



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE «ABBES LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**



Département de Génie Civil

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie civil

Option : Génie civil

Influence des ajouts minéraux sur la résistance mécanique de mortier

*Réalisé par : -ADJALI Leyla
- BELOUAAR Sabrina*

Dirigé par : M. RAFRAFI Salah

*Membres de jury :
M. MESSAS Tidjani *Président*
M. TOUAM Lekhemissi *Examineur*
M. BENADDI Hachemi *Examineur**

Présenté le 01/07/2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère '**cherifa**' qui a été à mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et mon père '**Mahboubi**' qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*A mes grands- mères :''**AIDA** ''*

*A femme de mon père : '**salima**'*

*Ma sœur et son mari et sa jeune fille '**Ghofran**'.*

*A mes sœurs :''**Ahlem** '' ,''**Nour el houda**'' ,''**Amel** '' ,''**Maissa** '' ,''**Sirine**''*

*A mon frère :''**Adel** ''*

*Ma tante '**soumia** 'et son mari et ses filles '**dina Marama**' '**Arwa**' norsine '**sadane**'*

*Ma tante '**Dalila**' et son mari et ses filles'**Nor el houda**''**haifa** '**mlak**'*

*Ma tante '**Moufida**' et son mari et ses filles'**wisale**'**Ritage**'**lamis**' et son fils '**khiredine**'*

*Ma tante '**Makkia**' et son mari et ses enfants '**Rzak**' '**Rahim**' '**Bdro**' Ayobe'et son fils **Hiba**'*

*Et mes tantes '**Fatima**'' ,''**Mlouka**'' et Leurs marries et son enfants.*

*A mon ancl '**Ammar**''*

A tout ma famille.

*A Mon cher binôme :'**Adjali Leila** '*

*A mon amis '**wafa**', et tout mes amis de géné civil promo 2017.*

*A mon encadreur **Refray Salah** et A Tous mes enseignants de génie civil surtout'**khelfaoui Kamal**'*

Lycée Saleh djbaili surtout prof masai khaled

Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra

Laboratoire C.T.C.EST de Khenchela.



Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère 'Nouara' qui a été à mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et mon père' **Lakhdar**' qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.*

A mes sœurs : 'Fatima' 'Mounira' 'Sana' ' Ouiame'

A mes frères : 'Mohemed' 'Ala addin'

A mon ancl 'Lazhar''

A tout ma famille.

A Mon cher binôme : 'Belouaar Sabrina' '

A mon amis 'Amira', et tout mes amis de génie civil promo 2017.

*A mon encadreur **Rafrai Salah** et A Tous mes enseignants de génie civil surtout*

'khelfaoui Kamal' 'Benaddi Hachemi' 'Menassria Abderrahman'

Lycée Saleh djbaili surtout prof 'Massai khaled'

Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra

Laboratoire C.T.C.EST de Khenchela.

***ADJALI** leyla*

Remerciement

Ce travail de recherche a été accompli au laboratoire de C.T.C.ESTde Khenchela, Laboratoire lysée Saleh Djbaili Khenchela et laboratoire de l'université Mohamed khider Biskra.

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière nous remercier notre encadreur : **M.REFRAFISALAH**, c'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour ; pour son soutiens, conseils judicieux et son grandes bienveillances.

Nous tiens tout d'abord à remercier grandement **M. MESSAS Tidjani, M. KHELFAOUI Kamel** pour leur grande disponibilité et leurs précieux conseils.

Nous remercier également **M. BENADDI Hachemi pour** sa grande disponibilité et ses encouragements tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des sciences et de la technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier tous nos enseignants du département de génie civil pour tout ce que nous ont fourni durant notre formation.

Sommaire

	<i>page</i>
<i>Dédicace 1</i>	<i>I</i>
<i>Dédicace 2</i>	<i>II</i>
<i>Remerciement</i>	<i>III</i>
<i>Sommaire</i>	<i>IV</i>
<i>liste des figures</i>	<i>VII</i>
<i>liste des tableaux</i>	<i>X</i>
<i>Résumé</i>	<i>XI</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
 CHAPITRE I : REVU BIBLIOGRAPHIQUE	
<i>1.1.Historique</i>	<i>03</i>
<i>1.2.Les ciments</i>	<i>04</i>
<i>1.2.1. Introduction</i>	<i>04</i>
<i>1.2.2.Définition</i>	<i>04</i>
<i>1.2.3.Les différentes catégories de ciment</i>	<i>05</i>
<i>1.2.3.1.Le CEM I ou ciment Portland</i>	<i>05</i>
<i>1.2.3.2.Ciment portland composites CPJ-CEMII</i>	<i>05</i>
<i>1.2.3.3. Ciment de haut-fourneau CHF et CLK CEM III</i>	<i>07</i>
<i>1.2.3.4. Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV</i>	<i>07</i>
<i>1.2.3.5. Le CEM V A ou B ou ciment composé</i>	<i>08</i>
<i>1.2.3.6.Ciment alumineux fondu CA</i>	<i>08</i>
<i>1.2.3.7.Ciment prompt naturel CNP</i>	<i>08</i>
<i>1.2.3.8.Ciment gris, ciment blanc</i>	<i>09</i>
<i>1.2.4.Principes de fabrication des ciments courants</i>	<i>09</i>
<i>1.2.4.1.Extraction et concassage</i>	<i>09</i>
<i>1.2.4.2.Préparation de cru</i>	<i>09</i>
<i>1.2.4.3.Cuisson</i>	<i>09</i>
<i>1.2.4.4.Broyage</i>	<i>10</i>
<i>1.2.5.Les Constituants du ciment</i>	<i>11</i>
<i>1.2.5.1.Clinker</i>	<i>11</i>
<i>1.2.5.2.Le gypse(CaSO₄)</i>	<i>12</i>
<i>1.2.6.Classification des ciments courants</i>	<i>13</i>
<i>1.2.7.Propriétés des ciments</i>	<i>13</i>
<i>1.2.7.1.Caractéristiques physiques</i>	<i>13</i>
<i>1.2.7.2.Caractéristique chimique</i>	<i>15</i>
<i>1.2.7.3.Caractéristiques mécaniques des ciments courants</i>	<i>15</i>
<i>1.2.8.L'hydratation du ciment</i>	<i>16</i>
<i>1.2.8.1.Hydratation des composants du ciment portland</i>	<i>16</i>
<i>1.2.9.L'activité hydraulique du ciment</i>	<i>17</i>
<i>1.3.Les ajouts minéraux</i>	<i>17</i>
<i>1.3.1. Introduction</i>	<i>17</i>

<i>I.3.2. Classification des ajouts minéraux</i>	<i>18</i>
<i>I.3.2.1. Les ajouts minéraux actif.....</i>	<i>18</i>
<i>I.3.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes.....</i>	<i>23</i>
<i>I.3.3. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....</i>	<i>27</i>
<i>I.3.3.1. Intérêt du point de vue économique.....</i>	<i>27</i>
<i>I.3.3.2. Intérêt du point de vue technique.....</i>	<i>27</i>
<i>I.3.3.3. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....</i>	<i>28</i>
<i>I.3.4. L'utilisation des ajouts en Algérie.....</i>	<i>28</i>
<i>I.4. Les granulats.....</i>	<i>28</i>
<i>I.4.1. Définition.....</i>	<i>29</i>
<i>I.4.2. Les sable.....</i>	<i>29</i>
<i>I.4.2.1. Sable naturels.....</i>	<i>29</i>
<i>I.4.2.2. Sable artificiels.....</i>	<i>30</i>
<i>I.5. L'eau de gâchage.....</i>	<i>30</i>
<i>I.5.1. Le rôle de l'eau</i>	<i>30</i>
<i>I.5.2. La qualité d'eau.....</i>	<i>31</i>
<i>I.5.3. La quantité d'eau.....</i>	<i>31</i>
<i>I.6. Le rapport eau/ ciment.....</i>	<i>31</i>
<i>I.7. Conclusion.....</i>	<i>33</i>
CHAPITRE II : CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	
<i>II.1. Introduction.....</i>	<i>34</i>
<i>II.2. Caractéristiques des matériaux.....</i>	<i>34</i>
<i>II.2.1. Le sable.....</i>	<i>34</i>
<i>II.2.1.1. Équivalent de sable.....</i>	<i>34</i>
<i>II.2.1.2. Résultats d'équivalente de sable.....</i>	<i>37</i>
<i>II.2.2. Analyse granulométrique.....</i>	<i>38</i>
<i>II.2.2.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI</i>	<i>40</i>
<i>II.3. La masse volumique.....</i>	<i>41</i>
<i>II.3.1. Masses volumiques apparentes.....</i>	<i>42</i>
<i>II.3.1.1. Résultat de Sable.....</i>	<i>44</i>
<i>II.3.2. La masse volumique absolue</i>	<i>45</i>
<i>II.3.2.1. Résultat de Sable.....</i>	<i>45</i>
<i>II.4. Ciment.....</i>	<i>46</i>
<i>II.5. Fillers calcaires.....</i>	<i>47</i>
<i>II.5.1. La masse volumique absolue de filler calcaire.....</i>	<i>47</i>
<i>II.6. Pouzzolane.....</i>	<i>49</i>
<i>II.7. Barytine.....</i>	<i>49</i>
<i>II.7.1. La masse volumique apparente de barytine.....</i>	<i>49</i>
<i>II.7.2. La masse volumique absolue de barytine.....</i>	<i>50</i>
<i>II.8. Eau de gâchage.....</i>	<i>51</i>
<i>II.9. Conclusion.....</i>	<i>51</i>

CHAPITRE III : PREPARATIONS DES EPROUVETTES ET ESSAIS

MECANIQUES

<i>III.1.Introduction</i>	52
<i>III.2.Préparations des éprouvettes et déroulements des essais</i>	52
<i>III.3.Formulation de mortier normal (NF –P 15-403)</i>	52
<i>III.4.Propriétés mécaniques du mortier</i>	53
<i>III.4.1.Programme expérimental</i>	53
<i>III.4.2.Compositions des mortiers</i>	53
<i>III.5.Préparation de mortier</i>	54
<i>III.5.1.Matériel utilisée</i>	54
<i>III.5.2.Matériaux utilisées</i>	54
<i>III.5.3.Mode opératoire</i>	55
<i>III.5.3.1.Mesure des matériaux</i>	55
<i>III.5.3.2.Préparations des éprouvettes</i>	57
<i>III.5.3.3.Conservation des éprouvettes</i>	59
<i>III.6.Essais mécaniques sur pâtes et mortiers</i>	60
<i>III.6.1.Essais de traction par flexion</i>	60
<i>III.6.2.Essai de compression simple</i>	61
<i>III.7.Durabilité</i>	63
<i>III.7.1.Introduction</i>	63
<i>III.7.2.Action des eaux agressives</i>	63
<i>III.8.Conclusion</i>	64

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

<i>VI.1.Introduction</i>	65
<i>VI.2.Résultats des essais mécaniques</i>	65
<i>VI.2.1.Résistance à compression</i>	65
<i>VI.2.2.Résistance à la traction par flexion</i>	73
<i>VI.2.3.Résistance à la flexion</i>	81
<i>IV.2.4. la durabilité des mortiers (Action des eaux agressives)</i>	90
<i>VI.3.Conclusion</i>	92
<i>Conclusion générale</i>	93
<i>Bibliographie</i>	
<i>Annexe</i>	

Liste de figure

Chapitre I : REVU BIBLIOGRAPHIQUE	<i>page</i>
<i>Figure. I.1 : Poudre de ciment courant.....</i>	04
<i>Figure. I.2 : Exemple de composition du cru.....</i>	10
<i>Figure. I.3 : Organigramme de fabrication du ciment.....</i>	10
<i>Figure. I.4 : Fabrication du ciment.....</i>	11
<i>Figure. I.5 : Image représente un échantillon de gypse</i>	12
<i>Figure. I.6 : Étude de l'activité hydraulique par calorimétrie des pâtes des ciments élaborés....</i>	17
<i>Figure. I.7 : pouzzolane naturelle avant broyée</i>	19
<i>Figure. I.8 : pouzzolane naturelle après broyée</i>	19
<i>Figure. I.9 : filler avant broyage</i>	25
<i>Figure. I.10 : filler après broyage</i>	25
<i>Figure. I.11 : barytine avant broyage.....</i>	26
<i>Figure. I.12: barytine après broyage.....</i>	26
<i>Figure. I.13 : influence de rapport E/C sur l'évolution de la résistance a la compression au.....</i> <i>jeune âge du béton d'après Byfors</i>	32
 Chapitre II : CARACTERISATIQUES DES MATERIAUX UTILISES	
<i>Figure. II.1 : Matériels utilisées du équivalente de sable.....</i>	35
<i>Figure. II.2 : Schéma d'équivalente de sable visuel et équivalent de sable au piston</i>	36
<i>Figure. II.3 : Équivalente de sable visuel et équivalent de sable au piston</i>	37
<i>Figure. II.4 : Matériels utilisées pour l'analyse granulométrique</i>	38
<i>Figure. II.5 : Tamiseuse électrique</i>	39
<i>Figure. II.6 : Courbe granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI.....</i>	40
<i>Figure. II.7 : Récipient $1dm^3$ + Entonnoir.....</i>	43
<i>Figure. II.8 : Schéma représente planification de Récipient $1dm^3$ + Entonnoir.....</i>	43
<i>Figure. II.9 : La quantité de M_1.....</i>	44
<i>Figure. II.10 : La quantité de M_2.....</i>	44
<i>Figure. II.11 : Schéma représente la masse apparente de sable.....</i>	44
<i>Figure. II.12 : Méthode de l'éprouvette graduée.....</i>	45
<i>Figure. II.13 : Méthode de l'éprouvette graduée de filler</i>	48
<i>Figure. II.14 : Méthode de l'éprouvette graduée de barytine</i>	50
 Chapitre III :	
<i>Figure. III.1: Matériels utilisées de préparation de mortier.....</i>	54
<i>Figure. III.2 : La quantité de l'eau.....</i>	55
<i>Figure. III.3 : La quantité de ciment.....</i>	55
<i>Figure. III.4 : La quantité de sable.....</i>	55
<i>Figure. III.5 : La quantité d'eau dans le malaxeur.....</i>	56
<i>Figure. III.6 : La quantité de ciment dans le malaxeur.....</i>	56
<i>Figure. III.7 : La quantité de sable dans le malaxeur.....</i>	56
<i>Figure. III.8 : Mélange des matériaux dans malaxeurs</i>	57

Figure. III.9 : La première des deux couches de mortier.....	58
Figure. III.10 : Étaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.....	58
Figure. III.11 : La seconde couche de mortier	58
Figure. III.12 : La seconde couche de mortier	59
Figure. III.13 : Les moules pour identifier les éprouvettes	59
Figure. III.14 : Marquer les éprouvettes.....	60
Figure. III.15 : Les éprouvettes dans l'eau.	60
Figure. III.16 : Les appareilles de essais de flexion.....	61
Figure. III.17 : La position de l'éprouvette dans la appareille.....	61
Figure. III.18 : La position de l'éprouvette brisée	61
Figure. III.19 : Appareil d'essai de compression sur éprouvette 4 x 4 x 16cm ³	62
Figure. III.20 : La position de l'éprouvette dans l'appareille.....	63
Figure. III.21 : Le sulfate de sodium(Na ² SO ₄)	64
Figure. III.22 : Les éprouvettes dans milieu agressive	64

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure. IV.1 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de filler calcaire.....	65
Figure. IV.2 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.....	66
Figure. IV.3 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de filler calcaire.....	66
Figure. IV.4 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de filler calcaire.....	67
Figure. IV.5 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de pouzzolane.....	68
Figure. IV.6 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane.....	68
Figure. IV.7 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane.....	69
Figure. IV.8 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane.....	70
Figure. IV.9 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.....	71
Figure. IV.10 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.....	71
Figure. IV.11 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.....	72
Figure. IV.12 : Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.....	73
Figure. IV.13 : Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de filler calcaire.....	73
Figure. IV.14 : Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.....	74
Figure. IV.15 : Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de filler calcaire.....	75
Figure. IV.16 : Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de filler calcaire.....	76
Figure .IV.17: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers	

contenant 10% de pouzzolane naturelle.....	75
Figure .IV.18 : Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane.....	77
Figure .IV.19: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane.....	77
Figure. IV.20 : Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane.....	78
Figure. IV.21: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.....	78
Figure. IV.22 : Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.....	79
Figure IV.23:Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.....	80
Figure .IV.24: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.....	80
Figure .IV.25: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de filler calcaire.....	81
Figure .IV.26: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.....	82
Figure .IV.27: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de filler calcaire.....	82
Figure .IV.28: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de filler calcaire.....	83
Figure .IV.29: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de pouzzolane.....	84
Figure .IV.30: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane.....	84
Figure .IV.31: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane.....	85
Figure .IV.32: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane.....	86
Figure .IV.33: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.....	86
Figure .IV.34: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.....	87
Figure .IV.35: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.....	88
Figure. IV.36: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.....	88
Figure. IV.37 : La variation du coefficient de qualité des mortiers immergés dans la solution Na_2SO_4 en fonction du type de ciment.....	90

Liste des tableaux

	page
CHAPITRE I : REVU BIBLIOGRAPHIQUE	
<i>Tableau. I.1 : Analyse chimique et minéralogique du clinker</i>	12
<i>Tableau. I.2 : les différents types de ciment courants</i>	13
<i>Tableau. I.3 : caractéristique chimique de ciment courante</i>	15
<i>Tableau. I.4 : caractéristique mécanique des ciments courants</i>	16
<i>Tableau. I.5 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.....</i>	21
<i>Tableau. I.6 : composition chimiques de la fumée de silice</i>	22
<i>Tableau. I.7 : caractéristique de la barytine</i>	26
<i>Tableau. I.8 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes</i>	28
CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	
<i>Tableau. II.1 : les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable</i>	36
<i>Tableau. II.2 : Résultats d'analyse granulométrique du sable de AIN ZITOUN EOUM El BOUAGH</i>	36
<i>Tableau. II.3 : Résultats d'analyse granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI</i>	39
<i>Tableau. II.4 : matériels de méthode de masse volumiques</i>	41
<i>Tableau. II.5 : Composition chimique du ciment</i>	45
<i>Tableau. II.6 : Propriétés physiques du ciment</i>	45
<i>Tableau. II.7 : Propriétés physiques du ciment</i>	46
<i>Tableau. II.8 : Résistance mécaniques du ciment (MPa).....</i>	46
<i>Tableau. II.9 : Caractéristiques physiques de Fillers calcaires.....</i>	47
<i>Tableau. II.10 : Caractéristiques chimiques de Fillers calcaires.....</i>	47-48
<i>Tableau. II.11 : Caractéristiques chimiques de Pouzzolane.....</i>	48
<i>Tableau. II.12 : Caractéristiques physiques de Barytine.....</i>	49
Chapitre III :	
<i>Tableau .III.1 : Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques</i>	52
<i>Tableau. III.2 : Méthodologie</i>	56



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

I.1. Contexte général de l'étude :

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancés seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂.

Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine.

L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les Gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de Remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental.

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 (CPA-CEMII/ ES), 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, la pouzzolane, et des ajouts inertes comme le calcaire filler, et la Barytine.

Un autre avantage est qu'il permet au béton de pour suivre sa performance mécanique même après la période de mûrissement normale de 28 jours, c'est pourquoi il est utilisé pour des projets de constructions devant être particulièrement durables, comme les chaussées, les ponts, les tunnels, les viaducs, les barrages et les plates-formes pétrolières.

La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel il va être exposé durant la durée de vie d'un ouvrage. Certains ions, dans un environnement aqueux peuvent être néfastes pour le ciment hydraté et par conséquent pour l'intégrité du matériau béton.

I.2. Objectif de l'étude :

L'étude entreprise dans ce mémoire vise à atteindre les objectifs principaux suivants :

1-Etude des effets de l'incorporation des ajouts minéraux : pouzzolane naturelle, filler Calcaire, barytine, sur les propriétés mécaniques des mortiers confectionnés à base de ciments portland composés (C.P.A CEM I/B 42,5ES) ;


2- Les mortiers contenant les filler et la pouzzolane, immergés dans la solution de Na_2SO_4 .

I.3.Organisation du mémoire :

Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

- Une introduction générale ;
- **Chapitre I :** Est une synthèse consacrée à l'élément principal du mortier qui est le ciment et les ajouts minéraux (filler calcaires, pouzzolane et Barytine) .les étapes de fabrication, les constituants, l'hydratation du ciment ainsi que la classification des ajouts minéraux, les intérêts d'utilisation des ajouts ;
 - **Chapitre II :** 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 ;
 - **Chapitre III :** Formulation et Propriétés mécaniques du mortier, et différentes méthodes Modes opératoires des essais (mortier, Essai de compression, traction, flexion, essai action agressive etc....) ;
 - **Chapitre IV :** Contient les résultats des essais mécaniques.

Et enfin une conclusion générale.



chapitre I
Revue Bibliographique

Chapitre I

Revue Bibliographique

I.1. Historique :

Les Chinois, les Égyptiens, les Mayas construisaient avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau.

Les Romains fabriquaient des liants hydrauliques, comme en témoigne Vitruve dans ses dix livres d'architecture. Ils y ajoutaient de la tuile broyée, ce qui améliore la prise et le durcissement pour préparer leur "opus camentitium". Nombre de constructions remarquables ont été réalisées grâce à ce procédé, dans tout l'Empire Romain : Colisée, Pont du Gard...

Vers le 1^{er} siècle, les romains améliorent leur « liant » en y ajoutant des cendres volcanique de Pouzzoles, ce qui lui permet de prendre sous l'eau.

Le principe est resté longtemps inexplicé et fut un peu oublié jusqu'à ce que, à la fin du XVIII^e siècle, plusieurs ingénieurs le redécouvrent et cherchent à le comprendre expérimentalement. Dans cette quête, parallèlement aux travaux de JOHN SMEATON, c'est Louis Vicat (1786-1861) qui découvre les propriétés des mortiers de ciment. En charge du pont de Souillac sur la Dordogne, il travaille à la mise au point de ce nouveau mortier et parvient à isoler une cendre artificielle composée de calcaire et de silice qui devient ciment. Il expérimente ensuite son emploi dans les piles du pont de Souillac puis, en 1818, élabore la théorie de l'hydraulicité qui précise les proportions des différents composants nécessaires à la constitution du ciment artificiel lors de la cuisson. En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau. Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et en publie les listes dans les Annales des Ponts et Chaussées.

C'est ainsi que se met en place la base d'une production industrielle de ciment artificiel. En 1824, l'Écossais Joseph Aspdin dépose un brevet pour le Ciment Portland qui améliore la qualité de cette « pierre artificielle ». En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe des fours à chaux au Teil, en 1833, et la première usine de ciment est créée par Dupont et Demarle à Boulogne-sur-Mer en 1848. La fabrication de ciment de laitier date de 1890 et la découverte du Ciment Fondu par Jules Bied, de 1908. [1]

I.2. Les ciments :

I.2.1. Introduction :

Le ciment est un liant, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées appelées agrégat ou granulat.

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, des graviers, pour produire du mortier, ou encore du béton.

Un ciment est dit naturel lorsqu'il résulte de la simple cuisson à température modérée (500 °C à 1 200 °C) d'une marne ou d'un calcaire argileux (Ciment prompt, ciment romain, et le premiers ciment Portland sont des ciments naturels) . Il est dit artificiel (Ciment moderne, appelé Ciment Portland) lorsqu'il résulte de la cuisson à plus haute température (1 450 °C) d'un mélange moulu de calcaire, de marne ou d'argile. [2]

I.2.2. Définition :

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 de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. [3]



Figure .I.1 : Poudre de ciment courant [3].

I.2.3. Les différentes catégories de ciment :

I.2.3.1. Le CEM I ou ciment Portland :

Contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée [4].

a. CPA-CEM I 42.5 et 42.5 R : la classe 42.5 signifie une résistance inférieure caractéristique de 42.5 Mpa à 28 jours respectée à 95 %.

- La résistance moyenne mesurée étant voisine de 55 Mpa.

- Le début de prise doit être inférieur à 1 heure.

- Le retrait à 28 jours doit être inférieur à 1000 $\mu\text{m/m}$.

- La classe « PM ES » qui réunit les propriétés des deux classes précédentes, trouve son emploi lorsque l'un ou/et l'autre des risques travaux à la mer et travaux en présence d'eaux à haute teneur en sulfates se présentent sur chantier [23].

b. CPA-CEM I 52.5 et 52.5 R : ils sont constitués d'au moins 95% de clinker.

La classe 52.5 signifie une résistance caractéristique inférieure à 52.5 Mpa à 28 jours respectée à 95 %.

- La résistance moyenne mesurée étant voisine de 65 Mpa.

- Le début de prise doit être supérieur à 1 heure [23].

I.2.3.2. Ciment portland composites CPJ-CEM II :

Contient au moins 65% de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires... Les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs [4].

a. CPJ-CEM II/A et CPJ-CEM II/B 32.5 et 32.5 R : Ils sont constitués de 80 à 94% de clinker pour ceux des classes II/A et de 65 à 79% pour ceux des classes II/B,

- La classe 32.5 signifie une résistance caractéristique inférieure à 32.5 Mpa à 28 jours respectée à 95 %.

- La résistance moyenne mesurée étant voisine de 45 Mpa.

- Le début de prise doit être supérieur à 1h 30.

- Le retrait doit être inférieur à 800 $\mu\text{m/m}$ pour les ciments CPJ-CEM II 32.5.

- Le retrait doit être inférieur à 1000 $\mu\text{m/m}$ pour les ciments CPJ-CEM II 32.5 R.

- Les principales utilisations sont :

❖ Bétons courant, armés ou non armés, et tous travaux de génie civil n'exigeant pas des contraintes particulièrement élevées ;

- ❖ Travaux de maçonnerie, réalisation de dallage, confection d'enduit (dans ce dernier cas, il peut être utilisé soit seul, soit mélangé avec de la chaux pour confectionner des mortiers batards) [23].

b. CPJ-CEM II/A et CPJ-CEM II/B, 42.5 et 42.5 R : leur constitution est identique à celle des ciments CPJ-CEM II de la classe 32.5

- La classe 42.5 signifie une résistance caractéristique inférieure à 42.5 Mpa à 28 jours respectée à 95 % ;
- La résistance moyenne mesurée étant voisine de 55 Mpa ;
- Le début de prise doit être supérieur à 1h ;
- Le retrait à 28 jours doit être inférieur à 1000 $\mu\text{m/m}$.

Les principales utilisations sont :

- ❖ Bétons courants devant présenter des résistances finales élevées
- ❖ Bétons prêts à l'emploi
- ❖ Dallages [23].

c. CPJ-CEM II/A 42.5 suprb blanc : ces ciments fabriqués par certains cimentiers ont les mêmes emplois que les ciments blancs CPA-CEM I.

d. CPJ-CEM II/A 52.5 et 52.5 R : leur constitution est identique à celle des ciments CPJ-CEM II de la classe 32.5.

- La classe 52.5 signifie une résistance caractéristique inférieure à 52.5 Mpa à 28 jours
- La résistance moyenne mesurée étant voisine de 65 Mpa ;
- Le début de prise doit être supérieur à 1h ;

Leurs principales utilisations :

- ❖ Réservées pour des ouvrages soumis à de fortes contraintes
- ❖ Construction d'ouvrage d'art et de génie civil
- ❖ Fabrication d'éléments précontraints par fils adhérents soumis à un traitement thermique [23].

e. CPJ-CEM II/A 52.5 et 52.5 aux fumées de silice D : ces ciments comprennent de 90% à 94% de clinker, le reste étant constitué par la fumée de silice D.

