



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Thème :

**ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE AUX ATTAQUES CHIMIQUES  
DES MORTIERS MODIFIÉS PAR LA BENTONITE.**

Présenté par :

Mr. BENDEHNOUN KADDOUR

SOUTENU LE 17 SEPTEMBRE 2023

Devant le jury composé de :

Président : Dr. CHALABI YOUSOUF

Examineur : Dr. MAROUF HAFIDA

Encadreur : Dr. KAMECHE ZINE EL-ABIDINE

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

# **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant d'avoir facilité notre arrivée pour terminer ce travail*

*La première personne que nous tenons à remercier est le DOCTEUR KAMECHE ZINE EL ABIDINE d'avoir accepté de nous encadrer et l'aide précieuse, et les sa présence constante, les conseils avisés et ses remarques importantes qu'il nous a fournis tout au long de ce projet.*

*Merci et encore merci nos professeurs qui ont contribué à notre apprentissage et à notre savoir depuis l'école primaire jusqu'à l'université.*

*Nous remercions également les membres de comité correction qui ont accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, un merci spécial et personnel à tous les membres de à nos familles, Professeurs d'université et tous nos amis et nos camarades de classe, les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## **DEDICACES**

*Je dédie d'abord ce modeste travail à l'âme de mon père et ma mère, pour son encouragement.*

*Que dieu la procure bonne santé et longue vie.*

*A mes frères, mes sœurs, tous les membres de la famille,*

*Mes amis tous mes proches,*

*Chaque professeur qui m'a appris,*

*Et à tous ceux qui nous connaissent.*

*Sans exception.*

*Avec le plus grand respect et appréciation.*

**BENDEHNOUN KADDOUR**

# Résumé

Le présent travail consiste à étudier l'influence de certaines attaques chimiques (milieux agressifs) sur le comportement physique et mécanique du mortier modifié par une substitution partiel du ciment par la bentonite naturelle de la région de Maghnia. Dans ce but, plusieurs séries d'éprouvettes prismatiques du mortier (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> ont été préparées avec différents dosages en bentonite (0, 10, 15, 20 et 25 %). Les mortiers modifiés (à base de la bentonite naturelle), exposés à des différentes solutions acides HCL (1%), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1%) et NaOH (5%), ont été testés à différents âges ( 7, 28 et 60 jours) en raison de déterminer leurs résistances mécaniques, leurs absorptions capillaires, leurs porosité ainsi que leurs pertes en masse. Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'effet non bénéfique de la bentonite (non traité thermiquement) sur la résistance aux attaques acides.

**Mots Clés :** Mortier, Bentonite, Attaques acides, Résistance mécanique, Sorptivité, Perte en masse.

# ABSTRACT

The present work consists of studying the influence of certain chemical attacks (aggressive environments) on the physical and mechanical behavior of mortar modified by a partial substitution of cement by natural bentonite from the Maghnia region. For this purpose, several series of prismatic mortar test pieces (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> were prepared with different bentonite dosages (0, 10, 15, 20 and 25%). Modified mortars (based on natural bentonite), exposed to different acid solutions HCL (1%), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1%) and NaOH (5%), were tested at different ages (at 7, 28 and 60 days) to determine their mechanical strengths, their capillary absorptions, their porosities as well as their mass losses. The results obtained allowed us to highlight the non-beneficial effect of bentonite (not heat-treated) on resistance to acid attacks.

**Keywords :** Mortar, Bentonite, Acid attacks, Mechanical resistance, Sorptivity, Mass loss.

## ملخص

يتضمن العمل الحالي دراسة تأثير بعض الهجمات الكيميائية (البيئات القاسية) على السلوك الفيزيائي والميكانيكي للملاط المعدل عن طريق الاستبدال الجزئي للأسمت بالبتونيت الطبيعي من منطقة مغنية. ولهذا الغرض، تم تحضير عدة سلاسل من قطع اختبار الملاط المنشوري ( $4 \times 4 \times 16$ ) سم<sup>3</sup> بجرعات مختلفة من البتونيت (0، 10، 15، 20 و 25%). الملاط المعدل (باساس البتونيت الطبيعي)، المعرض لمحاليل حمضية مختلفة (1% HCL، 1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و 5% NaOH) في أعمار مختلفة (7 و 28 و 60 يوماً) لتحديد قوتها الميكانيكية وامتصاصها الشعري ومساميتها بالإضافة إلى فقدان كتلتها. أتاحت لنا النتائج التي تم الحصول عليها تسليط الضوء على التأثير غير المفيد للبتونيت (غير المعالج بالحرارة) على مقاومة الهجمات الحمضية.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط، البتونيت، الهجمات الحمضية، المقاومة الميكانيكية، الامتصاص، فقدان في الكتلة.

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.</b>	<b>I</b>
<b>DEDICACES</b>	<b>II</b>
<b>RESUME</b>	<b>IV</b>
<b>ملخص</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VI</b>
<b>TABLEDES MATIERES</b>	<b>VII</b>
<b>LISTEDES FIGURES</b>	<b>X</b>
<b>LISTEDESTABLEAUX</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
CONTEXTE	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Introduction:</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Définition du ciment portland:</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1. Type de Ciment :</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.1. Ciment Portland artificiel (CEM I):</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.2. Ciment portland composé (CEMII):</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.3. Ciment de haut-fourneau CEMIII:</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1.4. Ciment pouzzolaniques CEM IV:</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1.5. Ciment composé CEM V:(anciennement ciment de laitier au clinker):</b>	<b>6</b>
<b>I.2.2. Les types de ciments selon la norme NFEN197-1:</b>	<b>6</b>
<b>I.3. Hydratation du ciment:</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1. Introduction:</b>	<b>7</b>
<b>I.3.2. Hydratation des silicates de calcium, <math>3\text{SetC}_32\text{S}</math>:</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3. Hydratation des aluminates de Calcium, <math>\text{C}_3\text{AetC}_4\text{AF}</math>:</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3.1. Hydratation de l'aluminatetricalcique <math>\text{C}_3\text{A}</math>:</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.2. Hydratation de l'aluminoferrit et étracalcique <math>\text{C}_4\text{AF}</math>:</b>	<b>9</b>
<b>I.4. Réactivité des autres constituants du ciment(les additions minérales):</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1. La pouzzolane:</b>	<b>10</b>
<b>I.4.2. Laitier des hauts-fourneaux :</b>	<b>10</b>
<b>I.4.3. Fumées de silice:</b>	<b>11</b>
<b>I.4.4. Calcaire:</b>	<b>12</b>
<b>I.5. Bentonite:</b>	<b>12</b>
<b>I.5.1. Définitions:</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2. Origine de la bentonite:</b>	<b>13</b>
<b>I.5.3. Types de bentonite :</b>	<b>13</b>
<b>I.5.4. Utilisations de la bentonite:</b>	<b>14</b>

<b>I.6.</b>	Fillers:	<b>14</b>
<b>I.6.1.</b>	Définition:	<b>14</b>
<b>I.6.2.</b>	Propriétés Requises Du Filler Calcaire:	<b>15</b>
<b>I.6.3.</b>	L'utilisation Des Fillers Calcaires:	<b>15</b>
<b>I.6.4.</b>	Différents types de calcaire:	<b>16</b>
<b>I.6.5.</b>	Propriétés et mode d'action des fillers:	<b>17</b>
<b>I.7.</b>	Argiles:	<b>17</b>
<b>I.7.1.</b>	Les grandes familles de minéraux argileux:	<b>18</b>
<b>I.7.2.</b>	Classification des argiles:	<b>19</b>
<b>I.7.3.</b>	Différents typesd'argile:	<b>19</b>
<b>I.7.4.</b>	Espèces de minéraux argileux:	<b>21</b>
<b>I.7.5.</b>	Les minéraux à pseudo-feuill et setâfaciès fibreux:	<b>21</b>
<b>I.7.6.</b>	Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques:	<b>22</b>
<b>I.7.7.</b>	Activation thermique:	<b>22</b>
<b>I.7.8.</b>	Activation chimique :	<b>23</b>
<b>I.8.</b>	Argiles Calcinées:	<b>23</b>
<b>I.8.1.</b>	Mode d'obtention :	<b>23</b>
<b>I.8.2.</b>	Composition minéralogique:	<b>24</b>
<b>I.8.3.</b>	Domaine d'utilisation :	<b>25</b>
<b>I.8.3.1.</b>	Matériaux deconstruction :	<b>25</b>
<b>I.8.3.2.</b>	Utilisation générales:	<b>25</b>
<b>I.8.4.</b>	Rôle de l'argile calcinée:	<b>26</b>
<b>I.8.5.</b>	Réactivité pouzzolaniques des argiles calcinées:	<b>27</b>
<b>I.9.</b>	Mortiers:	<b>27</b>
<b>I.9.1.</b>	Définition:	<b>27</b>
<b>I.9.2.</b>	Les différents types de mortiers:	<b>27</b>
<b>I.9.2.1.</b>	Les mortiers de ciment:	<b>27</b>
<b>I.9.2.2.</b>	Les mortiers de chaux:	<b>28</b>
<b>I.9.2.3.</b>	Les mortiers bâtards:	<b>28</b>
<b>I.10.</b>	Conclusion:	<b>28</b>
<b>CHAPITREII:MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>		<b>29</b>
<b>II.1.</b>	Introduction:	<b>29</b>
<b>II.2.</b>	Caractérisation des matériaux utilisés:	<b>30</b>
<b>II.2.1.</b>	Ciment:	<b>30</b>
<b>II.2.2.</b>	Sable:	<b>30</b>
<b>II.2.2.1.</b>	Analyse Granulométrique:	<b>31</b>
<b>II.2.2.2.</b>	Equivalent de Sable:	<b>33</b>
<b>II.2.2.3.</b>	Masse volumique apparente :	<b>34</b>
<b>II.2.2.4.</b>	Teneur en eau:	<b>36</b>
<b>II.2.2.5.</b>	Caractérisation chimique de Sable:	<b>37</b>



<b>II.2.3.</b> Bentonite:	<b>37</b>
<b>II.2.3.1.</b> Préparation de la bentonite:	<b>37</b>
<b>II.2.3.2.</b> sechage de la Bentonite	<b>38</b>
<b>II.2.3.3.</b> Composition chimique de Bentonite:	<b>39</b>
<b>II.2.4.</b> L'eau:	<b>39</b>
<b>II.2 .5.</b> L'acide chlorhydrique(HCl):	<b>40</b>
<b>II.2 .6.</b> L'acide sulfurique(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ):	<b>40</b>
<b>II.2 .7.</b> hydroxyde de sodium( NaOH):	<b>42</b>
<b>II.3.</b> Méthode de formulation du mortier cimentaire:	<b>42</b>
<b>II.4.</b> Méthodes expérimentales:	<b>43</b>
<b>II.4.1.</b> Essai de la Flexion simple:	<b>43</b>
<b>II.4.2.</b> Essai de Compression simple:	<b>43</b>
<b>II.4.3.</b> Absorption capillaire:	<b>44</b>
<b>II.4.4.</b> Mesure de Porosité accessible à l'eau:	<b>45</b>
<b>II.5.</b> Conclusion:	<b>46</b>
<b>CHAPITREIII:RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
<b>III.1.</b> Introduction	<b>48</b>
<b>III.2.</b> Perte en masse	<b>49</b>
<b>III.2.1.</b> perte en masse des mortiers conservés dans solution HCL	<b>49</b>
<b>III.2.2.</b> perte en masse des mortiers conservés dans solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<b>50</b>
<b>III.2.3.</b> perte en masse des mortiers conservés dans solution NaOH	<b>51</b>
<b>III.2.4.</b> Etat visuel des mortiers après immersion dans les acides	<b>52</b>
<b>III.3.</b> Résistance à la flexion simple	<b>53</b>
<b>III.3.1.</b> Résistance à la flexion simple des mortiers témoins	<b>53</b>
<b>III.3.2.</b> Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution chlorhydrique HCL	<b>53</b>
<b>III.3.3.</b> Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<b>54</b>
<b>III.3.4.</b> Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution acide sodium (NaOH)	<b>56</b>
<b>III.4.</b> Résistance à la compression	<b>57</b>
<b>III.4.1.</b> Résistance à la compression des mortiers témoins	<b>57</b>
<b>III.4.2.</b> Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution chlorhydrique (HCL)	<b>58</b>
<b>III.4.3.</b> Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	<b>59</b>
<b>III.4.4.</b> Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution acide sodium (NaOH)	<b>60</b>
<b>III.5.</b> Absorption capillaire.	<b>60</b>
<b>III.5.1.</b> Absorption capillaire des mortiers témoins.	<b>61</b>
<b>III.5.2:</b> Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution chlorhydrique (HCL).	<b>64</b>

