥42,5	≤62,5
52,5	≥20	≥52,5	-
52,5R	≥30	≥52,5	-

Classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage trouvent par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication.

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment par la norme (tableau précédent), la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90 % pour les résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % et qui sont indiquées dans le tableau (1.5) ci-dessous :

**Tableau (I.5) : résistances garanties des ciments courants [3].**

Classe des ciments	Résistances garanties à 2 jours (MPa)	Résistances garanties à 7 jours (MPa)	Résistances garanties à 28 jours (MPa)
32,5		17,5	30
32,5R	12	-	30
42,5	10	-	40
42,5R	18	-	40
52,5	18	-	50
52,5R	28	-	50

## I.7.L'hydratation du ciment :

### I.7.1-Introduction:

L'hydratation du ciment fait intervenir les réactions de ses constituants avec l'eau de gâchage.

Les anhydres du ciment vont réagir avec l'eau du gâchage pour former des hydrates. Ces anhydres se sont principaux minéraux de clinker purs cités auparavant.

Les anhydres et les hydrates cités dans ce paragraphe sont résumés dans le tableau (1.6) ci-dessous :

**Tableau (I.6): Les anhydres et les hydrates de ciment [4].**

Notation Abrégée	Formule Chimique en oxyde	dénomination
C <sub>3</sub> S	(CaO) <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Silicate tricalcique
C <sub>2</sub> S	(CaO) <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	Silicate bicalcique
C <sub>3</sub> A	(CaO) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	(CaO) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminoferrite tétracalcique
CH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandite
C-S-H	(CaO) <sub>x</sub> -SiO <sub>2</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>y</sub>	Silicate de calcium hydraté
C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>3</sub> .H <sub>32</sub>	(CaO) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>32</sub>	Ettringite ou "Aft"
C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>3</sub> .H <sub>12</sub>	(CaO) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub>	Monosulfoaluminate de calcium hydrate ou "Afm"
C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>	(CaO) <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>8</sub>	Aluminate dicalcique hydraté
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	(CaO) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	Aluminate tricalcique hydraté
C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	(CaO) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>13</sub>	Aluminate tétracalcique hydraté

## **I.7.2 -Hydratation des composants du ciment portland :**

### **I.7.2.1- Hydratation des silicates :**

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques ( $C_3S$ ) et les silicates bicalciques ( $C_2S$ ) se dissolvent sous forme d'ions  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  et  $H_2SiO_4^{2-}$ , qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du  $C_2S$ , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [5]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

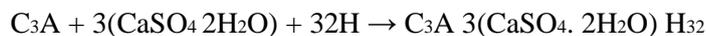


### **I.7.2.2- Hydratation des aluminates :**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [5].

### **I.7.2.3- Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :**

La réaction est donnée par:



### **I.7.2.4- Hydratation de L'aluminoferrite tétracalcique C4AF :**

Le C4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C3A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

## **I.7.3 - Conclusion:**

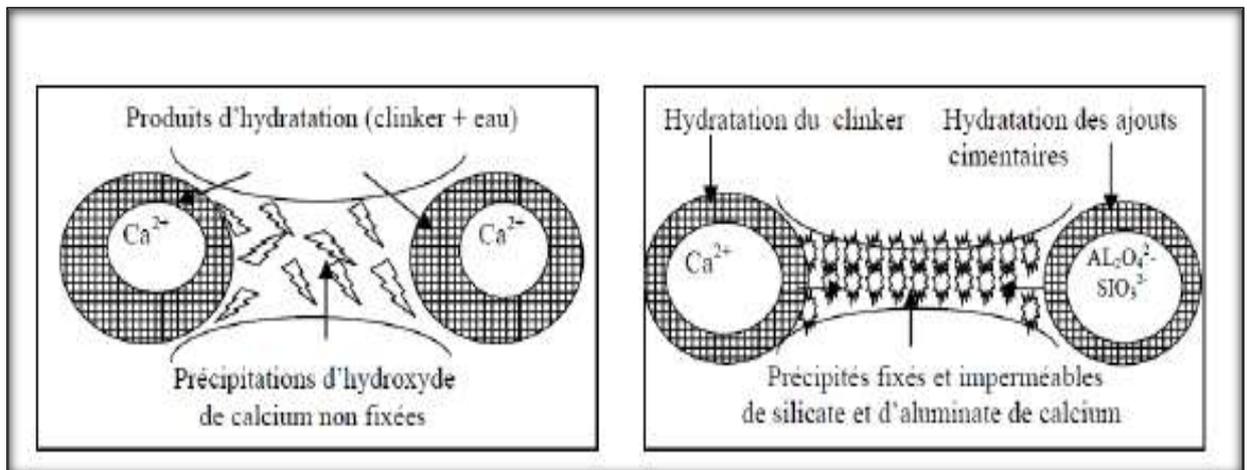
La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

## 2<sup>ème</sup> partie : les ajouts minéraux

### I.8.1-Introduction :

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (**figure I-5**) [5].



(a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire

(b) Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.

**Figure(I.4) :** Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.

### I.8.2-Rôle de l'ajout cimentaire :

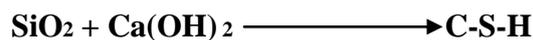
#### I.8.2.1-Rôle de la granulométrie de l'ajout :

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [6].

### I.8.2.2-Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire :

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C3S et C2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [6]. Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



### I.8.3-Classification des ajouts minéraux :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [7]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (I.7) ci-dessous.

**Tableau (I.7) :** Classification des ajouts selon leur réactivité.

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, , terres à diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

### **I.8.4-Principaux ajouts minéraux inertes :**

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland:ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés.

#### **I.8.4.1-Fillers calcaires:**

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

#### **I.8.4.1-Sable de dune :**

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

### **I.8.5- Les ajouts minéraux actifs :**

#### **A) La pouzzolane:**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en

présene d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes[8]. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

➤ **Pouzzolane naturelle:**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



**Figure (I.5):** pouzzolane naturelle

➤ **Pouzzolane artificielle:**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

**B) La fumée de silice :**

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ 1  $\mu\text{m}$ ) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

**Tableau (I.8) :** composition chimiques de la fumée de silice.

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO <sub>2</sub>	93.7	87.3	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2

Na <sub>2</sub> O	0.2	0.2	0.9
K <sub>2</sub> O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2

### C) Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique tableau (I.9), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparés.

**Tableau (I.9) :** Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [9].

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%		0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation.

Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ❖ Broyage poussé.

- ❖ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ❖ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude.

### **I.8.6-L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil:**

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

#### **I.8.6.1-Intérêt du point de vue technique:**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [7].

#### **I.8.6.2- Intérêt du point de vue économique:**

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [7].

#### **I.8.6.3- Intérêt du point de vue environnemental:**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO<sub>2</sub>. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO<sub>2</sub> [7].

### **I.8.7-Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux :**

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.

- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.

### **I.8.8-Effets des ajouts sur les propriétés des bétons :**

#### **I.8.8.1- Amélioration de l'ouvrabilité:**

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules  $> 45 \mu\text{m}$  à un maximum de 34 % [10].

#### **I.8.8.2-Chaleur d'hydratation:**

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

#### **I.8.8.3-Durabilité:**

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH.

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

**I.8.8.4-Développement des résistances:**

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

**I.8.8.5-Développement des bétons à haute résistance :**

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales .Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [11].

**I.8.9- L'utilisation des ajouts en Algérie :**

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf. Le tableau (I.11) (donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes).

**Tableau (I.10) : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [11].**

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

### I.9-Conclusion :

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle [12, 13] riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheur, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue deux catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se base essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuie sur les méthodes physiques et mécaniques.



## *CHAPITRE II*

# METHODES D'ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES

## Chapitre II

### Méthodes d'essais et matériaux utilisés

#### II.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous avons défini l'importance des essais appliqués sur le sable, le ciment, et le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité des mortiers confectionnés à base de ciment portland composé (C.P.J CEMII/B 42,5N).

Des essais physiques, chimiques, et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire L.T.P .S d'Ouargla.
- Laboratoire L.T.P .S de Ghardaïa.
- Laboratoire de département de Génie Civil et d'hydraulique d'Universitaire Kasdi Mer bah Ouargla.

#### II.2- Caractéristiques des matériaux :

La caractérisation des matériaux de construction nécessite connaissance de la nature de ses composants .Par ailleurs ,la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés.

##### II.2.1- Le sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier [14]. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

##### II.2.1.1- Analyse granulométrique:

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

**a-But de l'essai :**

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

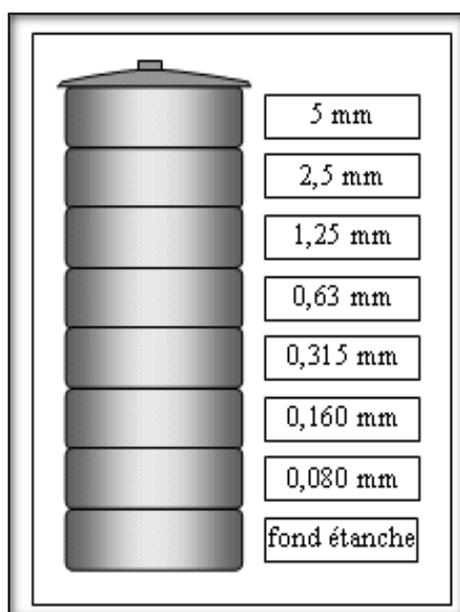
- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

**b-Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

**c- Matériel nécessaire :**

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis. (Figure (II.2)). La dimension nominale de tamis se suit dans une progression géométrique de raison.