- Leur finesse de mouture est de l'ordre de 500 à 600 m^2/kg

Leurs principales utilisations sont :

- ❖ Les bétons à très hauts résistances ;
- ❖ Les bétons devant présenter une très bonne durabilité notamment vis-à-vis du gel ;
- ❖ La préfabrication de tuyaux ;
- ❖ La réalisation de béton projeté ;

❖ La confection de béton a très faible teneur en eau [23].

I.2.3.3. Ciment de haut-fourneau CHF et CLK CEM III: contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker [4].

a. CHF-CEM III/A 32.5, 42.5 et 52.5 : ils sont constitués d'au moins 36 à 65% de laitier (S) le reste étant composé de clinker, ils peuvent en outre comporter jusqu'à 5% de constituants secondaires.

Les principaux domaines d'utilisation de ces ciments pour lesquels on doit tenir compte des contraintes appliquées pour le choix les classes 32.5-42.5 et 52.5 sont

- ❖ Les bétonnages en milieu humide ;
- ❖ La construction d'ouvrages souterrains tels que tunnels, galeries ;
- ❖ La construction d'ouvrages massifs ;
- ❖ Les travaux de fondations profondes tels que pieux forés, parois moulées, voiles [23].

b. CHF-CEM III/B 32.5 : ils sont constitués d'au moins 66 a 80 % de laitier (S), le reste étant composé de clinker ; ils peuvent en outre comporter jusqu'à 5% de constituants secondaires.

- La résistance réelle étant voisine de 45 Mpa.

Les principaux emplois :

- ❖ Construction d'ouvrage massifs compte tenu de leur faible chaleur d'hydratation (barrages, piles de pont, radiers, murs de soutènement) ;
- ❖ Construction d'ouvrages en présence d'eaux a haut teneur en sulfates, dont le pourcentage de SO₄ peut être au maximum de 1500 mg/l sans autres précautions particulières [23].

c. CLK-CEM III/C 32.5 : Ils sont constitués d'au moins 81 % de laitier, le reste étant du clinker ; ils peuvent en outre comporter jusqu'à 5% de constituants secondaires.

- Le début de prise doit être supérieur à 1h 30.

- La teneur en SO₃ doit être inférieure à 4.5%

Ce type de ciment est utilisé dans les cas suivants :

- ❖ Travaux de béton armé en milieu humide ;
- ❖ Construction d'égouts ;
- ❖ Ouvrages en contact avec eaux industrielles ou des eaux pures [23];
- ❖ En travaux routiers pour le traitement des sols, traitement des graves, injection de sol.

I.2.3.4. Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV : Avant l'introduction de la NF EN 197-1 [37], il était connu sous l'appellation CPZ. Ce type de ciment n'est pas fabriqué en France [4].

a. CPZ-CEM IV/A et CPZ-CEM IV/B 42.5 : Ces ciments sont constitués de clinker dans les proportions de 65 à 90 % pour la catégorie A ou de 45 à 64 % pour la catégorie B et d'un constituant à propriété pozzolanique pour le complément [23].

b. CPZ-CEM IV/A et CPZ-CEM IV/B 22.5 UT : Ces ciments sont destinés à être utilisés en zone tropicale pour des ouvrages ne nécessitant pas de caractéristiques mécaniques élevées.

I.2.3.5. Le CEM V A ou B ou ciment composé : (anciennement ciment au laitier et aux cendres CLC) contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau [4].

Les principales utilisations :

- ❖ Possibilité de construction d'éléments en béton précontraint par post-tension. En tant-compte de leurs caractéristiques mécaniques ;
- ❖ Bétonnage en grande masse, ouvrages massifs ;
- ❖ Travaux de fondations ;
- ❖ Béton à la mer [23].

I.2.3.6. Ciment alumineux fondu CA :

Il résulte de la mouture après cuisson jusqu'à fusion d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxyde de fer et de silice.

Les principales utilisations :

- ❖ Construction d'ouvrages soumise à des températures élevées ;
- ❖ Construction d'ouvrages en contact avec certains milieux agressif ;
- ❖ Construction par temps froid en raison de la très forte réaction exothermique développée lors de la prise [23].

I.2.3.7. Ciment prompt naturel CNP :

Il résulte de la cuisson d'un calcaire argileux de composition régulière broyé très fin.

Les résistances évoluent progressivement dans le temps pour atteindre des valeurs de l'ordre de

- 20 Mpa à 28 jours
- 38 Mpa à 6 mois
- 42 Mpa à 1 an

- ❖ Les principales utilisations sont :
- ❖ Réalisation de scellements, de réparations ou de réfection d'arêtes ;
- ❖ Jointoiement de tuyaux ;
- ❖ Étanchéité des parois poreuses (bassins ; caves ...) ;
- ❖ Pour la réalisation de moulages rapides et mobilier urbain ;

- ❖ Dans certains bétons projetés pratiquement exclusivement suivant la technique de la voie sèche [23].

I.2.3.8. Ciment gris, ciment blanc :

a. les applications du ciment gris :

Le ciment gris est largement employé dans la fabrication de bétons classiques pour les bâtiments, les routes, les mortiers et les enduits. Des gammes de ciments spécifiques sont également développées pour des applications comme les ouvrages béton en milieu humide, en milieu marin, ou pour des bétons à prise très rapide ou pouvant résister à de fortes températures ou à des incendies. [5]

b. Obtient du ciment blanc :

La couleur, naturellement grise, du ciment provient de l'oxyde de fer, qui donne à l'argile sa couleur caractéristique. Pour obtenir un clinker blanc, le processus de fabrication est particulier. Les matières premières (calcaire et argile) sont triées pour ne retenir que celles qui sont exemptes de composants ferreux. On ajoute du kaolin, une argile blanche, avant de chauffer ce cru à haute température (1500 °). Lors de la phase de refroidissement, un refroidisseur rotatif évite l'oxydation du clinker au contact de l'air et permet d'obtenir une poudre immaculée. [5]

I.2.4. Principe de fabrication des ciments courants :

I.2.4.1. Extraction et concassage :

Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement prêt de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie. Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm.

I.2.4.2. Préparation de cru :

Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique. Le produit obtenu est appelé « le CRU».

I.2.4.3. Cuisson :

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la

sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

I.2.4.4. Broyage :

Le Clinker Portland est additionné de gypse et éventuellement d'ajouts cimentaires (Laitier, pouzzolane, calcaire,...) et est broyé en poudre fine d'une granulométrie inférieure à 80 µm, C'est le ciment Portland. [6]

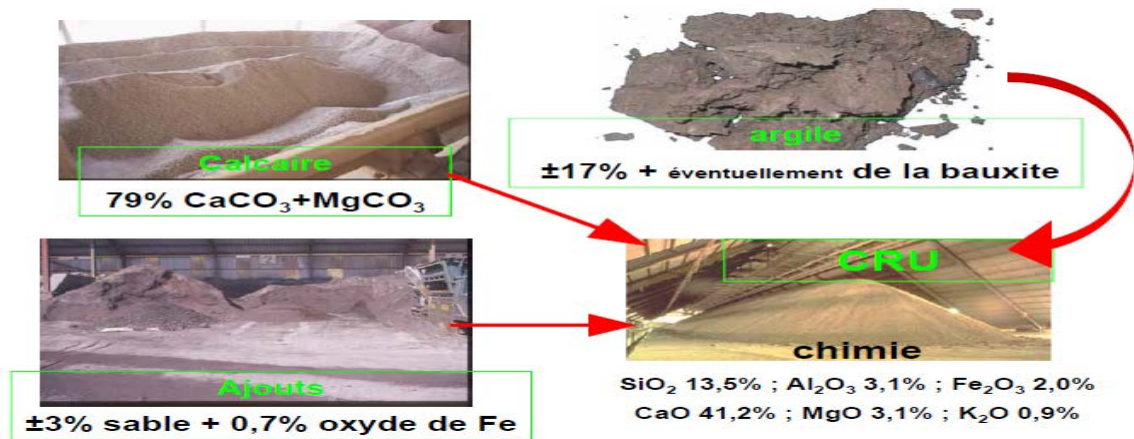


Figure. I.2 : Exemple de composition du cru.

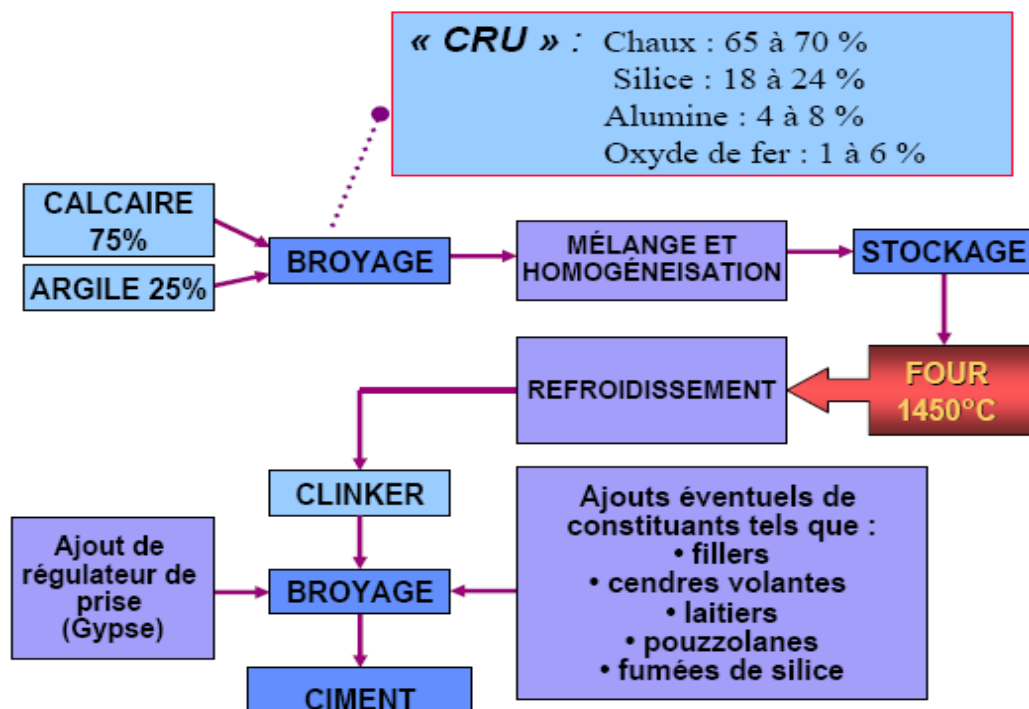


Figure. I.3 : Organigramme de fabrication du ciment [36].

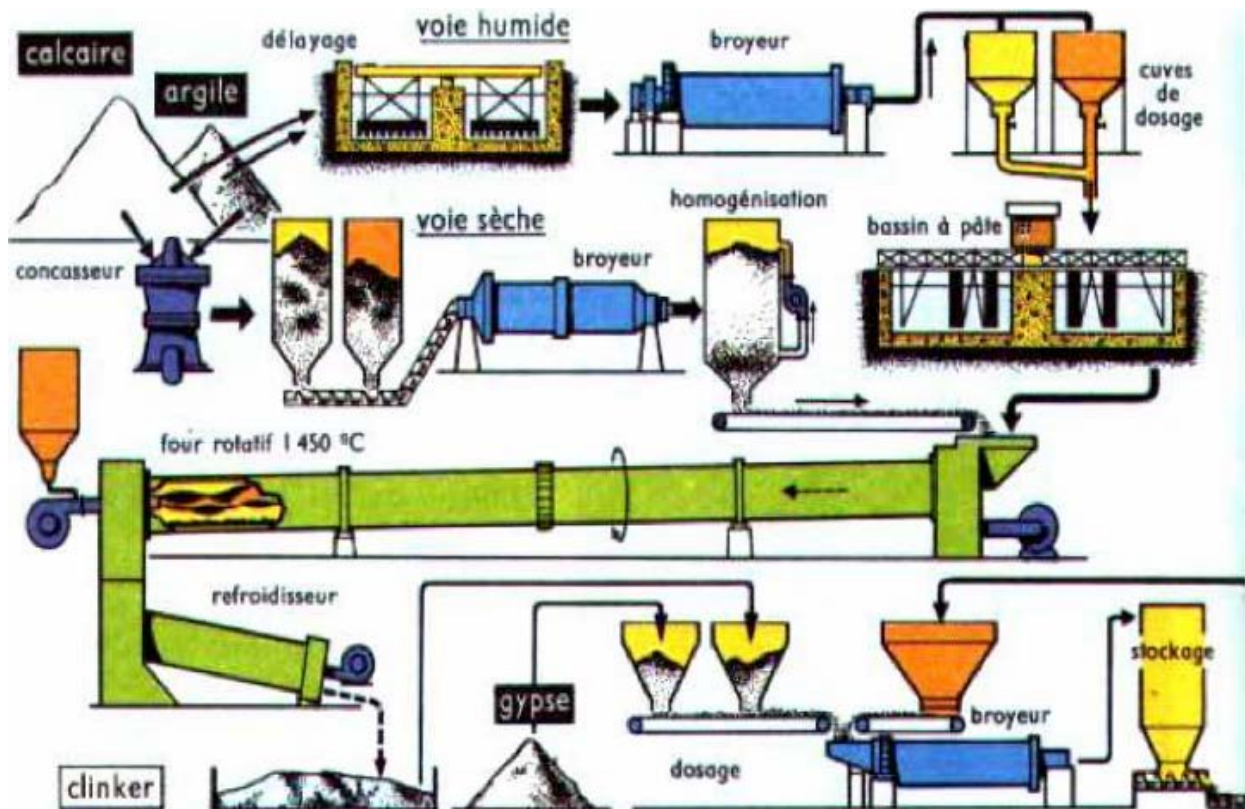


Figure .I.4 : Fabrication du ciment. [7]

I.2.5. Les Constituants du ciment:

I.2.5.1. Clinker :

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 75 % de calcaire et de 25 % de silice : la «farine» ou le «cru». Cette cuisson, la clinkerisation, se fait à une température d'environ 1450°C.

Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

La composition des clinkers gris est représentée par quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment. Elles sont en moyenne les suivantes :

- C_3S : Silicate tricalcique ($SiO_2 - 3 CaO$) : 50 à 65% (Alite),
- C_2S : Silicate bi-calcique ($SiO_2 - 2 CaO$) : 15 à 20% (Belite),
- C_3A : Aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3CaO$): 5 à 15% (Aluminate),
- C_4AF : Ferro-aluminate tétra-calcique ($Al_2O_3 Fe_2O_3 - 4 CaO$) : 5 à 10% (Ferrite).

La composition minéralogique du clinker obtenu après cuisson des matières crues dépend de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement (trempe à l'aire). [6]

Composition chimique (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Chaux libre	Résidu insoluble	Perte au feu
22.00	5.30	3.38	65.16	1.77	2.32	1.40	0.48
Composition minéralogique (%)							
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
58.09		23.32		8.32		10.27	

Tableau .I.1 : Analyse chimique et minéralogique du clinker [6].

I.2.5.2. Le gypse(CaSO₄) :

Gypse est une évaporite incolore ou de couleur blanchâtre, jaunâtre ou rougeâtre. Il existe sous plusieurs formes : gypse en pied d'alouettes, en fers de lance, albâtre, rose des sables. Des hydrate, ou chauffé dans des fours, le gypse fournit le plâtre.

On l'appelait autrefois "pierre à plâtre" pour cette raison. Le gypse, particulièrement sensible à l'eau, se désagrège rapidement à son contact ; on parle alors communément du phénomène de dissolution du gypse, bien connu dans les carrières qui se fragilisent ainsi et finissent par s'effondrer suite à des infiltrations d'eau. Pour être préservé naturellement sous sa forme solide, le gypse est donc généralement protégé par des couches de roches retenant l'eau et en particulier l'argile qui forme une couverture étanche. [8]



Figure.1.5 : Image représente un échantillon de gypse.

I.2.6. Classification des ciments courants :

Les ciments courants font l'objet de la norme (NF EN197-1) [37] ciment : Composition, spécifications et de conformité des ciments critères de conformité des ciments courants. Cette norme définit les constituants des ciments et les différents types de ciments courants. Elle fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico- chimiques et précise les critères de conformité et les fréquences d'essais [9].

Désignations	Types de ciments	clinker%	Teneur en% de l'un de constituants suivant : laitier pouzzolanes- cendres calcaire sschistes- fumées de silice	Ajout et Teneur en %
CPA-CEM I	Ciment portland	95à100%		0à5%
CPj-CEM II/A	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	
CPJ- CEM II/B		65 à79%		
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35à64%	-35à65% de laitier de haut fourneau	
CHF-CEM III/B		20à34%	-66à80% de laitier de haut fourneau	
CLK-CEMIII/C		5à19%	-81 à95% de laitier de haut fourneau	
CPZ-CEM IV/A	ciment pouzzolanique	65 à90%	-10à35% de pouzzolanes cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%. -36à55% comme ci-dessus	
CPZ-CEM IV/B		45à64%		
CLC-CEM V/A	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	
CLC-CEM V/B		20à39%		

Tableau .I.2: les différents types de ciment courants [9].

I.2.7. Propriétés des ciments :

I.2.7.1. Caractéristiques physiques :

a. Prise :

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pate de ciment (ciment+eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton puisqu'elle donne sa cohésion ou matériau. [9]

b. Durcissement :

c. 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 résistance. [3]

d. Chaleur d'hydratation :

Les constituants anhydres se transforment en composés hydratés. Deux mécanismes d'hydratation peuvent être observés. Le premier se passe en solution, les composés cimentaires se dissolvent en ions dans la solution et de nouveaux composés se forment par précipitation.

Le second correspond à des réactions à l'état solide, les composés réagissent avec les précipités en phase solide. [9]

e. Finesse de mouture :

La finesse de mouture des différents constituants du ciment influence la cinétique des réactions d'hydratation, c'est-à-dire la prise puis le durcissement de la pâte et ainsi la structure poreuse du matériau durci.

Le broyage simultané de plusieurs constituants de dureté différentes, le laitier de haut fourneau, le clinker ou encore le gypse, mène à différer granulométrie pour chacun d'eux les granulométries des ciments ont été déterminées avec un granulomètre faisceau laser (Malvern Mastersizers). [10]

f. Retrait :

Le retrait est une diminution de volume liée à la dessiccation du béton, au moment de la mise en œuvre puis au cours du vieillissement de l'ouvrage. Cette diminution crée des contraintes de traction dans le matériau. Si ces contraintes sont plus importantes que la limite de rupture du béton, il y a rupture du matériau, ce qui se traduit par des fissures.

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. [11]

g. 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. [3]

I.2.7.2. Caractéristique chimique:

Dans les normes actuelles, les ciments portland sont classés en fonction:

- ✓ De type de ciment ;
- ✓ De la classe de résistance.

La nouvelle norme (EN 1971) se substitue officiellement à l'ancienne norme depuis le 1^{er} janvier 1995. Selon la proportion des constituants qui entrent dans la composition du ciment, on peut classer les ciments en 5 grandes catégories.

Types de ciments	Notation	%Clinker	Autres composants	Principales utilisations
Ciment Portland	CPA-CEM I	Min. 95%	Max. 5% de filler	Bétons armés
Ciment Portland composé	CPJ-CEMII/A CPJ-CEMII/B	65 à 79 80 à 94%	Max. 35% de cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice, laitiers	Travaux de dallage, routes
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	De 35 à 80% de laitier de haut fourneau 81 à 95% de laitier de haut fourneau	Convient aux travaux peu soumis à une trop, grande augmentation de chaleur :
Ciment aux laitiers, et aux cendres	CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	40 à 64% 20 à 39%	18 à 30% laitier, et 18 à 30% pouzzolanes ou cendres volantes ; 31 à 50% laitier, et 31 à 50% de cendres volantes ou pouzzolanes	travaux hydrauliques souterrains, ouvrages massifs, travaux en eaux agressives. A éviter par temps froid

Tableau. I.3: caractéristique chimique de ciment courante. [10]

I.2.7.3. Caractéristiques mécaniques des ciments courants :

On a 3 classes : 32,5 / 42,5 / 52,5 = résistances minimales caractéristiques à la compression obtenues mesurées à 28j sur mortier normalisé (E/C=0.5).

Résistances à court terme : 2 et 7 jours : 2 classes :

- ✓ Résistance à court terme ordinaire « N » ;
- ✓ Résistance à court terme élevée « R » .

Classe de ciments	Résistance à la compression Mpa			Tempe de début de prise min	Stabilité (expansion) min
	Résistance à court terme Mpa		Résistance courant Mpa		
	2 jours	7 jours	28 jours		
32,5	–	≥ 16.0	≥32.5	≤52.5	≥ 75.0
32,5R	≥10.0	–			
42 ,5	≥10.0	–	≥42.5	≤62.5	≥ 60.0
42,5R	≥20.0	–			
52,5	≥20.0	–	≥52.5	–	≥ 45.0
52,5R	≥30.0	–			

Tableau .I.4: caractéristique mécanique des ciments courants. [7]

I.2.8. L'hydratation du ciment :

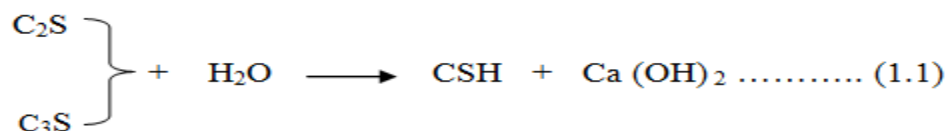
L'hydratation du ciment artificiel (CPA) est le résultat de l'hydratation de ses différentes espèces minéralogiques. Ainsi il n'existe pas de « réaction l'hydratation du ciment portland » à proprement parler.

L'hydratation de chacune de ses espèces est déjà quelque chose compliqué : elles comprennent toutes plusieurs réactions chimiques qui conduisent à la formation de différents hydrates, directement ou par recombinaison d'espèce préalablement formées. [9]

I.2.8.1. Hydratation des composants du ciment portland :

a. Hydratation des silicates :

L'hydratation des silicates conduit à la formation de silicates de calcium hydratés ou CSH (de l'anglais : « calcium silicate hydrate ») et de portlandite $[Ca(OH)_2]$. Les produits d'hydratation étant qualitativement les mêmes, on peut écrire de manière synthétique une équation bilan (1.1) des espèces mis en jeu.



Les CSH forme une phase très désordonnée que l'on considère parfois comme amorphe. D'où l'application de « gel de CSH ». constituée de l'agrégation de feuillets de CSH. La composition et la structure de ses feuillets font encore l'objet de nombreuses recherches.

b. Hydratation des aluminates C_3A et C_4AF :

Les produits d'hydratation de C_4AF se déduisent de ceux C_3A par substitution de l'alumine (Al_2O_3) dans par l'alumino-ferrite ($Al_2O_3-Fe_2O_3$) dans les formules chimique .on ne présentera donc que l'hydratation du C_3A . [9]

I.2.9. L'activité hydraulique du ciment :

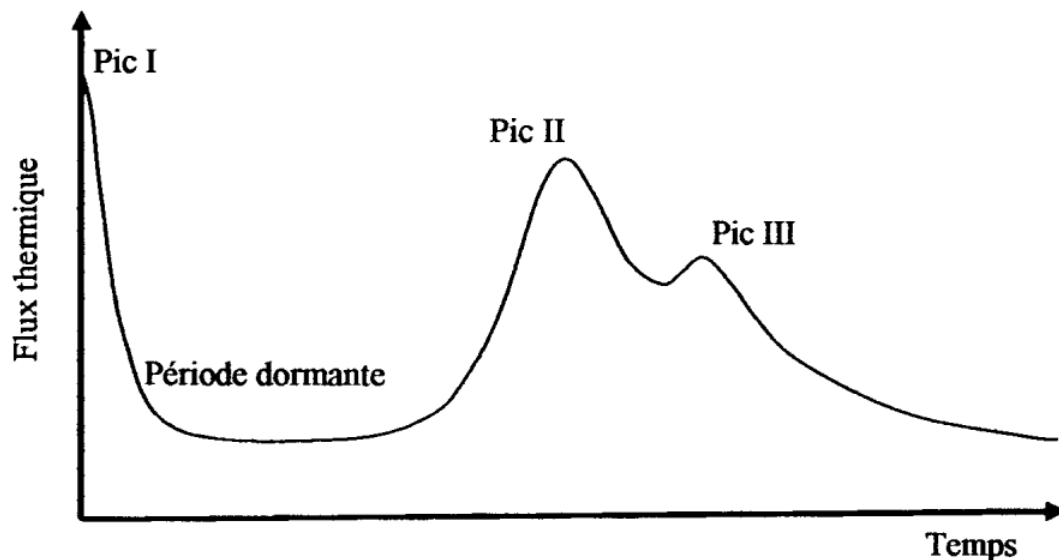


Figure I.6 : Étude de l'activité hydraulique par calorimétrie des pâtes des ciments élaborés [35].

a. Premier pic: Le premier pic caractérise le dégagement de la chaleur lors du gâchage. Cette chaleur est due à la dissolution superficielle des constituants du ciment qui sera vite dissipée dans le malaxeur et ne peut être mesurée que si le gâchage se fait dans le calorimètre.

b. Période dormante: Cette période suit le gâchage et dure quelques heures, elle est caractérisée par une formation très lente des hydrates accompagnée par une chaleur dégagée presque nulle.

c. Second pic: Après la période dormante, un grand flux de chaleur apparaît représentant une formation accélérée des hydrates et principalement l'hydratation du composant principal du ciment (C_3S).

d. Troisième pic : Le troisième pic vient après le second et représente un dégagement de chaleur dû à l'hydratation d'autres composants du ciment, ou à la transformation de l'ettringite au monosulfoaluminates (AFm) lorsque la teneur en C_3A dépasse 10% dans le ciment [35].

I.3. Les ajouts minéraux :

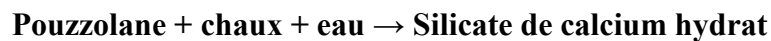
I.3.1. Introduction :

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en substitution partielle du ciment portland à Travers le monde .Ils proviennent de sources naturelles (pouzzolane, calcaire) ou de sous

Produits industriels (laitier, cendres volantes...), leur valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques [10].

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du clinker est très bénéfique, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du CO₂, les ajouts peuvent améliorer les propriétés du béton, en augmentant sa compacité et en changeant sa micro structure [11].

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et du C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (NF P 18-508) [38]. On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante [12] :



I.3.2. Classification des ajouts minéraux :

Selon la norme (EN V 2006) paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes [12].

I.3.2.1. Les ajouts minéraux actifs :

a. La pouzzolane :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des Matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes [12].

a.1. pouzzolane naturelle :

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites [12].



Figure. 1.7 : pouzzolane naturelle avant broyage [3].



Figure. 1.8 : pouzzolane naturelle après broyage.

a.2. 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 et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories :

- ✓ Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées ;
- ✓ Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites ;
- ✓ Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes [12].

- **Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées. (Cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique.

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure.

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ✓ Ajouts de produits chimiques ;
- ✓ Broyage à une finesse plus élevée ;
- ✓ Traitement thermique [12].

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques :**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme [12].