## TABLES DES MATIERES

<b>III.5.3:</b> Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).	67
<b>III.5.4:</b> Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution acide sodium (NaOH).	70
<b>III.6:</b> Porosité accessible à l'eau.	74
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>75</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>76</b>

## Liste Des Figures

<b>Fig.1:</b> Émission de dioxyde de carbone d'une cimenterie dans l'État de M'sila	2
<b>CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>Fig. I.1 :</b> C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H , La porosité est représentée par(O).	7
<b>Fig. I.2 :</b> Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.	8
<b>Fig. I.3:</b> pouzzolane naturelle.	9
<b>Fig. I.4:</b> Pouzzolane artificielle:(a)Kaolin ;(b) Méta kaolin.	10
<b>Fig. I.5:</b> Poudre de Fumées de silice.	12
<b>Fig. I.6 :</b> Fumée de silice vu au microscope.	12
<b>Fig. I.7:</b> Bentonite	13
<b>Fig. I.8:</b> Illustration de l'effet filler	16
<b>Fig. I.9:</b> Constitution d'un tétraèdre d'un octaèdre.	18
<b>Fig. I.10 :</b> Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type1:1 (groupe de kaolinite $Si_2Al_2O_5(OH)_4$ ).[40]	18
<b>Fig. I.11:</b> Minéraux argileux de type1:1.	19
<b>Fig. I. 12:</b> Minéraux argileux de type2:1.	20
<b>Fig. I.13:</b> Minéraux argileux de type2:1:1.	20
<b>Fig. I.14:</b> Minéraux argileux inter stratifiés régulier et irrégulier.	21
<b>Fig. I.15:</b> Les différents types de mortiers.	28
<b>CHAPITRE II: MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	
<b>Fig. II.1 :</b> Sac de Ciment CEM I/A42.5.	30
<b>Fig. II.2:</b> sable de carrière	30
<b>Fig. II.3:</b> L'analyse Granulométrique	31
<b>Fig. II.4:</b> Courbe distribution granulométrique	32
<b>Fig. II.5:</b> Processus de L'essai d'équivalent de Sable.	34
<b>Fig. II.6:</b> Récipient Rempli par le Sable	35
<b>Fig. II.7 :</b> Four à 300°C	38

<b>Fig. II.8 : Bentonite</b>	38
<b>Fig. II.8 : Eau déminéralisé</b>	39
<b>Fig. II.10 : Les acides</b>	41
<b>Fig. II.11: Conservation des mortiers dans solutions (Hcl).</b>	42
<b>Fig. II.12: Conservation des mortiers dans solution (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	42
<b>Fig. II.13: Conservation des mortiers dans solution (NaOH)</b>	42
<b>Fig. II.13: Mortier cimentaire</b>	43
<b>Fig. II.15 : Eprouvettes Mortiers de Ciment.</b>	43
<b>Fig. II.16 : Dispositif de Résistance à la Flexion.</b>	44
<b>Fig. II.17 : Dispositif de résistance à la compression.</b>	45
<b>Fig. II.18 : Etuve petit model 500 C</b>	46
<b>Fig. II.19 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire</b>	46
<b>CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
<b>Fig. III.1 : perte en masse des mortiers conservés avec solution HCL pendant 7 ,28 et 60 jours.</b>	49
<b>Fig. III.2 : perte en masse des mortiers conservés avec solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>pendant 7 ,28 et 60 jours.</b>	50
<b>Fig. III.3: perte en masse des mortiers conservés avec solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours</b>	51
<b>Fig.III.4 : perte en masse des mortiers conservés avec les solutions acides</b>	52
<b>Fig. III.5 : Résistance à la flexion simple des mortiers témoins pendant 7 ,28 et 60 jours.</b>	53
<b>Fig.III.6:Résistance à la flexion simple des mortiers avec solution HCL pendant 7 ,28 et 60 jours...</b>	54
<b>Fig.III.7: Résistance à la flexion simple des mortiers conservés avec solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant7, 28 et 60 jours</b>	55
<b>Fig.III.8 : Résistance à la flexion simple des mortiers conservés avec solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours..</b>	56
<b>Fig.III.9: Résistance à la compression des mortiers témoins pendant 7 ,28 et 60 jours</b>	57
<b>Fig.III.10:Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution en HCL pendant 7 ,28 et 60 jours..</b>	58
<b>Fig.III.11: Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant 7 ,28 et 60 jours</b>	59
<b>Fig.III.12 : Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution</b>	60

LISTE DES FIGURES

NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours	
<b>Fig.III.13</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (7jours) :	61
<b>Fig.III.14</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (28 jours) :	62
<b>Fig.III.15</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (60 jours)	63
<b>Fig. III.16:</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (7 jours).	64
<b>Fig. III.17</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (28 jours).	65
<b>Fig. III.18</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (60 jours).	66
<b>Fig. III.19</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (7 jours).	67
<b>Fig. III.20</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (28 jours)	68
<b>Fig. III.21:</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (60 jours).	69
<b>Fig. III.22</b> : absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (7 jours).	70
<b>Fig. III.23</b> : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (28 jours)	71
<b>Fig. III.24</b> : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (60 jours) .	72
<b>Fig. III.25</b> : Résultats de porosités accessibles à l'eau.	73

## Liste des Tableaux

<b>CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>Tab .I.1 :</b> différents types de ciment selon la norme NFEN197-1	6
<b>Tab. I.2:</b> Relation entre la taille et la nature de minéraux.	22
<b>CHAPITRE II: MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES</b>	
<b>Tab. II.1:</b> Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.	31
<b>Tab. II.2:</b> Un tableau représentant les pourcentages des acides utilisés.	31
<b>Tab. II.3:</b> Analyse granulométrique du sable de carrière d'el MALEH AT.	34
<b>Tab. II.4:</b> Résultats Equivalent de sable.	36
<b>Tab. II.5:</b> Valeur Préconisée pour L'équivalent de Sable	36
<b>Tab. II.6:</b> Masse Volumique Apparente du Sable de carrière d'el MALEH AT	37
<b>Tab. II.7:</b> Teneur en Eau du Sable de carrière d'el MALEH AT.	38
<b>Tab. II.8 :</b> Composition chimique de Sable.	39
<b>Tab. II.9 :</b> Composition chimique de Bentonite.	40
<b>CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
<b>Tab. III .1 :</b> Un tableau représentant les pourcentages des matériaux utilisés	48
<b>Tab. III .2 :</b> Un tableau représentant les pourcentages des acides utilisés	48
<b>Tab. III.3 :</b> perte en masse des mortiers conservés avec solution HCL pendant 7 ,28 et 60 jours.	49
<b>Tab. III.4 :</b> perte en masse des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pendant 7 ,28 et 60 jours.	50
<b>Tab. III.5:</b> perte en masse des mortiers conservés avec solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours	51
<b>Tab. III.6 :</b> Résistance à la flexion simple des mortiers témoins pendant 7 ,28 et 60 jours.	52
<b>Tab. III.7:</b> Résistance à la flexion simple des mortiers avec solution HCL pendant 7 ,28 et 60 jours...	53
<b>Tab. III.8:</b> Résistance à la flexion simple des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pendant 7, 28 et 60 jours	54
<b>Tab. III.9 :</b> Résistance à la flexion simple des mortiers conservés avec solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours..	55
<b>Tab. III.10:</b> Résistance à la compression des mortiers témoins pendant 7 ,28 et	56

LISTE DES TABLEAUX

60 jours	
<b>Tab.III.11:</b> Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution en HCL pendant 7 ,28 et 60 jours..	57
<b>Tab.III.12:</b> Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pendant 7 ,28 et 60 jours	58
<b>Tab.III.13 :</b> Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours	59
<b>Tab.III.14 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (7jours) :	60
<b>Tab.III.15 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (28 jours) :	61
<b>Tab.III.16 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (60 jours)	63
<b>Tab. III.17:</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (7 jours).	64
<b>Tab. III.18 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (28 jours).	65
<b>Tab. III.19 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution HCL (60 jours).	66
<b>Tab. III.20 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (7 jours).	67
<b>Tab. III.21 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (28 jours)	68
<b>Tab. III.22:</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (60 jours).	69
<b>Tab. III.23 :</b> absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (7 jours).	70
<b>Tab. III.24 :</b> Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (28 jours)	71
<b>Tab. III.25 :</b> Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés avec solution NaOH (60 jours) .	72
<b>Tab. III.26 :</b> Résultats de porosités accessibles à l'eau.	73

## INTRODUCTION GENERALE

En 2001, le rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement en Algérie a mis en évidence le fait que le pays est face à une crise écologique sans précédent (MATE, 2001). Des problèmes tels que la déforestation, la dégradation de la biodiversité, la perte de fertilité des sols, la prolifération des déchets, l'épuisement des ressources rares, etc. ont directement impacté l'activité et l'efficacité économiques, mais également la santé et la qualité du cadre de vie de la population. Ainsi, la dégradation des forêts, des sols et de la biodiversité affecte la productivité agricole et la qualité des écosystèmes. La pollution des ressources en eau est la cause de maladies hydriques et est à l'origine de la dégradation des écosystèmes aquatiques se répercutant sur les ressources halieutiques. La pollution de l'air provoquée par les activités industrielles et le transport a des répercussions importantes sur la santé publique (maladies respiratoires, allergies, etc.) [1, 2, 3, 4].

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, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. 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.





**Fig.1:**Émission de dioxyde de carbone d'une cimenterie dans l'État de M'sila[5].

La production de ciment représentant 5% des émissions mondiales de dioxyde de carbone [6] étant sa principale source. Ce la est dû, d'une part, à la fort intensité énergétique du processus de production de clinker Portland La production d'une tonne de clinker nécessite un apport de 3, 1 à 3, 8GJ de chaleur, alors que dans les fours à méthode humide de l'ancienne génération, la demande peut même atteindre 6 GJ / t [6]. En revanche, lors de la production de ciment, le dioxyde de carbone est émis par les matières premières, principalement le calcaire.

La quantité de cette émission est d'environ 0,53 kg/ Tonne de Clinker [6].

Pour cette raison, il est devenu nécessaire de rechercher un liant moins cher et disponible en utilisant certains biomasses et déchets et ressources naturelles pouvant être obtenus gratuitement, tels que (charge calcaire, pouzzolane (ajouts minéraux), le laitier de haut fourneau, le fumé de cilice, le filler calcaire, poudre de marbre, Les argiles calcinée, poudre de verre, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le mortier et béton.

L'argile calcinée et le filler calcaire peuvent-elles être utilisées comme produits de remplacement partiel du ciment Portland ?

## **Objectifs de l'étude:**

La présente étude de recherche est pour but d'évaluer expérimentalement la résistance aux attaques chimiques (acides) des mortiers modifiés par une substitution partielle (10, 15, 20 et 25 %) du ciment par la Bentonite naturelle de la région de Maghnia (W. de Tlemcen). Un intérêt majeur est aussi donné à l'évaluation de la résistance mécanique (à la flexion et à la compression) et à l'estimation de la porosité et l'absorption capillaire de ces mortiers modifiés conservés pendant des différentes durées (à 7, 28 et à 60 jours) dans différents solutions acides (HCL, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaOH).