**Figure (II.1):**Colonne de tamis.



**Figure (II.2):**tamiseur électrique.

**II.2.1.2- Module de finesse(Mf) :**

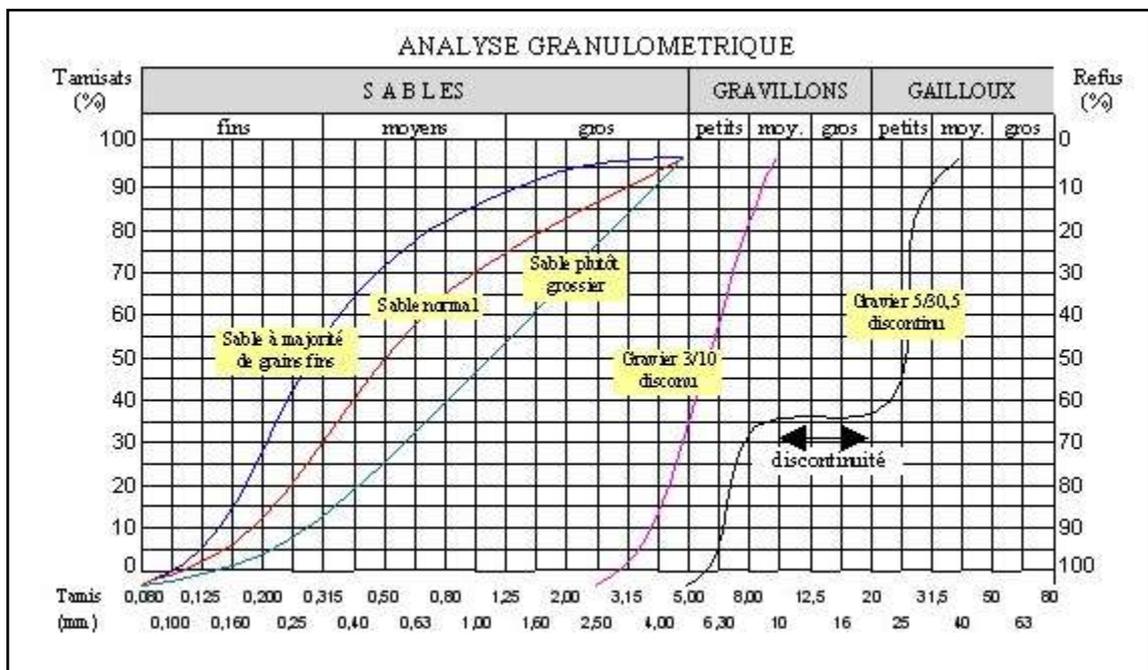
Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse  $M_f$  compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- ❖ **Pour  $1,8 < M_f < 2,2$  :** le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- ❖ **Pour  $2,2 < M_f < 2,8$  :** le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- ❖ **Pour  $2,8 < M_f < 3,2$  :** le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- ❖ **Pour  $M_f > 3,2$  :** le sable est à rejeter.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P 18-540). [15].

$$M_f = \sum R_c / 100 \dots\dots\dots (II.1)$$

$R_c$  : refus cumulé en (%) sous les tamis de module 23 à 38.



**Figure (II.3):** courbe granulométrique des différents cas. [15]

### II.2.1.3-Equivalent de sable (la norme NF P 18 -598) [16]:

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fin qui flocculent.

#### a-But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers .une procédure normalisé permet de détermination un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

#### b-Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier .Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout .Au bout de 20minutes, on mesure les éléments suivants :

- **Hauteur h1** : sable propre +élément fins,
- **Hauteur h2** : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = \frac{h2}{h1} \times 100 \dots \dots \dots (II. 2)$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine **ES<sub>v</sub>** (équivalent de sable visuel) ou **ES<sub>p</sub>**(équivalent de sable au piston) .



**Figure (II.4):**Essai d'équivalent de sable.

**Tableau (II.1):** les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

**II.2.1.4-Masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre  $\rho_s$  avec la masse volumique  $\rho$  qui la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en  $t/m^3$ , en  $kg/dm^3$ , ou en  $g/cm^3$ .

**a-But de l'essai :**

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une compression de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaire malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

**b-Conduite de l'essai :**

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.
- Peser un échantillon sec  $M_s$  de granulats (environ 100g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume  $V_2$ .

La masse volumique est alors :

$$\rho_{absolu} = \frac{m_{mat}}{V_{absolu}} = \frac{m_{mat}}{V_{réel} - V_{pores}} \dots \dots \dots (II.3)$$



**Figure (II.5) :** Essai de la détermination de la masse volumique absolue.

#### II.2.1.5- La masse volumique apparente :

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

$$\rho_{app} = \frac{m_{mat}}{V_{app}} \dots \dots \dots (II.4)$$

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.



**Figure (II.6):** Essai de détermination de la masse volumique apparente.

### II.2.1.6-Résultat des essais sur le sable :

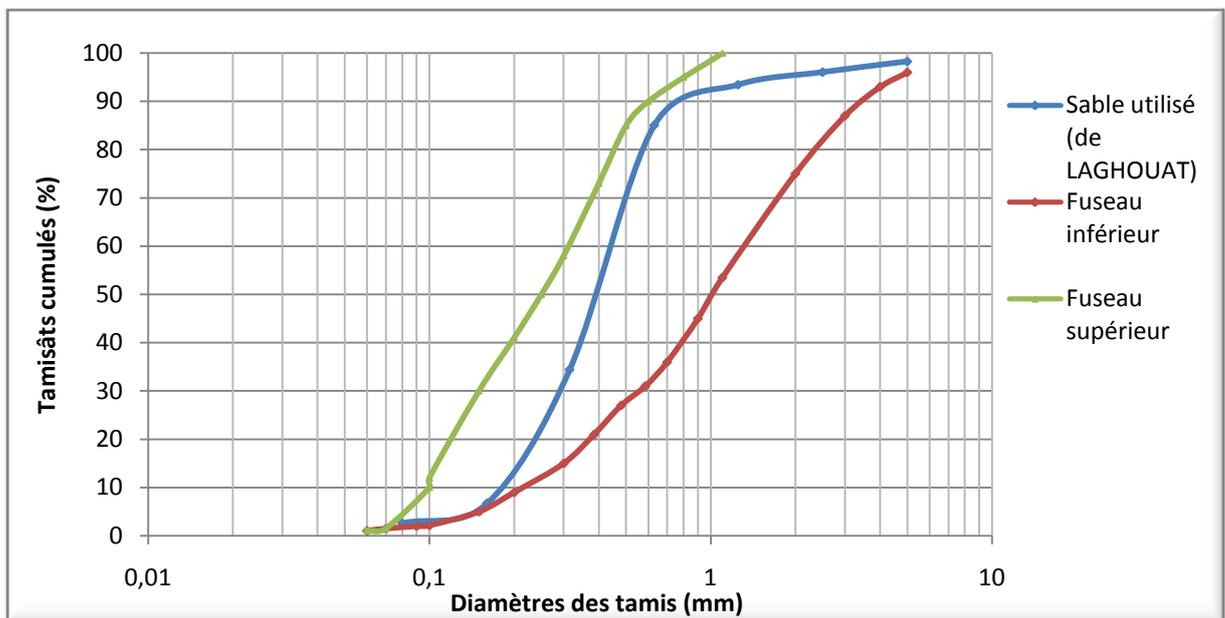
Les tableaux et le courbe suivants représentent les résultats des différents essais sur le sable.

➤ **résultats d'analyse granulométrique du sable de LAGHOUAT.**

On a obtient la masse de sable selon la relation suivante :  $(0,2 D_{max})$

**Tableau (II.2):** résultats d'analyse granulométrique du sable de LAGHOUAT.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
<b>5</b>	17,04	17,04	1,704	98,296
<b>2,5</b>	22,15	39,19	3,919	96,08
<b>1,25</b>	26,19	65,38	6,538	93,46
<b>0,63</b>	83,59	148,97	14,897	85,1
<b>0,315</b>	506,68	655,65	65,565	34,43
<b>0,16</b>	277,45	933,1	93,31	6,69
<b>0,08</b>	40,85	973,68	97,368	2,6



**Figure (II.7):** la courbe granulométrique du sable de LAGHOUAT.

➤ **Caractéristiques physiques du sable de LAGHOUAT.**

**Tableau (II.3):** Caractéristiques physiques du sable de LAGHOUAT.

Caractéristique physique		Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		2.61
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		1.5
Equivalent de Sable	<b>ES à Piston (%)</b>	76.43
Module de finesse		1.86

➤ **l'analyse chimique du sable utilisé :**

**Tableau (II.4):** l'analyse chimique du sable utilisé.

<b>INSOLUBLES NFP15-461</b>	<b>SULFATE BS 1377</b>		<b>CARBONATES NFP 15-461</b>	<b>CHLORURES Méthode de Mohr</b>	
%insolubles	% SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	%CaCO <sub>3</sub>	%Cl <sup>-</sup>	% NaCl
96.28	0.19	1.05	2	0.009	0.014

**II.2.2- Pouzzolane :**

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance de Sétif exactement de Ain El Kebira, en quantité suffisante pour nos besoins. sur notre projets de fin d'étude. Cette pouzzolanes est fournit sous forme des roches concassées. Pour pouvoir la substituer au ciment CPJ, nous avons d'abord procédé à son.

Étuvage à 105 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage.

La surface spécifique de Blaine de pouzzolane(SSB) est effectuée au niveau de laboratoire de la cimenterie de Sétif à deux échantillons de différent temps de broyages :

$$\text{Pouzzolane} \left\{ \begin{array}{l} \text{ECH1 : SSB1} = 5877 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ à } 220 \text{ sec} \\ \text{ECH2 : SSB2} = 4881 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ à } 2\text{min et } 32\text{sec} \end{array} \right.$$

$$\text{SSB (moye)}=5379\text{cm}^2/\text{g}.$$

Les compositions chimiques de pouzzolane naturelle présente dans le tableau (II.5) suivant :

**Tableau (II.5) :** compositions chimiques et caractéristique physiques de la pouzzolane.

compositions chimiques de pouzzolane								
Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	PF
%	43.70	14.90	9.14	14.14	4.52	0.54	-	-

### II.2.3-Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut- être Mieux l'appeler est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, de provenance de Sétif en quantité suffisante pour nos besoins sur notre projet. Cette laitier est fournit sous forme des roches concassées. Pour pouvoir la substituer au ciment CPJ, nous avons d'abord procédé à son Étuvage à 105 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage.

La surface spécifique de Blaine de laitier(SSB) est effectuée au niveau de laboratoire de la cimenterie de Sétif à deux échantillons de différent temps de broyages :

$$Laitier \begin{cases} ECH1 : SSB1 = 4190 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ à } 112\text{sec} \\ ECH2 : SSB2 = 3671 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ à } 86 \text{sec} \end{cases}$$

$$SSB \text{ (moye)} = 3930,5 \text{ cm}^2/\text{g}.$$

Les compositions chimiques laitières de haut fourneau présente dans le Tableau (2.6) suivant :

**Tableau (II.6) :** compositions chimiques et caractéristique physiques de laitier de haut fourneau.

compositions chimiques laitier de haut fourneau								
Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	PF
%	36.60	6.38	6.94	37.75	3.77	-	-	-

### II .2.4-Fillers calcaires :

Les fillers calcaires utilisés dans notre étude proviennent de la carrière de Ghardaïa, où sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimiques effectuées dans le laboratoire de chimie L.T.P.S de Ouargla. L'analyse chimique de fillers calcaires utilisés a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau (II.7) suivant :

**Tableau (II.7) :** Composition chimique de filler calcaire

Composition chimique de filler calcaire						
Elément	CaSO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	PF
%	38	11,54	4.52	2.33	0,28	-

### II .2.5-La fumée de silice :

Les études sur le lien entre la granulométrie d'un béton et sa résistance mécanique ont conduit à proposer l'introduction d'une petite fraction d'éléments de taille plus réduite que celle des particules de ciment afin d'augmenter la résistance. Parmi les matériaux pouvant constituer ces éléments « fins », la fumée de silice qui présente un intérêt particulier car elle réagit chimiquement dans les mortiers et bétons en améliorant certaines propriétés telles que la maniabilité, la perméabilité, l'adhérence, et la résistance mécanique.