- **Propriétés physiques de remplissage :**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [12].

b. 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 [12].

D'un point de vue chimique, 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 séparément [12].

OXYDES	Laitier français	Laitier nord USA	Laitier algérien
SiO₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al₂O₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe₂O₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Tableau .I.5 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [12].

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation [12].

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, le sulfate de calcium (gypse) [12].

c. la fumée de silice [NF P 18-502] [17] :

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferro-silicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferro-silicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage [12].

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau I.6). La teneur en SiO₂ de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO₂ de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO₂. La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe –Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85% [12].

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.03 μ m et 0.3 μ m (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 μ m), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron [12].

Composés	Silicium (grise)	Ferro-silicium (grise)	Blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2

Tableau. I.6 : composition chimiques de la fumée de silice [12].

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à

l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2,2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3,1 [12].

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie. Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [12].

d. Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables [12].

La composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires [12].

Les cendres volantes se divisent en trois catégories : Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille) Les cendres sulfo-calciques (cendre de lignite) Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines [12].

I.3.2.2. Principaux ajouts minéraux inertes :

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette

même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305)

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés 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 la poussière.

a. Fillers calcaires (NF P 18-508) [16] :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- ✓ leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui'ils contiennent.
- ✓ leur finesse, la forme des grains ;
- ✓ leur dureté, leur porosité [3].

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.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA Peuvent jouer plusieurs rôles:

- ✓ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau) ;
- ✓ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle ;
- ✓ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carbo-aluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates ;
- ✓ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [3].



Figure. 1.9 : filler avant broyage.



Figure. 1.10 : filler après broyage.

b. La poussière :

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/g. Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout [3].

c. la barytine :

La barytine (BaSO₄), ou sulfate de baryum, est un minéral incolore ou blanc. Elle peut être légèrement teintée de jaune, marron, vert, rouge, brun ou gris. Ces nuances sont le résultat de la présence d'oxyde de fer, de sulfures ou de matières organiques [39].

c.1. Usages :

La barytine, ou sulfate de baryum, est largement utilisée dans différents secteurs pour ses propriétés particulières : densité élevée, neutralité chimique, blancheur et absence d'abrasif. Elle sert comme charge minérale dans une grande variété de produits dont les peintures, le papier, le verre, le caoutchouc, les plastiques, les matériaux de friction ainsi que les barrières de protection contre les rayonnements [39].

Dans l'industrie de la construction, la barytine entre dans la fabrication des bétons denses utilisés dans la construction de ports ou de terminaux pétroliers. Ce type de béton est également employé comme contrepoids de ponts, stabilisateur de conduits sous-marins, ballast de bateaux et barrière de protection contre d'éventuelles radiations. Il sert aussi dans la construction de laboratoires, de centrales nucléaires et de bases militaires atomiques (Albouy et Rousseau, 1993) [39].



Figure. I.11 : barytine avant broyage.



Figure. I.12 : barytine après broyage.

c.2. Caractéristiques :

Masse atomique	137,33 g.mol ⁻¹
Électronégativité de Pauling	0,9
Masse volumique	3,5 g.cm ⁻³ à 20°C
Température de Fusion	725 °C
Température d'ébullition	1640 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,222 nm
Rayon ionique	0,135
Isotopes	7
Configuration électronique	[Xe] 6s ²
Énergie de première ionisation	502,7 kJ.mol ⁻¹
Énergie de deuxième ionisation	965 kJ.mol ⁻¹
Potentiel standard	- 2,90 V

Tableau. I.7 : caractéristique de la barytine [40].

I.3.3. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

I.3.3.1. Intérêt du point de vue économique :

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisent déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles [12].

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus [12].

I.3.3.2. Intérêt du point de vue technique :

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C_3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique [12].

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une

plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide [12].

I.3.3.3. 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.3.4. 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 Béni – Saf. Le (tableau III.4) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes [12].

Entreprise	cimenterie	Ajouts utilisés
ERCE	Ain Touta	Laitier+calcaire
	Ain El Kbira	Laitier+pouzzolane
	Hamma Bouziane	Laitier
	H'djar Essaoud	Laitier
ERCC	Meftah	Tuf/calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour El Ghozlane	Calcaire / Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

Tableau. I.8 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [12].

I.4. Les granulats :

La norme (XP P 18-545) définit les règles générales de contrôle des granulats. La norme (NF EN 12620) régleme leurs caractéristiques.

Les granulats entrant dans la composition des mortiers et bétons sont des grains minéraux appelés fillers, sables, gravillons ou graves, suivant leurs dimensions.

I.4.1. Définition :

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes: fillers; sablons; sables; graves; gravillons; ballast; enrochements. [22]

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis. Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

Les granulats utilisés pour la confection du mortier sont: les fillers et les sables [22].

I.4.2. Le sable

Le sable est avant tout un matériau naturel, issu du quartz ou du silex, largement utilisé dans le domaine de la construction. Le sable est constitué de grains plus ou moins fins, dont la dimension varie de 0,15 mm à 4,76 mm. En fonction de la taille des grains, on parle de sable fin, de gros sable ou de sable graveleux. Il existe ainsi différents types de sables, qui auront différentes utilisations en construction.

On distingue les sables naturels des sables artificiels.

I.4.2.1. Sable naturel :

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Également appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Un autre type de sable naturel est le sable de carrière, extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.

Quant au sable de mer, qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences.

Enfin, le sable de feuilles est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux.

I.4.2.2. Sable artificiel :

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé.

✓ Qualités requises pour un sable naturel ou artificiel :

Un sable est jugé de bonne qualité s'il remplit certaines conditions.

a. Granulométrie :

Un sable de bonne granulométrie doit contenir à la fois des grains fins, moyens et gros. Les sables très fins, de dunes ou marins sont à éviter.

b. Propreté :

Les sables doivent être propres. La propreté est fournie par l'essai d'équivalent de sable (norme NF EN 933-8)

c. Foisonnement du sable :

Les dosages pondéraux ou volumétriques sont indiqués pour des sables secs. L'eau produit un foisonnement, c'est-à-dire une augmentation apparente de volume dont il faudra tenir compte dans les dosages volumétriques [22].

I.5. L'eau de gâchage :

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci [21].

I.5.1. Le rôle de l'eau :

L'eau permet au ciment de faire prise (c'est un des réactifs de la réaction d'hydratation), et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. L'eau est un

constituant très important du béton, car elle peut en influencer la qualité, en fonction de sa qualité et de sa quantité [21].

I.5.2. La qualité d'eau :

L'eau destinée au gâchage du béton doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés qui pourraient nuire à la qualité du béton (matières organiques ou chimiques...)

I.5.3. La quantité d'eau :

Il faut être attentif au dosage, car un excès d'eau nuit à la durabilité du béton et diminue la résistance du béton durci. On calcule la quantité d'eau à partir du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) établi expérimentalement.

En France, la norme (NF EN 206-1) [41] régit la formulation de bétons. Elle fixe les règles concernant la spécification, la production, la livraison et le contrôle de la conformité des bétons. Elle donne des classes de consistance pour le béton à l'état frais, et fixe la quantité d'eau maximale de gâchage en fonction de la classe d'expositions du béton, par l'intermédiaire du rapport pondéral Eau efficace/Liant équivalent.

Les ajouts d'eau non maîtrisés (sur chantier ou en centrale à béton) entraînent :

- une diminution des performances mécaniques du béton
- une augmentation de sa porosité concomitante avec une augmentation de ses propriétés de transfert
- une diminution de sa durabilité
- une augmentation des phénomènes de retrait
- une diminution de la résistance aux cycles gel/dégel
- des risques de ségrégation et de ressuage [21].

I.6. Le rapport eau /ciment:

- **Introduction :**

En 1919, D.A. Abrams suggérait tout simplement une corrélation directe entre la résistance et le rapport E/C. En gros, plus E/C était bas, plus la porosité du béton obtenue (pour des agrégats donnés) était faible et donc plus la résistance était supposée être élevée.

Depuis, nos connaissances ont bien sûr permis de constater que ce corollaire pouvait induire en erreur, notamment sur les bétons à haute performance où la résistance intrinsèque des granulats et des liants inter-granulats jouent un rôle crucial. Cependant, pour les bétons courants, il est certain que ce rapport reste critique, donc à surveiller de près, et mériterait bien notre intérêt. [22]

Au delà de la résistance, un rapport E/C bas limite des effets pernicioeux comme l'alcali-réaction, et des phénomènes de retraits dus à l'évaporation d'eau.

- **Définition :**

Le rapport ciment/eau indique la relation entre le poids du ciment dans un mélange frais de mortier ou de béton et la quantité d'eau de gâchage (y compris l'humidité naturelle du ballast).

- **Signification du rapport ciment/eau :**

Le rapport des poids ciment/eau a une grande importance pratique. D'abord il permet de se faire d'emblée une idée de l'état de la pâte de ciment correspondant à chaque mélange de béton ou de mortier. Plus la valeur numérique de ce rapport est grande, plus la pâte de ciment est concentrée et plus sa force de liaison est élevée. Au contraire, plus elle est petite, plus la pâte de ciment est diluée et fluide.

Ce renseignement sur le degré de dilution du ciment n'est pas donné par les indications usuelles de la quantité d'eau de gâchage (en % du poids des matières sèches, ou en litres par m³, de béton mis en œuvre), car les mélanges maigres ou gras nécessitent presque la même quantité d'eau pour obtenir une consistance déterminée. [22].

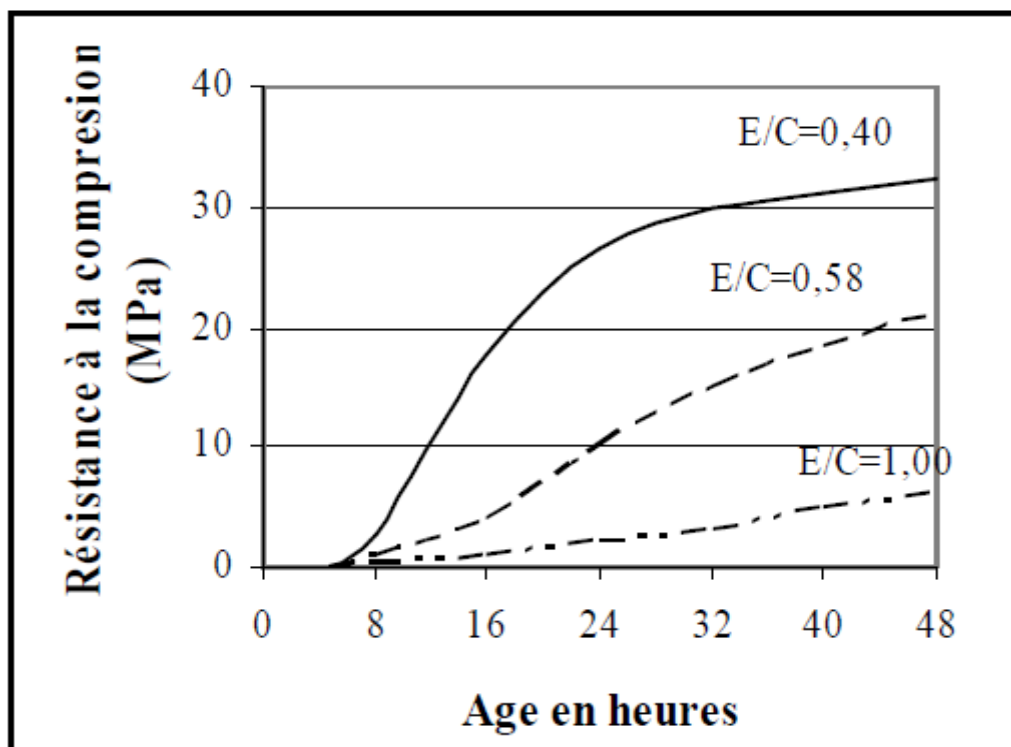


Figure. I.13 : influence de rapport E/C sur l'évolution de la résistance a la compression au jeune âge du béton d'après Byfors.

I.7. Conclusion :

Pour ce qui est des constituants du mortier, une gamme des ciments courants, écologiques, durables et économiques sont produits par réduction de la teneur en clinker et l'incorporation de différents types d'ajout minéraux. Pour le gâchage du mortier, l'eau potable est toujours utilisable, mais si on doit utiliser une autre eau la norme (NF EN 1008) [42] précise les conditions d'utilisation d'une eau de gâchage. Les granulats doivent répondre à certaines exigences sur leur nature, leur taille et leur forme, il ne doivent pas contenir d'éléments nocifs préjudiciables à la qualité du mortier

Les réactions d'hydratation des minéraux du clinker sont complexes et ne présentent pas une succession mais un échelonnement, cependant c'est l'hydratation des silicates de calcium hydratés, la portlandite a sont tour favorise le PH, par contre les aluminates tricalcique accélère la prise et dégage une forte chaleur d'hydratation initiale.

Différents facteurs influencent la cinétique d'hydratation des composantes du clinker, comme la surface spécifique du ciment, la présence de sels, l'incorporation d'adjuvants, la chaleur, cette dernière joue un rôle à la fois cinétique et thermodynamique dans la réaction d'hydratation.



chapitre II

*Caractéristiques des
matériaux utilisés*

Chapitre II

Caractéristiques des matériaux utilisés

II. 1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons défini les essais appliqués sur le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques, le mortier est confectionné à base de ciment portland composé (CPA CEMI/B 42,5 ES).

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

- ✓ Laboratoire C.T.C.EST de Khenchela ;
- ✓ Laboratoire lycée Saleh Djbaili Khenchela ;
- ✓ Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra.

II.2. Caractéristiques des matériaux :

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large, Ce dernier Est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface des différentes matières premières, qui sont à la base des matériaux, leur confèrent des propriétés particulières. [25]

II.2.1. Le sable :

Le sable est un constituant important de la plupart des sols il est très abondant comme dépôt de surface, le long des cours d'eau, sur les rives des lacs et des mers et dans les régions arides.

Le sable utilisée dans ce travail est un sable concassé ramené de la carrière de *A/N ZITOUN OUM ELBOUAGHI*

II.2.1.1. Équivalent de sable (NF P 18-597) :

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que l'essai au bleu de méthylène, d'équivalent de sable à 10 % de fines etc. mais dans ce travail pratique, on va parler que sur l'essai d'équivalent de sable.

Il s'agit là aussi d'une expérience normalisée dont chaque carrière doit pouvoir fournir les résultats pour ses sables. Elle permet de déterminer le pourcentage de fines dans le sable.

❖ **But de l'essai :**

Cet essai a pour but de mesurer 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 normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

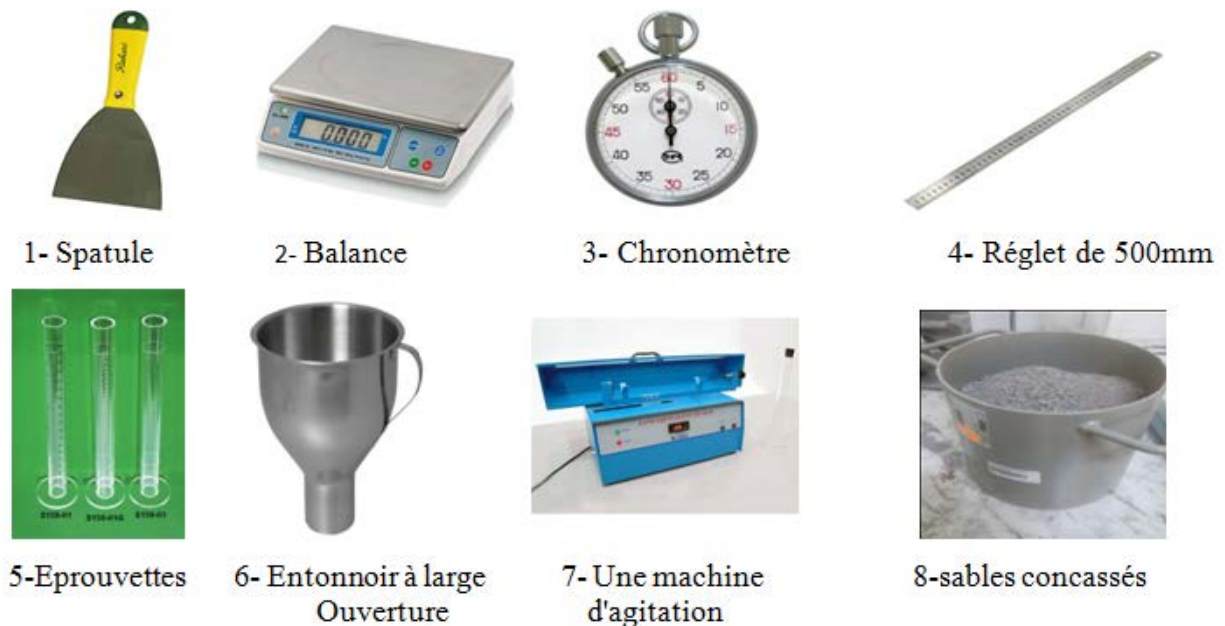
❖ **matériels utilisés :**

Figure. II.1 : matériels utilisés du équivalente de sable.

❖ **Principe de l'essai :**

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- ✓ Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- ✓ Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (figure II.2). L'essai dit d'équivalent de sable - permet de déterminer le degré de propreté du sable :

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

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ESP (équivalent de sable au piston). [25]

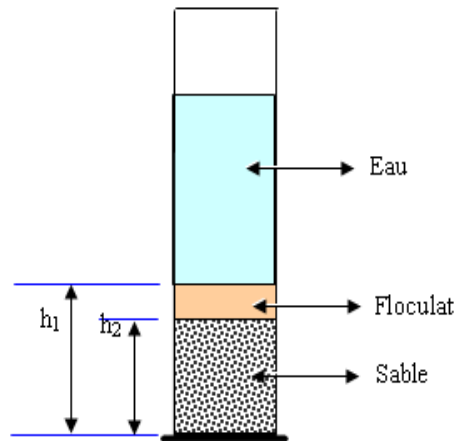


Figure II.2 : schéma d'éprouvette équivalente de sable visuel et équivalent de sable au piston.

❖ **Mode opératoire :**

- remplir les 3 éprouvettes de solution lavant jusqu'au 1^{er} repère, ensuite verser la quantité de sable tarée ;
- éliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer 10 minutes ;
- boucher les éprouvettes et les agiter d'un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes).
- laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface ;
- On ferme le robinet lorsque la solution atteint le 2^{ème} trait (supérieur) et on sort le tube laveur ;
- On laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;
- On mesure à vue les hauteurs h_1 et h_2 (h_2 est entachée d'incertitude) ;
- pour effectuer la mesure de façon plus précise, on introduit le piston taré à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette est on l'immobilise au contact du sable ;
- mesure h'_2 ; [25]



Figure II.3 : équivalente de sable visuel et équivalent de sable au piston.

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.

Tableau. II.1: les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable. [3]

II.2.1.2. Résultats d'équivalente de sable :

Lecture			équivalent de sable en %	moyenne en %
H _t (cm)	H _v (cm)	H _p (cm)		
11.2	9.3	8.7	80.35	78,61
12.1	9.7	9.1	77.68	
11.9	9.7	8.9	78.15	

Tableau. II.2 : Résultats de l'équivalent de sable de sable AINZITOUNE OUMELBOUAGHI

II.2.2. Analyse granulométrique (NF P 18-101):

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- ✓ des mortiers, des bétons,
- ✓ des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- ✓ et des assises et des ballasts de voies ferrées.

❖ But de l'essai :

Le but de l'essai se matérialise par plusieurs points. Nous avons entre autre :

- ✓ Le dimensionnement des particules qui varie entre 10^{-6} mm à 1000 mm ;
- ✓ La classification utilisée pour caractériser les grains de différentes dimensions ;

L'établissement de la courbe granulométrique qui donne des informations très précises sur le sable étudié. [25]

❖ matériels utilisés :**1-Tamiseuse****2-balance****3- sable****4-les tamis****5- étuve**

Figure II.4 : matériels utilisées pour l'analyse granulométrique.

❖ **principe de l'essai:**

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



Figure. II.5 : tamiseuse électrique.

❖ **Mode opératoire :**

Voici les étapes du tamisage de la fraction retenue sur le tamis ($D > 2 \text{ mm}$) :

- 1- Délayer la fraction retenue sur le tamis N_o 4 jusqu'à ce que le filtrant soit clair ;
- 2- Sécher à l'étuve ;
- 3- Peser et noter ;
- 4- Tamiser avec une série de tamis en fonction des besoins et de l'échantillon. Animer les tamis d'un mouvement latéral et vertical continu pour que l'échantillon soit toujours en mouvement sur le tamis ;
- 5- Continuer le tamisage jusqu'à ce que la variation de poids sur un tamis soit inférieure à 1%. Pour une minute de tamisage.
- 6- Peser la fraction retenue sur chaque tamis et passant au travers du dernier.
- 7- Vérifier si la somme des fractions retenues ou passant est égale à la masse initiale mise en œuvre. [25]

❖ **Module de finesse (M_f) :**

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 ; [3]
- ✓ Pour $M_f > 3,2$: le sable est à rejeter.

❖ Tracé de la courbe granulométrique

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- en abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique ;
- en ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique ;
- La courbe doit être tracée de manière continue.

II.2.2.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI :

On a obtenu la masse de sable selon la relation suivante : $0.2 D_{max}$

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisas(%)
4	014.180	014.180	001.772	098,228
2,5	085.750	099.930	012.490	087,510
1,25	178.440	278.370	034.796	065,204
0,63	199.240	477.610	059.701	040,299
0,315	139.780	617.390	077.173	022,827
0,16	092.560	709.950	088.743	011,257
fond de tamis	090.050	800.000	100.000	000.000

Tableau II.3 : Résultats d'analyse granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI

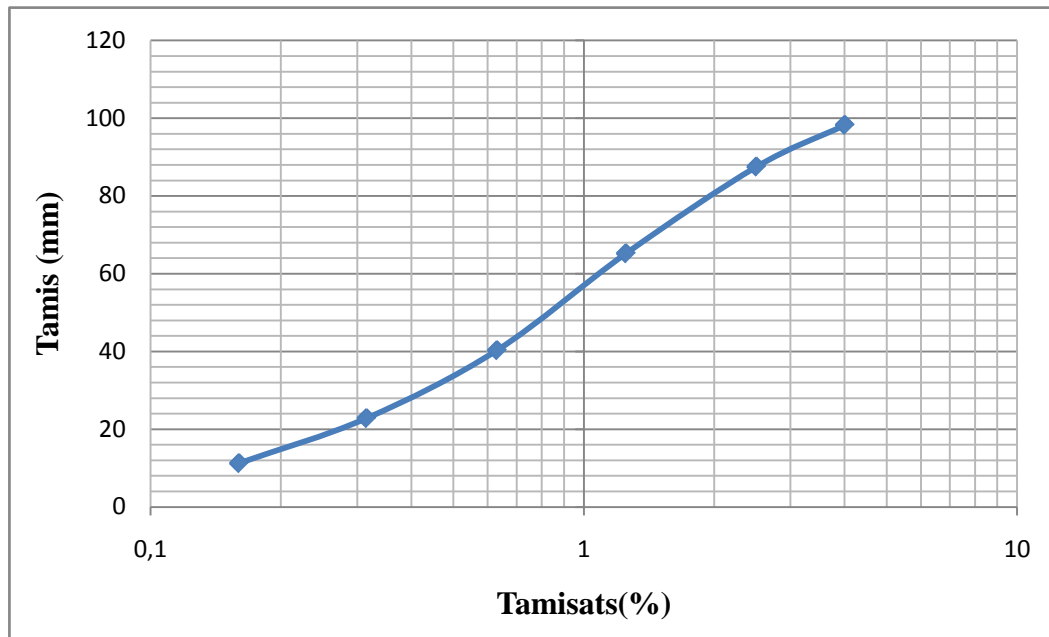


Figure .II.6 : La courbe granulométrique du sable de AIN ZITOUNE OUM EL BOUAGHI

- **Module de finesse Norme Française (NF P 18-540) :**

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\}$$

$M_f = 2.74$ (sable préférentiel)

II.3. La masse volumique :

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'une substance par unité de volume.

Cette grandeur est notée par les lettres grecques ρ (rho) ou μ (mu) en fonction des situations rencontrées. Toutefois le BIPM (Bureau international des Poids et Mesures) recommande d'utiliser la notation ρ .

Elle est déterminée par le rapport $\rho = m/v$ où m est la masse de la substance homogène occupant un volume v .

Parmi les propriétés principales des matériaux de construction on a la masse volumique, dans cet essai on va connaître et calculer la masse volumique des matériaux par plusieurs méthodes. [26]

❖ **But d'essai :**

- S'approprier la notion de masse volumique ;
- De faire connaître le fonctionnement des matériels dans laboratoire ;

- D'interpréter les résultats obtenus ;
- D'estimer la précision de mesure.

❖ **Principe :**

Masse volumique absolue : la méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée et la méthode de pycnomètre.

Masse volumique apparente : remplir une mesure de 1 Dm^3 et déterminer la masse du contenu.

❖ **Matériels :**

- ✓ Récipient 1 dm^3 + Entonnoir ;
- ✓ Pycnomètre ;
- ✓ Éprouvette+Balance.




Récipient 1 Dm^3 + Entonnoir	Pycnomètre	Eprouvette+Balance
		

Tableau. II.4 : matériels de méthode de masse volumiques.

II.3.1.Masses volumiques apparentes :

• **Définition:**

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.

La masse volumique apparente d'un matériau : pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

• **Objectif :**

Connaître la masse d'une fraction granulaire. [27]

- **Matériels :**

- Un bécher de $1\text{dm}^3 = 1\text{ litre}$;
- Une cuvette ;
- Une balance de précision ;
- Un échantillon de 2000g.



Figure. II.7 : Récipient 1dm^3 + Entonnoir.

- **Mode opératoire :**

On place l'entonnoir au-dessus de la mesure de 1 Dm^3 , et après on verse environ 50g de sable dans la mesure en ouvrant l'entonnoir jusqu'à ce qu'il déborde formant un cône et on fait l'arasement à l'aide d'une règle. Ensuite on pèse le contenu.

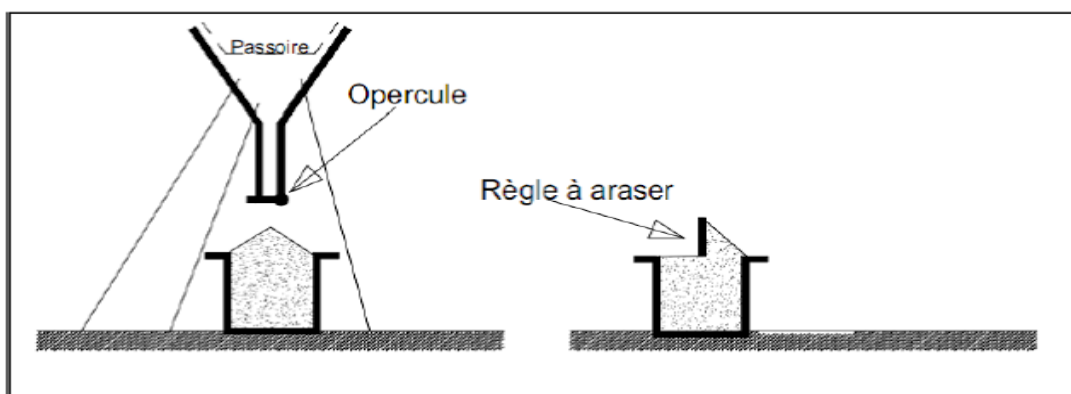


Figure. II.8 : schéma représente planification de Récipient 1dm^3 + Entonnoir.