## **CONTEXTE:**

Cette étude est divisée en 3 chapitres structurés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la synthèse bibliographique sur le ciment et des minéraux argileux et types des ajouts minéraux différents et les mortiers.

Le deuxième chapitre en contient matériaux et procédures expérimentales particulier la caractérisation des matériaux utilisés et les méthodes expérimentales dans la confection des mortiers par différents mélanges.

Le troisième chapitre contient la présentation et discussion des résultats concernant l'état durci des différents mortiers étudiés. Tous les résultats font l'objet des commentaires et des interprétations.

En fin une conclusion générale sur cette étude, des perspectives et des recommandations sont présentées.

# CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## I .1.Introduction:

Le mortier est un matériau de construction, qui contient du ciment, de l'eau, du sable, des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure[1].

L'étude du comportement du mortier est plus complexe que celui de la pâte. Sa théorie est encore peu explorée et nécessite plus d'investigation et de recherches théoriques et expérimentales. Bien que cette étude a été faite dans un système de mortier, il est raisonnable de penser que les tendances qui ont été observées pourraient être prolongées au béton [2].

A l'origine, un mortier est un simple mélange entre un liant (en général du ciment) et du sable, gâché avec de l'eau. Néanmoins, au cours des dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes, du fait de l'ajout de multiples adjuvants. Ils font dorénavant intervenir plus d'une dizaine de composants.

Les mortiers sont maintenant présents dans tous les secteurs du BTP. Leur utilisation n'a fait qu'augmenter depuis 1970 pour arriver à une production proche de 4 millions de tonnes en 2011. De plus, la complexité des mortiers entraîne une augmentation constante des mortiers pré-formulés, dits « industriels » ou « prêts à l'emploi », face aux mortiers réalisés sur chantier. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir diverses propriétés à l'état frais ou durci, selon l'application finale et les performances souhaitées. Néanmoins, la formulation des mortiers étant fondée fortement sur l'empirisme, l'emploi et le dosage des adjuvants sont souvent mal maîtrisés [3].

## I. 2. Définition du ciment portland:

Grâce à la simplicité de la technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse  $\text{CaSO}_4$  finement broyé et d'additions éventuelles. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et

## CHAPITRE I

broyées très finement dans des broyeurs à boulets. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de la granulométrie et de la finesse. par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elles s'expriment en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La finesse habituelle est de l'ordre de  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , elle passe à  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge. Le clinker est obtenu par cuisson à  $1450^\circ\text{C}$  suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80% de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) et 20% d'argile. L'argile est composée de silice, d'alumine et d'autres phases qui sont présentes en faibles proportions telles que l'oxyde de fer, le magnésium, l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium. Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique (C3S) dénommé alite, de silicate bicalcique (C2S) ou Bélite, d'aluminate (C3A) ou Célite, d'Alumino-ferrite tétra calcique (C4AF) ou Felite, et d'autres phases mineures. Le C3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le C2S, le C3A et le C4AF représentent respectivement 15 à 30%, 5 à 10% et 5 à 15% du clinker classique. Ces composés sont refroidis, broyés et mélangés au gypse pour former le produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de:

- la composition chimique.
- Le traitement thermique (chauffage et refroidissement).
- La finesse du clinker [4].

### **I .2.1. Type de Ciment:**

#### **I .2.1.1. Ciment Portland artificiel (CEMI):**

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont: La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [5].

#### **I .2.1.2. Ciment portland composé (CEMII):**

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convention : (Clinker) + (autres constituants) + (constituants secondaires) = 100 [6].

**CHAPITRE I**

**I .2.1.3. Ciment de haut fourneau CEMIII:**

Le CEM III/A, B ou C ou ciment de haut-fourneau : Contient entre 36 et 80 % de laitier de haut-fourneau (S) et 20 à 64 % de clinker (K). Le CEM III/C (également dit ciment de haut-fourneau) contient au moins 81% de laitier haut fourneau (S) et 5 à 19% de clinker (K)[7].

**I .2.1.4. Ciment pouzzolaniques CEMIV:**

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane et de cendre doit en plus satisfaire à l'essai de pouzzolanité»[8].

**I .2.1.5. Ciment composé CEMV:(anciennement ciment de laitier au clinker):**

Il contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

**I .2.2. Les types de ciments selon la norme NFEN 197-1 :**

**Tab. I.1** : différents types de ciment selon la norme NFEN 197-1 [9].

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitiers, schistes, pouzzolanes, cendres, calcaires et Fumes de silice.	Teneur en secondaires
CEMI	Ciment Portland Artificiel	95 à 100%	0%	0 à 5%
CEMII/A CEMII/B	Ciment Portland composés	80 à 94% 65 à 79%	-de 6 à 20% de l'un des constituants dans le cas où le constituant est des fumés de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%(*). -de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus(*).	0 à 5%
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64% 20 à 35% 5 à 19%	-de 36 à 65% de laitier de hauts fourneaux. -de 66 à 80% de laitier de hauts fourneaux. -de 81 à 95% de laitier de hauts fourneaux.	0 à 5%
CEMIV/A CEMIV/B	Ciment Pouzzolanique	65 à 90% 45 à 64%	-de 10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumés de silice, ces dernières étant limités à 10%. -de 36 à 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CEM V/A CEM V/B	Ciments aux laitiers et aux cendres	40 à 64% 20 à 39%	-de 18 à 30% de laitier de hauts fourneaux et 18 à 30% de cendre siliceuse ou de pouzzolane. -de 31 à 50% de chacun des Constituants comme ci-dessus.	0 à 5%
<b>(*le pourcentage de fillers est limité à 5%</b>				

### I.3 . Hydratation du ciment :

#### I.3.1.Introduction:

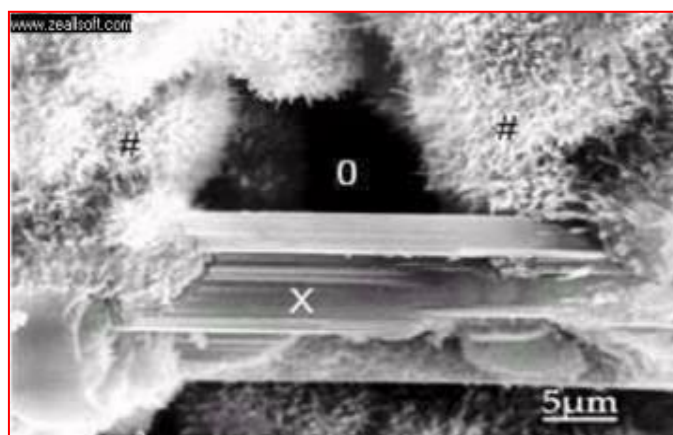
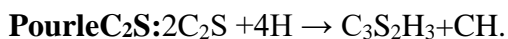
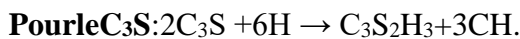
Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui .La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [10]:

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- La formation de solutions saturées par rapport aux différents hydrates.
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides sinter granulaires.

#### I.3.2Hydratation des silicates de calcium, $3\text{SetC}_2\text{S}$ :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques ( $\text{C}_3\text{S}$ ) et les silicates bicalciques ( $\text{C}_2\text{S}$ ) se dissolvent sous forme d'ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  et  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ . Qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du  $\text{C}_2\text{S}$ , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible [11]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire:



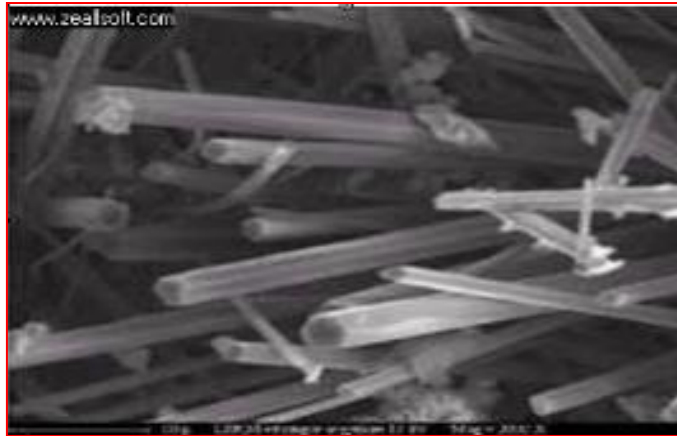
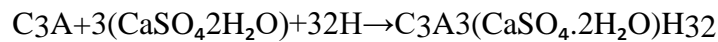
**Fig. I.1 :** C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H, La porosité est repérée par (O) [12].

**I .3.3 Hydratation des aluminates de Calcium,C3A etC4AF:**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions[13].

**I .3.3.1 Hydratation de l'aluminat et tricalciqueC3A:**

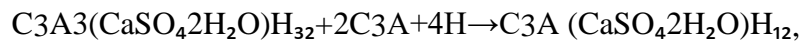
L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O). En l'absence du gypse, la réaction de C3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C3A réagissent d'abord pour former le trisulfo aluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base hexagonale (figure 1.). La réaction est donnée par:



**Fig. I.2 :** Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [14].

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite.

Il apparaît donc secondairement un mono sulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [15]. La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [13].

### I .3.3.2. Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C4AF:

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

Dans la première étape de la réaction, le C4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte.

La réaction du C4AF dégage peu [16]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

## I .4. Réactivité des autres constituants du ciment (les additions minérales):

### I .4 .1. La pouzzolane:

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments:

#### ➤ Pouzzolane naturelle:

C'est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites [17].



Fig. I.3 :pouzzolane naturelle[17].



### ➤ Pouzzolane artificielle:

Tout comme la précédente, ils agissent d'un matériau composé, essentiellement, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer mais qu'il a subi un traitement souvent thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles peuvent être des sous-produits comme la fumée de silice et les cendres volantes ou des matériaux issus d'un traitement approprié, notamment thermique. Parmi les matériaux traités thermiquement on cite: les argiles, schistes, la térite, bauxite, ...etc[18].

Les argiles calcinées sont des argiles qui ont subi un traitement sous des hautes températures, leur permettant d'avoir certains changements microstructuraux afin d'obtenir des propriétés pouzzolaniques. Parmi les argiles utilisées pour l'obtention des pouzzolanes artificielles on cite: les micas, la montmorillonite et la kaolinite. Le Métakaolin est une poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination-broyage ou broyage-calcination d'une argile composée majoritairement de kaolinite. Le Méta kaolin est constitué principalement de particules de silicate d'alumine amorphe ayant des propriétés pouzzolaniques. La température de calcination nécessaire pour l'obtention du Méta kaolin varie entre 500 et 850 °C suivant la cristallinité et le degré d'ordre de la matière première (Kaolinite). Il se produit une réaction de déshydroxylation du matériau avec une destruction de la structure cristalline initiale conduisant à une nature amorphe du matériau.



**Fig.I.4:**Pouzzolane artificielle:(a)Kaolin;(b)Métakaolin.

### I .4.2. Laitier des hauts-fourneaux:

Les laitiers de hauts-fourneaux sont des coproduits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques, ils sont formés de la gangue du minerai de fer, des fondants ajoutés, des impuretés du coke. Ce sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium. La structure

Minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement. Plus rapide est le refroidissement (la trempe), plus vitreux est le laitier. Le laitier refroidi est en forme de granules.

Le laitier granulé est utilisé en cimenterie, soit dans le cru en remplacement de l'argile (en particulier dans le procédé par voie sèche), soit au moment du broyage avec le clinker, le gypse comme ajout minéral. Ainsi donc le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été broyé séparément ou après avoir été broyé avec le clinker. Il peut aussi être vendu séparément aux producteurs de béton qui l'introduisent dans le béton comme ajout cimentaire [19].