### II .2.6-Sable de dune :

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

### II .2.7-Eau :

#### II .2.7.1-Eau de la nappe phréatique (cité NASRE-Ouargla) :

Nous utilisons cette eau pour examiner la résistance du béton aux eaux de la nappe phréatique contenant des différents types de sels tels que les sels minéraux, et connaître la quantité d'eau absorbée par les deux échantillons étudiés (40x40x160) mm et (70x70x280) mm.



**Figure (II.8):**Eau de la nappe phréatique de (cité NASRE-Ouargla).

### II .2.7.2-Eau de gâchage (robinet) :

C'est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mortier.

A travers l'étude que nous faisons, il doit être l'eau que nous utilisons dans le mélange de mortier, pur, propre, exempté de sels et de matières organiques, pour notre cas on utilise eau potable «eau de robinet» fournie au laboratoire L.T.P .S d'Ouargla.

**Tableau (II.8):** Composition chimique de l'eau de gâchage (robinet) et de la nappe (cité NASRE-Ouargla).

Composants	Unité	Valeurs (eau de robinet)	Valeurs (nappe phréatique)
Ph	-	7,5	7.8
K <sup>+</sup>	mg/l	25	170
chlorures (cl <sup>-</sup> )	mg/l	795,2	5786.5
Nacl	mg/l	1310,4	9535.5
sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	mg/l	818,57	5791.33
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	-	00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	97	150
calcium (Ca <sup>+2</sup> )	mg/l	264,53	801.6
magnésium (Mg <sup>+2</sup> )	mg/l	106,92	972
oxyde de carbone	mg/l	-	00
Conductivité	ms/cm	4,560	29,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	13	0

**II.2.8- ciment :**

Le ciment utilisé dans notre projet dit ELMATINE est un ciment portland composé C.P .J CEMII/B 42,5N selon la norme NA442, provenant de la cimenterie Hammam Eddalaa M'sila, la fiche technique du ciment est donnée en annexe A.

**II .2.8.1-Caractéristiques chimiques :**

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau (II.9) suivant : Cette analyse a été réalisée au sein du laboratoire (LTPS- Ouargla)

**Tableau (II.9) :** L'analyse chimique du ciment

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Perte au feu
<b>18,13</b>	4,42	3.03	60,78	1,84	2,34	0,64	0,13	0,10	0,23	8,36

**II .2.8.2- Caractéristiques physiques :**

Le tableau suivant résume certaines Caractéristiques physiques de ciment utilisé :

**Tableau (II.10) :** caractéristique physico-mécanique du ciment.(Annexe A).

Début de prise		150-180 min
Fin de prise		3 h 30 – 4 h 30
Masse spécifique		3,1 g/cm <sup>3</sup>
SSB		3555 cm <sup>2</sup> /g
Chaleur d'hydratation		456,60 (j/g)
Résistance à la compression (MPa)	7j	36,74
	14j	41,07
	28j	45,07

**II.2.9-Formulation de mortier normal (NF –P 15-403) [17] :**

Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable et d'une demi partie d'eau, Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme décrit le sable utilisé pour les essais ainsi que le malaxeur.

Dans notre cas on a utilisé pour le mortier:

- 1500g de sable (03 parties).
- 500g de ciment (une partie).
- 275g d'eau (à peu près une demi-partie).
- E/C = 0.56 (pour une consistance acceptable).

### II.2.10-Essai au maniabilimètre B (NF P 18-452 et 15- 437)[18] :

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilimètre B, il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique à des dimensions connus, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

#### a-But de l'essai :

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, on super plastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale .il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance.

#### b-Principe de l'essai :

Dans ces essais la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

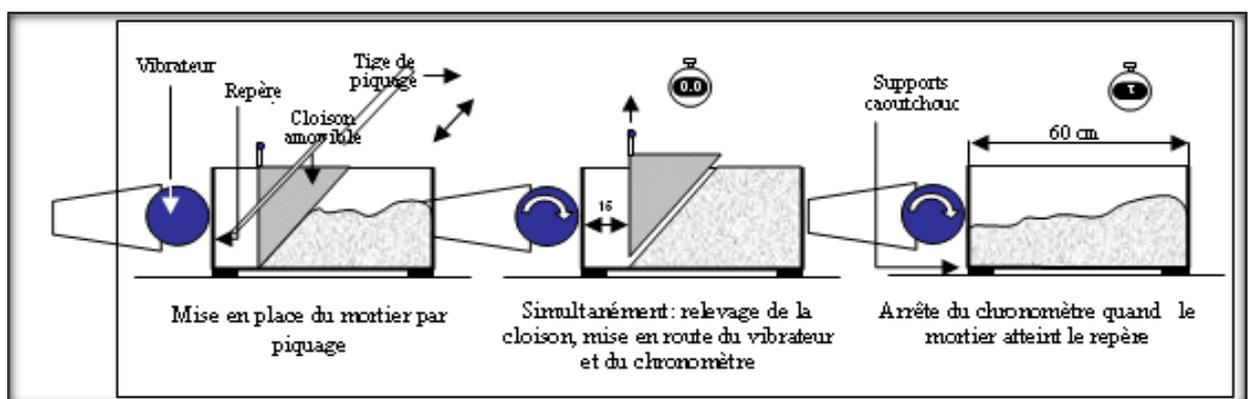


Figure (II.9):Principe de fonctionnement du maniabilimètre B [19].

#### c -Equipement utilisé :

L'appareil utilisé est appelé " maniabilimètre B " et schématisé sur la figure. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60cm×30cm×30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.



**Figure (II.10) :** Maniabilimètre B

Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier.



**Figure (II. 11) :** Appareil de malaxage

Le temps  $t$  mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil. Comme illustré au tableau (II.11).

**Tableau (II.11) :** Classe de consistance selon la durée d'écoulement [20].

Classe de consistance	Durée (s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

➤ **Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont de forme prismatique de section carré (40 x 40 x 160) mm, et (70x70x280) mm. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier. Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs.

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée.



**Figure (II .12) :** Moule d'éprouvettes prismatiques (40x40x160) mm.

➤ **Conservation des éprouvettes :**

Après le démoulage d'échantillons ont laissé pendant 24 heures pour sécher relativement, après sa nous mettons échantillons (40 x 40 x 160) mm, et (70x70x280) mm dans l'eau de la nappe phréatique, pendant 60 jours.

### **II .3-Essais de résistances mécaniques :**

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm.

### II.3 .1-Résistance à la traction par flexion:

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ , jusqu'à rupture.

Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion  $R_f$  (en  $\text{N/mm}^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1,5Pl}{b^3} \dots \dots \dots (II. 5)$$

où :

$R_f$ : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

$b$  : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

$F_f$ : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

$l$  : est la distance entre les appuis, en millimètres.

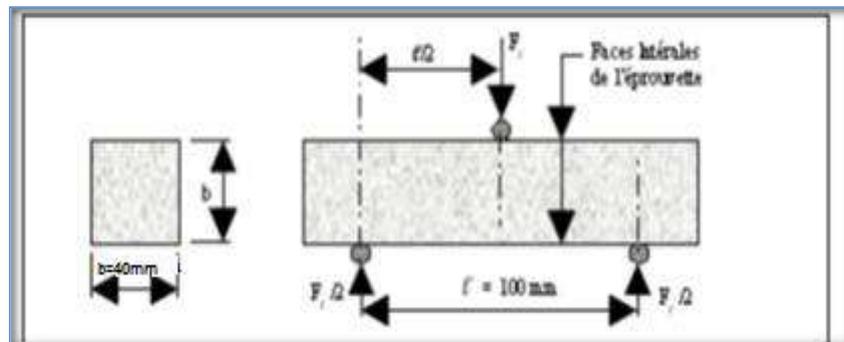


Figure (II. 13) : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.



Figure (II. 14) : L’essai de résistance à la flexion.

**II.3 .2 -Résistance à la compression :**

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ±0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

La résistance en compression  $R_c$  (en  $N/mm^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots \dots \dots (II. 6)$$

$R_c$  : Résistance à la compression en (MPa).

$F_c$ : Charge de rupture en (N).

$b^2$ : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

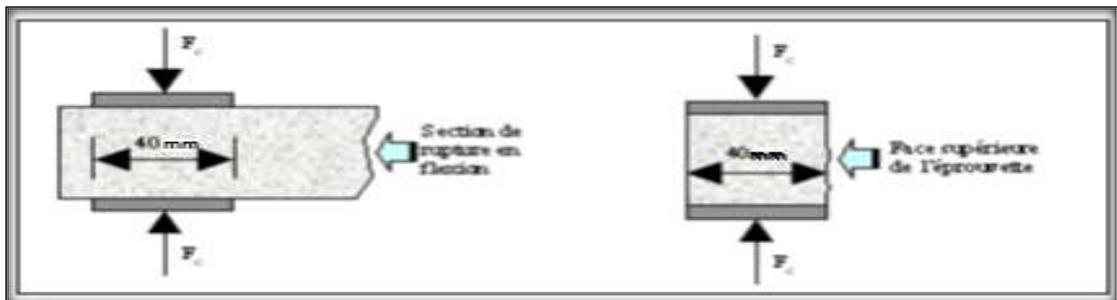


Figure (II.15) : dispositif pour l’essai de résistance à la compression.



**Figure (II.16) :** Appareil d'OHELGASS (Essai de compression).

### II.3.3-Essais de durabilité :

Ces essais sont effectués en deux volées :

#### 1- Mesure de l'absorption capillaire :

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaire des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures de la Sportivité, les éprouvettes seront préalablement conditionnées dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sportivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une demi prisme d'éprouvette cubique 70 x 70 x 280 mm<sup>3</sup> placée dans un bac contenant du sable saturé de l'eau, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur presque de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par la paraffine sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps la formule suivante :

$$Ac = 100 \times P / S \times \sqrt{t} \dots \dots \dots (II.7)$$

Ou :

P : Poids d'eau absorbée en (g).

t : Le temps en heures (t = 72 heures pour notre cas).

S : Surface de la face sciée (49 cm<sup>2</sup>).



**Figure (II. 17):** Essai d'absorption capillaire d'eau

## **2-Effet de la nappe phréatique sur la résistance mécanique**

Pour la caractérisation de la résistance mécanique, des éprouvettes cubiques de mortier  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Les éprouvettes sont immergées dans un bac contenant l'eau de la nappe phréatique pendant 60 jours. Jusqu'au moment de l'essai mécanique c-à-dire traction par flexion et compression.



**Figure(II.18) :** Gonflement et éclatement des éprouvettes.

#### **II.4- Conclusion :**

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.