La masse volumique apparente est donnée par: [27]

$$\rho_{app} = \frac{m_2 - m_1}{v}$$

II.3.1.1. Résultat de Sable :

Figure. II.9 : la quantité de M_1 .Figure. II.10 : la quantité de M_2 .

Figure. II.11 : schéma représente la masse apparente de sable.

$$M_1 = 299.51 \text{ g} ;$$

$$M_2 = 1811.16 \text{ g} ;$$

$$V = 1000 \text{ ml} ;$$

$$\rho_{\text{app}_1} = \frac{1811.16 - 299.51}{1000} = 1.511 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$M_2 = 1802.25 \text{ g} ;$$

$$\rho_{\text{app}_2} = \frac{1802.25 - 299.51}{1000} = 1.502 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$M_2 = 1827.10 \text{ g} ;$$

$$\rho_{\text{app}_2} = \frac{1827.10 - 299.51}{1000} = 1.527 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\rho_{\text{app moy}} = \frac{1.511 + 1.502 + 1.527}{3} = 1.513 \text{ g/cm}^3 ;$$

II.3.2. La masse volumique absolue :

- **Définition :**

La masse volumique absolue ρ_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 des grains.

Cette méthode est très simple et très rapide. Toute fois sa précision est faible. Et pour calculer la masse volumique absolue : [27]

La masse volumique absolue (par l'éprouvette graduée) :

$$\rho_s = \frac{M}{(v_2 - v_1)} ;$$

- **Méthode de l'éprouvette graduée :**

Mode opératoire :

- On remplit une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- On pèse un échantillon sec m de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. En suit on lit le nouveau volume V_2 . [27]

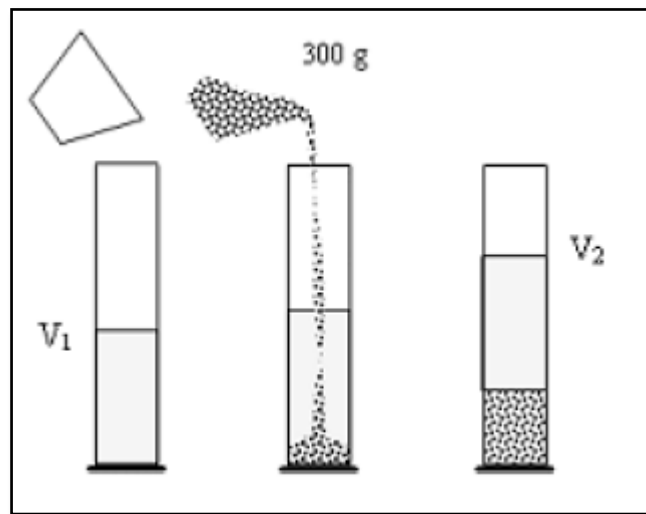


Figure. II.12 : Méthode de l'éprouvette graduée.

II.3.2.1. Résultat de Sable :

$$v_1 = 100ml ;$$

$$v_2 = 142ml ;$$

$$M = 140 g ;$$

$$\rho_{abs_1} = \frac{140}{142 - 100} = 3.33 g/cm^3 ;$$

$$\rho_{abs_2} = \frac{140.01}{142 - 100} = 3.33 g/cm^3 ;$$

$$\rho_{abs_3} = \frac{140}{141 - 100} = 3.41 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\rho_{abs_{moy}} = \frac{3.33 + 3.33 + 3.41}{3} = 3.35 \text{ g/cm}^3 .$$

II.4. Ciment :

Le ciment que nous avons utilisé pour ce programme expérimental est un ciment portland de classe CPA/CEM I/42,5 ES (CRS) (Wilaya de Tebessa) conformément à la norme (NA 443).

Les différentes caractéristiques que ce soit Chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau de laboratoire de l'usine même. Nous notons que toutes les caractéristiques du ciment CPA/CEM I/42,5 ES (CRS) manipulé répondent aux normes.

Toute la quantité de ciment utilisée lors des séries d'expérimentation a fait l'objet d'une seule commande et conservé dans un milieu sec et à l'abri des écarts de température.

Les compositions chimiques et les propriétés physiques du ciment utilisé dans cette recherche sont données dans les tableaux (II.5 – II.6 – II.7 et II.8) :

Composition chimique du ciment									
SiO ₂ -T	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO – T	SO ₃	Na ₂ O	Chlorures	CaO libre	Résidus Insolubles	P.A.F
21.79	4.29	5	64.73	2.1 ≤3.5 %	/	0 ≤0.1%	0.61	0.86	0.87 ≤3%

Tableau II.5 : Composition chimique du ciment.

Composition potentielles du ciment		
Éléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri-calcique	C ₃ S	63,26
Silicate bi-calcique	C ₂ S	14,43
Aluminate tricalcique	C ₃ A	2,49
Alummino-ferrite tetracalcique	C ₄ AF	15,9

Tableau II.6 : Propriétés physiques du ciment.

Essais Physiques		Garantie	Mesures
P ,S	$\frac{g}{cm^3}$	/	3,16
SSB (NA 231)	cm^2/g	/	3388
Temps de Prise Min (NA 232)	Début	≥ 60	206
	Fin	/	307
Expansion mm (NA229)	à chaud	≥ 10	0.8
Refus %	90 μ	/	4.82
Consistance Normale (NA 229)	%	/	24.35
Retrait à 28 j (NA 440)	$\mu m/m$	≤ 1000	/

Tableau II.7: Propriétés physiques du ciment.

Résistance mécanique du ciment (MPa)			
Essais	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	16,4 Li $\geq 12,5$	36,2	55,2 Li $\geq 42,5$
Flexion	3,6	6,3	8,3

Tableau II.8 : Résistance mécaniques du ciment (MPa).

II.5. Fillers calcaires :

Les fillers calcaires utilisé dans notre étude provient de gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée en quantité suffisante pour nos besoins. sur notre projets de fin d'étude.

II.5.1. La masse volumique absolue de filler calcaire :

$$v_1 = 260 \text{ ml ;}$$

$$v_2 = 290 \text{ ml ;}$$

$$M = 100.04 \text{ g ;}$$

$$\rho_{abs_1} = \frac{100.04}{290 - 260} = 3.334 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\rho_{abs_2} = \frac{100.04}{290 - 260} = 3.334 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\rho_{abs_3} = \frac{100.04}{310 - 260} = 2.00 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$\rho_{abs_{moy}} = \frac{3.334 + 3.334 + 2.00}{3} = 2.889 \text{ g/cm}^3.$$



Figure. II.13 : Méthode de l'éprouvette graduée de filler.

❖ **Caractéristiques physiques :**

Dureté(MOHS) :	3
Poids spécifique :	2.7
Densité apparente non tassée	1.3

Tableau .II.9 : Caractéristiques physiques de Fillers calcaires.

❖ **Caractéristiques chimiques :**

CaCO ₃	99.00%
CaO	55.88%
SiO ₂	00.01%
Na ₂ O	00.01%
Al ₂ O ₃	00.01%
MgO	00.14%
Fe ₂ O ₃	00.01%
K ₂ O	00.01%
P ₂ O ₆	00.01%
TiO ₂	00.01%

Chlorure	0.0050%
SO ₃ (soluble dans l'eau)	0.0021%
SO ₃ (soluble dans l'acide)	0.1115%
Soufre totale	0.0137%
Résidu insoluble	0.005%
Solubilité dans l'eau (Ws)	00.38%
Perte au feu	43.90%
Ph	09.24%

Tableau .II.10 : Caractéristiques chimiques de Fillers calcaires

II.6. Pouzzolane :

La pouzzolane naturelle utilisé dans notre étude provient de Cimenterie Ain-Touta Batna

Désignation	Valeurs (%)	Exigences (%)
SiO ₂	46.83	43.00 - 72.00
AL ₂ O ₃	17.45	9.00 - 20.00
Fe ₂ O ₃	8.36	1.00 - 12.00
CaO	9.38	1.00 - 15.00
MgO	3.88	0.50 - 7.00
K ₂ O	1.40	0.20 - 8.00
Na ₂ O ₃	4.32	0.50 - 11.00
Cl	0.03	0.00 - 0.06
PF	4.79	2.30 - 6.00
Activité minérale	≥ 50 %	-
Résidu Insoluble dans le Pouzzolane RI	RI ≤ 75 %	-

Tableau .II.11: Caractéristiques chimiques de Pouzzolane.

II.7.Barytine :

La barytine utilisée dans notre étude provient de gisement de Ain-Mimoun de Khenchela

II.7.1.La masse volumique apparente de barytine :

$$M_1 = 299.51 \text{ g ;}$$

$$M_2 = 1852.5 \text{ g ;}$$

$$V = 1000 \text{ ml ;}$$

$$\rho_{\text{app}_1} = \frac{1852.5 - 299.51}{1000} = 1.552 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$M_2 = 1802.25 \text{ g ;}$$

$$\rho_{\text{app}_2} = \frac{1814.25 - 299.51}{1000} = 1.515 \text{ g/cm}^3 ;$$

$$M_2 = 1827.10 \text{ g};$$

$$\rho_{\text{app}_2} = \frac{1794.94 - 299.51}{1000} = 1.495 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_{\text{app}_\text{moy}} = \frac{1.552 + 1.515 + 1.495}{3} = 1.520 \text{ g/cm}^3;$$

II.7.2. La masse volumique absolue de barytine :

$$v_1 = 250 \text{ ml};$$

$$v_2 = 270 \text{ ml};$$

$$M = 117.63 \text{ g};$$

$$\rho_{\text{abs}_1} = \frac{117.63}{280 - 250} = 3.921 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_{\text{abs}_2} = \frac{116.40}{280 - 250} = 3.88 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_{\text{abs}_3} = \frac{120.02}{280 - 250} = 4.00 \text{ g/cm}^3;$$

$$\rho_{\text{abs}_\text{moy}} = \frac{3.921 + 3.88 + 4.00}{3} = 3.933 \text{ g/cm}^3.$$



Figure. II.14 : Méthode de l'éprouvette graduée de barytine.

❖ Propriétés physiques :

Densité	4.30 à 4.60
Dureté	3 à 4
Clivage	Parfait selon {001} bon selon {210}
Cassure	Conchoïdale
Couleur du trait	Blanc
Résistance au choc	Fragile
Résistance à la chaleur	Mauvaise (crépité au chalumeau)

Tableau. II.12 : Caractéristiques physiques de Barytine.

II.8. Eau de gâchage :

Il s'agit de l'eau du robinet de lycée Saleh Djbaili Khenchela, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) [42] en matière de béton.

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les différents essais appliquée sur le mortier est toute les matières utilisée pour réaliser un objet, pour connaitre l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques, la nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), Les différentes caractéristiques que ce soit Chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau de laboratoire.



Chapitre III
Préparations des
éprouvettes et
essais mécaniques

Chapitre III

Préparations des éprouvettes et essais mécaniques

III.1. Introduction :

Le travail consiste à préparer un mortier pour la fabrication des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ (cm³). Pour que les résultats soient comparables, on passe, d'un mortier à l'autre, et on prend comme seule variable la composition du ciment. Un mortier comprenant ciment, sable et eau, ou peuvent varier la nature et quantité, et ou sont fixées :

Les quantités de chaque constituant.

La quantité nécessaire pour un moule (3 éprouvettes) est indiquée dans les dosages présentés dans le tableau III.1. Les mélanges du mortier sont obtenus à partir de différents ajout utilisés.

III.2. Préparations des éprouvettes et déroulements des essais :

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, à raison de trois éprouvettes par essai et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc.

Les moules et stockés dans l'environnement du laboratoire après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés jusqu'à la période de l'essai dans l'eau à une température de 20 ± 1 °C.

Les résistances mécaniques des mortiers ont été déterminées à l'âge de 7, 14 et 28 jours Selon la norme (EN 196-1). Les liants ont été préparés à partir de différents pourcentages d'ajouts de filler et de pouzzolane naturelle et de barytine. Toutes les substitutions sont faites relativement à la masse de ciment.

III.3. Formulation de mortier normal (NF P 15-403) :

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 en a utilisé pour le mortier:

- ✓ 1500g de sable (03 parties) ;
- ✓ 500g de ciment (une partie) ;
- ✓ 250g d'eau (une demi-partie) ;

✓ $E/C = 0.50$ (pour une consistance acceptable).

III.4. Propriétés mécaniques du mortier :

III.4.1. Programme expérimental :

Différents mortiers, préparés à base de ciment Portland seul ou mélangés à un ajout minéral, ont été examinés. On note la codification suivante:

- Un ciment (CPA) ;
- Un ciment composé de (CPA et de filler calcaire: CPA+FC) ;
- Un ciment composé de (CPA et de pouzzolane: CPA+PZ) ;
- Un ciment composé de (CPA et de barytine : CPA+BR).

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages des ajouts, le rapport ($E/L = 0.50$) sur la résistance mécanique à la compression du mortier, On a choisi pour le filler Calcaire trois pourcentages (5%, 10% et 15%) pour les additionner au ciment CPA, et tirer le taux optimum de filler. Pour les mêmes raisons les différents pourcentages de la pouzzolane choisis sont (10%, 20% et 30%) et mêmes chose pour la barytine (5%, 10% et 20%).

III.4.2. Compositions des mortiers :

Le tableau III.1 donne les différents dosages des matériaux entrant dans la confection des différents mélanges de mortiers:

Type de ciment	Ciment (g)	pouzzolane (g)	filler (g)	Barytine (g)	Sable (g)	Eau (g)	E/L
CPA	500	–	–	–	1500	250	0.50
CPA+ 5%FC	475	–	25	–	1500	250	0.50
CPA+10%FC	450	–	50	–	1500	250	0.50
CPA+15%FC	425	–	75	–	1500	250	0.50
CPA+10%PZ	450	50	–	–	1500	250	0.50
CPA+20%PZ	400	100	–	–	1500	250	0.50
CPA+30%PZ	350	150	–	–	1500	250	0.50
CPA+5%BR	475	–	–	25	1500	250	0.50
CPA+10%BR	450	–	–	50	1500	250	0.50
CPA+20%BR	400	–	–	100	1500	250	0.50

Tableau III.1 : Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques.

III.5. Préparation de mortiers :

III.5.1. Matériel utilisée :

- Un malaxeur avec récipient en acier inoxydable (cuve), batteur. Le malaxeur est pourvu de plusieurs vitesses : lente, moyenne, rapide ;
- Des moules métallique numérotés pour la conception de 3 éprouvettes prismatiques 4x4x16 ;
- Une grande et une petite spatule
- Un chronomètre ;
- Une règle plate à araser ;
- Un pinceau ;
- Une balance électrique ;
- Une table à chocs automatique fixée.



1-Un malaxeur.



2- Une spatule



3-Un chronomètre



4- Des moules métallique



6- Une règle plate



7- Une balance électrique



8- Une table à chocs



9- Un pinceau

Figure.III.1 : matériels utilisées de préparation de mortier.

III.5.2.Matériaux utilisées :

- Ciment CPA CEM I 42.5
- Sable concassés ;
- L'eau ;

- Ajout pouzzolanes ;
- Ajout fillers ;
- Ajout barytine.

III.5.3. Mode opératoire :

III.5.3.1. Mesure des matériaux :

1-mesuré de la quantité de l'eau de 250 g ;



Figure .III.2 : la quantité de l'eau.

2-mesuré la quantité de ciment de 500g ;



Figure .III.3 : la quantité de ciment.

3- mesuré la quantité de sable ;



Figure .III.4 : la quantité de sable.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)

- Nettoyage et séchage parfait des instruments (malaxeur, cuve...);
- Introduire la quantité d'eau choisie : $E / C = 0.50$;



Figure .III.5 : la quantité d'eau dans le malaxeur.

- Introduire 500g de ciment ;



Figure .III.6 : la quantité de ciment dans le malaxeur.

- Mettre le malaxeur en route, vitesse lente pendant 30 s, introduire régulièrement le sable entre la 30^{ème} et la 60^{ème} seconde (voire tableau de méthodologie ci-dessous) ;



Figure .III.7 : la quantité de sable dans le malaxeur.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)

- Mettre la vitesse rapide et relancer le malaxeur pendant 30 s ;



Figure .III.8 : mélange des matériaux dans malaxeurs.

- Stopper le malaxeur pendant 1 min 15 s et nettoyer les parois du récipient avec le batteur pendant les 15 premières secondes ;
- Remettre le malaxeur en route, vitesse rapide durant 60 s.

Opérations	introduction de l'eau	introduction de ciment		introduction de sable		raclage de la cuve		
durées	–	–	30 s	30 s	30 s	15 s	1min15 s	60 s
État du malaxeur	arrête		vitesse lente		vitesse rapide	arrête		vitesse rapide

Tableau III.2 : Méthodologie.

III.5.3.2. Préparations des éprouvettes : (à effectuer immédiatement après préparation du mortier)

- Fixer le moule et la hausse sur la table à chocs ;
- Introduire la première des deux couches de mortier dans chaque compartiment ;



Figure .III.9: La première des deux couches de mortier.

- Étaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement ;



Figure .III.10: Étaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.

- Serré la première couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine) ;
- Introduire la seconde couche de mortier ;



Figure .III.11: La seconde couche de mortier.

- Étaler la couche en utilisant la petite spatule tenue verticalement ;
- Serrer la deuxième couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine)



Figure .III.12 : La seconde couche de mortier.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)

- Retirer le moule et la hausse de la machine à chocs ;
- Ôter la hausse et enlever l'excédent de mortier avec la règle plate à araser ;
- Étiqueter les moules pour identifier les éprouvettes (nom, date, caractéristique) ;



Figure .III.13 : les moules pour identifier les éprouvettes.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)

III.5.3.3 : Conservation des éprouvettes :

- Poser une plaque en plastique ou en acier sur le périmètre du moule ;
- Placer le moule dans une pièce humide pendant 24 heure ;
- Démouler en suite les éprouvettes avec précautions et marquer les éprouvettes ;
- Conserver les éprouvettes dans l'eau à 20 °C.

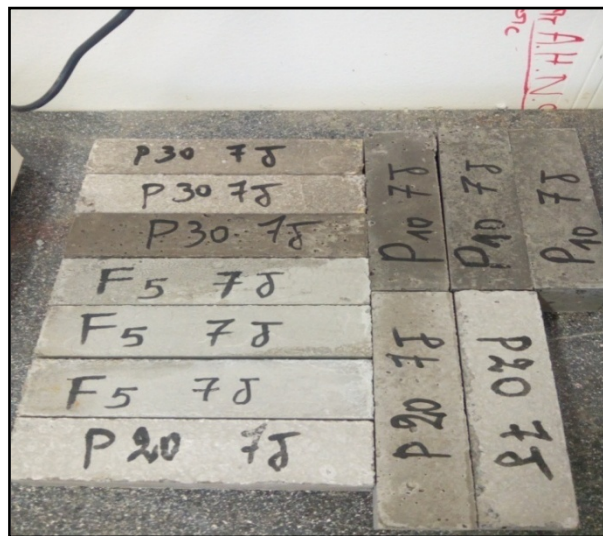


Figure .III.14 : marquer les éprouvettes.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)



Figure .III.15 : les éprouvettes dans l'eau.

(Laboratoire lycée Saleh Djbaiali Khenchela)

III.6: Essais mécaniques sur pâtes et mortiers :

III.6.1.Essais de traction par flexion :

Cet essai est réalisé sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétriquement entre deux mâchoires. Ces dernières servent d'appuis et une troisième est destinée à appliquer un moment fléchissant. Après rupture de l'éprouvette la valeur de la force de flexion est directement lue en Mpa (Figure III.12). Effectivement, les contraintes de traction dans cette section sont données par la formule classique suivante :

$$\sigma = \frac{M}{I/V}$$

I: moment d'inertie de la section ;

V : distance du point considéré à l'axe.

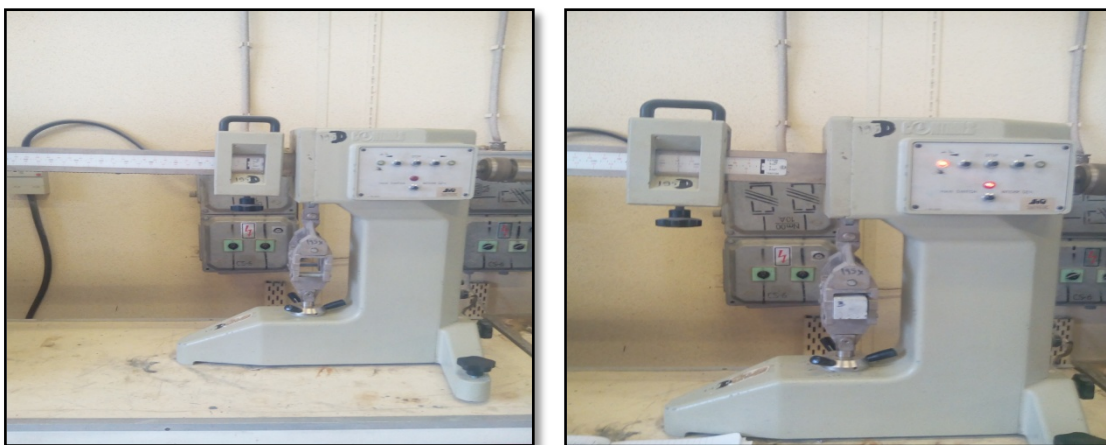


Figure.III.16 : Appareilles de essai de flexion

(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)

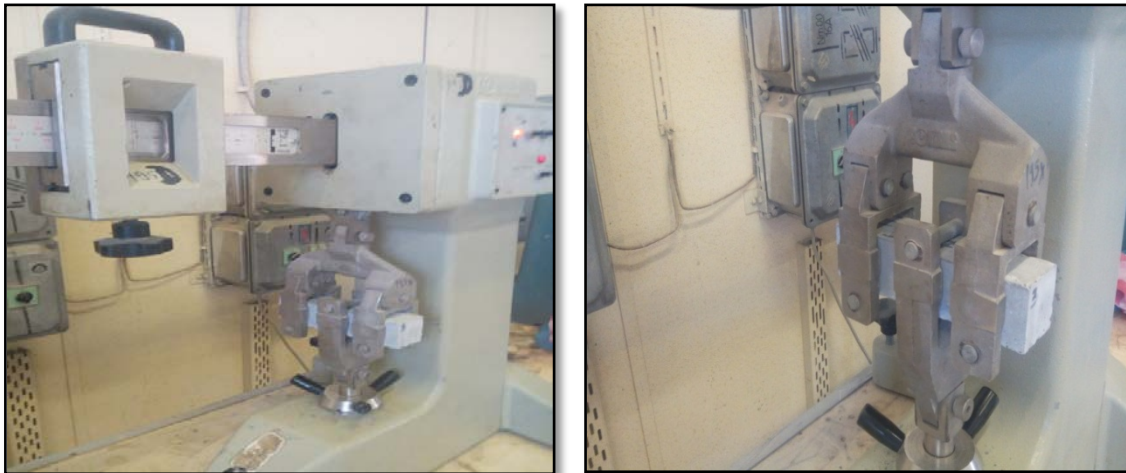


Figure .III.17: La position de l'éprouvette dans la appareil.
(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)

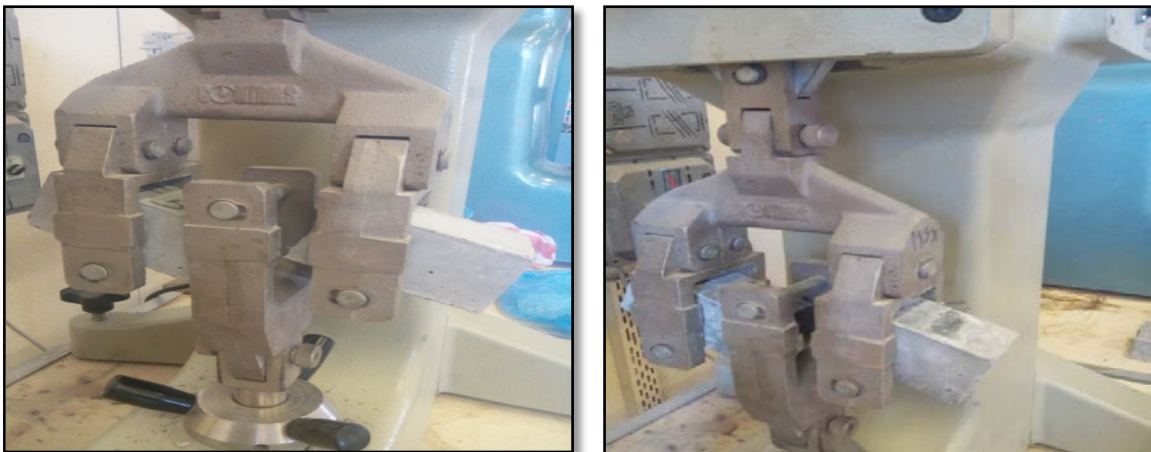


Figure .III.18 : Éprouvette brisée.

(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)

III. 6.2. Essai de compression simple

Les deux demi-prismes obtenus après rupture sont testés en compression.

L'essai à la compression est réalisé par une presse hydraulique (Figure III.14). L'éprouvette est placée au milieu du plateau de la presse. La surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm^2 : $(4 \times 4 \text{ cm}^2)$. L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en KN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai.

La résistance à la compression est la moyenne arithmétique des valeurs déterminées par six essais ; cette résistance est donnée par la relation : $R_c = \frac{P}{s}$

Où :

R_c : Résistance à la compression;

P : charge de rupture ;

S : section de l'éprouvette.

Pour cet essai, plusieurs conditions doivent être remplies :

- Les faces de l'éprouvette qui sont en contact de la presse doivent être bien planes et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette ;
- La ligne d'application de la force doit coïncider avec l'axe de l'éprouvette ;
- La vitesse de la force d'application doit croître régulièrement, ni trop vite ni trop lentement afin d'éliminer les effets de chocs et de fluage.

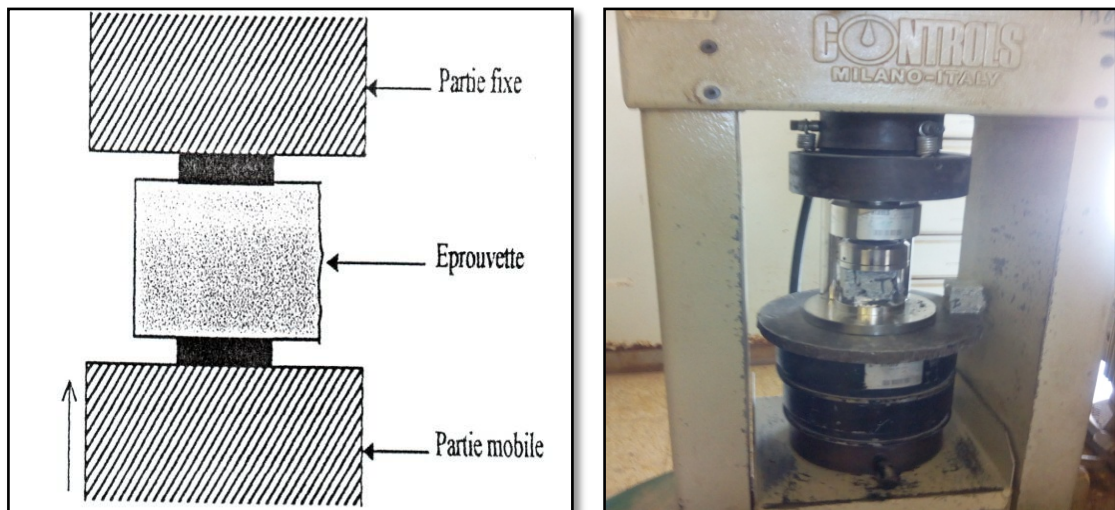


Figure .III.19 : Appareil d'essai de compression sur éprouvette $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$.