### **I .4.3. Fumées de silice:**

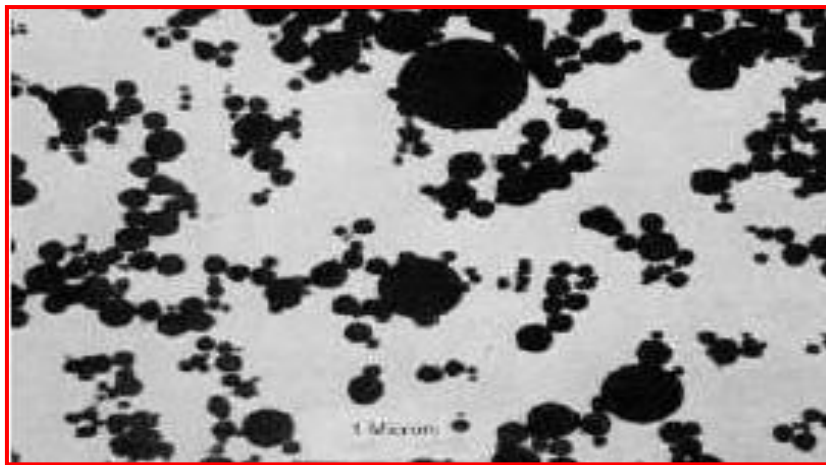
Sous-produit de la fabrication du silicium, du Ferro-silicium ou des silico-alliages. La fumée de silice est généralement grise foncée à noir ou blanc cassé. La fumée de silice est une poudre très fine constituée principalement de particules sphériques ou des microsphères de diamètre moyen d'environ 0.15 microns, avec une surface spécifique très élevée (15000-25000 m<sup>2</sup>/kg). Chaque microsphère est en moyenne 100 fois plus petite qu'un grain de ciment moyen. Par exemple un dosage de 10% en masse de ciment, il y aura 50-100 mille particules de fumée de silice par grain de ciment.

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

Dans le béton durci, la fumée de silice améliore la résistance mécanique et la résistance aux cycles gel/dégel, d'un autre côté elle réduit l'action des attaques chimiques, la porosité et la perméabilité. Cette amélioration est due à l'accélération de la réaction d'hydratation et l'effet pouzzolanique [20].



**Fig. I.5 :**Poudre de Fumées de silice[20].



**Fig. I.6 :**Fumée de silice vue au microscope [21].

#### **I .4.4 . Calcaire:**

Le calcaire appartient aux roches carbonatées riches en chaux ( $\text{CaCO}_3$ ), et il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire comme ajout et le remplacement du gypse. Les deux principales caractéristiques normalisées sont :

- Une teneur minimale en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .
- Une valeur minimale de l'indice d'activité[22].

#### **I .5 .Bentonite:**

##### **I .5.1.Définitions:**

Le terme bentonite a été proposé en 1898 pour désigner une argile au toucher savonneux appartenant à la formation "Bentonshale" et affleurant dans la région de RockRiver

## CHAPITRE I

(Wyoming, Etats Unies) où la première exploitation de bentonite aurait été découverte en 1890. Cette formation tire son nom de Fort-Benton situé à 650 km environ au Nord de Rock River. Les bentonites sont des silicates d'alumine hydratés appartenant au groupe des Montmorillonite [23].

Selon la pharmacopée Européenne 2008: C'est une argile naturelle contenant une forte proportion de montmorillonite, silicate d'aluminium hydraté d'origine naturelle, dans lequel certains atomes d'aluminium et de silicium peuvent être remplacés par d'autres atomes tels que le magnésium et le fer [24].



**Fig. I.7:** Bentonite Calcinée.

### I .5.2. Origine de la bentonite:

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smaltites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [25].

### I .5.3. Types de bentonite :

➤ **Il existe trois types de bentonites :**

- a) **Bentonite calcique :** Elles constituent la plus grande part de gisements exploités dans le monde. Elles contiennent essentiellement des ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en position inter foliaire. Ces argiles présentes ont un taux de gonflement de 3 à 7 fois le volume initial [23].

- b) **Bentonite sodique** : Ce sont des argiles rares. Leur ion inter foliaire ou échangeable est Na<sup>+</sup>. Elles ont un pouvoir de gonflement très élevé (12 à 18 fois)[23].
- c) **Bentonite de potassium** : Aussi connu sous le nom de bentonite de potasse ou de K-bentonite, la bentonite de potassium est une argile illitique riche en potassium formée à partir d'une altération des cendres volcaniques [26].

### **I .5.4 ; Utilisations de la bentonite:**

La bentonite est l'argile industrielle la plus importante en raison de son principal composant de montmorillonite qui lui confère une capacité d'absorption et de gonflement très élevées qui sont exploités dans différents domaines dont [27]:

- Protection environnementale.
- Forage.
- Les céramiques.
- Les peintures.
- L'agroalimentaire.
- Décoloration des huiles.
- Raffinage du pétrole.
- Additif dans la fabrication du papier.
- Génie civil (additif dans le ciment).
- Traitement des eaux usées.
- La pharmacie et la cosmétique.

Les bentonites sont largement utilisées dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique en tant qu'excipient, ingrédients actifs et transporteur et libérateurs d'ingrédients actifs [28,29], comme décrit plus en détail dans le titre suivant.

### **I .6. Fillers:**

#### **I .6.1. Définition :**

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante: Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du

ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bomblet : [30]. Il y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

- **Rôle de remplissage:** l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire. Sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler le vide inter granulaire [31].
- **Rôle rhéologique :** par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci [32].
- **Rôle physico-chimique :** la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [33].
- **Rôle chimique :** par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates [34].

### I .6.2. Propriétés Requises Du Filler Calcaire:

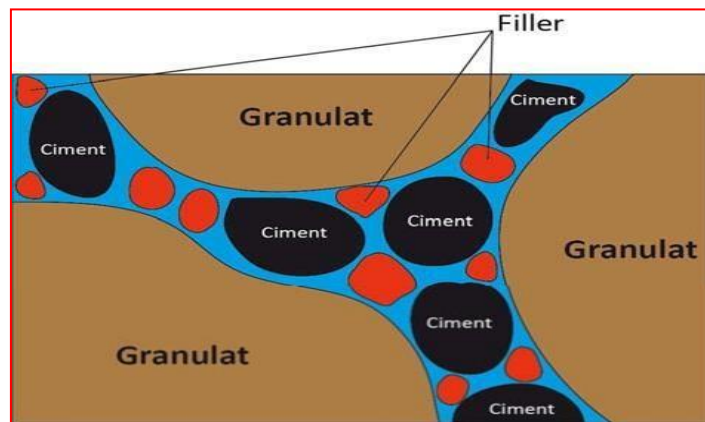
Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NFP18-508). L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure I.8) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes des mortiers (ciment, sable). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

### I .6.3. L'utilisation Des Fillers Calcaires:

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur

## CHAPITRE I

composition chimique est celle du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). 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.



**Fig.I.8:** Illustration de l'effet filler.

### I .6.4. Différents types de calcaire:

Les fillers calcaires sont:[35]

Soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques ;

Soit obtenus par broyage du matériau cru. Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques.

#### ❖ Différentes:

- Origine métamorphique, ils'agit des marbres.
- Origine sédimentaire.

Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  (56,03% de  $\text{CaO}$  et 43,97% de  $\text{CO}_2$ ). Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques : Calcite, aragonite et vèrité [36].

Le calcaire peut contenir aussi  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou le minéral accessoire qui est la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  [54,27%  $\text{CaCO}_3$  et 45,73%  $\text{MgCO}_3$  ou 30,41%  $\text{MgO}$  et 47,72%  $\text{CaO}$ ]. Le

Calcaire dolomitique contient un mélange de dolomite et de calcite, tandis que la dolomiene contient que de la dolomite.

### I .6.5 .Propriétés.et.mode.d'action.des.fillers:

Les fillers se différencient les uns des autres par:

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

Les fillers calcaires sont le plus réactifs en présence de ciment, alors que les fillers siliceux sont pratiquement inertes. La réactivité dépendrait de la nature du calcaire, de son état de cristallisation. C'est ainsi qu'une calcite à réseau cristallin désorganisé donne une augmentation de résistance plus rapide qu'une calcite bien cristallisée [37].

### I .7 .Argiles:

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi :-Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.

Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes:

- Groupe kaolin: formule générale:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- Groupe halloysite: formule générale:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
- Groupe montmorillonite: formule générale:  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ .
- Groupe des minéraux argileux micacés:(ex : séricine).
- Groupe des minéraux argileux magnésiens:(ex : sépiolite)

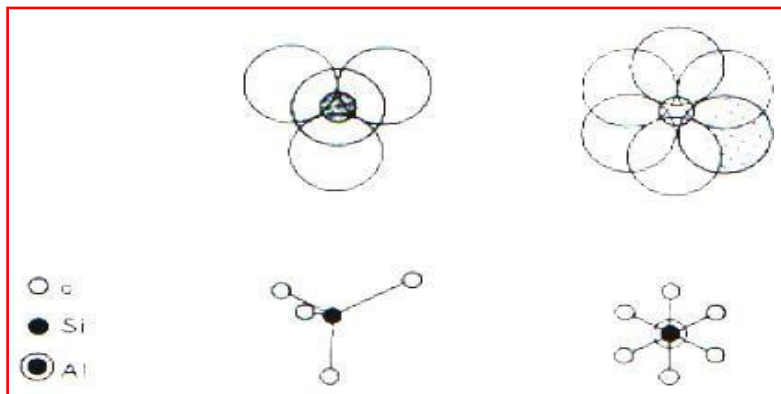
Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,...etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger. Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible. Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkerisation[38].



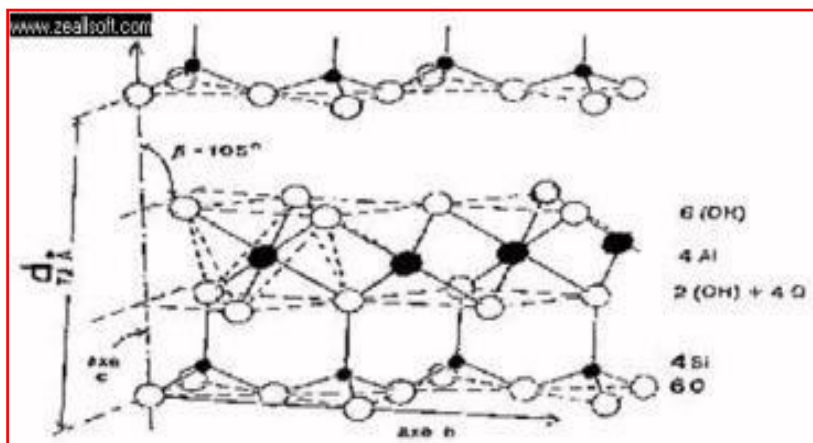
**I.7.1. Les grandes familles de minéraux argileux:**

Les minéraux de l'argile se répartissent principalement en quatre grandes familles [39], qui sont:

- Famille du kaolin  $Al_4 [(OH)_8Si_4O_{10}]$ .
- Famille des micas: dioctaédrique  $K_2Al_4[Si_6Al_2]O_{20}(OH)_4$  tri octaédrique  $K_2Mg_6 [Si_6Al_2]O_{20}(OH)_4$ .
- Famille de la montmorillonite  $Al_2 [(OH)_2 Si_4O_{10}].xH_2O$ .
- Famille des chlorites: entre deux feuillets de type talcs place un feuillet de type brucite  $Mg(OH)_2$ , d'où des formules du type  $(Mg, Al)_3 [(OH)_2AlSi_3O_{10}]Mg_3(OH)_6$ .



**Fig. I.9:** Constitution d'un tétraèdre et d'un octaèdre. [40]



**Fig. I.10 :** Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type 1:1 (groupe de kaolinite  $Si_2Al_2O_5(OH)_4$ ) [40].

### I.7.2. Classification des argiles:

Les argiles sont des roches constituées de variétés de minéraux très fins auxquels viennent s'ajouter des minéraux non argileux tels que le quartz, minéraux lourds, matières organiques ..... Du point de vue chimique, ces minéraux sont des silicates d'alumine qui se présentent sous forme de feuillets. L'empilement de ces feuillets constitue le grain dont la dimension est généralement inférieure à  $2\ \mu\text{m}$ [41].