---

## *CHAPITRE III*

---



# *RÉSULTATS ET DISCUSSIONS*

## Chapitre III

### Résultats et Discussions

#### III.1- Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnées selon les différentes combinaisons d'ajouts (Pouzzolane Naturelle, Laitier de hauts fourneaux, Fillers Calcaires, Fumée de silice et sable de dune).

On a utilisé les abréviations suivantes :

- ✓ Mortier de référence (témoin) → combinaisons : MCPJ.
- ✓ Mortier avec 10% Fillers Calcaires → combinaisons : MFC.
- ✓ Mortier avec 10% Sable de dune → combinaisons : MSD.
- ✓ Mortier avec 15% Pouzzolane naturelle → combinaisons : MPZN.
- ✓ Mortier avec 20% fumée de silice → combinaisons : MFS.
- ✓ Mortier avec 20% Laitier de hauts fourneaux. → combinaisons : MLH.

Les taux d'incorporation des ajouts sont choisis sur la base d'une recherche bibliographique des études précédentes [5, 6, 9, 11, 22].

Ces résultats portent sur les résistances mécaniques (compression et flexion) aux échéances 3 - 7- 28 et 60 jours, et étudie le coefficient l'absorption capillaire (sportivité) à 72heurs ainsi que la durabilité par l'effet de la nappe phréatique sur la résistance mécanique (flexion et compression) a 60 jours.

#### Remarque :

L'âge de 60 jours a été choisi au lieu de 90 jours a cause de délais serré de projet.

#### III.2- Caractérisation des mortiers :

##### III.2.1- Maniabilités :

Les caractéristiques des mortiers frais sont présentées au tableau suivant :

**Tableau III -1** : la maniabilité des mortiers (temps de vibration en (seconde)).

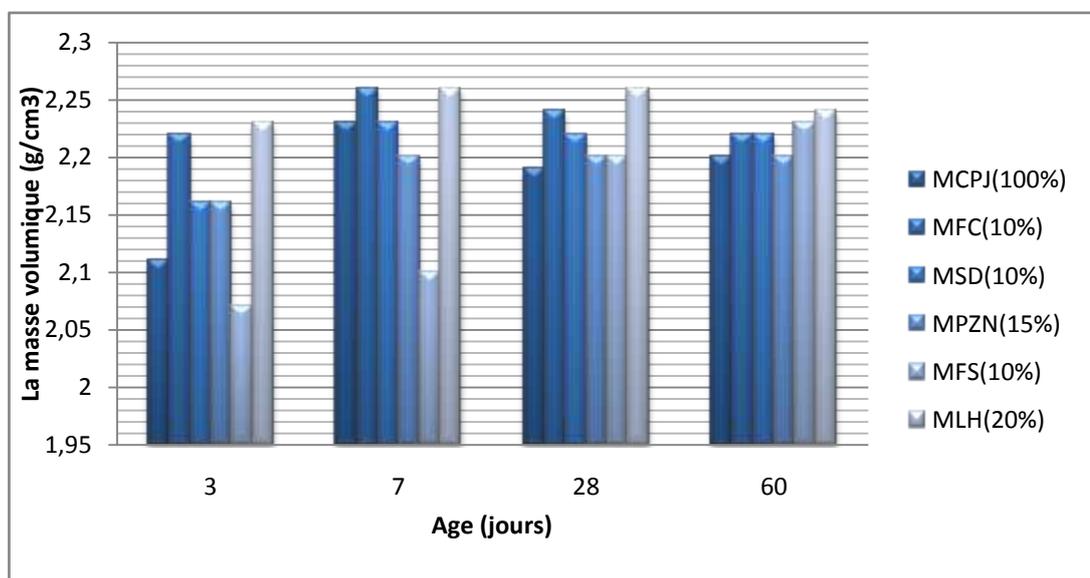
Nomination	E/C	Temps de maniabilité (sec)
MCPJ (100%)	0,56	30
MFC (10%)	0,56	27
MSD (10%)	0,56	28
MPZN (15%)	0,56	28
MFS (20%)	0,56	25
MLH (20%)	0,56	25

D'après les résultats expérimentaux présentés précédemment, l'incorporation des ajouts minéraux affecte la maniabilité des mortiers frais. En effet, tous les ajouts (la pouzzolane naturelle, le sable de dune, le calcaire, la fumée de silice et le laitier de hauts fourneaux) ont diminué le temps de vibration de maniabilimètre c'est-à-dire augmentent la maniabilité du mortier, en rendant le gâchée plus plastique, en remarquant que la fumée de silice et le laitier ont plus d'avantage que les trois autres. Ce qui peut être expliqué par la composition particulière du laitier et de la fumée de silice.

**III.2.2- La masse volumique de mortier:**

**Tableau (III-2):** Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation

	La masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )			
	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
MCPJ (100%)	2,11	2,23	2,19	2,20
MFC (10%)	2,22	2,26	2,24	2,22
MSD (10%)	2,16	2,23	2,22	2,22
MPZN (15%)	2,16	2,2	2,18	2,2
MFS (20%)	2,07	2,10	2,2	2,20
MLH (20%)	2,23	2,26	2,26	2,24



**Figure (III-1):** Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation dans l'eau.

On remarque une augmentation de la masse volumique dans la période de 1 à 7 jours pour toutes les compositions de mortier, et ce peut être expliqué par le besoin des mortiers de

l'eau dans la phase première d'hydratations. Puis, et à partir de cet âge (7jours) on a remarqué une stabilisation de la masse volumique car la cinétique d'hydratation devient plus lent , et le besoin d'eau devient plus faible.

On remarque aussi que pour toutes les compositions, la masse volumique est relativement plus grande que celle du mortier témoin à cause de l'effet physique des ajouts qui rendent la matrice plus dense.

### III .3- Résultats de l'essai mécaniques :

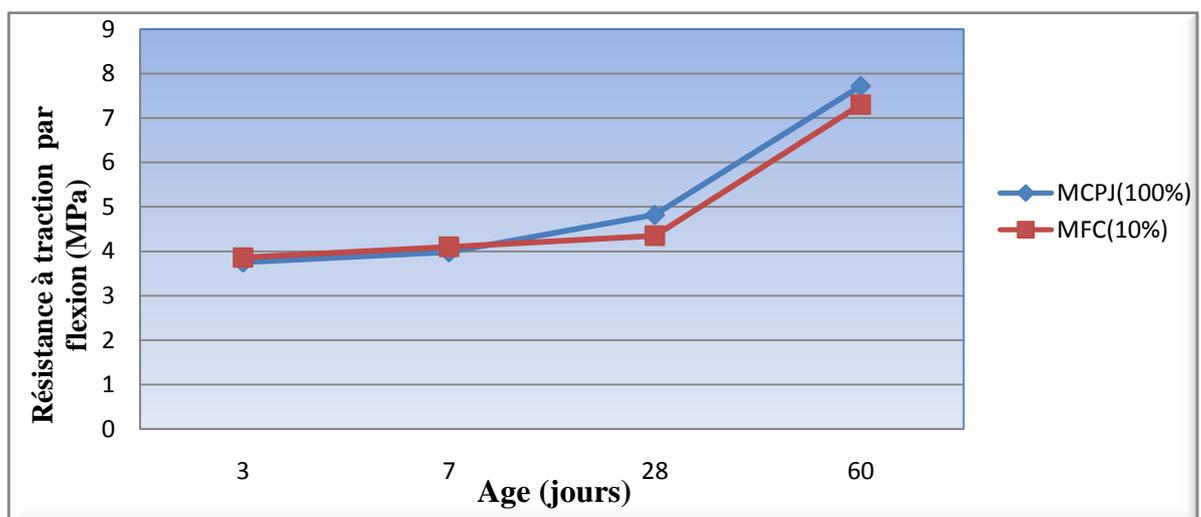
#### III .3.1- Résistance à la traction par flexion:

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion sont résumés dans le tableau (III -3) suivant :

**Tableau (III-3):** Evolution de la résistance à flexion par traction du mortier étudié.

	Résistance à la traction par flexion (MPa)			
	3 Jours	7 Jours	28 Jours	60 Jours
<b>MCPJ(100%)</b>	3,75	3,98	4,82	7,72
<b>MFC (10%)</b>	3,86	4,10	4,35	7,30
<b>MSD (10%)</b>	3,39	4,14	4,57	7,03
<b>MPZN (15%)</b>	3,75	4,33	4,71	7,31
<b>MFS (20%)</b>	3 ,28	3,75	5,62	7,8
<b>MLH (20%)</b>	3 ,39	4 ,01	4,20	7 ,62

➤ **Effet de filler calcaire:**



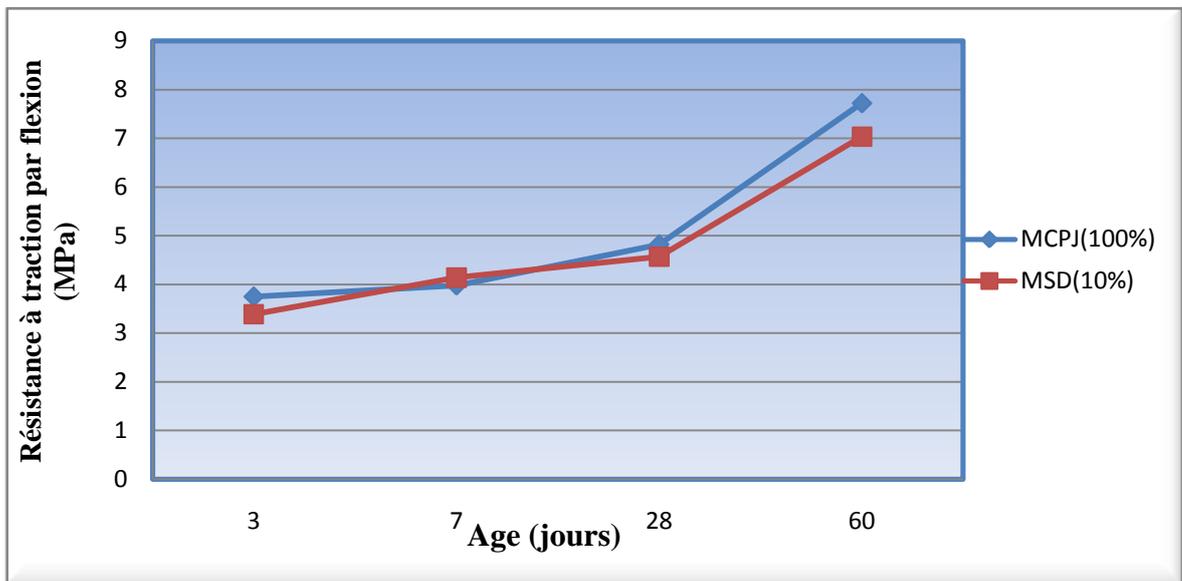
**Figure (III.2):** Evolution de traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de fillers calcaires.

La figure (III.2) présente l'effet des fillers calcaires sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 3 – 7 – 28 et 60j.