(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)



Figure .III.20 : la position de l'éprouvette dans l'appareille.

(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)

II.7.Durabilité :

II.7.1.Introduction :

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performance mécanique dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

III.7.2. Action des eaux agressives :

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), on peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, En particulier sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification dessiccation,...) ou mécaniques.

Le sulfate de sodium, très soluble, entraîne une dégradation par formation de gypse et D'étrangeté expansive dont les proportions relatives sont fonction à la fois de la concentration de SO_4^{2-} et de la teneur en aluminates tricalcique du ciment.

Il faut déterminer le coefficient de qualité (A) qui est défini par la formule suivante:

$$A = \frac{R_s}{R_{ep}}$$

R_s : Résistance à la compression de ciment immergé dans différentes solutions agressives ;

R_{ep} : Résistance à la compression de ciment immergé dans l'eau potable.

Le ciment est d'autant plus durable que le coefficient de qualité est plus élevé La résistance aux eaux agressives est déterminée avec un rapport fixe ($E/L = 0,50$). Le durcissement des éprouvettes se fait dans les conditions naturelles (cure sous l'eau), puis les mortiers durcis sont immergées séparément pendant 28j dans les solutions suivantes : Eau potable, eau avec 5 % Na_2SO_4 .



Figure.III.21 : Le sulfate de sodium(Na_2SO_4).

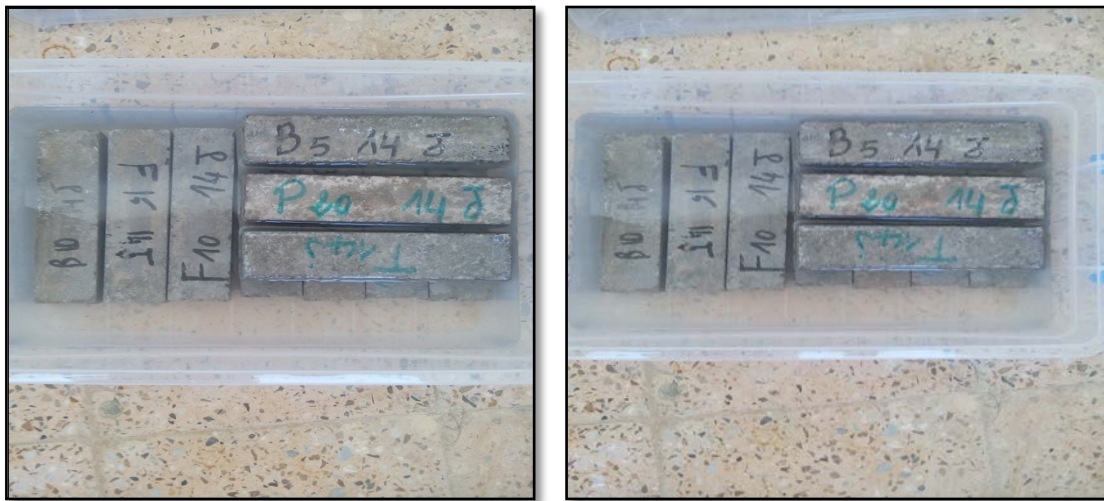


Figure.III.22 : les éprouvettes dans milieu agressive.

(Laboratoire de l'université Mohamed Khider Biskra)

III.8.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.

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



chapitre VI
Résultats et discussions

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur le mortier conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus.

Les taux d'incorporation des ajouts sont choisis sur la base d'une recherche bibliographique des études précédentes, Ces résultats portent sur les résistances mécaniques (compression, traction par flexion et flexion) aux échéances 7- 14 et 28 jours, et la durabilité des mortiers émergés dans la solution Na_2SO_4 .

IV.2. Résultats de l'essai mécaniques :

IV.2.1. Résistance à la compression :

a. Effet de filler calcaire :

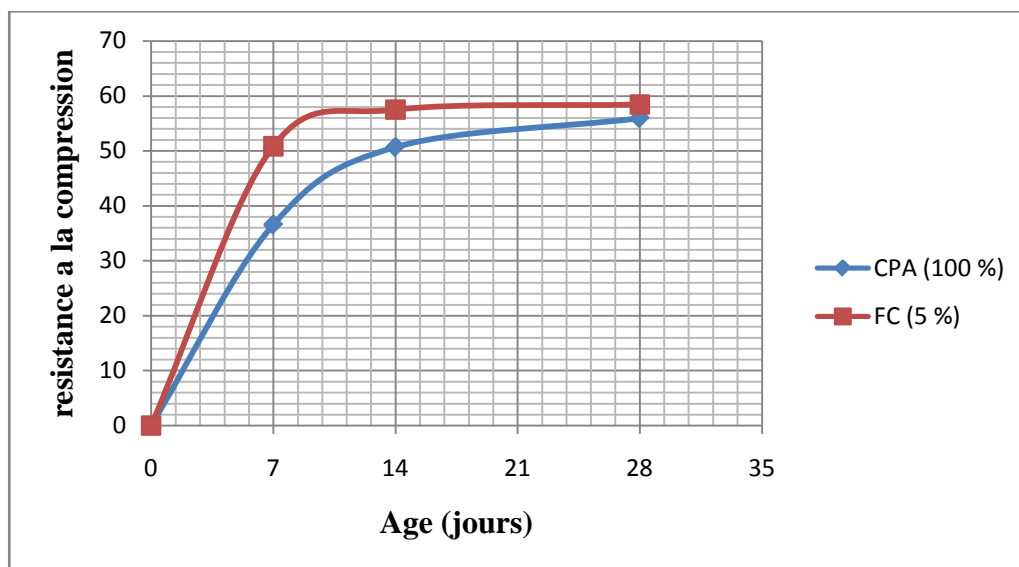


Figure .IV.1: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de filler calcaire.

La figure (IV.1) présente l'effet des fillers calcaires sur la résistance à la compression des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance du mortier avec 5% de filler calcaire augmente proportionnellement en fonction des différents âges. Cette résistance est supérieure avec des taux (28% ,11%, 4%) par rapport à celle de mortier témoin à l'âge 7,14 et 28jours successivement.

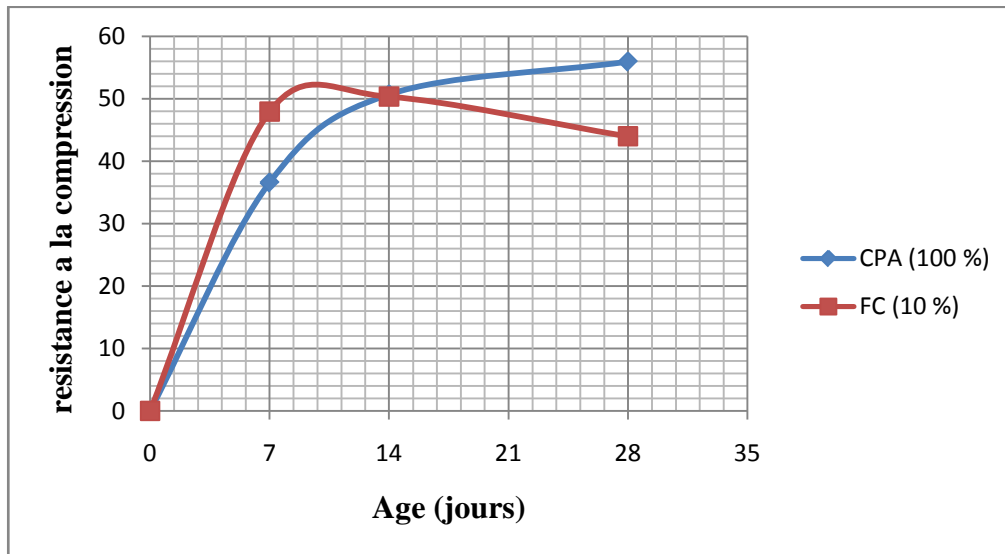


Figure .IV.2: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.

La figure (IV.2) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 10% de filler calcaire aux différents âges : 7 – 14 et à long terme 28j.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 7 et 14 jours. Cette résistance est supérieure avec un taux de (31%) par rapport au mortier témoin à l'âge de 7 j.

Par contre cette résistance reste légèrement inférieure avec des taux (7% ; 21%) par rapport au mortier témoin aux âges de 14, 28 jours successivement.

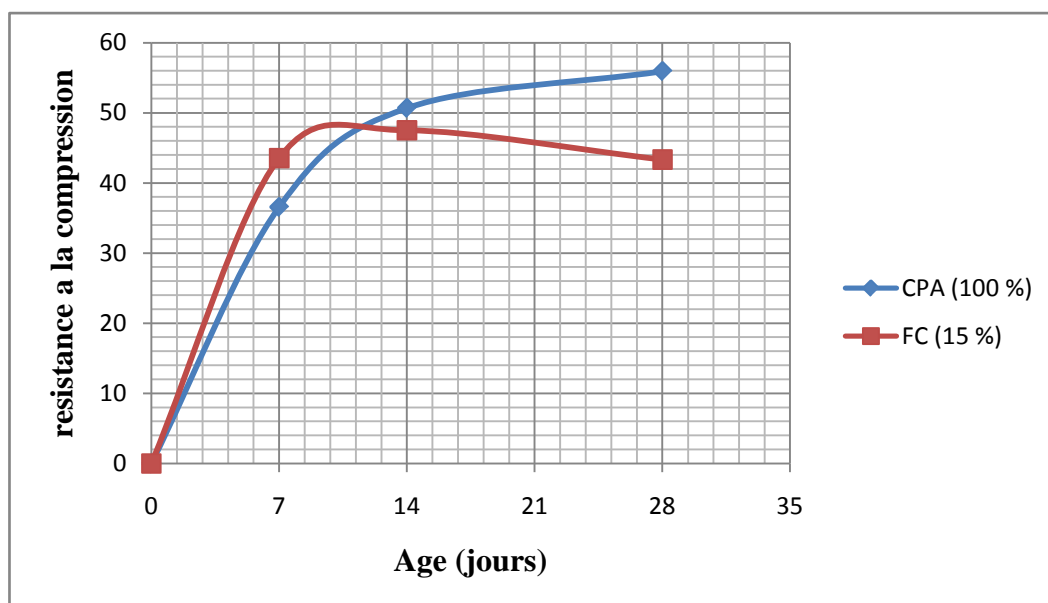


Figure .IV.3: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de filler calcaire.

La figure (IV.3) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 15% de filler calcaire aux différents âges : 7 – 14 et à moyenne terme 28j.

On remarque que cette résistance est supérieure avec un taux (16%) par rapport au mortier témoin à l'âge de 7 jours.

Par contre cette résistance reste légèrement inférieure avec des taux (6%,22%) par rapport au mortier témoin aux âges de 14, 28jours successivement.

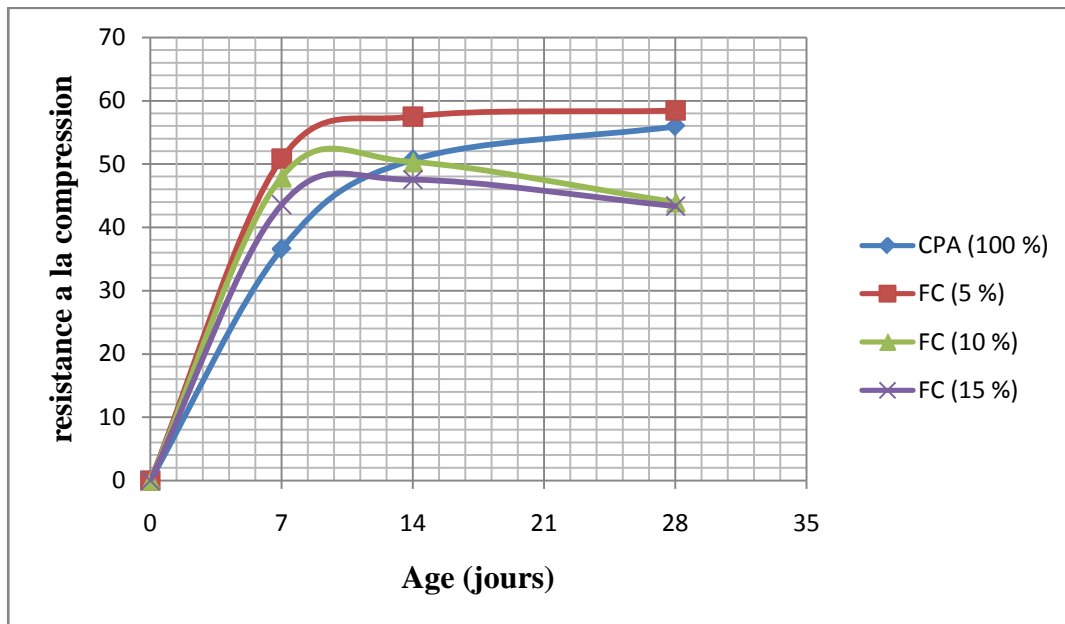


Figure .IV.4: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de filler calcaire.

La figure (IV.4) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant les différents pourcentages de filler calcaire aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Nous constatons que l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant les fillers calcaires augmente en fonction de l'âge et présente une chute pour les taux de 10% et 15% jusqu'à l'âge de 28 jours. Ainsi, nous remarquons que la résistance à la compression est maximale pour le mortier avec 5% de filler à l'âge de 28 jours.

La résistance à la compression au moyen terme diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

b. Effet de pouzzolane :

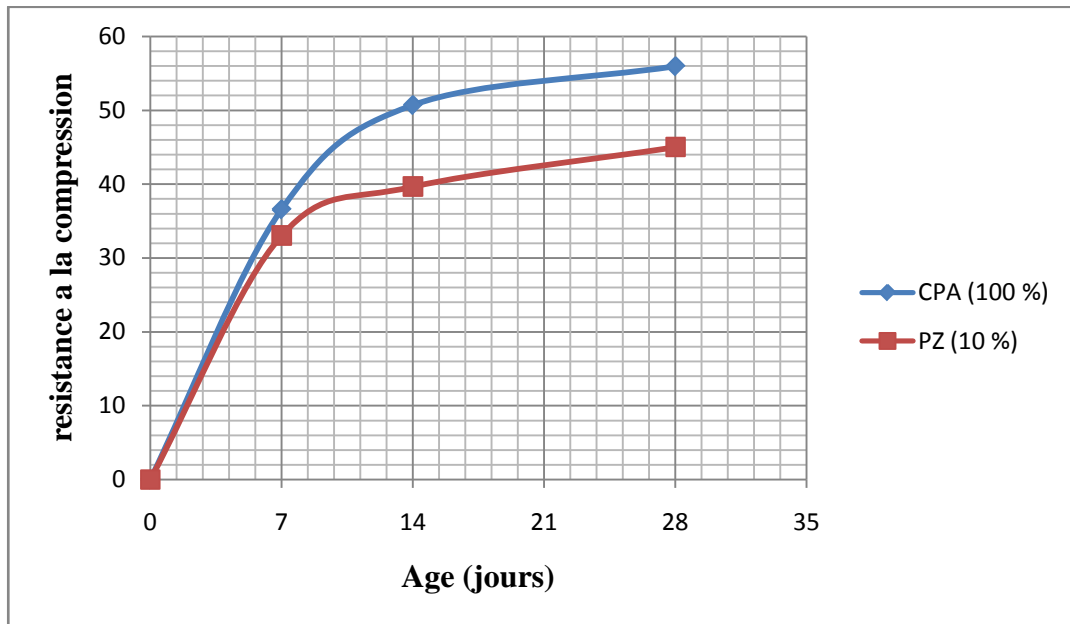


Figure .IV.5: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de pouzzolane naturelle.

La figure (IV.5) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant le taux de 10% de pouzzolane naturelle aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance du mortier avec 10% de pouzzolane naturelle augmente proportionnellement en fonction de temps, cette résistance est inférieure avec des taux (9%,21%,19%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7, 14, 28, jours successivement.

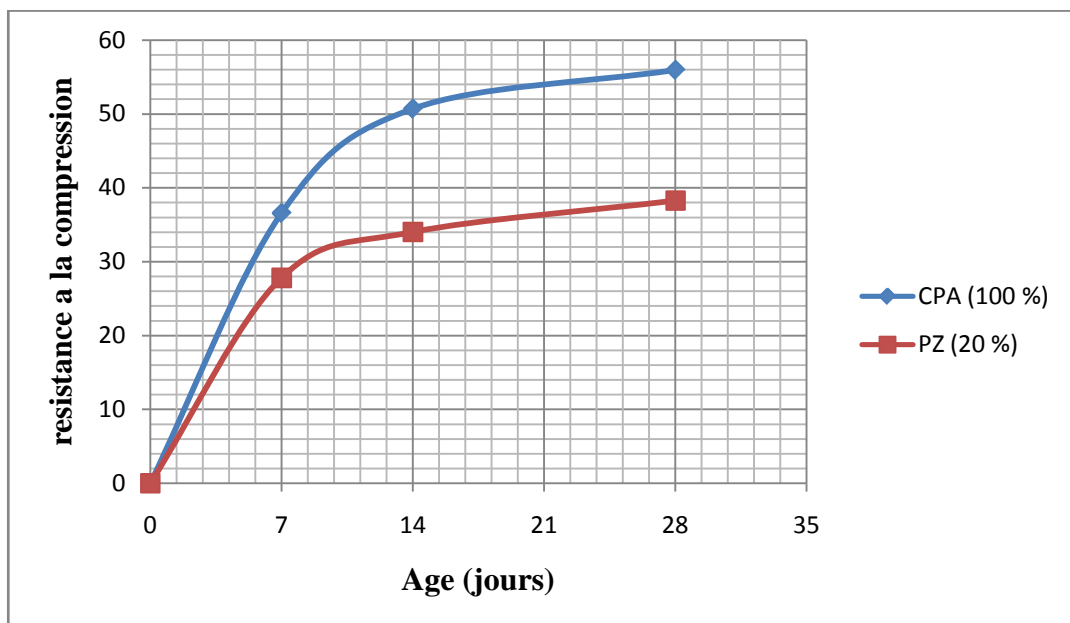


Figure .IV.6: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane naturelle.

La figure (IV.6) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers Contenant le taux de 10% de pouzzolane naturelle aux différents âges : 7 – 14 et à long terme 28j.

On remarque que la résistance a la compression du mortier avec 20% de pouzzolane naturelle augmente proportionnellement en fonction de temps, cette résistance est inférieure avec des taux (23%,32%,31%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7, 14, 28, jours successivement.

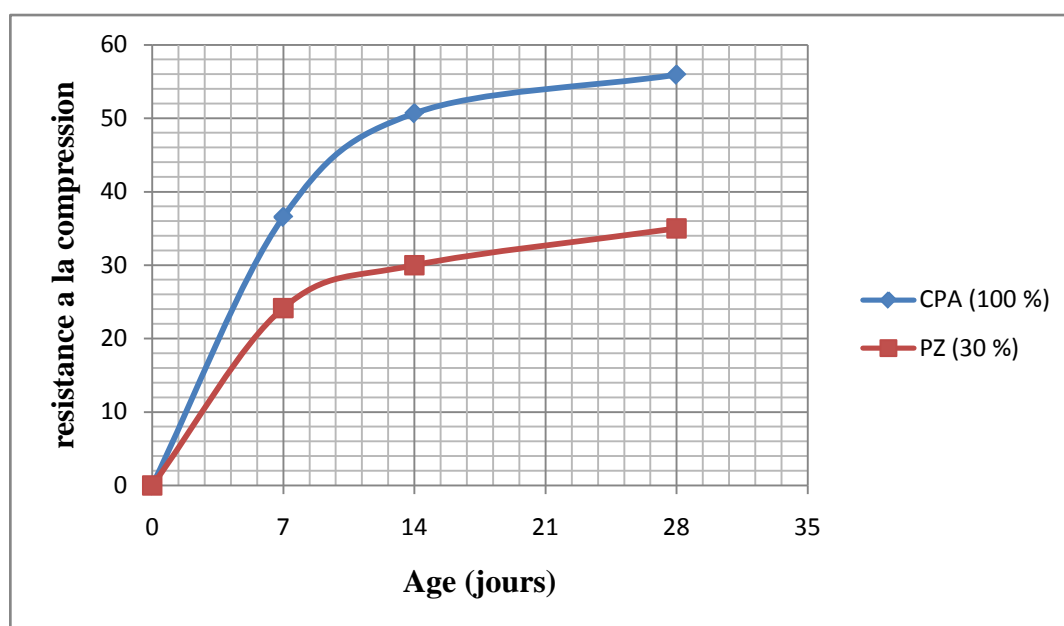


Figure .IV.7: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane naturelle.

La figure (IV.7) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers Contenant le taux de 30% de pouzzolane naturelle aux différents âges : 7 – 14 et à long terme 28j.

On remarque que la résistance du mortier avec 30% de pouzzolane naturelle augmente proportionnellement en fonction de temps, cette résistance est inférieure avec des taux (33%,40%,37%,) par rapport au mortier témoin a l'âge 7, 14, 28, jours successivement.

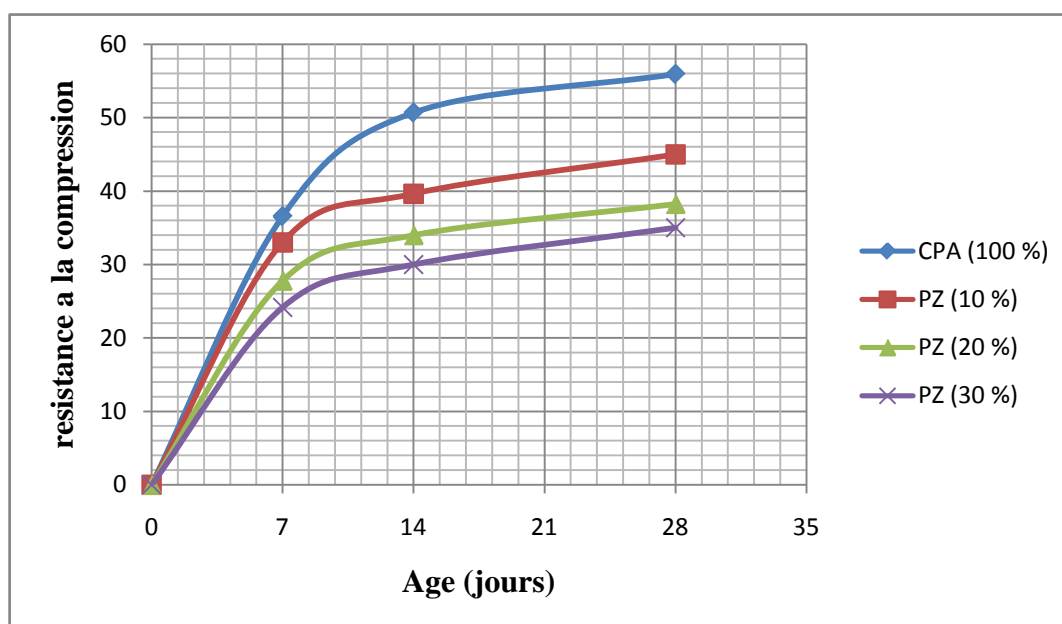


Figure .IV.8: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane naturelle.

La figure (IV.8) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant différents pourcentages de pouzzolane naturelle aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Nous constatons que l'évolution de la résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant la pouzzolane naturelle augmente en fonction de l'âge et ne présente aucune chute. Ainsi, nous remarquons que la résistance à la compression est maximale pour le mortier avec 10% de pouzzolane.

La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Mais cette résistance reste inférieure à celle de mortier témoin pour les 3 pourcentages.

c. Effet de barytine :

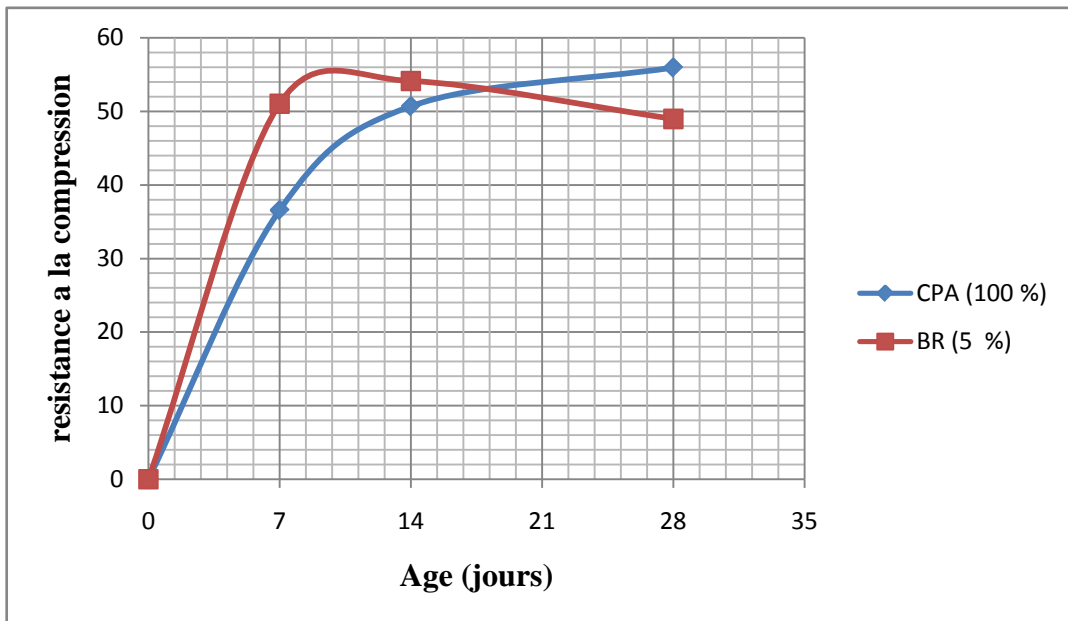


Figure .IV.9: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.

La figure (IV.9) présente l'effet de 5% de barytine sur la résistance à la compression des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance à la compression du mortier avec 5% barytine augmente proportionnellement par rapport à l'âge de 7 et 14jours. Cette résistance est supérieure avec des taux (39%,6%) par rapport à celle de mortier témoin à l'âge 7,14jours successivement. Mais cette résistance est diminuée jusqu'à une valeur inférieure à celle du mortier témoin avec un taux de 12% a l'âge de 28 jours.