Les argiles sont classées en différents groupes de minéraux selon l'épaisseur de leurs feuillets

- **Minéraux à 7Å:** Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ  $7\ \text{Å}$ ;
- **Minéraux à 10Å:** Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ  $10\ \text{Å}$  ;
- **Minéraux à 14Å:** Le feuillet est constitué de couches octaédriques inter foliaires [42].

### I.7.3. Différents types d'argile:

L'argile est classée selon le nombre, le placement et le vide entre ces feuillets.

- **Minéraux argileux type 1 :1 «TO» :** constitués d'un feuillet tétraédrique surplombant une couche octaédrique. Ils présentent typiquement une taille de  $7\ \text{Å}$  (TO+inter feuillet). La nature du feuillet octaédrique permet de distinguer les argiles TO à feuillet di octaédrique (feuillet type brucite,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) et les argiles TO à feuillet tri octaédrique (feuillet de type gibbsite)[43].

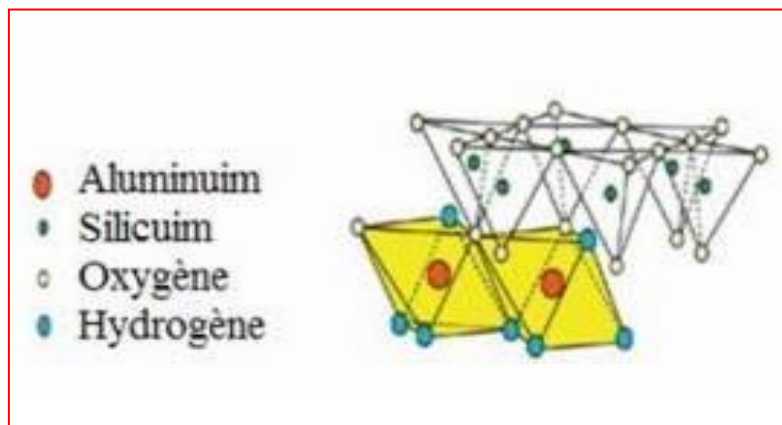


Fig. I.11: Minéraux argileux de type 1:1. [43]

- **Minéraux de type 2:1(ou T-O-T) :** ils correspondent à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de [9,4 à 15 Å], selon la dimension de l'espace inter foliaire (espace entre deux feuillets consécutifs). A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et des micas.

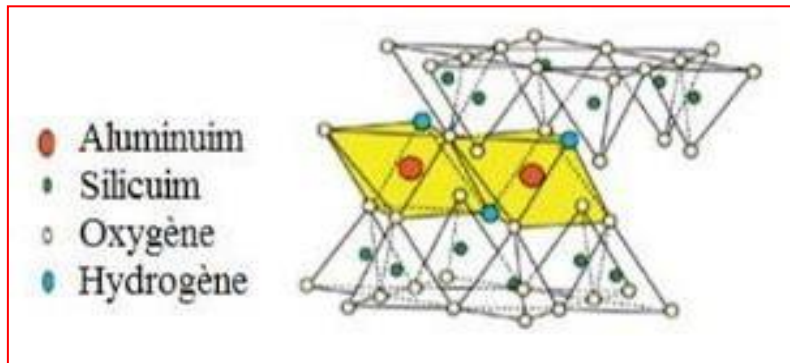


Fig.12:Minéraux argileux de type 2:1. [43]

- **Minéraux argileux dits 2:1:1 ou TOTO :** ils ont une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques, l'espace inter foliaire étant occupé par une couche d'octaèdres. Ce groupe de minéraux argileux exhibe une équidistance d'environ 14 Å.

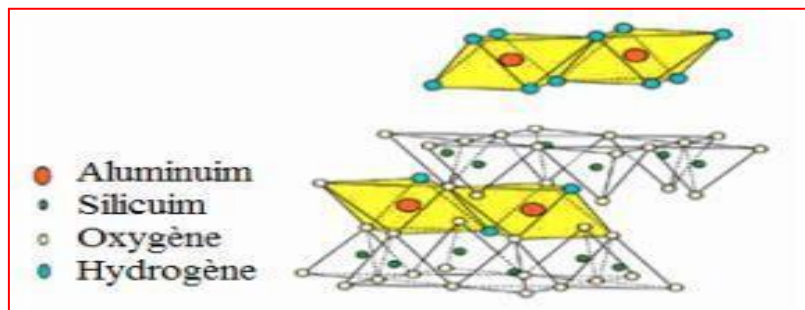


Fig. I.13:Minéraux argileux de type 2:1:1.[43]

- **Minéraux inter stratifiés :** Selon leur classement, on considère un minéral inter stratifié contenant deux feuillets A et B, on peut en envisager trois types:
  - d1-Ségrégés: une particule donnée présente des séquences AAABBB.
  - d2-Réguliers: une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB.
  - D3-Aléatoires: les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment.

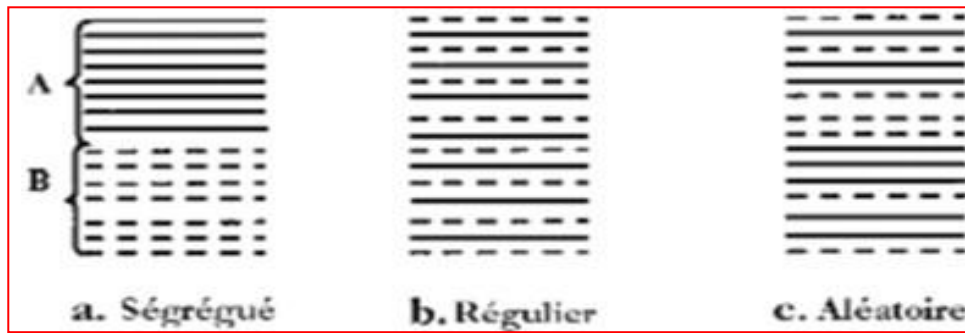


Fig. I.14: Minéraux argileux inter stratifiés régulier et irrégulier. [43]

#### I.7.4 . Espèces de minéraux argileux:

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés et cristallisés, subdivisés en trois variétés [44,46] Si ces minéraux sont à couche octaédrique discontinue, on parle de minéraux type fibreux. Ils appartiennent à la famille de la de la palygorskyte. Leurs structures ont des caractères communs avec celles des phyllo silicates, car leur faciès fibreux résulte d'une discontinuité du feuillet dans le sens de la largeur. Les couches T sont continues et constituées de tétraèdres qui n'ont pas tous la même disposition. Les couches octaédriques sont discontinues. Si ces minéraux sont à couche octaédrique continue et constitués par l'empilement du même feuillet (exemples : O-T/ O-T/ O-T... ou T-O-T/ T-O-T/ T-O-T...), on parle des minéraux types 1/1, 2/1, 2/1/1. Si ces minéraux sont à couche octaédrique continue et constitués par l'empilement des feuillets différents, cet empilement peut être régulier (T-O-T/ O-T/ T-O-T/ O-T...) : cas des inter stratifiés ou polyphyllites réguliers, ou irrégulier (O-T/T-O-T/ T-O-T/ O-T...) : cas des inter stratifiés ou polyphyllites irréguliers [46]. La plupart des groupes des minéraux argileux se divisent en deux groupes principaux ; les minéraux di-octaédriques et tri-octaédriques. La distinction entre les deux groupes se fait à partir de la composition des octaèdres; si les six équivalences négatives du ce toctaédrique sont compensées par trois cations divalents ( $Fe^{2+}, Mg^{2+}, \dots$ ) (les trois cavités sont remplies par des cations divalents) on parle des minéraux tri-octaédriques [46]. Si la compensation est assurée par deux cations trivalents ( $Fe^{3+}, Al^{3+}, \dots$ ) (deux cavités sur trois sont remplies par des cations trivalents), il s'agit des minéraux d'octaédriques [45,46].

#### I.7.5 Les minéraux à pseudo-feuillet et à faciès fibreux :

Les minéraux fibreux sont des espèces à pseudo-feuillets. Leur faciès fibreux résulte d'une discontinuité du feuillet selon l'axe b. Ce pseudo-feuillet est constitué de plans continus d'oxygène. Dans ces plans, les oxygènes sont aux sommets d'un hexagone plus ou moins régulier. Entre deux plans continus d'oxygène, on trouve deux plans discontinus formés

D'oxygène et d'hydroxyle. L'empilement des deux plans discontinus forme des octaèdres enchevêtrés créant ainsi un ruban. Cette rupture donne naissance à des lacunes qui forment des canaux structuraux entre des rubans. La largeur de ces rubans est caractéristique de chaque famille. Les oxygènes du plan continu forment la base de tétraèdre dont la pointe est constituée par un oxygène du ruban. Ces tétraèdres sont occupés en leur centre par des ions  $Si^{4+}$ . Lesions  $Mg^{2+}$  ou  $Al^{3+}$  occupent les lacunes octaédriques. Les rubans se terminent par des liaisons entre ces cations et des molécules d'eau. On distingue deux principales familles On distingue deux principales familles [47].

**I.7.6. Relation entre la taille des particules fines et leurs natures minéralogiques :**

D'après Mitchell (1976) Il existe une infinité de types d'argiles selon les proportions des minéraux [48,49], donc on peut connaître approximativement la nature du minéral d'après la dimension des particules comme indiqué au (Tab. I.2).

**Tab. I.2 :** Relation entre la taille et la nature de minéraux. [49]

Dimension	Minéraux dominants	Minéraux courants	Minéraux rares
0.1µm	Montmorillonite	mica	Illite
0.1à0.2µm	Mica	Kaolin Montmorillonite	Illite Quartz
0.2à2µm	Kaolinite	Illite Mica halloysite	Quartz Montmorillonite Illite
2à11µm	Mica Illite feldspaths	Quartz Kaolinite	Halloysite Montmorillonite

**I.7.7 Activation thermique:**

L'activation thermique est une exposition de l'argile à la chaleur pouvant atteindre quelques centaines de degrés pour un certain temps. Le traitement thermique provoque quelques modifications dans la structure de l'argile. Le départ de l'eau d'hydratation (eau inter foliaire) est presque total à 220°C environ tandis que le départ de l'eau constitution et des hydroxyles des octaèdres a lieu à des températures plus élevées, dans le domaine 220 à 350°C, cette déshydratation libère des sites et accroît la surface spécifique de l'argile, alors que la capacité d'adsorption du matériau traité est améliorée [50]

### I.7.8 Activation chimique:

L'activation à l'acide sulfurique est la plus répandue. L'activation chimique aux acides augmente le nombre de sites acides dans l'argile, qui sont responsables des propriétés d'adsorption et de catalyse. Le maintien du matériau sous activation au-delà de certaines limites fait régresser ce nombre de sites. Selon la littérature l'activation acide est souvent accompagnée par le départ d'abord des éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ , ensuite suivront les composés  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Les composés du Mg partent plus facilement que ceux de Fe et Al [50]. En fait, l'activation chimique de la montmorillonite est largement étudiée [51]. Au cours du traitement:

- Les cations qui se trouvent dans l'espace inter foliaire sont remplacés par les ions  $\text{H}^+$ .
- La dissolution de l'aluminium de la couche octaédrique et du silicium de la couche tétraédrique avec la dissolution des cations structuraux.
- Augmentation de la surface spécifique.