On remarque que la résistance du mortier avec filler calcaire augmente proportionnellement par rapport aux différents âges.

Mais cette résistance est supérieure de 3% par rapport à celle de mortier témoin à l'âge 7 jours, par contre cette résistances reste légèrement inférieure avec des taux (10%,5%) par rapport au mortier témoin aux âges 28 et 60 jours successivement.

➤ **Effet de sable de dune:**



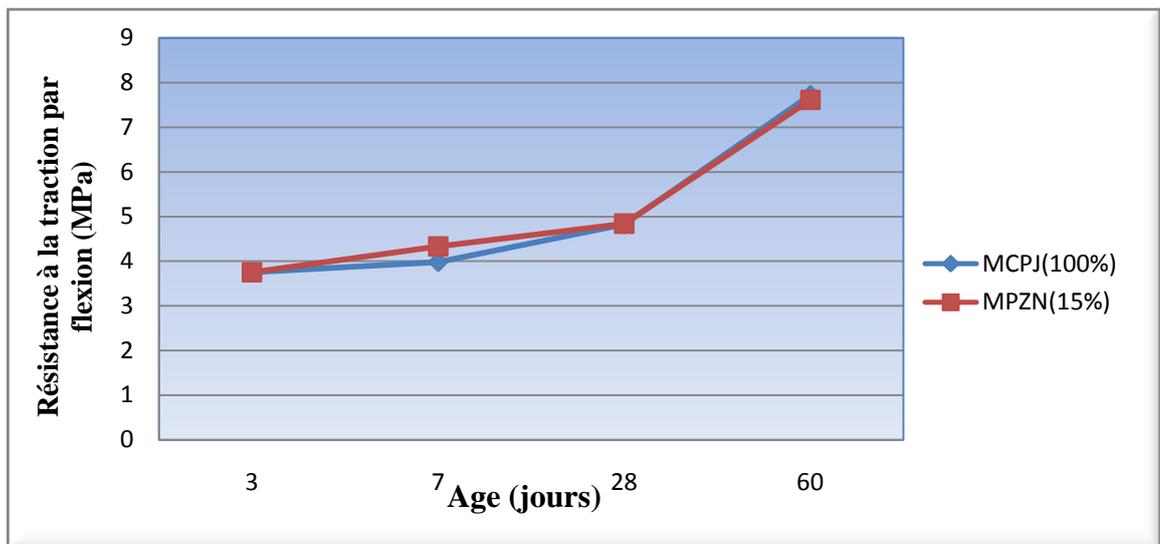
**Figure (III.3):** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de sable de dune.

La figure (III.3) présente l'effet du sable de dune sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 3 – 7 – 28 et 60j.

D'après cette figure ; on observe que cette résistance est inférieure de (10 %) par rapport à celle de mortier témoin à l'âge de 3 jours, puis elle augmente à 7 jours de (4%), puis elle diminue à l'âge 28 et 60 jours de taux (5%, 9%) par rapport au mortier témoin.

Ceci peut être expliqué par l'effet inerte de l'ajout sable (il n'a pas un effet actif), car il influence par son granulométrie physique seulement.

## ➤ Effet de la pouzzolane naturelle:



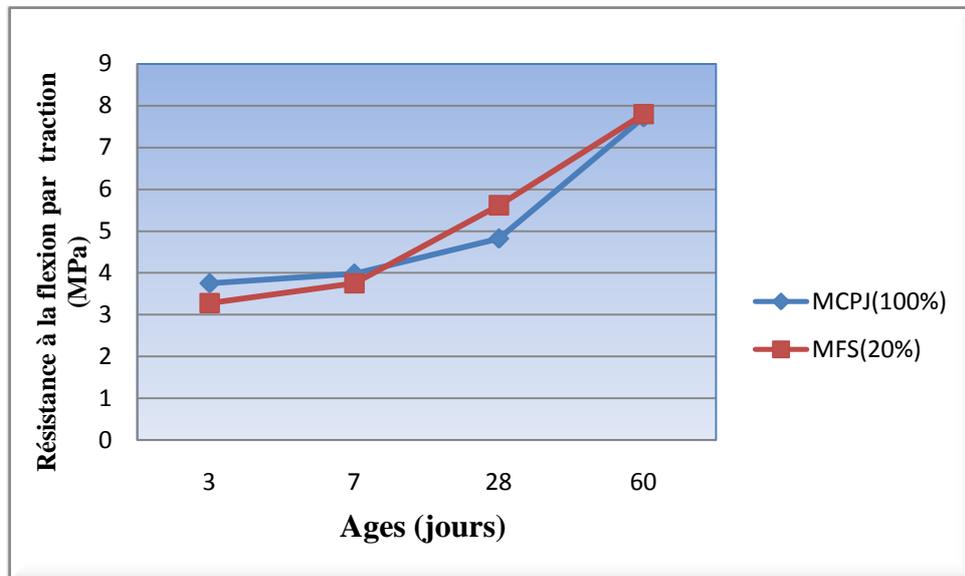
**Figure (III.4):** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de pouzzolane.

La figure (III.4) présente l'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la flexion par traction des mortiers contenant le taux de 15% de pouzzolanes aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

D'après cette figure ; on remarque que ce mortiers développe des résistances qui sont légèrement supérieure à celle du mortier témoin avec un taux d'augmentation de 9%, et cela aux jeunes âges (3 et 7 jours);

Ainsi, on observe que la résistance de ce mortier augmente comparativement à celle de mortier témoin à 28j de taux (0,4%), et à long terme (60 jours) donne la même résistance avec le mortier témoin. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme.

## ➤ L'effet de fumé de silice :



**Figure (III.5):** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de fumé de silice.

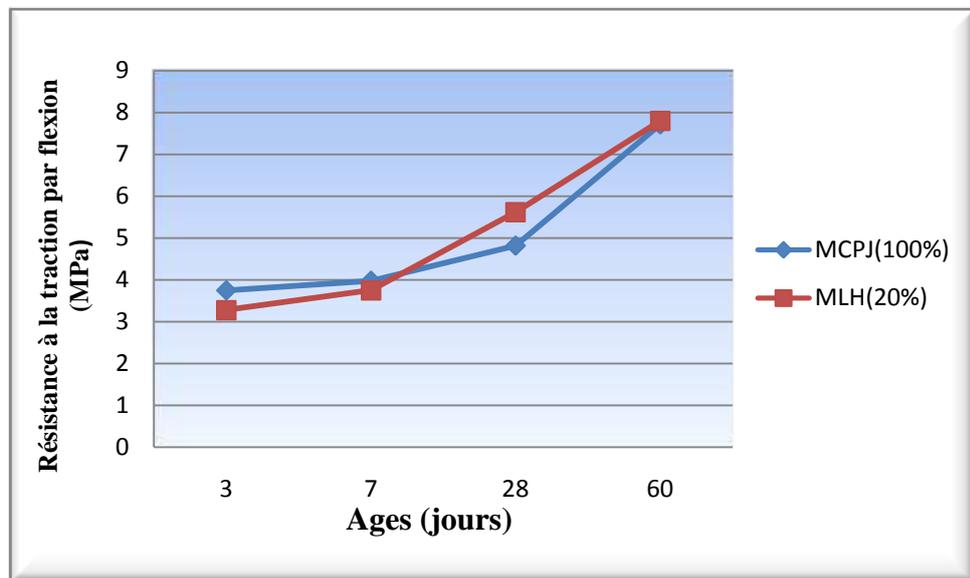
La figure (III.5) présente l'effet de la fumé de silice sur la résistance à la flexion par traction des mortiers contenant le taux de 20% de fumé de silice aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j .

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 3, 7, 28 et 60 jours. Cette résistance est inférieure avec des taux (13%, 6%) par rapport au mortier témoin aux âges de 3 et 7j successivement.

Par contre cette résistance reste légèrement supérieure avec des taux (17%, 1%) par rapport au mortier témoin aux âges de 28 et 60 jours successivement.

L'incorporation de la fumée de silice au ciment CPJ s'avère bénéfique, ce qui témoigne l'effet positif de la fumée de silice sur la cinétique de l'hydratation du ciment.

## ➤ L'effet de laitier de haut fourneau :



**Figure (III .6):** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de laitier de hauts fourneaux.

La figure (III.6) présente l'effet de le laitier sur la résistance à la flexion par traction des mortiers contenant le taux 20% de laitier de hauts fourneaux aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

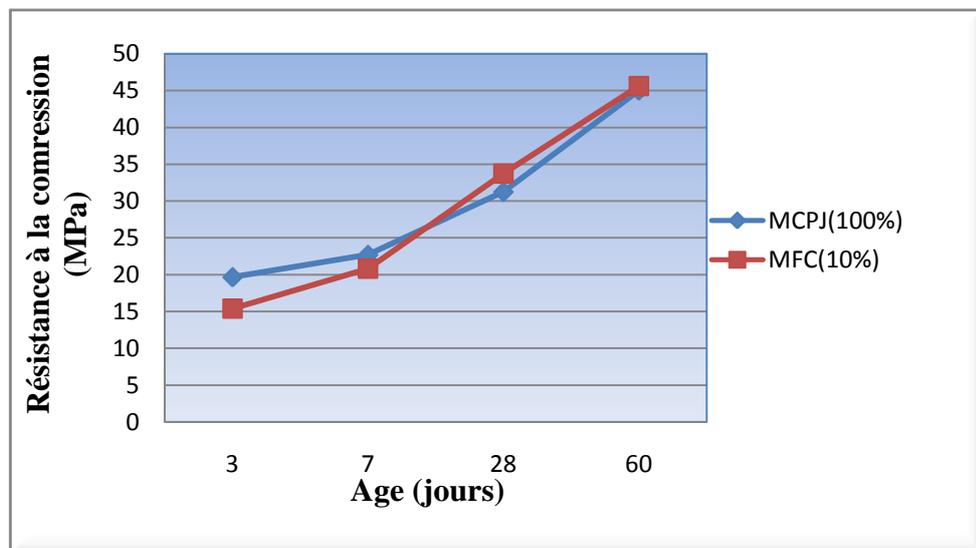
D'après cette figure ; on observe que cette résistances est inférieure de taux de 10% à 3jours, par contre aux âges 7 jour augmentation mineur de la résistance de taux de (3%), puis elle diminue à l'âge 28 jours de taux (14%) par rapport à celle de mortier témoin et à long terme (60 jours) donne la même résistance .Et ceci, peut être expliqué par l'activité longue du laitier de haut fourneaux.