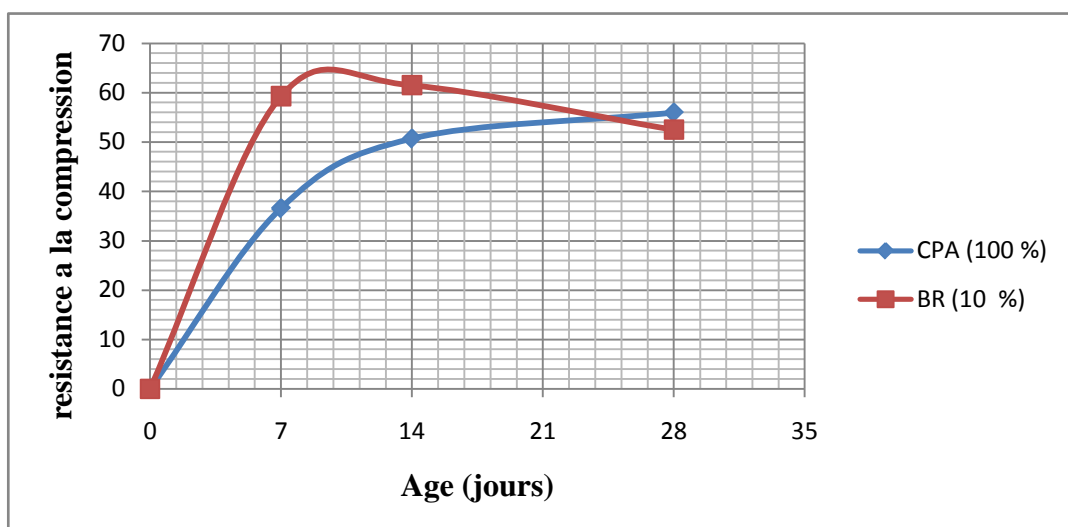


Figure .IV.10: Évolution de résistance a la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.

La figure (IV.10) présente l'effet de 10% de barytine sur la résistance à la compression des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance du mortier avec 10% barytine augmente proportionnellement en fonction de temps jusqu'à l'âge de 14jours. Cette résistance est supérieure avec des taux (62%,21%) par rapport à celle de mortier témoin à l'âge 7,14jours successivement. Mais cette résistance est diminuée pour attendre une valeur inférieure à celle de mortier témoin avec un taux de 6% à l'âge de 28 jours.

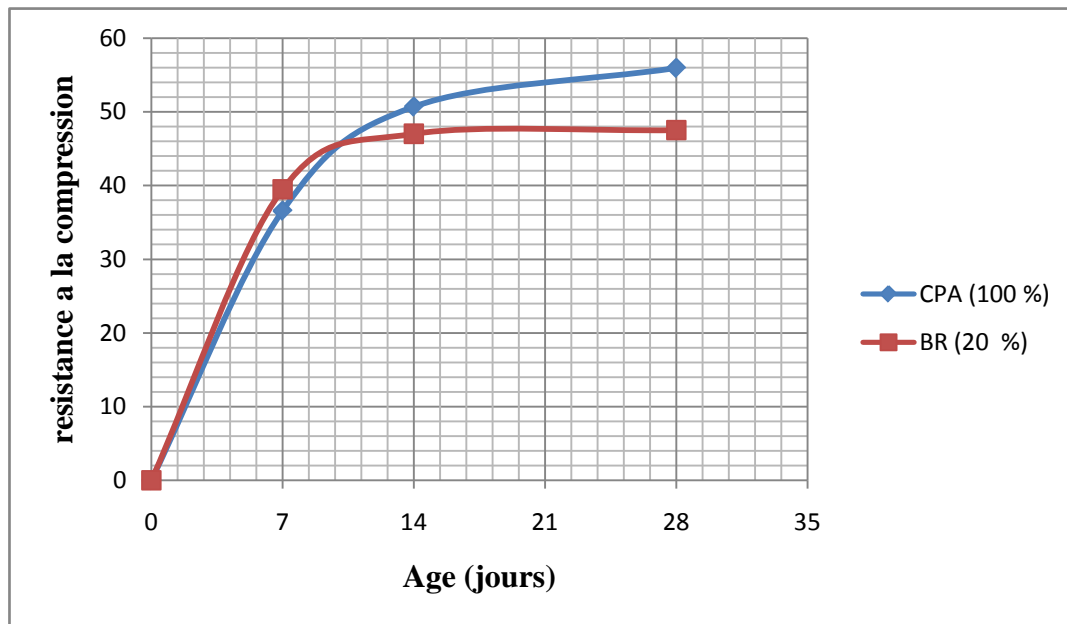


Figure .IV.11: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.

La figure (IV.11) présente l'effet de 20% de barytine sur la résistance à la compression des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance du mortier avec 20% de barytine augmente proportionnellement en fonction de temps. Cette résistance est légèrement supérieure avec des taux (7%) par rapport à celle de mortier témoin à 7jours. Mais cette résistance est inférieure à celle de mortier témoin avec des taux (7% ; 15%) à 14 et 28 jours successivement.

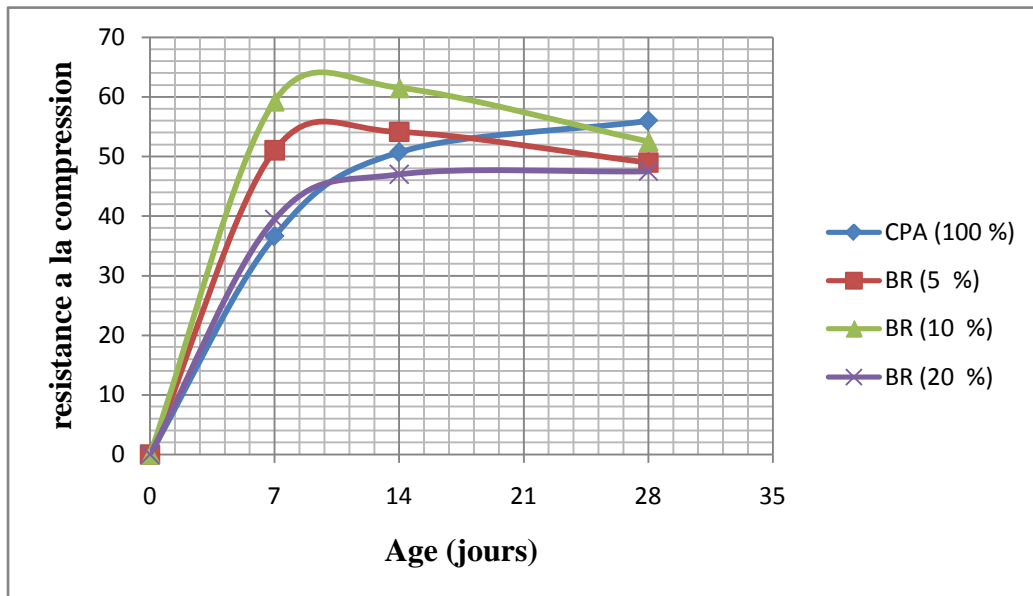


Figure .IV.12: Évolution de résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.

La figure (IV.12) présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers Contenant différents pourcentages de barytine aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Nous constatons que l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contant la barytine augmente en fonction de l'âge, mais elle présente une chute après l'âge de 14j. Ainsi, nous remarquons que la résistance à la compression est maximale pour le mortier avec 10% de barytine.

IV.2.2. Résistance à la traction par flexion :

a. Effet de filler calcaire:

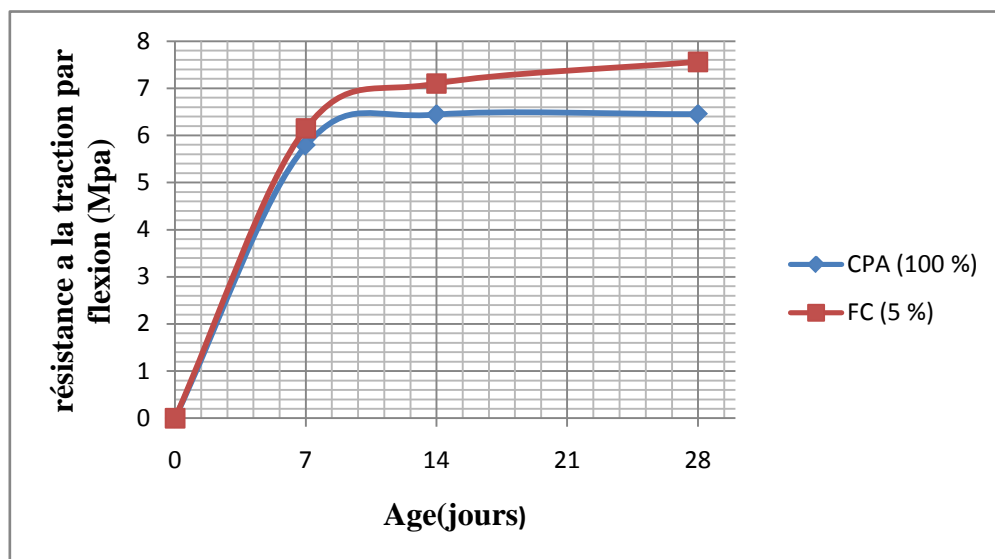


Figure .IV.13: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de fillers calcaires.

La figure (IV.13) présente l'effet de 5% des fillers calcaires sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance à la traction du mortier avec 5% filler calcaire augmente proportionnellement par rapport aux différents âges. Cette résistance est supérieure de 6% par rapport à celle de mortier témoin à l'âge 7jours, 10% à l'âge de 14 jours et 17% à l'âge de 28 jours.

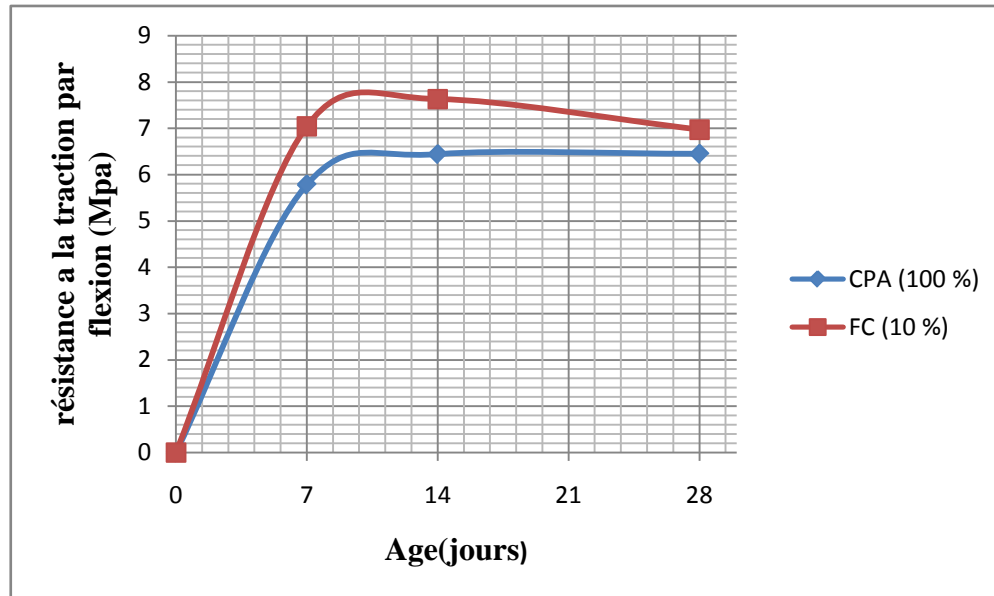


Figure .IV.14: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de fillers calcaires.

La figure (IV.14) présente l'effet de 10% des fillers calcaires sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance à la traction du mortier avec 10% de filler calcaire augmente proportionnellement par rapport aux différents âges. Cette résistance est supérieure à celle de mortier témoin avec des taux de 21% a 7jours ; 18% a 14jours et 8% a 28jours.

Mais cette résistance représente une chute après l'âge de 14jours.

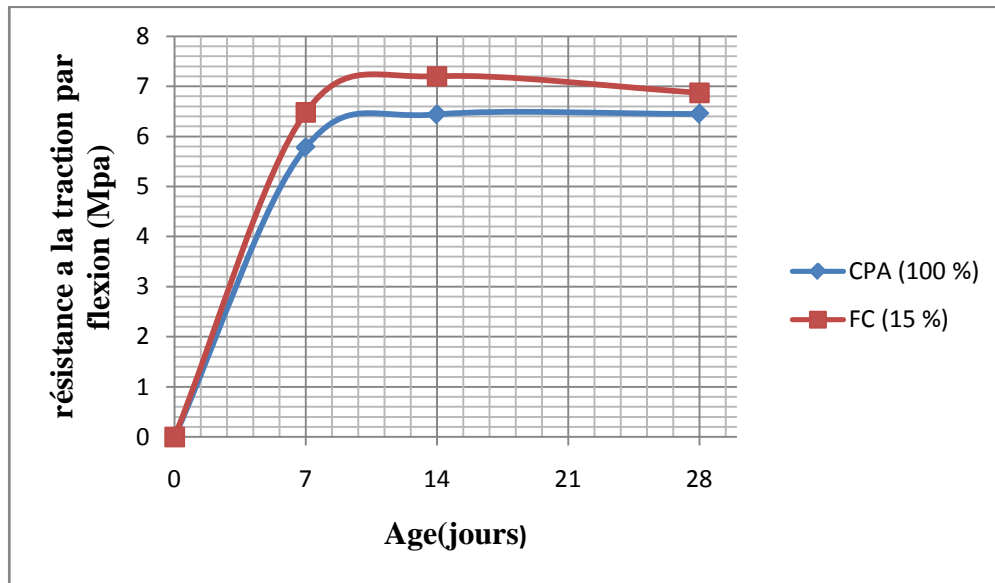


Figure .IV.15: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de fillers calcaires.

La figure (IV.15) présente l'effet de 15% des fillers calcaires sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

On remarque que la résistance à la traction du mortier avec 15% filler calcaire augmente proportionnellement par rapport aux différents âges. cette résistance est supérieure à celle de mortier témoin avec des taux de 12% a 7 jours 11% a 14jours et 6% a 28jours.

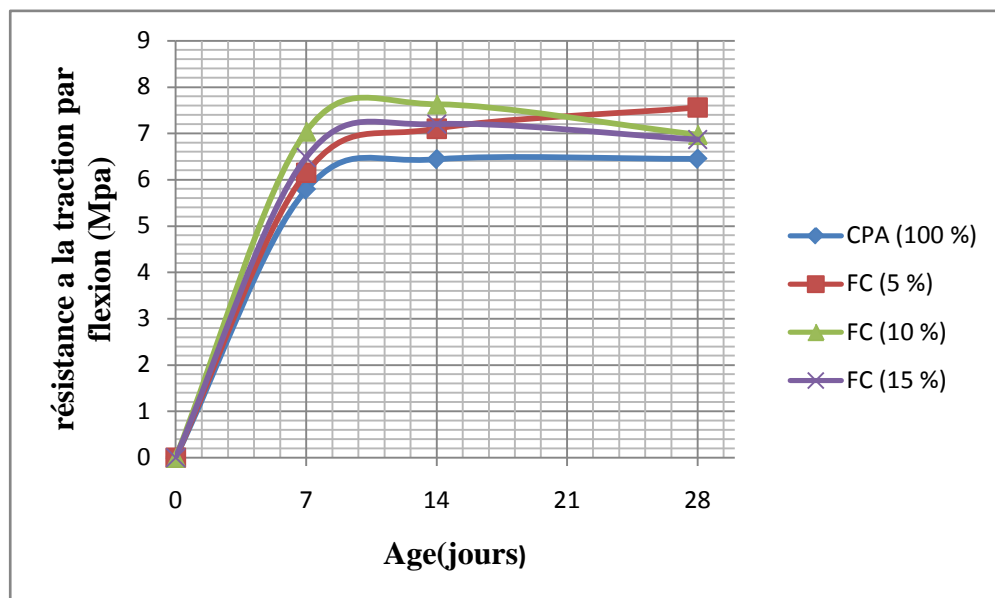


Figure .IV.16: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de fillers calcaires.

La figure (IV.16) présente l'effet des fillers calcaires sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Nous constatons que l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant les fillers calcaires augmente en fonction de l'âge et présente une chute pour les taux de 10% et 15% jusqu'à l'âge de 28 jours. Ainsi, nous remarquons que la résistance à la traction est maximale pour le mortier avec 5% de filler à l'âge de 28 jours.

La résistance à la traction au moyen terme diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

b. Effet da pouzzolane :

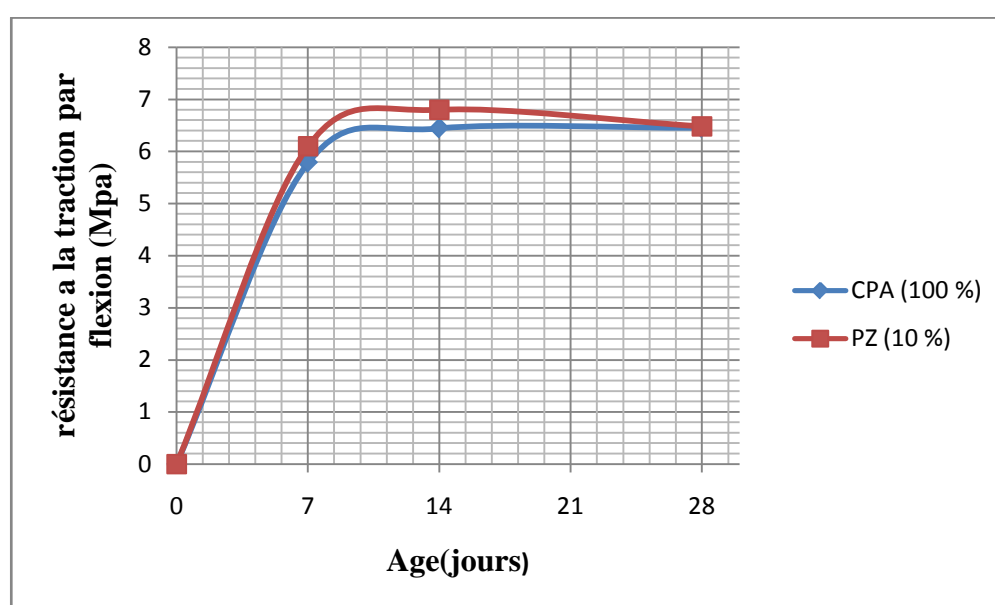


Figure .IV.17: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de pouzzolane naturelle.

La figure (IV.17) présente l'effet de 10% de pouzzolane sur la résistance à la traction des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarquant que la résistance a la traction des mortiers qui contiennent 10% de pouzzolane est légèrement supérieure à celle de mortier témoin avec un taux de 5% à court terme mais la résistance diminue a l'âge de 28 jours.

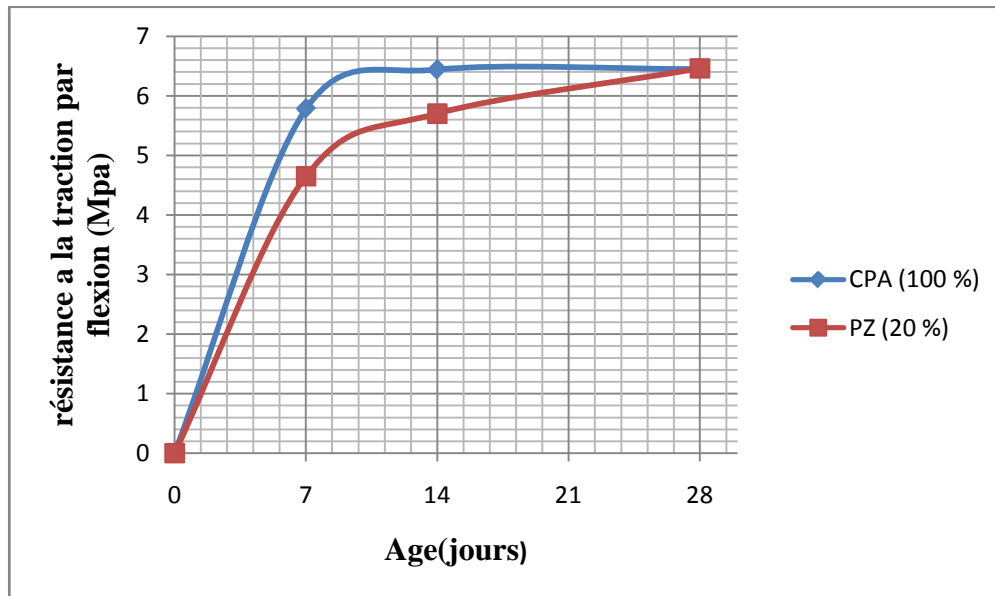


Figure .IV.18: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane.

La figure (IV.18) présente l'effet de 20% de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 7, 14 et 28jours. Cette résistance est inférieure avec des taux (19%,11%, 0.15%) par rapport au mortier témoin aux âges de 7 ,14 et 28j successivement.

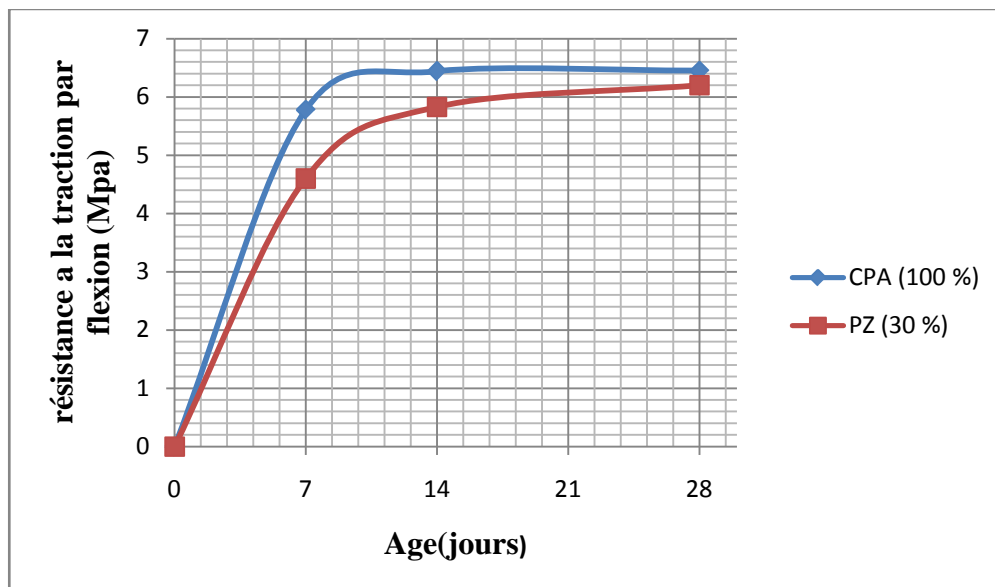


Figure .IV.19: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane.

La figure (IV.19) présente l'effet de 30% de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure ; on remarque que ces mortiers développent des résistances qui augmentent proportionnellement aux âges 7, 14 et 28 jours. Cette résistance est inférieure avec des taux (20%, 9%, 3%) par rapport au mortier témoin aux âges de 7, 14 et 28j successivement.

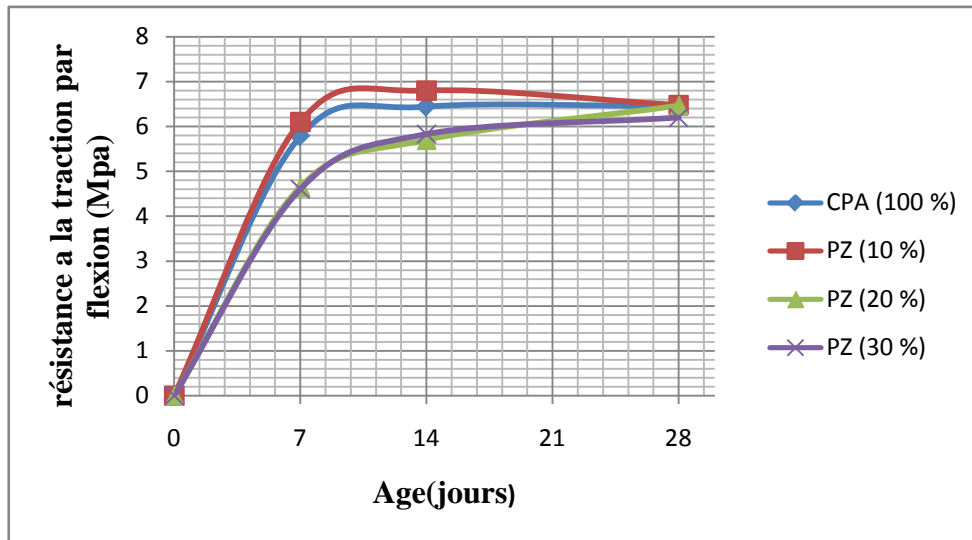


Figure .IV.20: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane.

La figure (IV.20) présente l'effet de différents pourcentages de pouzzolane sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge jusqu'à 14 jours mais après 14j cette résistance diminue légèrement à 28j, cette résistance reste supérieure à celle du mortier témoin pour l'ajout de 10% de pouzzolane.

c. Effet de barytine :

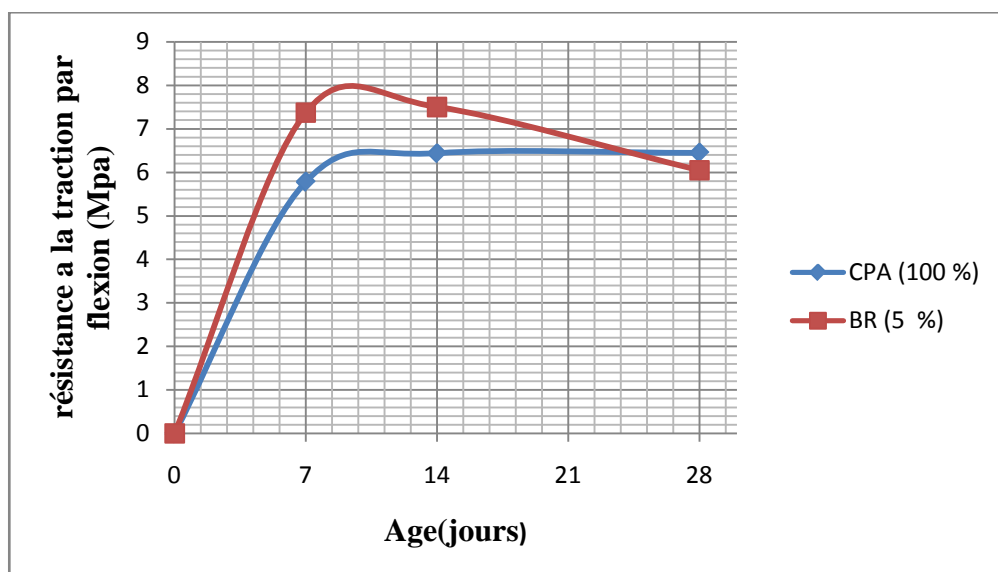


Figure .IV.21: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.

La figure (IV.21) présente l'effet de 5% de barytine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

La figure montre que la résistance a la traction des mortier avec 5% de barytine est supérieur a celle de mortier témoin avec des taux de (27%, 16%) aux âges de 7 et14 j successivement, mais cette résistance commence diminuer pour atteindre une valeur inferieur a celle de mortier témoin avec un taux de 6% a l'âge de 28j.