### I.8 Argiles Calcinées:

La calcination des argiles consiste à les mettre sous l'effet des hautes températures (400 - 900°C) pendant quelques heures (2 à 5h). L'argile, vue sa variété minéralogique, peut connaître plusieurs phénomènes à l'occasion de sa calcination : l'évaporation de l'eau libre [52], la transformation du Quartz  $\alpha$  en Quartz  $\beta$  [53], la dés hydroxylation des phyllosilicates, la décomposition des matières organiques, la décarbonatation des carbonates...etc. C'est principalement le phénomène de dés hydroxylation qu'on vise à travers toute calcination. Ils'agit d'arracher l'eau chimiquement liée que comportent les minéraux phylliteux d'une argile. Ces molécules d'eau proviennent des groupements d'hydroxyle (O-H) que contiennent les tétraèdres de silice et les octaèdres d'alumine, composants élémentaires des minéraux phylliteux. C'est après leur dés hydroxylation que les oxydes,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , deviennent réactifs et peuvent réagir avec la chaux dans une réaction qu'on nomme réaction pouzzolanique.

#### I.8.1 Mode d'obtention:

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors du refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques. Les fumées de silice, la bauxite calcinée. Les cendres de balles de riz et des argiles calcinées [56,57,58] dont

on décrit le processus d'obtention par calcination. Transformation thermique: un des moyens les plus utilisés pour obtenir de la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) et le moyen adéquat poursuivre l'évolution des transformations au cours de la calcination et qui met en évidence trois phénomènes.

- ❖ **La déshydratation:** pic endothermique de faible amplitude vers 100°C, elle ne modifie en rien la structure cristallographique, mais elle permet seulement le départ de l'eau physiosorbée.
- ❖ **La déshydroxylation (phase de désorganisation) :** pic endothermique de grande amplitude vers 500°C à 700°C .A ce niveau les hydroxyles sont éliminées de la structure .Il se forme pour le kaolin une phase appelée méta kaolin, pour une argile hétérogène, il se forme une phase différente suivant les minéraux qui la compose.[59,61].Donc la température de décomposition dépend de la nature des minéraux, de la pression de vapeur maintenu pendant la cuisson[61,62].

C'est dans cette phase que l'argile devient amorphe et par conséquent pouzzolanique. La réaction globale de déshydratation pour la kaolinite peut se schématiser comme suit.

$$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$$


- ❖ **La recristallisation :** pic exothermique vers 900°C à 1200°C. le matériau passe d'une phase amorphe à une phase de recristallisation suivi d'un changement de la nature initiale des minéraux .l'argile dans cette phase devient inerte .le méta kaolin subit dans cette phase un réarrangement structurel, elle se transforme en mullite de forme  $3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$  [54, 55,52].

### I .8.2 Composition minéralogique:

L'analyse minéralogique a pour but l'identification et le dosage des minéraux. Elle apporte des renseignements sur le mode de combinaison des éléments .Si toutes fois la reconnaissance de la composition chimique est aisée .Il n'est pas facile d'identifier les espèces minérales en raison de la complexité de leurs mélanges, on peut trouver plus d'un minéral qui présente une intensité de pic (raie) principale identique à un autre. Voinovith [63]. En effet un minéral peut être caractérisé par :

- Sa structure cristalline: qui est un arrangement des atomes dans un réseau géométrique régulier (le kaolin en feuillet à double couche = 7 Å).
- Sa morphologie : qui est la taille et la forme des particules ainsi que les défauts (dislocation, Joints de grains, etc.) qui peuvent être déterminés par le microscope électronique.
- S'agit-il d'une composition élémentaire approchée qui peut être déterminée par le Microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X d'après Terrier [63].

### **I.8.3 Domaines d'utilisation:**

Les propriétés des argiles ont été reconnues et utilisées depuis la plus haute antiquité. Nos ancêtres de la préhistoire fabriquaient des poteries rudimentaires et des outils en silex [64].

#### **I.8.3.1 Matériaux de construction:**

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques [55]. Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580°C servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations [65]. Les argiles fusibles sont réfractaires au-dessous de 1350°C servent pour la fabrication des briques, et tuiles [65].

#### **I.8.3.2 Utilisation générale:**

La composition d'une solution saline est modifiée au contact d'argile; des cations «disparaissent» et sont remplacés par d'autres empruntés à l'origine elle-même; c'est le phénomène d'échange de cations. Les argiles, servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, doit atteindre sa cible sans être décomposé par l'argile pendant les étapes suivantes; production, transport, stockage et application. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) ou encore la sépiolite et la palygorskite ont été utilisées dans l'industrie pour leur propriété d'absorption et d'adsorption:

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines,...), dégraissage.
- Décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux,...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les interstratifiés smectite-kaolinite servent en fonderie comme liant des sables de moulage.



- De nombreux travaux ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques.

### **Onretiendra:**

- Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers.
- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et dans leur polymérisation en peptides.
- Les essais de polymérisation du benzène en polyphénylène dans une Montmorillonite.
- Les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres Composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux. De L'étude comparative des activités catalytiques de divers minéraux argileux Sur La polymérisation du styrène, il ressort que la kaolinite, la palygorskite et certains mélanges kaolinite-palygorskite-illite-montmorillonite donnent des résultats satisfaisants.
- Les argiles kaolin tiques non modifiées ont un caractère mi-renforteur des gommés naturelles ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement Considérable qui la place au premier rang des consommateurs de kaolins,.En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.
- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaoliniques, les carreaux de grés céramique par exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits[64].

### **I.8.4 Rôle de l'argile calcinée:**

La structure amorphe de l'argile calcinée entre 600 et 850°C, lui acquiert des propriétés pouzzolaniques. Un remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagé, car la rend capable de réagir avec la portlandite libérée par

l'hydratation du ciment portland pour produire des hydrates de nature proche de ceux duciment qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique. La calcination d'une argile constituée d'un réseau cristallin très désorganisé, conduit à de bonnes performances pouzzolanique [61, 62,66]. L'activité pouzzolanique augmente avec l'amorphisation du réseau minéralogique de l'argile calcinée.

### **I .8.5. Réactivité pouzzolaniques des argiles calcinées:**

Les argiles calcinées (déchet de briques) se distinguent par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland [61,66]. Les composés ainsi formés, par exemple, les C-S-H et les hydrates aluminosilicates [67,63] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages. La consommation de l'hydroxyde de calcium par le déchet de briques permet également de supprimer le phénomène des efflorescences. Dans un premier temps on a choisi de rappeler la définition et les méthodes de mesure de l'activité pouzzolanique Parmi.

Celle-ci:

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques (taux de vitrification des minéraux).
- Essais mécaniques et analyses chimiques.

## **I .9. Mortiers:**

### **I .9.1.Définition:**

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différent selon les réalisations[68].

### **I .9.2.Les différents types de mortiers:**

#### **I .9.2.1.Les mortiers de ciment:**

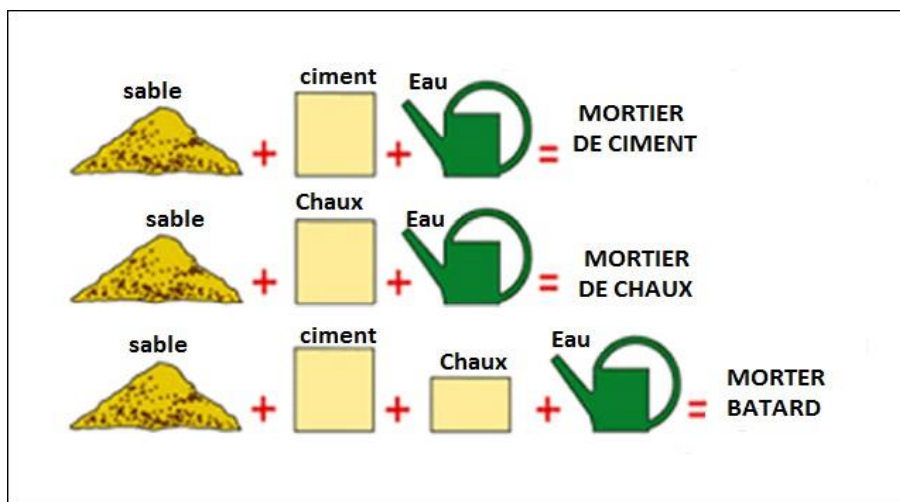
Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau surciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. En revanche, il est davantage sujet au retrait[68].

**I .9.2.2. Les mortiers de chaux:**

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment. Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment[68].

**I .9.2.3. Les mortiers bâtards:**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, On utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.[68].



**Fig.I.15:** Les différents types de mortiers[69].

**I .10. Conclusion :**

Les mortiers et les ciments sont les matériaux les plus utilisés et les plus important dans le domaine de la construction sur tout ces dernières années en Algérie.

Aussi que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO<sub>2</sub> et de la poussière causant la pollution de l'environnement, Par conséquent, dans ce chapitre, nous avons mis en évidence le mortier, le ciment et les additifs minéraux qui peuvent être utilisés dans le ciment, en particulier l'argile comme remède à ces problèmes et une alternative efficace.

## CHAPITRE II MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

### II.1 Introduction:

Dans ce chapitre présent, nous présentons tout d'abord les différents matériaux utilisés, ainsi que le protocole utilisé pour la préparation de la bentonite.

En deuxième partie nous décrirons les protocoles expérimentaux utilisés pour la préparation des mortiers (confectionner les échantillons) suivi par les différents essais réalisés au cours de notre étude.

**\*Les matériaux utilisés sont**

- :Eau :** Eau distillée
- Ciment:** CEMI(MOKAOUEM)
- Sable:** Sable de carrière d'el MALEH AIN TEMOUCHENT
- Bentonite:** de la région de Tlemcen

**Tableau II.1: Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.**

Notation		En pourcentage%		En gramme(g)			
		Ciment	bentonite	C	B	sable	Eau
A1	Formulation 1	100	0	450	0	1350	270
A2	Formulation 2	90	10	405	45	1350	270
A3	Formulation 3	85	15	382,5	67,5	1350	270
A4	Formulation 4	80	20	360	90	1350	270
A5	Formulation 4	75	25	337,5	112,5	1350	270

$E/C=0.6 \mid E=270g, C=450g.$

**Tableau II.2: Un tableau représentant les pourcentages d'acides utilisés.**

Solution	Concentration (%)	Quantité/10 litres d'eau	Observation
HCl	1	260ml/10L	Acide fort
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	104ml/10L	Acide fort
NaOH	5	6,5g/10L	Basique

**II.2.Caractérisation des matériaux utilisés:**

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisées pour les différentes formulations sont présentées au-dessous :

**II.2.1 Ciment:**

MOUKAOUM-PLUS est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland compos, NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442v 2013 et la EN 197-1 Il est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN197-1 avec un taux enC3A <3%.



**Fig. II.1:**Sac de Ciment CEMI/A42.5.

**II.2.2 Sable:**

Dans notre étude nous avons utilisé le sable carrière d'el MALEH AIN TEMOUCHENT.



**Fig. II.1:**sable de carrière

**II.2.2.1. Analyse Granulométrique : [NFEN933-1]**

- Prélever (1,5kg) de matériau (sable sec).
- Préparation de l'échantillon qui sera analysé. Le choix du matériau imposera aussi le choix des tamis. L'échantillon choisi devra être sec. Sa teneur en eau pourra être vérifiée avec l'essai correspondant de mesure de teneur en eau.
- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant en mettant le tamis avec la plus grosse maille en haut et le tamis avec la plus petite maille en bas, en finissant avec le fond de tamis et le couvercle de la colonne.
- Verser le matériau sec dans le tamis.
- Fermer le couvercle de la colonne de tamis.
- Secouer manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis.
- Reprendre un à un les tamis en ajoutant le fond et le couvercle le tamisât intégrant le tamis suivant et le refus restant dans le tamis initial.
- Déterminer à l'aide de la balance électronique la masse de chaque refus.
- Réaliser cette opération sur tous les refus y compris le matériau dans le fond de la colonne de tamis.
- Remplir le tableau correspondant avec les résultats des masses obtenues et calculer les pourcentages de refus et tamisât pour chaque tamis.
- Tracer sur la feuille de graphique vierge la courbe de granulométrie à l'aide des résultats obtenus.