**III .3.2- Résistance à la Compression:**

**Tableau (III-4):** Evolution de la résistance à la compression des différents mortiers.

	Résistance à la Compression (MPa)			
	3 Jours	7 Jours	28 Jours	60 Jours
<b>MCPJ(100%)</b>	19,68	22,7	31,25	45
<b>MFC (10%)</b>	15,41	20,83	33,75	45,62
<b>MSD (10%)</b>	13,64	15,62	26,87	41
<b>MPZN (15%)</b>	11,25	15,83	22,81	40
<b>MFS (20%)</b>	14,5	20,93	35	47
<b>MLH (20%)</b>	7,98	10,35	30	40

➤ **Effet de filler calcaire:**



**Figure (III.7):** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.

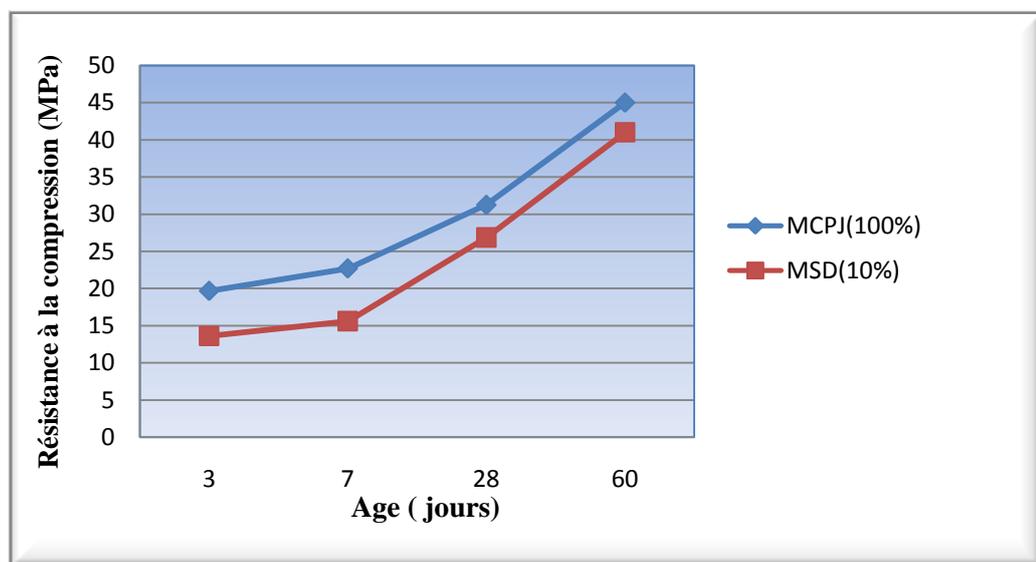
La figure (III.7) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 10% de filler calcaire aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j. D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 3, 7,28 et 60jours. Cette résistance est inférieure avec des taux (21%,8%) par rapport au mortier témoin aux âges de 3 et 7j successivement.

Par contre cette résistance reste légèrement supérieure avec des taux (8%,2%) par rapport au mortier témoin aux âges de 28 et 60 jours successivement.

Ceci peut être expliqué par l'effet physique (granulométrique) de l'ajout calcaire qui s'apparait à des âges avancés.

En effet à court terme c'est le ciment qui se manifeste et influe sur la résistance par son hydratation ; puis à long terme c'est l'ajout qui se manifeste par sa granulométrie.

➤ **Effet de sable de dune :**

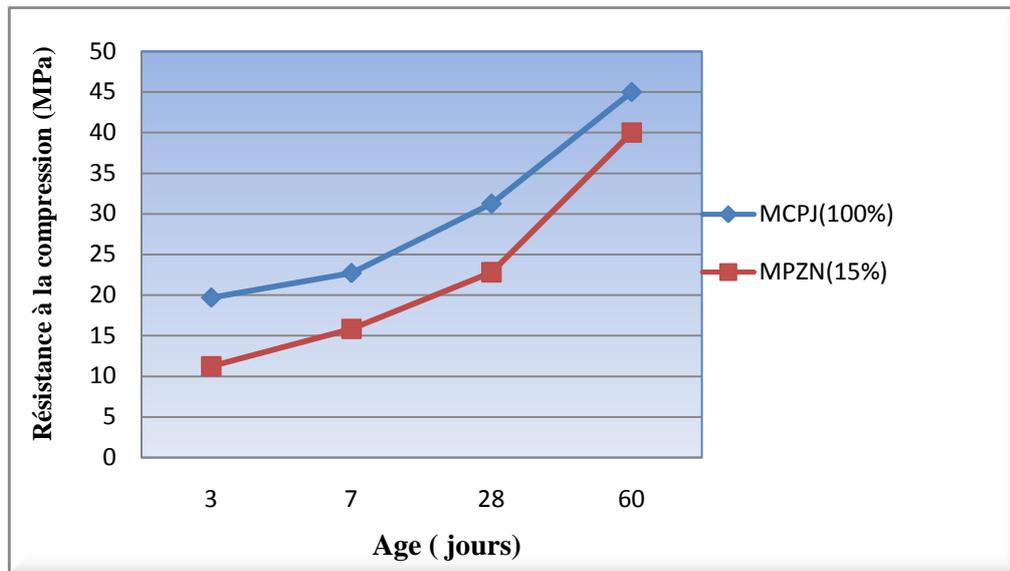


**Figure (III .8):** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de sable de dune.

La figure (III.8) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 10% de sable de dune aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

D'après cette figure ; on remarque que cette résistance est inférieure avec des taux (30%,31%,14%,11%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 3,7,28 et 60 jours successivement. Ceci peut être expliqué par l'effet inerte du sable de dune. En effet à court terme c'est le ciment qui se manifeste et influe sur la résistance par son hydratation ; puis à long terme c'est l'ajout qui se manifeste par sa granulométrie.

## ➤ Effet de la pouzzolane naturelle :



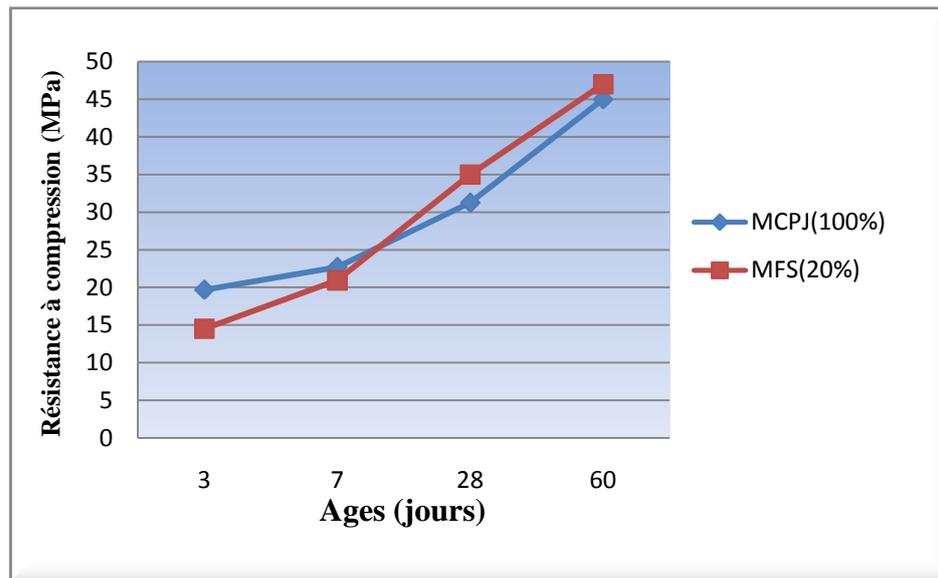
**Figure (III .9):** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de pouzzolane.

La figure (III. 9) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 15% de pouzzolane naturelle aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

On remarque que cette résistance est inférieure avec des taux (42%,30%,27%,11%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 3, 7, 28 ,60 jours successivement.

A 60 jours on remarque que l'écart entre les résistances diminue, par ce que l'effet de la pouzzolane se manifeste à long terme c'est-à-dire pour des âges plus avancés (des mois et des années) l'écart peut être nul (la même résistance).

## ➤ L'effet de fumé de silice :



**Figure (III.10):** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de fumé de silice.

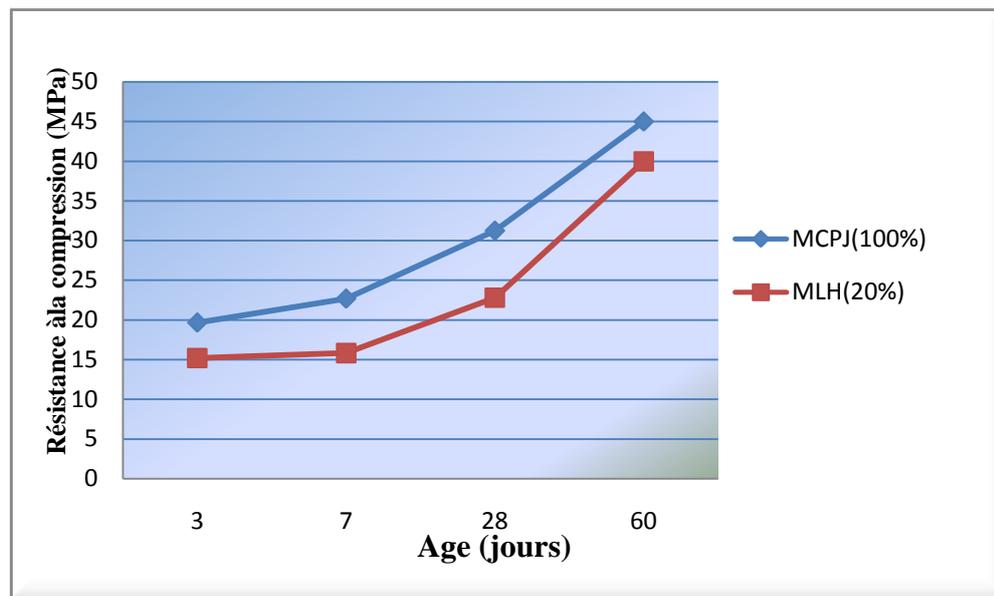
La figure (III.10) présente l'effet de la fumé de silice sur la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 20% de fumé de silice aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 3, 7, 28 et 60 jours. Cette résistance est inférieure avec des taux (26%, 8%) par rapport au mortier témoin aux âges de 3 et 7j successivement.

Par contre cette résistance reste légèrement supérieure avec des taux (12%, 5%) par rapport au mortier témoin aux âges de 28 et 60 jours successivement.

La fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression des mortiers à court et à long terme (28 et 60 jours). Ce gain de résistance est dû à la forte activité pouzzolanique de la fumée de silice qui prend place très rapidement et vient consommer la portlandite produite par l'hydratation du ciment et à sa très grande surface spécifique d'où l'effet filler entre les grains du ciment, ce qui rend la pâte plus homogène et plus compacte.

➤ L'effet du laitier de haut fourneau :



**Figure (III.11):** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de laitier de haut fourneau.

Selon La figure (III.11) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 20% de haut fourneau aux différents âges : 3 – 7 – 28 et à long terme 60j.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmente proportionnellement aux âges. Cette résistances est inférieure avec des taux (22%,30%,27%,11%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 3,7 ,28 ,60j successivement.