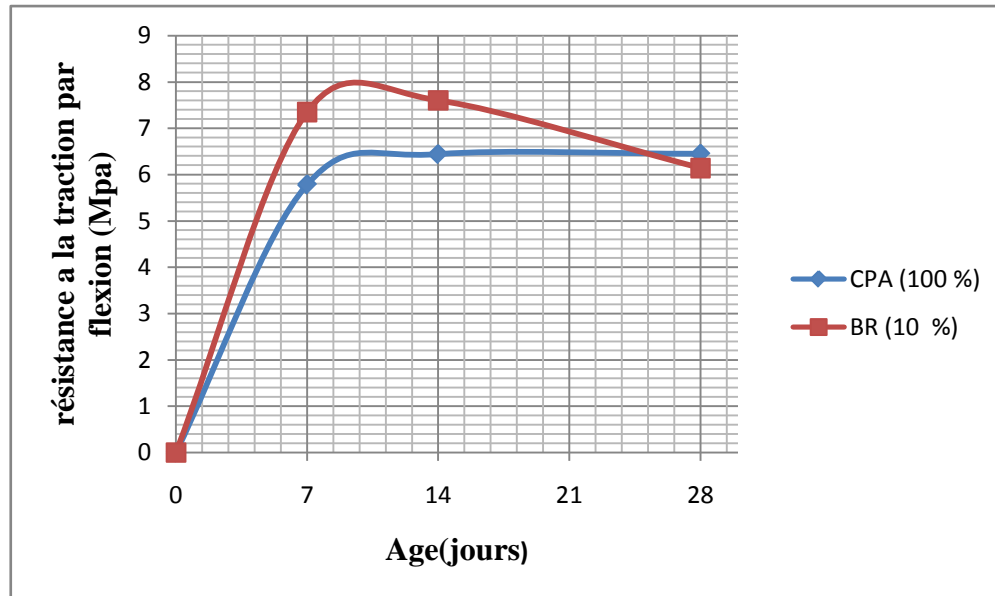


Figure .IV.22: Évolution de résistance a la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.

La figure (IV.22) présente l'effet de 10% de barytine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

La figure montre que la résistance a la traction avec 10% de barytine est supérieur a celle de mortier témoin avec des taux de (27%, 18%) aux âges de 7 et14 j successivement, mais cette résistance commence a diminuer pour atteindre une valeur inferieur a celle de mortier témoin avec un taux de 2% a l'âge de 28j.

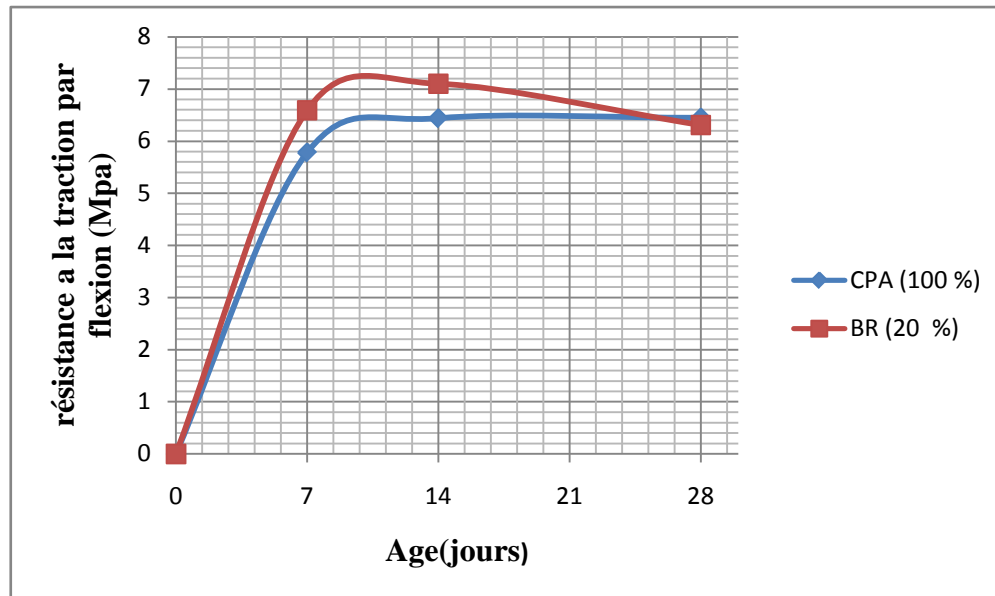


Figure IV.23: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.

La figure (IV.23) présente l'effet de 20% de barytine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

La figure montre que la résistance à la traction avec 10% de barytine est supérieur a celle de mortier témoin avec des taux de (14%, 10%) aux âges de 7 et 14 j successivement, mais cette résistance commence a diminuer pour atteindre une valeur inferieur a celle de mortier témoin avec un taux de 2% a l'âge de 28j.

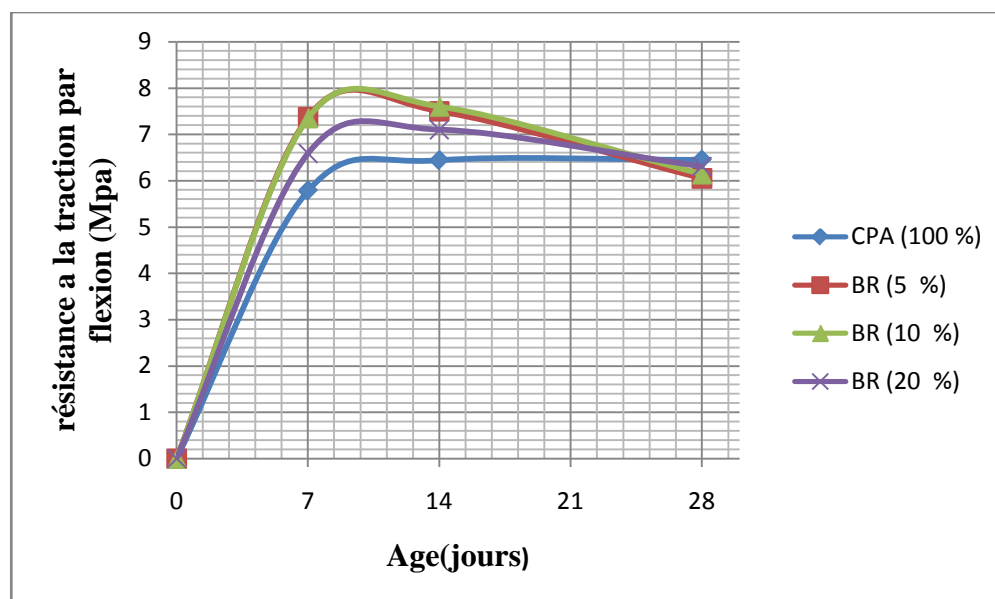


Figure .IV.24: Évolution de résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.

La figure (IV.24) présente l'effet de différents pourcentages de barytine sur la résistance à la traction par flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge jusqu'à 14 jours mais après 14j cette résistance diminue légèrement à 28j, cette résistance reste supérieure à celle du mortier témoin pour l'ajout de 5% et 10% de barytine.

IV.2.3. Résistance à la flexion :

a. Effet de filler calcaire :

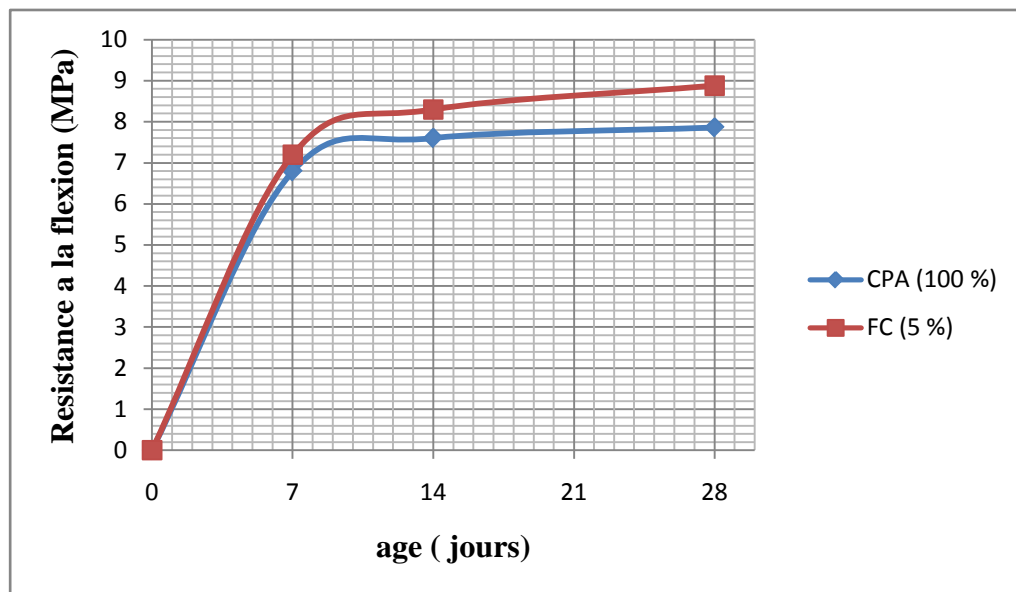


Figure .IV.25: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de filler calcaire.

La figure (IV.25) présente l'effet de 5% de filler calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure ; on remarque que cette résistance est supérieure avec des taux (6%,9%,12%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 et 28 jours successivement.

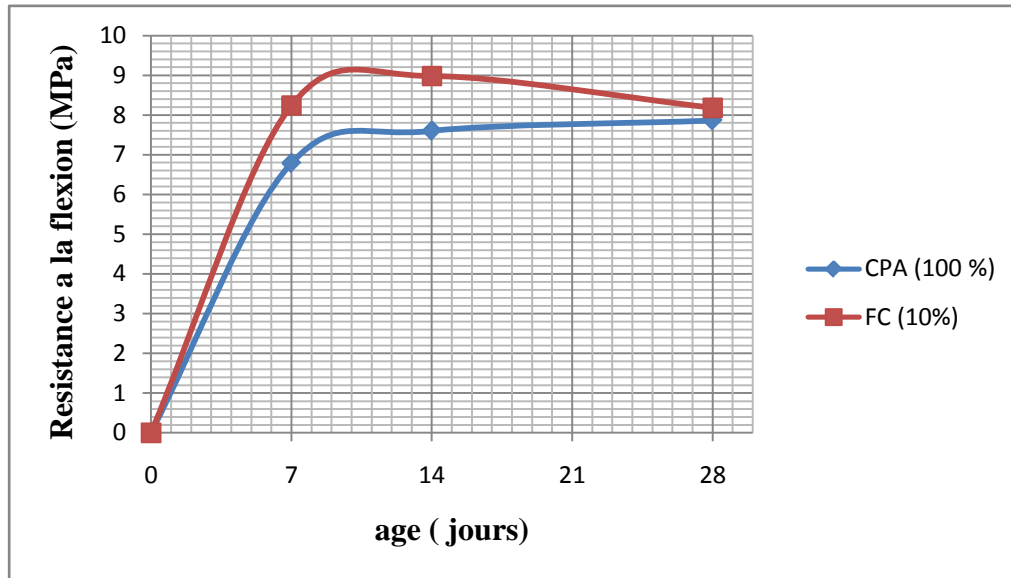


Figure .IV.26: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de filler calcaire.

La figure (IV.26) présente l'effet de 10% de filler calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure ; on remarque que cette résistance est supérieur avec des taux (21%,18%,4%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 et 28 jours successivement.

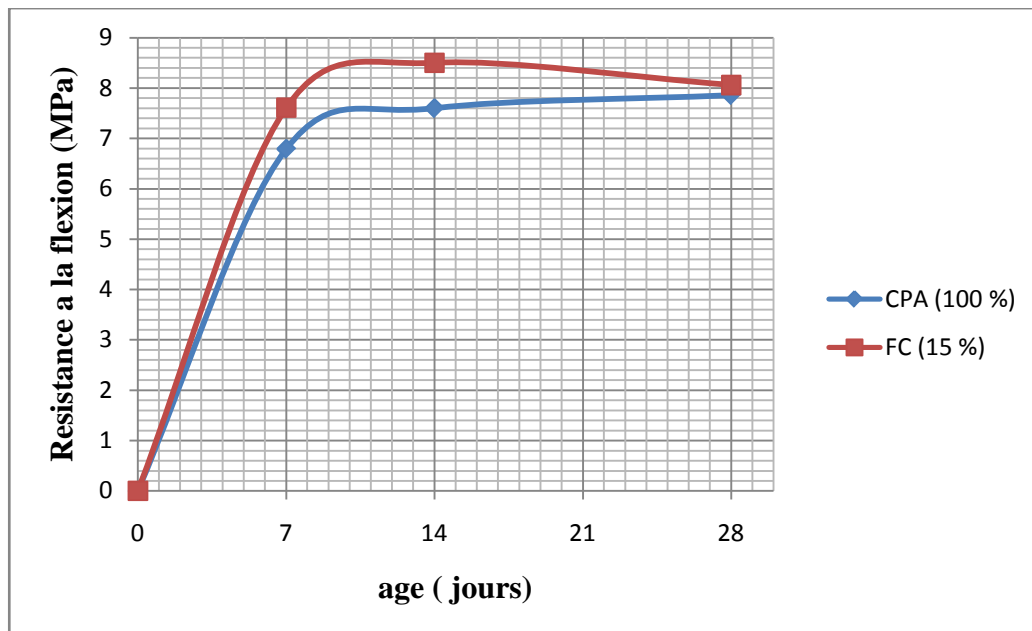


Figure .IV.27: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 15% de filler calcaire.

La figure (IV.27) présente l'effet de 15% de filler calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure ; on remarque que cette résistance est supérieure avec des taux (12%,11%,2%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 et 28 jours successivement.

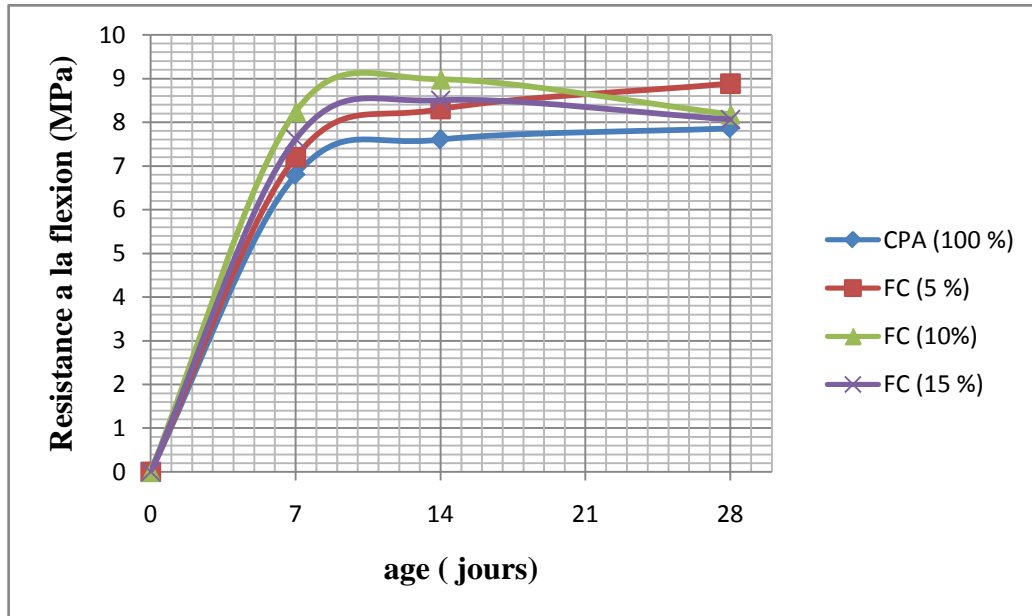


Figure .IV.28: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 15% de filler calcaire.

La figure (IV.28) présente l'effet de différents pourcentages de filler calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure on remarque une augmentation de résistance à la flexion jusqu'à l'âge de 14j puis la résistance diminue à l'âge de 28j dans le cas d'ajout de 10% et 15% et reste supérieure à celle de mortier témoin, mais la résistance de mortier avec 5% de filler calcaire reste en augmentation jusqu'à une valeur maximale à l'âge de 28j.

b. Effet de pouzzolane :

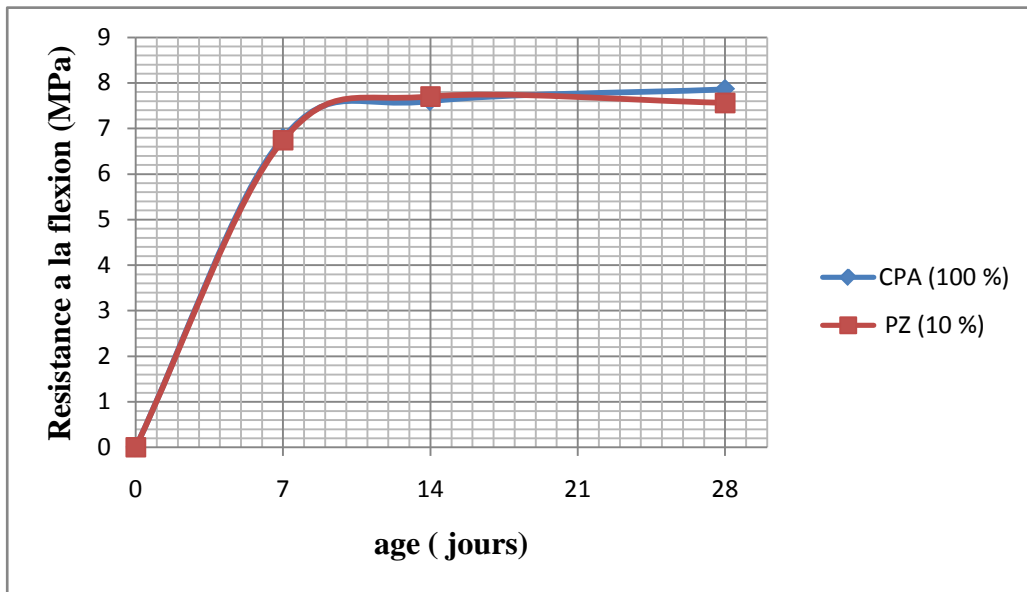


Figure .IV.29: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de pouzzolane.

La figure (IV.29) présente l'effet de 10% de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après cette figure en remarque une augmentation de la résistance à la flexion, cette résistance égale à peu près celle de mortier témoin a l'âge de 7 et 14j, mais a l'âge de 28j la résistance diminue légèrement avec un taux de 3%.

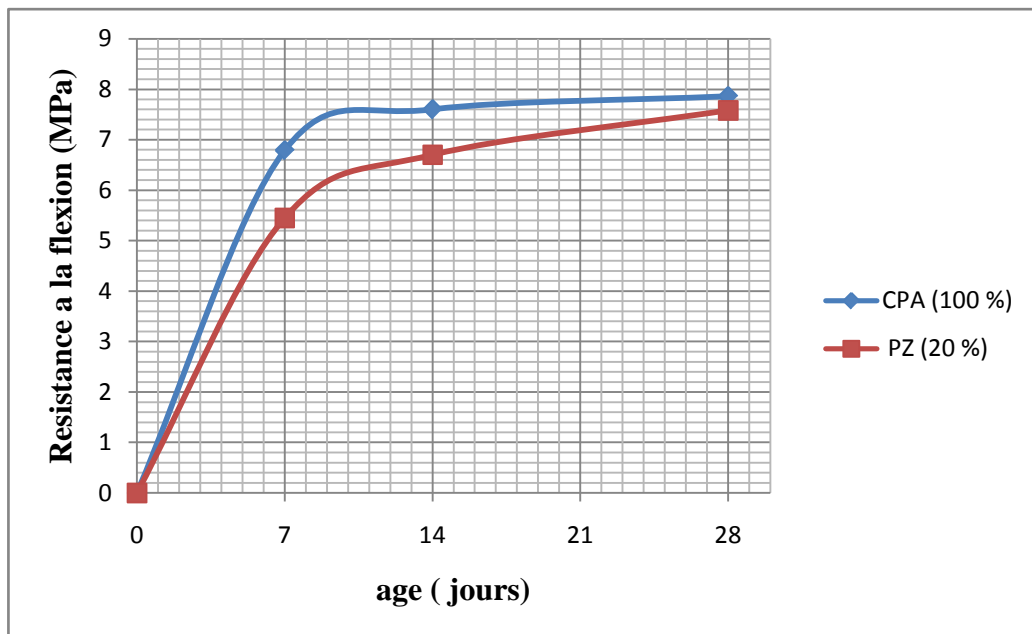


Figure .IV.30: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de pouzzolane.

La figure (IV.30) présente l'effet de 20% de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarque que la résistance a la flexion de mortier contenant 20% de pouzzolane est inferieur avec des taux (19%,11%,3%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 et 28 jours successivement.

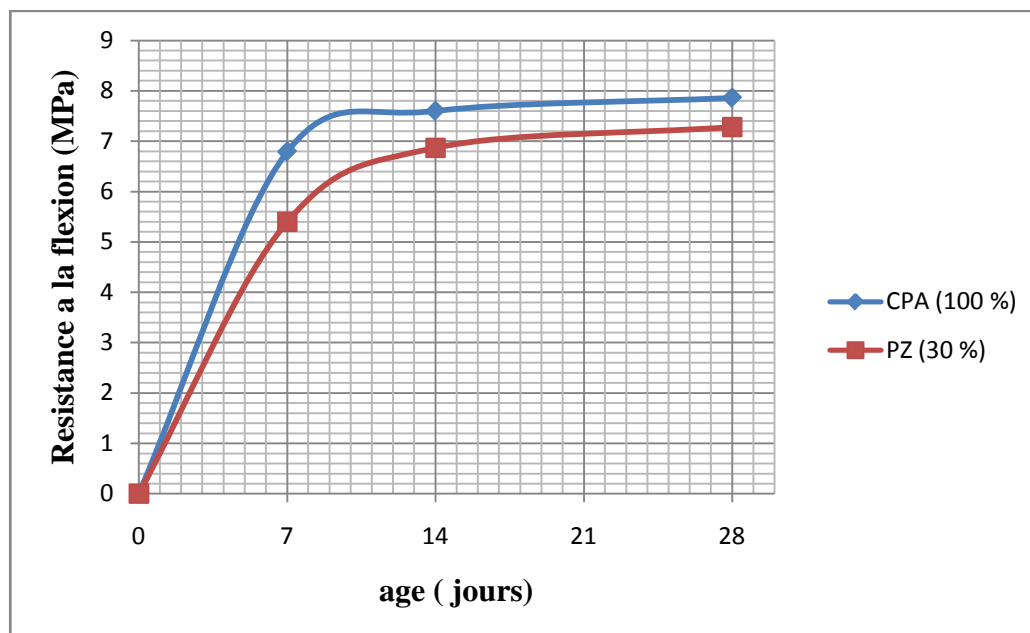


Figure .IV.31: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 30% de pouzzolane.

La figure (IV.31) présente l'effet de 30% de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarque que la résistance a la flexion de mortier contenant 30% de pouzzolane est inferieur avec des taux (20%,9%,7%,) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 et 28 jours successivement.

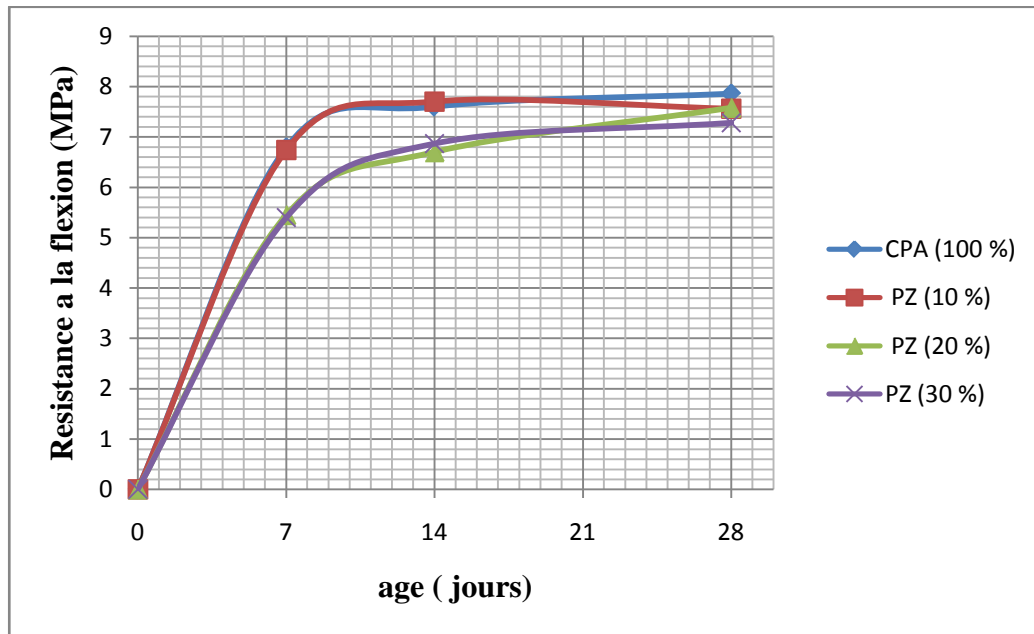


Figure .IV.32: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% ; 20% et 30% de pouzzolane.

La figure (IV.32) présente l'effet de différents pourcentages de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure on remarque que la résistance des mortiers contenant 20% et 30% de pouzzolane est inférieure à celle de mortier témoin ; par contre le mortier avec ajout de 10% de pouzzolane est similaire au mortier témoin.

c. Effet de barytine :

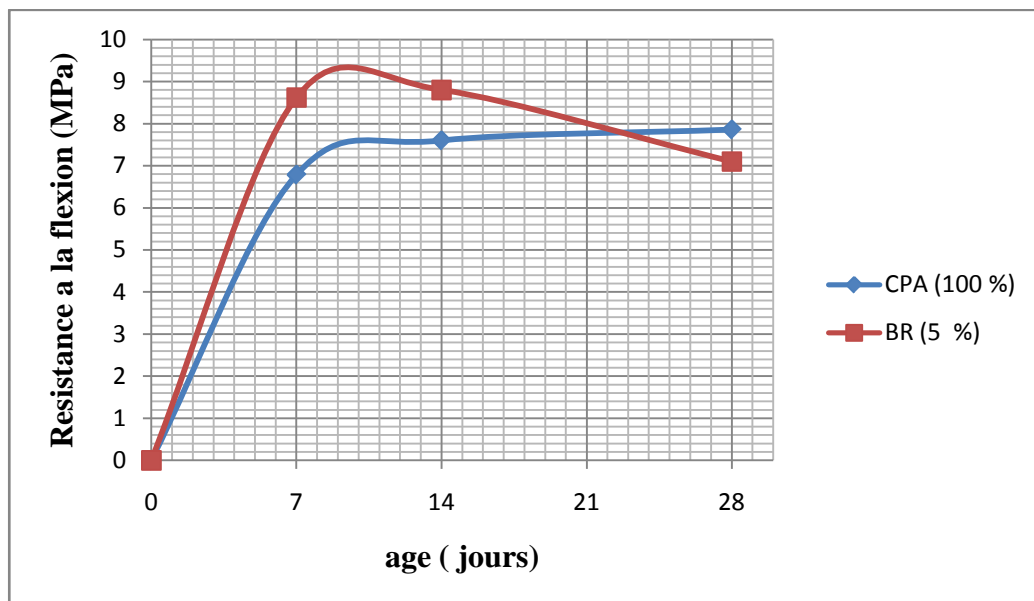


Figure .IV.33: Évolution de résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% de barytine.

La figure (IV.33) présente l'effet de 5% de barytine sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j

D'après la figure en remarque que la résistance est supérieur avec des taux de (21% ; 13%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 jours successivement, Cette résistance diminue jusqu'à ce qu'ils deviennent inférieur a celle de mortier témoin avec un taux de 9% a l'âge de 28 jours.