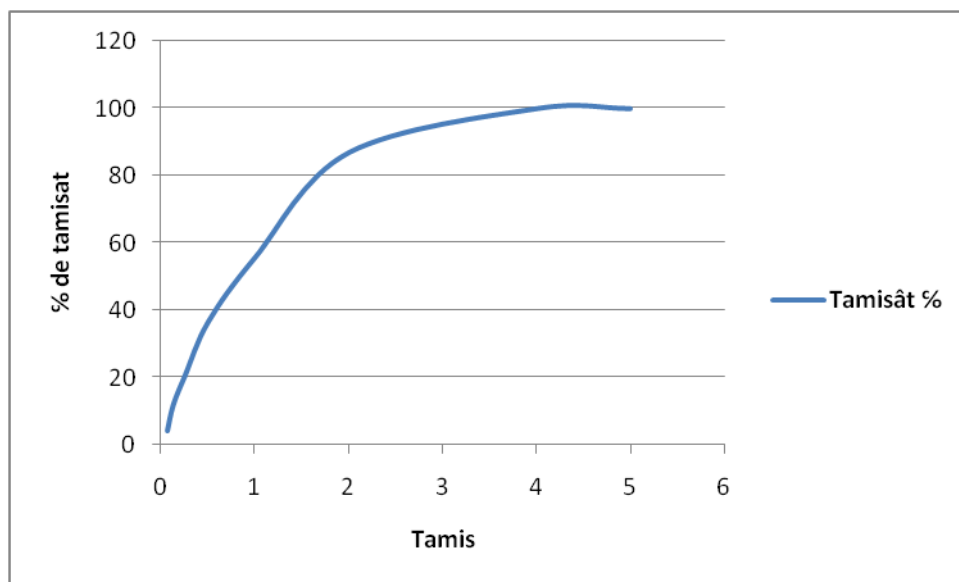
**Fig. II.3:**L'analyse Granulométrique.

Les résultats de l'analyse granulométrique sur le sable concasse sont présentes sur la courbe suivante:

**Tab. II.3:** Analyse granulométrique du sable de carrière  
D'el MALAH AINTEMOUCHENT

Tamis	Tamisât %	refus%	Refus cumule%
5	100	0	0
4	100	0	0
2	87	13	13
1	55,9	31,1	44,1
0,5	36,8	19,1	63,2
0,250	20,7	16,1	79,3
0,125	12,04	8,66	87,96
0,063	4,34	7,7	95,66
FOND	0,41		

MF=2,78



**Fig. II.4:** Courbe de distribution Granulométrique.

**II.2.2.2. Equivalent de Sable:[NFEN 933-8]**

Notre essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultra fines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

**\* Mode opératoire:**

- Tamiser une quantité de sable(masse supérieure à **500g**).
- Prendre une pesée de**120g**.
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier père (10 cm).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant **10** minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer **90** cycles de **20cm** de voie horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index enfaisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps autube un léger piquage. Cette opérationa pour but de laver le sable et de faire monterles éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavanteatteignele **2<sup>ème</sup>**repère.Laisserensuite reposerpendant**20** minutes.

❖ Mesure avec une règle de mesure(ESV).

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100 \dots\dots\dots (1)$$

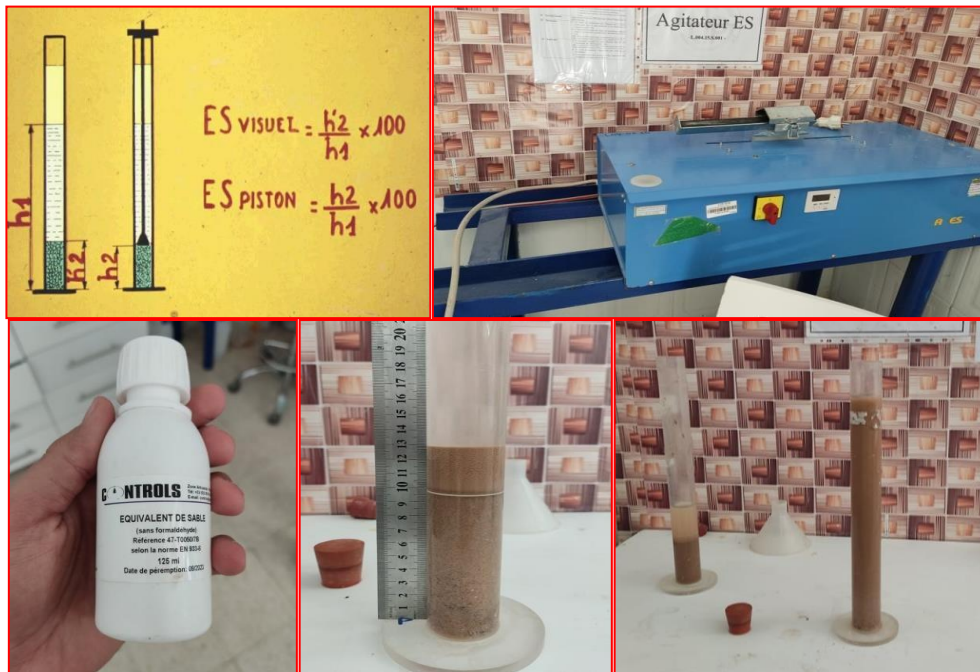
**Tab. II.4:**Résultats Equivalent de sable

	<i>h<sub>1</sub></i>	<i>h<sub>2</sub></i>	<b>E.S.V(%)</b>	<b>MoyE.S.V (%)</b>
<b>Essai1</b>	12,5	7,6	60,8	61,35
<b>Essai2</b>	12,6	7,8	61,9	



**Tab. II.5:** Valeur Préconisée pour L'équivalent de Sable.

E.S.V	Nature Et Qualité Du Sable
$E_{sv} < 65$	Sable argileux; à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq E_{sv} < 75$	Sable légèrement argileux; admissible pour des Bétons de qualité courante
$75 \leq E_{sv} < 85$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses; convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
$E_{sv} \geq 85$	Sable très propre: absence presque totale de fines argileuses



**Fig. II.5:** Processus de L'essai d'équivalent de Sable.

**II.2.2.3. Masse volumique apparente: [NFP18-555]**

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

❖ **Mode opératoire:**

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 5 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M1.

- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de **10 à 15 cm** et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit  $M_2$  ce poids.
- Volume de récipient  $V_r = 2000 \text{ cm}^3$ .

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante:

$$\rho = \frac{M}{V_r} \dots \dots \dots (2)$$

**Tab. II.6:** Masse Volumique Apparente du Sable de carrière  
D'el MALAH AINTEMOUCHENT.

N°d'essai	M(g)	V <sub>r</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>app moy</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	2855	2000	1.428	1.444
2	2883	2000	1.442	
3	2923	2000	1.462	

Pour le sable d'el MALAH la masse volumique apparente est: **1.444 g/cm<sup>3</sup>**



**Fig. II.6:** Récipient Rempli par le Sable.

**II.2.2 .4 Teneur en eau :[NFP18-554]**

Le sable à la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20 à 25%** de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0 à 3%**, on l'appelle sec.

❖ **Mode opératoire:**

- ◆ Peser un échantillon de sable humide, soit  $M_h$  son poids (**5761g**).
- ◆ Laisser l'échantillon dans une étuve à une température **15°C** à **24 heures**.
- ◆ Peser l'échantillon de nouveau, soit  $M_s$  son poids.

La teneur en eau du sable est:

$$W = \left( \frac{M_h - M_s}{M_h} \right) \times 100 [\%] \dots\dots\dots (3)$$

Et:

- $M_h$ : Poids du sable humide en(g).
- $M_s$ : Poids du sable sec en (g).

**Tab. II.7:**Teneur en Eau du Sable de carrière D'el MALAH AINTEMOUCHENT

N°d'essai	$M_h(g)$	$M_s(g)$	W (%)
<b>1</b>	<b>1675</b>	<b>1643</b>	<b>1.95</b>

**II.2.2 .5 Caractérisation chimique de Sable:**

Le Sable utilisé dans notre étude ou sa composition chimique a été déterminée à l'aide des analyses chimiques effectuées dans laboratoire.

**Tab. II.8 :** Composition chimique Du Sable.

	<b>Echantillon</b>	<b>Sable</b>
<b>Carbonates[ NFP15-461]</b>	<b>Prise d'essai:<math>m_0</math>(g)</b>	<b>0,5</b>
	<b>Volume HCl(<math>cm^3</math>)</b>	<b>10</b>
	<b>Chute de NaOH</b>	<b>9,5</b>
	<b>Volume d'acide réagissant <math>X=V_a-V_b</math>(<math>cm^3</math>)</b>	<b>0,5</b>
	<b>TeneurenCaCO3 <math>\frac{5.X}{m_0}</math></b>	<b>5</b>
<b>InsolublesNFP15-461</b>	<b>Prised'essai:<math>m_0</math>(g)</b>	<b>1</b>
	<b>Creuset+précipité:<math>m_2</math></b>	<b>29,827</b>
	<b>Creusetvidem<math>m_1</math></b>	<b>28,901</b>
	<b>%Insolubles: <math>\frac{(m_2-m_1)*100}{m_0}</math></b>	<b>92,6</b>
<b>SulfatesBS1377:1990</b>	<b>Prised'essai:<math>m_3</math>(g)</b>	<b>/</b>
	<b>Creus et+précipité :a(g)</b>	<b>/</b>
	<b>Creus et vide:b(g)</b>	<b>/</b>
	<b><math>m_2=a-b</math>(g)</b>	<b>/</b>
	<b><math>SO_3(\%)=0,343*(m_4/m_3)*100</math></b>	<b>/</b>

**II.2.3. Bentonite:**

L'argile de bentonite a été fournie par ENOFL td.de la région de Maghnia,wilaya de Tlemcen, Algérie. L'argile a été reçue sèche et pulvérisée dans des sacs de 50 Kg qui étaient destinés à être utilisés comme fluide de forage.

**II.2.3.1Préparation de la bentonite:**

Nous avons utilisé une bentonite préparée tamisée dont ses particules ont des diamètres inférieurs à 80  $\mu m$ .

II.2.3 .2 séchage de la bentonite:

Le séchage se fait dans un four en température de 500 degré



**Fig. II.7:**Four de température de 300°C.



**Fig. II.8:**Bentonite séchée.

**II.2.3.3 Composition chimique de Bentonite :**

**Tab. II.9:**Composition chimique de Bentonite.

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Valeurs en%	67.4	16.1	1.84	2.41	3.27	5.56	2.66	0.33	4.19

**II.2.4 L'eau :**

L'eau utilisée pour le gâchage de mortier est Eau Déminéralisée.



**Fig. II.9:**Eau Déminéralisée.

**II.2 .5 .L'acide chlorhydrique(HCl):**

L'acide chlorhydrique est une solution aqueuse ayant pour solutés des ions de type oxonium (plus précisément des ions hydrate d'hydrogène H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) et des ions chlorure (Cl<sup>-</sup>). On peut l'obtenir par dissolution dans l'eau(H<sub>2</sub>O)du chlorure d'hydrogène(HCl) qui est un gaz.

Le HCl est un acide fort qui s'ionise totalement en solution aqueuse.

Etant un liquide très corrosif, il doit être manié avec précaution. L'acide chlorhydrique concentré peut avoir un Ph inférieur à1.

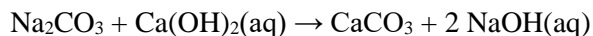
**II.2 .6. L'acide sulfurique(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):**

L'acide sulfurique est un composé chimique de formule H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. C'est un acide minéral fort, il est miscible à l'eau en toutes proportions, où il se dissocie en libérant des cations hydronium.



**II.2 .7. hydroxyde de sodium( NaOH):**

L'hydroxyde de sodium est un corps chimique minéral composé, de formule chimique NaOH, qui est un solide ionique à température ambiante. Il est fusible vers 318 °C.