A 60 jours, on remarque que l'écart entre les résistances diminue, par ce que l'effet de laitier de haut fourneau se manifeste à long terme c'est-à-dire pour des âges plus avancés (des mois et des années) l'écart peut être nul (la même résistance).

### III .3.3- Durabilité:

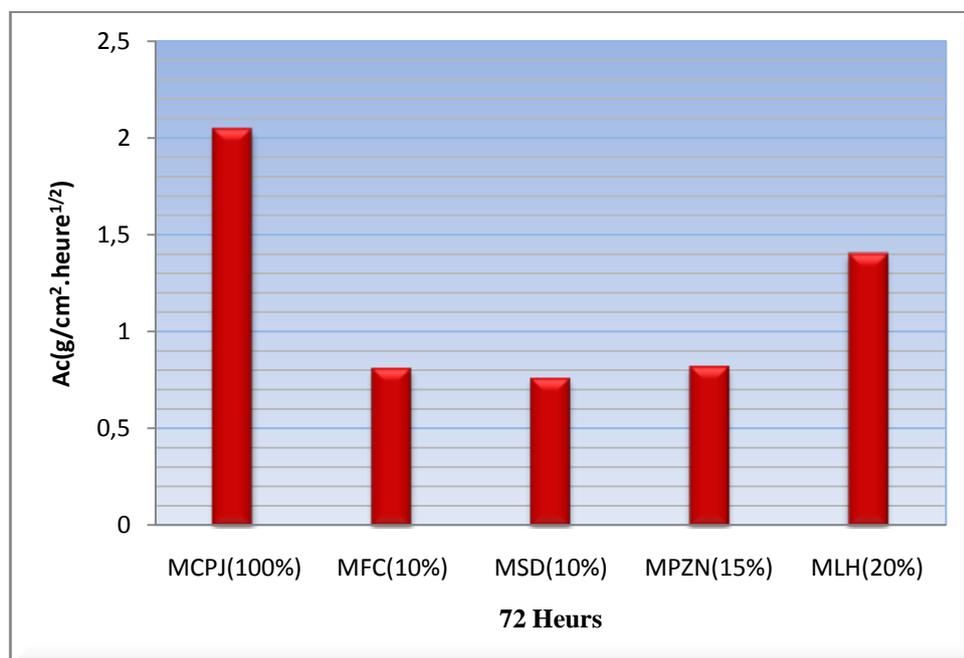
#### III .3.3.1-L'absorption capillaire:

Les éprouvettes sont conservées dans l'eau de la nappe (Cite NASRE-Ouargla) pendant 60 jours, puis elles sont séchées dans l'étuve, puis elles sont sciées et couvertes par une couche imperméable de paraffine, en laissant une face nue (généralement la face sciée).

Le calcul de l'absorption capillaire est expliqué dans le paragraphe (II.3.3).

**Tableau (III .5):** Effet des ajouts minéraux sur l'absorption capillaire de mortier à 72 heures.

Mortier	L'absorption capillaire $A_c$ ( $g/cm^2 \cdot heure^{1/2}$ )
MCPJ (100%)	2,04
MFC (10%)	0,81
MSD (10%)	0,76
MPZN (15%)	0,82
MLH (20%)	1,40



**Figure (III.12) :** Effet des ajouts minéraux sur l'absorption capillaire des différents mortiers (à 72 heures).

La figure (III .12) présente l'effet des ajouts minéraux sur l'absorption capillaire d'eau par rapport au mortier témoin. On remarque : que l'incorporation de 10% calcaire, 15% de pouzzolane et 20% laitier de haut fourneaux respectivement au ciment CPJ sont très avantageuses puis qu'elle permet une diminution importante d'absorption capillaire.

Dans ce cas, les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre ces derniers et les grains de sable sont remplis par ces ajouts, et les pores capillaires sont réduits.

**III .3.3.2-L'effet de l'eau de la nappe phréatique :**

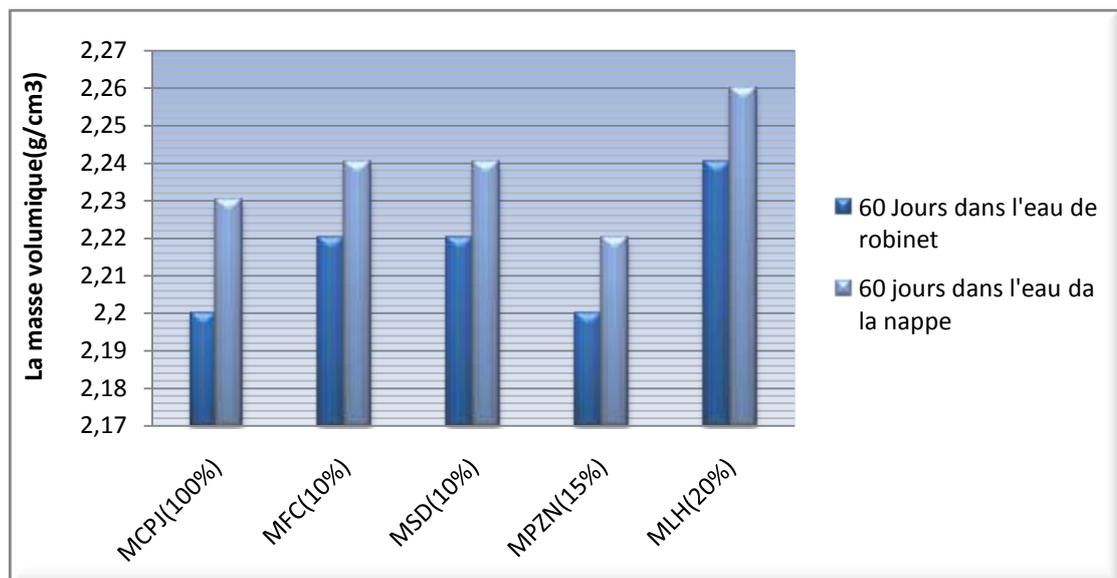
**L'eau de la nappe utilisée c'est celle de la nappe de la cité NASRE (Ouargla)**

➤ **La masse volumique :**

L'évolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation (60 jours dans l'eau de la nappe et l'eau de robinet) sont résumés dans le tableau (III -6) suivant :

**Tableau (III-6):** Evolution de la masse volumique de mortier en fonction de la durée de conservation

Nomination	La masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	
	60 jours dans l'eau de robinet	60 jours dans l'eau de la nappe
MCPJ (100%)	2,20	2,23
MFC (10%)	2,22	2,24
MSD (10%)	2,22	2,24
MPZN (15%)	2,2	2,22
MLH (20%)	2,24	2,26



**Figure (III-13):** la masse volumique d'éprouvette à 60 jours.

D'après la figure ( III.13), et après 60 jours de conservation dans l'eau de la nappe on remarque que: la masse volumique des mortiers (MCPJ(100%),MFC(10%), MSD(10%), MPZN(15%),MLH(20%)) qui sont conservés dans l'eau de la nappe est légèrement supérieure à celle du mortier conservé dans l'eau de robinet; des taux de (0,44%)pour (MFC(10%), MSD(10%), MPZN(15%),) respectivement et 1,3 % pour le laitier de haut fourneau .

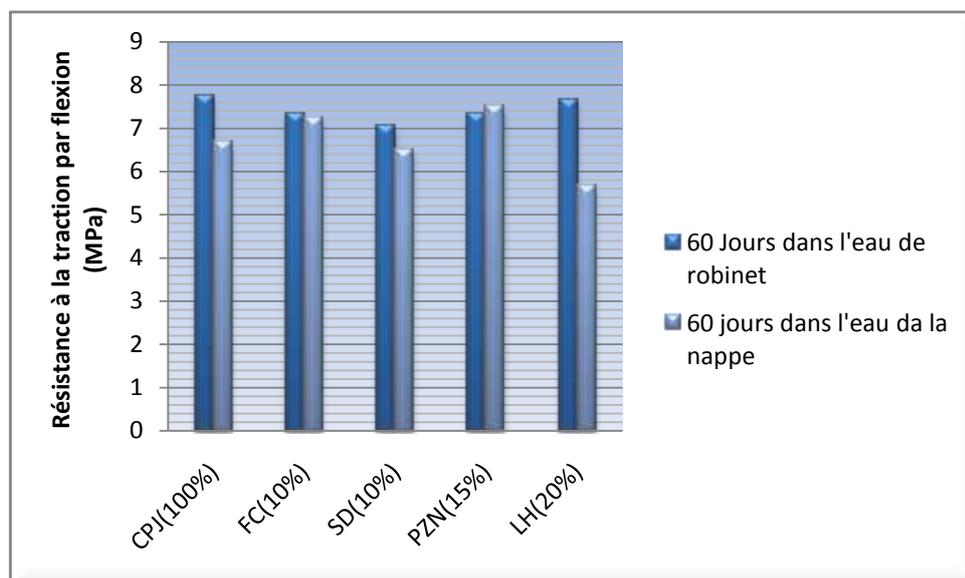
Ce qui peut être expliqué par la nature de l'eau de la nappe qui est fortement conservée des sels tels que (Na cl), ce qui augmente l'absorption d'eau par les éprouvettes.

➤ **La résistance à la traction par flexion:**

Les éprouvettes sont conservées 60 jours dans l'eau de la nappe (cité NASRE-Ouargla) avant l'essai, les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau (III -7) suivant :

**Tableau (III. 7):**Evolution de la résistance à la traction par flexion à 60 jours.

Nomination	La résistance à la traction (MPa)	
	60 jours dans l'eau de robinet	60 jours dans l'eau de la nappe
MCPJ (100%)	7,72	6,65
MFC (10%)	7,30	7,21
MSD (10%)	7,03	6,5
MPZN (15%)	7,31	7,5
MLH (20%)	7,62	5,65



**Figure (III.14) :** Résistance à la traction par flexion.

On remarque une perte de résistance pour toutes les compositions conservées dans l'eau de la nappe par rapport à celles qui sont conservées dans l'eau normale (de robinet) ; ce qui explique l'effet nuisible de la nappe sur les hydrates cimentaire du squelette des différent mortier , cette perte est évaluée par (25% pour Laite de haut fourneau).