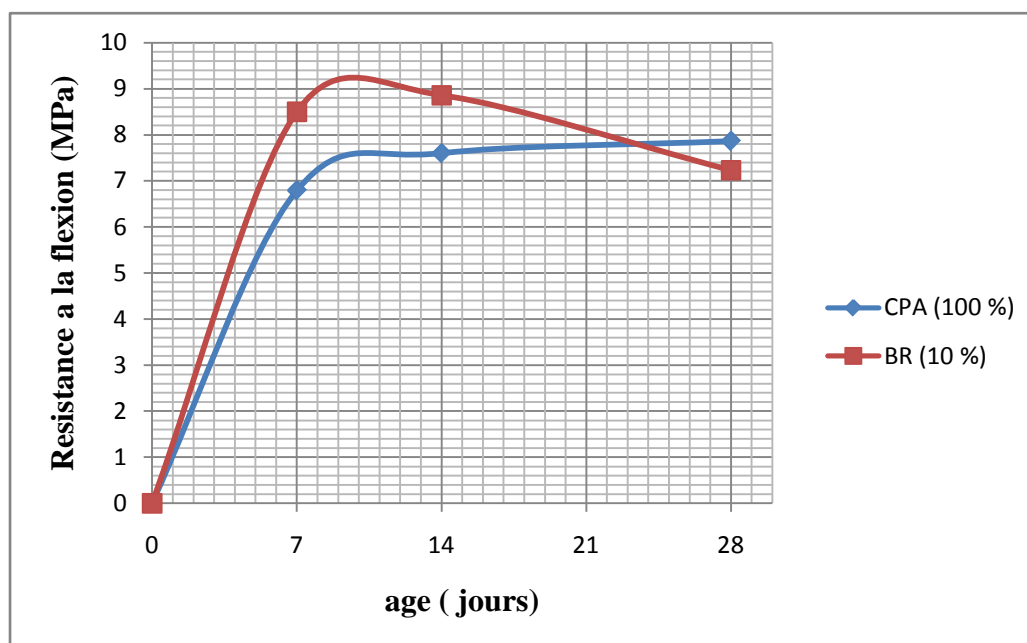


Figure .IV.34: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 10% de barytine.

La figure (IV.34) présente l'effet de 10% de barytine sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarque que la résistance a la flexion est supérieur avec des taux de (20% ; 14%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 jours successivement, Cette résistance diminue jusqu'à ce qu'ils deviennent inférieur a celle de mortier témoin avec un taux de 8% a l'âge de 28 jours.

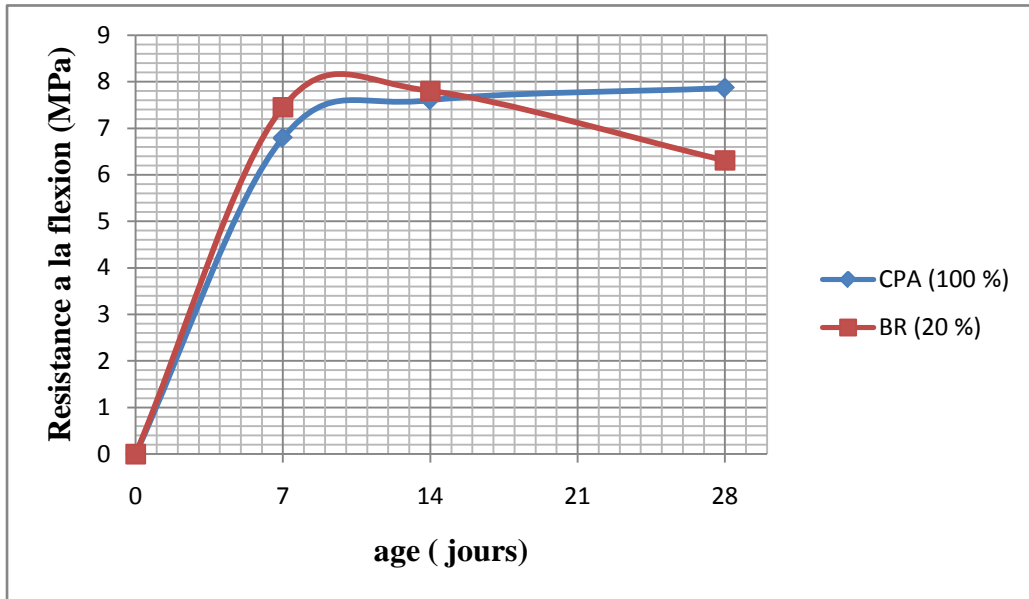


Figure .IV.35: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 20% de barytine.

La figure (IV.35) présente l'effet de 20% de barytine sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarque que la résistance est supérieur avec des taux de (8% ; 2%) par rapport au mortier témoin aux l'âge 7 ,14 jours successivement, Cette résistance diminue jusqu'à ce qu'ils deviennent inférieur a celle de mortier témoin avec un taux de 19% a l'âge de 28 jours.

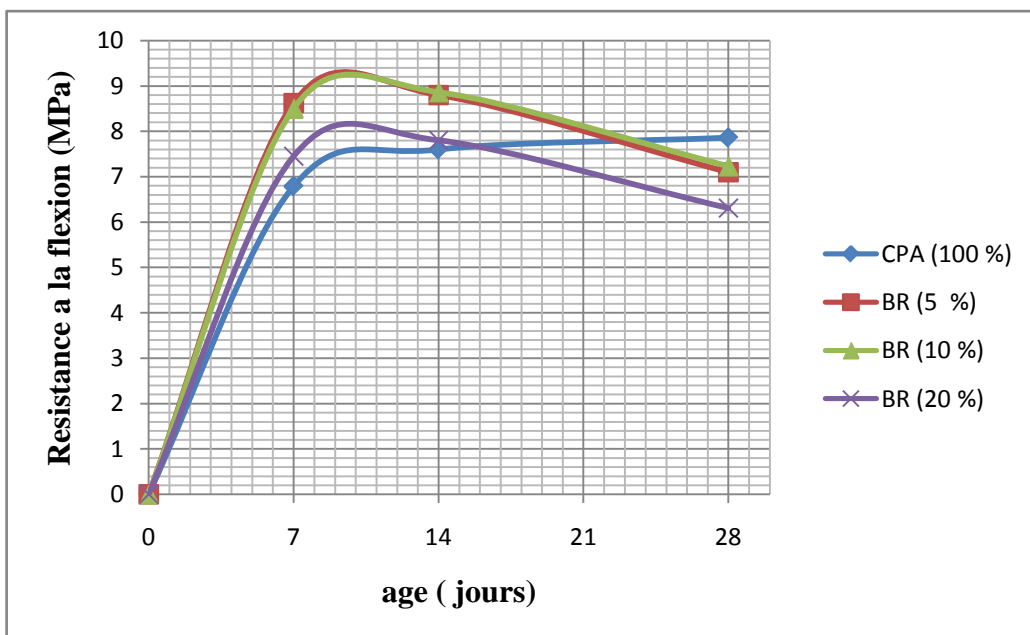


Figure. IV.36: Évolution de résistance a la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant 5% ; 10% et 20% de barytine.

La figure (IV.36) présente l'effet de différents pourcentages de pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers aux différents âges : 7 – 14 et 28j.

D'après la figure en remarque que la résistance des mortiers avec l'ajout de barytine est supérieur a celle de mortier témoin a court terme mais cette résistance représente une chute au moyenne terme.

Les résistances des mortiers avec ajout de taux de 5% et 10% de barytine sont égales.

IV.2.4. la durabilité des mortiers (Action des eaux agressives) :

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau mortier (béton). Cette propriété est définie par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue [43].

Dans cette partie nous avons illustré l'effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers :

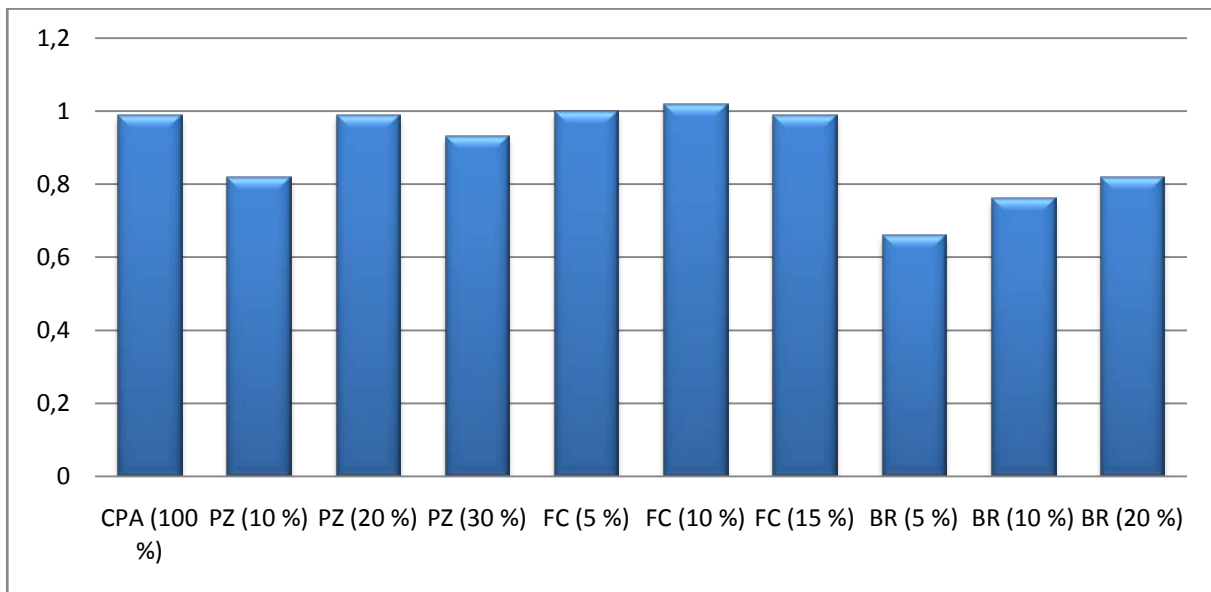


Figure. IV.37 : La variation du coefficient de qualité des mortiers immergés dans la solution Na_2SO_4 en fonction du type de ciment.

La figure (IV.37) présente la variation du coefficient de qualité de l'éprouvette immergée dans la solution Na_2SO_4 (avec une concentration de 5%) en fonction du type de ciment.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus, que le coefficient de qualité (A), dans la solution agressive, explique nettement la résistance au lessivage des ciments avec ajouts aux agents agressifs.

À 28 jours, les ciments avec ajouts se comportent mieux que le ciment Portland, puisque la pâte hydratée contient peu d'hydroxyde de calcium et donne naissance à une couche protectrice, à la surface, riche en gel de silice et d'alumine.

Les ciments immergés dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 28 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation de ciment.

IV.3.Conclusion :

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux inertes (filler calcaire et la barytine) et actifs (Pouzzolane naturelle) au ciment CPA, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des mortiers 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 moyenne terme.



***CONCLUSION
GENERALE***

Conclusion générale

Ce travail expérimental est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers par substitution partielle du ciment (C.P.A CEMI/B 42,5 ES) par l'ajout minérale, nous avons utilisé 3 types d'ajouts avec des différents taux (fillers calcaires(5% ;10% ;15%) pouzzolane naturelle(10% ;20% ;30%) barytine(5% ;10% ;20%))

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

✓ Les résistances mécaniques des mortiers augmentent lors de l'addition des fillers calcaires comme ajout traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des mortiers par double effet physique et chimique.

- L'effet physique: porte sur l'amélioration des propriétés mécaniques par un remplissage les pores et en corrigeant la granulométrie des éléments fins du ciment (L'effet inter-granulaire).

- L'effet chimique (faible): se manifeste par l'augmentation des résistances par la formation de nouveaux composés tels que les carbo-aluminates.

✓ L'incorporation de 5% des fillers calcaires au ciment CPAa un effet très efficace sur la résistance de compression et traction en fonction de temps par rapport à celle du témoin, pour cela le pourcentage recommandé pour le filler calcaire est de 5%. Cette amélioration se poursuit jusqu'à 28 jours.

✓ Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'utilisation de pouzzolane naturelle a diminué la résistance à la compression des mortiers au jeune âge par rapport au mortier témoin. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle (la vase calcinée). Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et le Ca(OH)_2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

✓ les résistances à la compression des différents mortiers sont inversement proportionnelles à la quantité de la pouzzolane substituée.

✓ L'incorporation de 10% de pouzzolane naturelle au ciment CPA, permet aussi au mortier de développer une résistance à la flexion et traction par flexionsupérieure à celle du mortier témoin.

✓ L'ajout de barytine au ciment CPA, permet au mortier de développer une résistance à la compression, flexion et traction par flexion supérieur à celle du mortier témoin aux jeunes âges (7et 14jours), par contre cette résistance est faible au moyenne terme ; les mélanges contenant 5% de barytine développent des résultats plus ou moins similaire à celle de mortier avec 10% de barytine.

✓ le taux de 10% de barytine permet au mortier de développer une résistance à la compression importante au jeune âge,Cependant la résistance se rapproche de celle du CEMI à 28 jours, Ceci peut être expliqué par l'effet physique (granulométrique) de l'ajout barytine qui s'apparait à des âges avancés.

✓ Les mortiers contenant les filler et la pouzzolane, immergés dans la solution de Na_2SO_4 montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité à 28 jours. On peut estimer que l'amélioration est due à la modification de la texture des hydrates qui deviennent plus compact. En général, la présence des ions de sulfate en faible quantité fait augmenter l'hydratation de ciment.



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- **Les normes :**

[15] : **NF EN 1008 (Juill 2003)** eau de gâchage pour béton – spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P18-211) ;

[16] : **NF P 18-508 (Oct.1994)** Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de qualité ;

[17] : **NF P 18-502 (mai. 1992)** Additions pour béton hydraulique - fumée de silice ;

[18] : **NF EN 197-1 (fév. 2001)** Ciment composition, spécification et critère de conformité des ciments courants (indice de classement P15-101-1) ;

[19] : **P 18-598 (Oct. 1991)** Granulats-équivalent de sable ;

[30] : **EN 196-1** Méthodes d'essais des ciments. - Détermination des résistances mécaniques ;

[31] : **NF –P 15-403** (juillet 1963). - Technique des essais. - Sable normal et mortier normal (homologuée le 31 juillet 1963).

[37] : **NF EN 197-1** (avril 2012) Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (Indice de classement : P15-101-1).

[38] : **NF P 18-508** (janvier 2012) Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité (Indice de classement : P18-508).

[41] : **NF EN 206-1** (avril 2004) Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité (Indice de classement : P18-325-1).

[42] : **NF EN 1008** (juillet 2003) Eau de gâchage pour bétons – Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (Indice de classement : P18-211).

- **Les mémoires :**

[3] : Mémoire Master en Génie Civil, Étude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux, BELHOCINE AIDA et NAGOUDI NADJAT, Université KASDI Merbah – Ouargla, promotion 2013-2014 ;

[6] : http://www.memoireonline.com/02/13/7021/m_Etude-physicochimique-du-ciment0.html;

[9] : Mémoire magister en Génie Civil, Modélisation de la prévision de la résistance en Compression des bétons à base de pouzzolanes, MENAD MOHAMED, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef ;

[10] : Mémoire magister en chimie des polymères, comportement mécanique et durabilité des matériaux composites mortier-polymère (PET), Université d'ORAN ES-SENIA, promotion 2006 ;

[11] : Thèse doctorat en Génie Civil-Hydrosystèmes - Géotechnique, retrait/gonflement des sols argileux compacts et naturels, HOSSEIN NOWAMOOZ, Institut national polytechnique de lorraine, 2007 ;

[14] : Mémoire magister en Génie des matériaux, accélération de durcissement par énergies renouvelable du béton frais et caractérisation du béton durcie, BOUTIBA Aljia, Université M'HAMED BOUGARRA BOUMERDESE ;

[34] : Mémoire Master en Génie Civil, Modélisation de la prévision de la résistance en compression des bétons à base de pouzzolanes, MENAD MOHAMED Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.

[36] : MEMOIRE DE MAGISTER, Chimie Industrielle, Élaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed BOUDIAF » Faculté des Sciences, promotion 2010/2011

- **Les cours :**

[7] : cour, chapitre II, le ciment, Dr Hadj Sadok, A, 2011 ;

[29] : Cour, chapitre 3, étude de mortier ;

(Homologuée le 31 juillet 1963) ;

[32] : Cour, chapitre 3, essais sur mortier normal, M.GHOMARIF, Université Aboubekr Belkaïd 2007-2008 ;

[33] : TP Matériaux, études des ciments, I.U.T de Génie Civil de Saint pierre.

- **Lien internet :**

[1] : <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/historique>;

[2] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment#D.C3.A9finition> ;

[4] : <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/process-fabrication/composition/les-types-de-ciments> ;

[5] : <http://www.constructionlabrique.com/avantages-blocs-de-ciment-maonnerie>;

- [8] : <https://www.google.dz/searchq=gyps+roche&source;>
- [12] : <https://www.academia.edu> , Chapitre III : Les ajouts minéraux ;
- [13] : <http://doc.lerm.fr/liants-hydrauliques-hydraulicite-hydratation-deau;>
- [20]: [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Mementos_RMI/brgm_nov.2014-barytine-rp-63974-fr.pdf;](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Mementos_RMI/brgm_nov.2014-barytine-rp-63974-fr.pdf)
- [21]: <http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants/eau;>
- [22]:http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants/granulats-beton-types_production;
- [23] : Nouveau guide du béton et ses constituants, Jean FESTA ; Georges DREUX ;
- [24]:<http://ma.viadeo.com/fr/groups/detaildiscussion/?containerId=0021eoly110m5p7e&forumId;>
- [25] : <https://fr.scribd.com/doc/145099174/tp-3-m-d-c-l-equivalent-de-sable;>
- [26] : <https://fr.scribd.com/doc/294294960/Tp-1-Analyse-Granulometrique;>
- [27] : <https://fr.scribd.com/doc/126706154/Tp-Masse-Volumique-Apparente;>
- [28] : [https://www.guillaumemebarki.fr/app/download/5783659869/Essai+Absolue.pdf;](https://www.guillaumemebarki.fr/app/download/5783659869/Essai+Absolue.pdf)
- [35] : <https://www.academia.edu> , Chapitre IV : matériaux, matériels et essais.
- [39]: [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Mementos_RMI/brgm_nov.2014-barytine-rp-63974-fr.pdf.](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Mementos_RMI/brgm_nov.2014-barytine-rp-63974-fr.pdf)
- [40] : [http://www.volcanol.fr/fiche-mineralogie-barytine-13.php.](http://www.volcanol.fr/fiche-mineralogie-barytine-13.php)



Annexe

شركة الإسمنت عين التوتة

SOCIETE DES CIMENTS DE AÏN TOUT

« S.CIM.A.T »

ش.ذ.ا. - رأسمالها الاجتماعي : 2.250.000.000.00 D A :
 N° Identification Fiscale : 099805022210668 - N° Article d'Imposition : 05010212840 - N° Registre de Commerce : 0222106/B/98

Désignation	Valeurs (%)	Exigences (%)
SiO ₂	46.83	43.00 - 72.00
Al ₂ O ₃	17.45	9.00 - 20.00
Fe ₂ O ₃	8.36	1.00 - 12.00
CaO	9.38	1.00 - 15.00
MgO	3.88	0.50 - 7.00
K ₂ O	1.40	0.20 - 8.00
Na ₂ O ₃	4.32	0.50 - 11.00
Cl	0.03	0.00 - 0.06
PF	4.79	2.30 - 6.00
Activité minérale	≥ 50 %	-
Résidu Insoluble dans le Pouzzolane RI	RI ≤ 75 %	-

RESUME

L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : pouzzolane naturelle (ajout actif), fillers calcaire (ajout inerte) et Barytine (ajout inerte)

Les propriétés mécaniques des mortiers élaborés selon les différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux pour les ciments composés Portlands.

✓ **Mots clés :**

- Ciment, pouzzolane, calcaire filler, Barytine, ajout inerte, ajout actif, résistance mécanique, Mortiers.

Abstract

The objective of our work is to study the effects of the incorporation of mineral additions such as: natural pozzolana (active addition), limestone fillers (inert addition) and barite (inert addition)

The mechanical properties of mortars prepared according to the different combinations based on these additions. This will make it possible to select the optimum dosages for Portland composite cements.

Keywords:

- Cement, pozzolana, limestone filler, barite, inert addition, active addition, Mechanical Resistance, mortar.

ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة الآثار المترتبة على إدراج المضافات المعدنية مثل البوزلان الطبيعي (بالإضافة النشيطة)، والحشو الحجر الجيري (بالإضافة الخاملة) والباريت (بالإضافة الخاملة). الخواص للاسمنت تنتج وفقا لمختلف مجموعات بناء على هذه الإضافات. سيؤدي هذا إلى تحديد الجرعات المثالية للبورتلاندا الإسمنت.

• كلمات البحث:

- الاسمنت، البوزلان والحجر الجيري حشو، البارييت، الإضافة الخاملة، الإضافة النشطة، مقاومة ميكانيكية،

ALCAL F50

Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest de massif Oum Sottas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Caractéristiques physiques

Dureté (MOHS) :	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée :	1,3

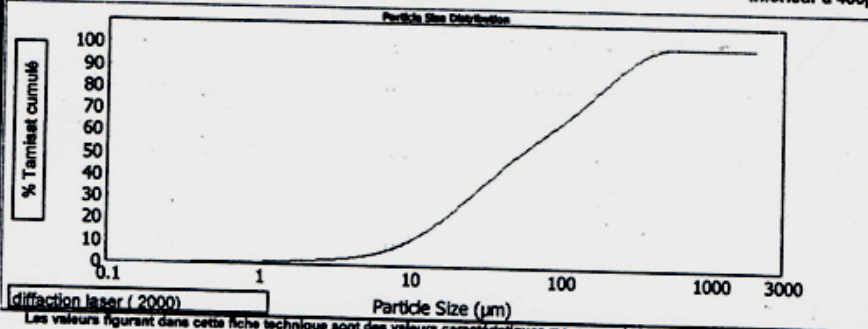
Caractéristiques chimiques

CaCO ₃	99%	Chlore	0.0050%
CaO	55.88%	SO ₂ (soluble dans l'eau)	0.0021%
SiO ₂	0.01%	SO ₂ (soluble dans l'acide)	0.1115%
Na ₂ O	0.01%	Soufre totale	0.0137%
Al ₂ O ₃	0.01%	Résidu insoluble	0.005%
MgO	0.14%	Solubilité dans l'eau (W ₉₀)	0.38%
Fe ₂ O ₃	0.01%	Perte au feu	43.90%
K ₂ O	0.01%	Pi	9.24
P ₂ O ₅	0.01%		
TiO ₂	0.010%		

Répartition granulométrique

Inférieur à 63 μ : 54%

Inférieur à 400 μ : 98%



Conditionnement

Vrac
Big Bag (1 tonne)

Principales utilisations

Etanchié
boue de forage



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
Société de Production de Granulats - Gypse - plâtre - Ajouts
EPE - GRANU - EST - SPA

ش.ذ.أ. - رأس مالها الاجتماعي 1.100.000.000 DA
N° Identification Fiscale : 0008 2500 6763 783 N° Article d'Imposition : 04 270682031 N° Registre de Commerce : 08 B 0067637

GRANU EST AIN ZITOUNE

Laboratoire

OUM EL BOUAGHI

Essai analyse granulométrique
NA 2607 / EN 933-1+A(2006)

Client : /// N° BC : /// Du : ///

Date de Prélèvement : 31/03/2016 Date : d'essai : 02/04/2016
Matériau : Sable (0/4) Con Projet : identification
N° Dossier : 01 Essai N° : 01

Masse totale sèche pour Analyse granulométrique		$M_t = 0.2 \times D_{max} \text{ (mm)}$		$M_t = 800.00 \text{ (gr)}$			
Tamis Ouverture (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)	Tamis Ouverture (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
80				8			
63				6.3			
50				5			
40				4	35.70	4.46	95.54
31.5				2.5	185.80	23.23	76.77
25				1.25	398.40	49.80	50.20
20				0.63	524.70	65.59	34.41
16				0.315	609.90	76.24	23.76
14				0.16	692.50	85.56	13.44
12.5				0.063	704.00	88.00	12.00
10				Fond de Tamis	800.00	100.00	0.00

Observation :

LE CHARGE D'ESSAI

LE RESPONSABLE D'ESSAI

KADI FAWZI

المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
 Société de Production de Granulats - Gypse - plâtre - Ajouts
EPE - GRANU-EST - SPA

ش.ذ.أ. - رأس مالها الاجتماعي 1.100.000.000 DA
 N° Identification Fiscale : 0008 2500 6763 783 N° Article d'Imposition : 04 270682031 N° Registre de Commerce : 08 B 0067637

GRANU EST AIN ZITOUNE

OUM EL BOUAGHI

Laboratoire

**Détermination de la masse volumique
 réelle NA 255**

Client : /// N° BC : /// Du : ///

Date de Prélèvement : 01/03/2016

Date d'essai: 03/03/2016

Matériau : Sable 0/4 ; GRN (4/8 ; 8/16 ; 16/25) con

Projet : identification

N° Dossier : 01

Essai N°: 01

Methode de Pycnomètre

Matériau	Poids de pyc+eau (P)gr	Poids de pyc+eau+Pré (P)gr	Poids du Matériau	Volume du matériau	Masse volumique (gr/ Cm ³)	Catégorie
0/4	867.48	1178.66	500.00	188.82	2.648	Leger
4/8	867.48	1054.18	300.00	113.30	2.648	//
8/16	867.48	1054.16	300.00	113.32	2.647	//
16/25	867.48	1054.13	300.00	111.35	2.647	//

Observation :

LE CHARGE D'ESSAI



LE RESPONSABLE D'ESSAI

Kadi Fawzi

KADI FAWZI



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
 Société de Production de Granulats - Gypse - plâtre - Ajouts
EPE - GRANU - EST - SPA

ش.ذ.أ. - رأس مالها الاجتماعي : 1.100.000.000 DA
 N° Identification Fiscale : 0008 2500 6763 783 N° Article d'Imposition : 04 270682031 N° Registre de Commerce : 08 B 0067637

GRANU EST AIN ZITOUNE

Laboratoire

OUM EL BOUAGHI

Essai Equivalent de sable
 NA 455 / EN 933-8 (1999)

Client : /// N° BC : /// Du : ///

Date de Prélèvement : 31/03/2016

Date d'essai : 01/04/2016

Matériau : sable 0/4 con

Projet : identification

N° Dossier : 01

Essai N° : 01

	E.S=100* H ₂ /H ₁	Hauteur H' ₂ (cm)	Hauteur de sable H ₂ (cm) (43-H' ₂)	Hauteur totale H ₁ (cm)	Heure de départ	Heure de départ+ (10mn)	Heure de lecture (20mn ap lvg) (08H52 - 09H12)	
1 ^{ère} Pré	69.6	34.3	8.7	12.5	08H40	08H50	(08H52 - 09H12)	
2 ^{ème} Pré	68.8	34.6	8.4	12.2	08H44	08H54	(08H56 - 09H16)	
3 ^{ème} Pré	///	//	//	//	//	//	//	
Moyenne (%)	69							

Observation :

LE CHARGE D'ESSAI

LE RESPONSABLE D'ESSAI

3 KADI FAWZI