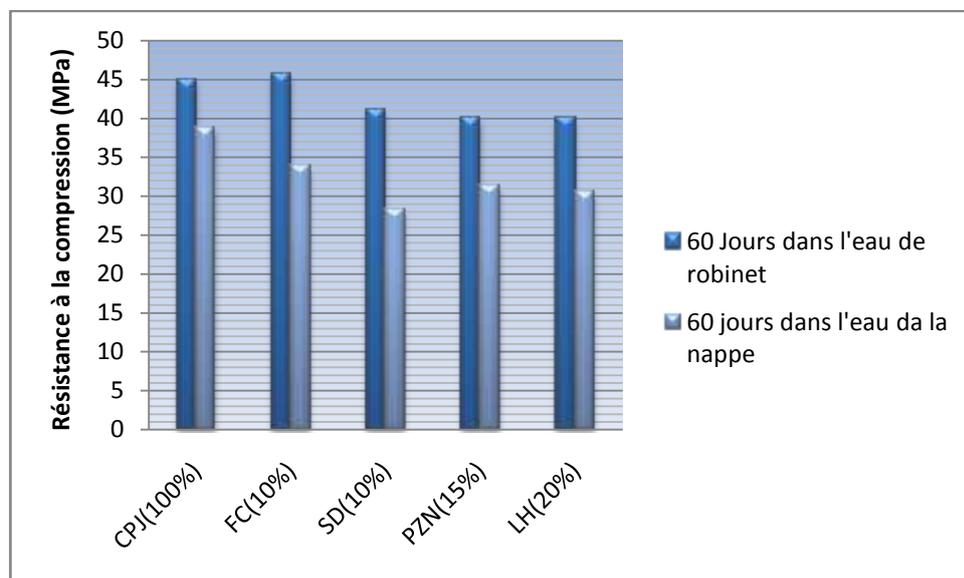
D'autre part on a remarqué que l'ajout ; PZN ; FC ; SD ; ont un effet positif contre la dégradation de résistance.

➤ **La résistance à la compression :**

Les éprouvettes sont conservées 60 jours dans l'eau de la nappe (citè NASRE-Ouargla) avant l'essai, les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau (III -8) suivant :

**Tableau(III.8) :** Evolution de la résistance à la compression.

Nomination	La résistance à la compression (MPa)	
	60 jours dans l'eau de robinet	60 jours dans l'eau de la nappe
MCPJ (100%)	45	38,75
MFC (10%)	45,62	33,75
MSD (10%)	41	28 ,12
MPZN (15%)	40	31,25
MLH (20%)	40	30,62



**Figure (III.15) :** Résistance à la compression.

On remarque une perte de résistance pour toutes les compositions conservées dans l'eau de la nappe par rapport a' celles qui sont conservées dans l'eau normale (de robinet) ; ce qui explique l'effet misible de la nappe sur les hydrates cimentaire du squelette des différents mortiers cette perte est évaluée par : (26%,21%,87%, 31,41%,23%, 13,88%) successivement.

**Remarque :**

Pour les éprouvettes renfermant de la fumé de silice, on a remarqué un gonflement et un éclatement des éprouvettes conservées dans l'eau de la nappe ; c'est-à-dire une destruction presque totale des éprouvettes (figure(II.18)).

**III.4-Conclusion:**

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux inertes (calcaires, sable de dune) et actifs (Pouzzolane – Laitier de haut fourneau, fumé de silice) au ciment CPJ type (ELMATINE), contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques, la masse volumique et la durabilité des mortiers binaires confectionnés selon les différentes combinaisons avec ces ajouts. Ils permettent une amélioration de la résistance mécanique des mortiers qui égale ou très proche de celle du mortier témoin à court et à long terme. De plus ces ajouts réduisent l'absorption capillaire en diminuant la porosité de la pâte de ciment durcie et augmentent la résistivité de ces mortiers.



# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

## Conclusion générale et perspective

Ce travail expérimental est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers par substitution partielle du ciment (C.P.J CEMII/B 42,5N) par l'ajout minérale, nous avons utilisé cinq types d'ajouts avec des différents taux (fillers calcaires 10%, pouzzolane 15%, laitier de haut fourneau 20% sable de dune 10% et fumée de silice 20 %)

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'effet des ajouts minéraux sur la maniabilité des mortiers frais est positif ; on a remarqué une amélioration pour la pouzzolane, fillers calcaires, et sable de dune .et une amélioration très remarquable pour la fumée de silice et le laitier comparativement à celle du mortier témoin.
- Bien que la résistance à **la compression** au jeune âge des mortiers est réduite par l'incorporation de **la pouzzolane naturelle**, elle s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme (60j). Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme.
- L'incorporation de 10% des **fillers calcaires**, 20 % **de fumée de silice** au ciment CPJ, un effet très efficace sur la résistance de **compression** en fonction de temps par rapport à celle du témoin, la résistance est faible aux jeune âges par contre son effet semble positif à long terme.
- L'incorporation de 10% **de sable de dune**, 20% de **laitier** et de 15% **Pouzzolane** au ciment CPJ, semble diminuer la résistance de **compression** en fonction de temps par rapport à celle témoin.
- L'incorporation de 15% de **pouzzolane naturelle** et 20% de **laitier**, 20 % **de fumée de silice** au ciment CPJ, permet aussi au mortier de développer une résistance à **la traction par flexion** proche à celle du mortier témoin aux jeunes âges (3et 7jours), par contre son effet semble positif à long

- Terme, Cela est dû à l'activité pouzzolanique de l'ajout qui est faible au jeune âge (3 et 7 jours) et tend à s'accroître à long terme (60 jours).
- le taux de 10% des **fillers calcaires et de 10% sable de dune** permet au mortier de développer une **résistance à la traction par flexion** proche à celle du mortier témoin, cette dernière s'améliore en fonction du temps.
- Concernant la durabilité ,on a remarqué que l'ajout sable de dune a diminué l'absorption capillaire des mortiers par son effet physique .par contre pour les trois autres ajouts (pouzzolane, fillers calcaires , et laitier) n'ont pas amélioré l'absorption cela est dû à l'effet retardé de ces derniers (l'essai est effectué à 60 jours).

### **Perspectives et recommandations :**

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- Etude des mortiers ternaires (deux ajouts à la fois).
- Substitution des fines argileuses de sable au lieu du ciment par les ajouts.
- Elargir l'étude de la durabilité des mortiers avec ajouts.

**Et comme recommandation** on peut dire que l'utilisation des ajouts minéraux (actifs et inertes) d'origine locale (calcaire (Ghardaïa)) ; laitier d'EL Hadjar ; pouzzolane de Beni saf ; sable de dune de Ouargla présente une alternative économique et écologique dans la fabrication des mortiers et des bétons en Algérie.



# REFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

- [1]. **M. Venuat** – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition 2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [2]. **J. Baron, J.P. ollivier et J.C. Weiss**, « Les bétons, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, Troisième tirage, 1999, P 3-12.
- [3]. **G. Dreux** "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41
- [4]. **A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB** .Les ajouts cimentaires et le développement durable.Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
- [5].**R. CHAID**. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
- [6].**R. CHAID, R. JAUBERTHIE et A. BOUKHALED**. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010
- [7]. **DJOBO YANKWA Jean Noël** , effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymerisés a base scories volcanique.
- [8]. **A. K. Ramezaniapour**, « Engineering properties and morphology of pouzzolanic cementconcrete », PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.
- [9].**P.C. AITCIN**. «les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fontethomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction. Mai 1968.
- [10]. **Bouglada Mohamed Salah**, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier», Mémoire de Magister, Université de M'sila, Année 2007 / 2008.

- [11]. **A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane**( Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran)( Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers).
- [12]. **A.Komar**, « Matériaux et éléments de construction » 3<sup>ème</sup> édition MIR 1976.
- [13]. **CANMET**, 1987, centre canadien de la technologie, des matériaux et de l'énergie «Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton
- [15]. **J. Baron et J.P. Olivier** " les bétons : bases et données pour leur formulations "Edition , Eyrolles- Paris - 1999.
- [16]. **Prof .J.P.Delisle,F.Alou**, «Matériaux de construction1»,Lausanne ,Octobre1978
- [17]. **NF P 18 – 598** « Granulats : Equivalent de sable » AFNOR – Paris – 1997 .
- [18]. **NF P 15 – 403** «Sable normal et mortier normal » AFNOR – Paris – 1996.
- [19]. **NF P18-452 et NF P18-437** «Maniabilité (ouvrabilité) » AFNOR – Paris – 1996.
- [20].**Cours en ligne matériaux de construction** sommaire [http // www.la refer.org /matériaux/sommaire](http://www.la-refer.org/matériaux/sommaire).
- [21]. **Norme française**, «Ciments courants » , NFP 15-301, Juin 1994
- [22]. **HOUASSI YASSER** , «Etude expérimentale d'un mortier avec des ajouts minéraux», mémoire de fin d'étude 2012-2013.UKMO.



---

# ***ANNEXE***

---



## Annexes A

## FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

**MATINE**  
Ciment pour béton exigeant  
CEM II/B 42,5 N NA 442



## Analyses et caractérisation

## Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO <sub>3</sub> (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

## Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C <sub>3</sub> S (%):	58 – 64
Silicates bicalciques C <sub>2</sub> S (%):	12 – 18
Aluminates tricalciques C <sub>3</sub> A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C <sub>4</sub> AF (%):	10,00 – 12,00

## Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en $\mu\text{m/m}$	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

## Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise ( min)	195 - 290

## Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	$\geq 10,0$
28 jours (MPa)	$\geq 42,5$

Algerian Cement Company (SPA)

Hamman: Dallas, Nisla (ACC)  
Tel: +213 35 50 76 20  
Fax: +213 35 50 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger  
Tel.: +213 (0) 21 48 16 65  
Fax.: +213 (0) 21 46 10 71

Ciment Blanc Algérie (SPA)

Usine Oggaz (CBA)  
BP 57, 20250, Mascara  
Tel. / Fax : +213 (0) 40 04 66 60

## Résumé

Les ajouts minéraux font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques et chimiques (durabilité) des matériaux cimentaires (mortier et béton).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie la substitution partielle du ciment par des ajouts minéraux dans le mortier avec les pourcentages suivants : fillers calcaires (10%), pouzzolane (15%), laitier de haut fourneau (20%), sable de dune (10%), et fumée de silice (20 %) et l'effet de cet ajout sur la résistance mécanique et la durabilité de mortier.

**Mots clés :** pouzzolane naturelle, laitier, filler calcaire , fumée de silice, sable de dune ,fumé de silice, mortier, résistance mécanique, durabilité, absorption capillaire, nappe phréatique.

## المخلص

ان استعمال الإضافات المعدنية في صناعة الاسمنت أدى إلى تحسرين كبير للخصائص الميكانيكية للمونة الإسمنتية (الملاط والخرسانة)،وعلاوة على ذلك فان استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية.

تهتم هذه الدراسة التجريبية باستبدال كمية معينة من الإسمنت بإضافات معدنية حسب النسب التالية: 10 % حجر جيرى، 15 % بوزولان، 20% خبث الأفران، 10% رمل الكتبان و 20 % مسحوق السيليس، ومدى تأثيرها على المقاومة الميكانيكية للملاط وديمومته.

### الكلمات المفتاحية:

الحجر الجيري، بوزولان، خبث الأفران، رمل الكتبان ، مسحوق السيليس،الملاط ، المقاومة الميكانيكية ، الديمومة ، تأثير المياه السطحية والنفاذية الشعرية.