HCL

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

NaOH

**Fig. II.10:**les acides.





**Fig. II.11:** Conservation des éprouvettes ( $\text{HCl}$ ).



**Fig. II.12:** Conservation des éprouvettes ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).



**Fig. II.13:** Conservation des éprouvettes ( $\text{NaOH}$ ).

**II.3 Méthode de formulation du mortier cimentaire :**

Le mortier de ciment a été mélangé avec bentonite, différents pourcentages massique de 10%, 15%, 20% et 25% dans des moules cubique avec un rapport constant de  $E/L_{qui}=0,6$ . Et les moules ont été démontés après une journée. Ensuite, les échantillons ont été placés dans l'eau durcissement à pendant 7 et 28 jours.



**Fig. II.14:**Mortier Cimentaire.



Fig. II.15: éprouvettes Mortier de ciment.

## II.4 Méthodes expérimentales :

### II.4.1 Essai de Flexion:

Les essais de flexion simple ont été réalisés au laboratoire de l'université sur une presse, elle est programmée pour les essais de flexion (éprouvette), trois échantillons pour chaque formulation à 7, 28 et 60 jours. Nous avons placé l'échantillon confectionné entre les trois points de la presse, le plateau supérieur est posé étant fixe, le plateau inférieur est mobile. Monter vers le haut écrase le corps de l'échantillon contre le plateau supérieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de flexion est ainsi achevé, la charge maximale est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance qui s'obtient (Fig. II.16).

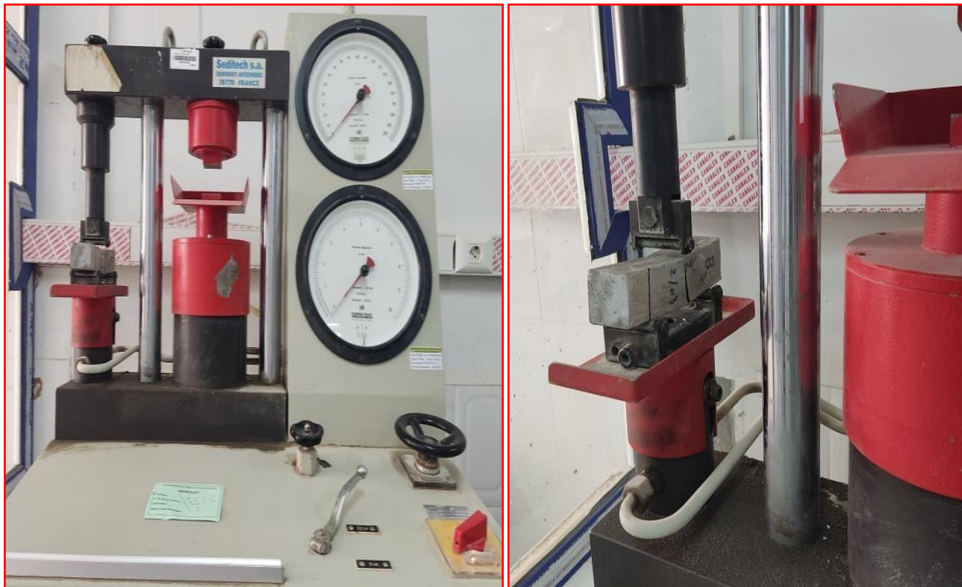


Fig. II.16: Dispositif de Résistance à la Flexion.

### II.4.2 Essai de Compression :

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire de l'université sur une presse, elle est programmée pour les essais de compression (éprouvette), trois échantillons pour chaque formulation à 7, 28 et 60 jours. Nous avons placé l'échantillon confectionné entre les deux plateaux de la presse, le plateau supérieur est posé étant fixe, le plateau inférieur est mobile. Monter vers le haut écrase le corps de l'échantillon contre le plateau supérieur.

L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

L'essai de compression est ainsi achevé, la charge maximale est donnée dès que la rupture est enclenchée, cette charge maximale servira à déterminer la résistance qui s'obtient (Fig. II.17).



**Fig. II.17:**Dispositif de résistance à la compression.

**II.4.3 Absorption capillaire:[NFEN772-11]**

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les prescriptions de la norme AFPC- AFREM sur éprouvettes de dimensions 40x40x160mm. Les échantillons sont d'abord séchés à l'étuve à la température de 55°C jusqu'à la stabilisation de la masse, puis laissés à l'air libre et pesés à l'aide d'une balance de précision 0.01 g, afin de déterminer leur poids à l'état sec  $M_0$ . Les échantillons sont ensuite placés sur un filet en plastique dans des récipients en plastique peu profonds, contenant de l'eau. La profondeur d'immersion des surfaces d'échantillon pendant le test d'absorption est de 2à3 mm. Après chaque échéance de submersion, les échantillons sont prélevés de l'eau, essuyés et séchés superficiellement à l'aide d'un papier absorbant ( $M_t$ ). Les mesures de masse et pénétration d'eau sont prises à des intervalles : 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, min et 24 heures. Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante:

$$C = \frac{M_t - M_0}{A} \dots\dots\dots(4)$$

C: Coefficient d'absorption capillaire ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ),  $M_t$  :

Masse de l'éprouvette à l'instant  $t$  (kg),  $M_0$  :

Masse initiale de l'éprouvette (kg),

A: Section immergée de l'éprouvette ( $\text{m}^2$ ),



Fig. II.18 : Etuve petit model 500°C.

**II.4.4 Porosité accessible à l'eau:[NFEN18-459]**

La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon la recommandation de l'AFPC AFREM. Cette porosité a été estimée en faisant la moyenne de trois valeurs. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 55 °C, jusqu'à stabilisation de la masse ( $M_d$ ), puis l'air présent dans les pores de mortier a été évacué à l'aide d'une pompe à vide. La masse des cubes de mortier entièrement saturés a été mesurée sous l'eau ( $M_{sw}$ ) et dans l'air ( $M_{sa}$ ). La porosité totale ( $P$ ) a été calculée en utilisant l'équation :

$$P = \frac{(M_{sa} - M_d) \times 100}{(M_{sa} - M_{sw})} \dots\dots\dots (5)$$

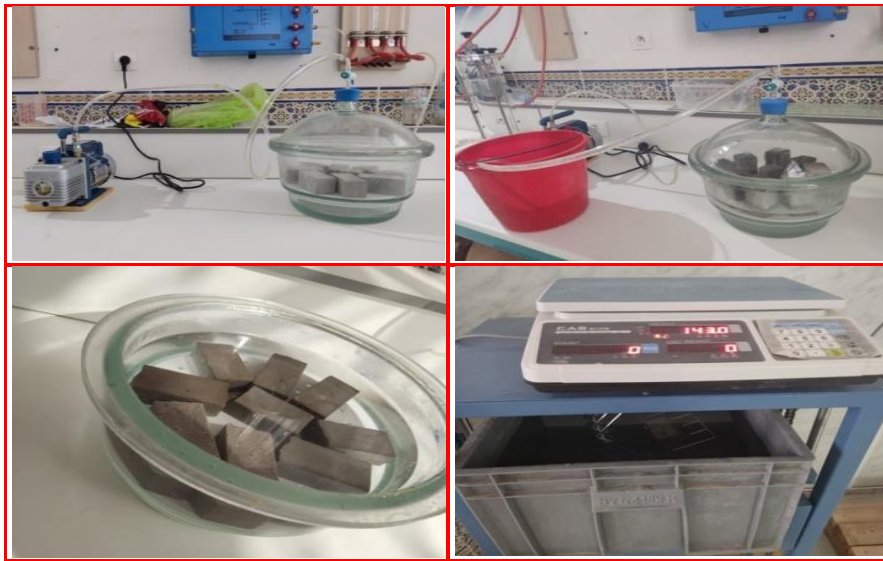
Ou:

## CHAPITRE II

$M_{SA}$ : est la masse saturée d'eau dans l'air.

$M_d$ : est la masse sèche.

$M_{SW}$ : est la masse saturée d'eau sous l'eau.



**Fig. II.19:**Dispositif de Mesure de la Porosité accessible à l'eau.

### II.4.4 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes de préparation appliquées à la bentonite.

Nous avons également montré les protocoles d'essais utilisés dans cette recherche pour la détermination des propriétés physiques (porosité, absorption d'eau), mécaniques (résistance à la traction par flexion et résistance à la compression) de composites cimentaires substitués avec différents pourcentages de bentonite.

## CHAPITRE III RESULTATS EXPERIMENTAUX INTERPRETATIONS

### III.1 Introduction:

Ce chapitre résume les résultats des différents essais suivis d'une discussion de ces résultats obtenus sur les mortiers comme : la variation de masse, la résistance à la flexion simple, la résistance de compression, l'absorption capillaire et la porosité des mortiers pendant une période de 60 jours.

Le but de notre travail est d'étudier l'influence des acides sur les propriétés mécaniques et physiques des mortiers cimentières modifiées par des pourcentages variés de bentonite.

**Tab.III.1:** Un tableau représentant les pourcentages de matériaux utilisés.

notation		pourcentage%		Pesée en (g)				
		Ciment	bentonite	Ciment	bentonite	sable	eau	Adjuvant
A1	Formulation 1	100	0	450	0	1350	270	0
A2	Formulation 2	90	10	405	45	1350	270	8
A3	Formulation 3	85	15	382,5	67,5	1350	270	11
A4	Formulation 4	80	20	360	90	1350	270	15
A5	Formulation 5	75	25	337,5	112,5	1350	270	22

$E/C=0,6$   $E=270g$ ,  $C=450g$

**Tab.III.2:** Un tableau représentant les pourcentages des acides utilisés.

Solution	Concentration (%)	Quantité/10litresd'eau	Observation
HCl	1	260ml/10L	Acid fort
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	104ml/10L	Acid fort
NaOH	5	6,5g/10L	Basique

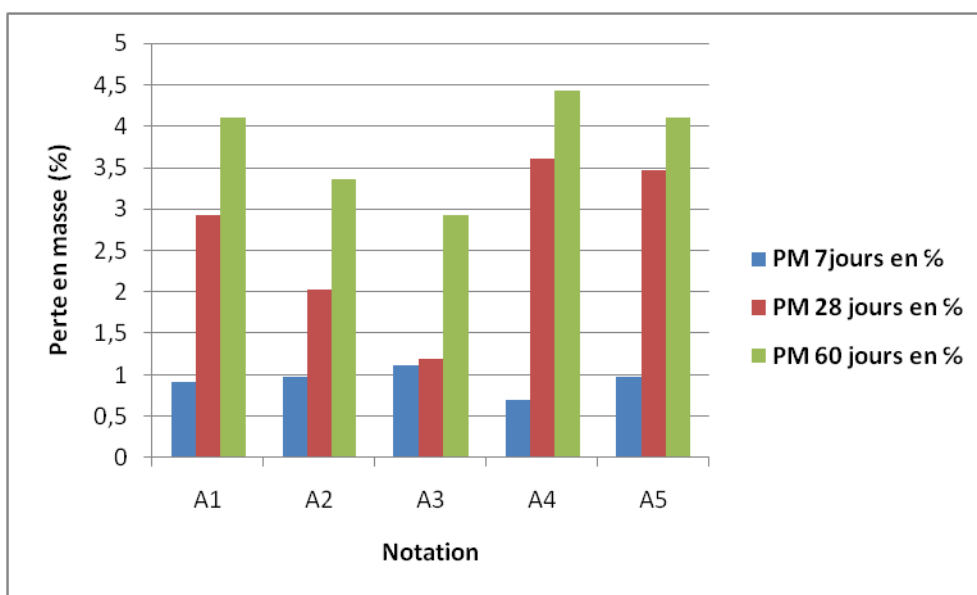
**III.2.Perte en masse:**

Des mesures de poids ont été effectuées sur les éprouvettes conservées dans les milieux acides pendant les temps variés 7, 28 et 60 jours et les résultats étaient comme suit :

**III.2.1. Perte en masse des mortiers conservés dans solution acide chlorhydrique( HCL).**

**Tab. III.3 :** Perte en masse des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

notation	PM 7 jours en %	PM 28 jours en %	PM 60 jours en %
A1 ( 0% de Bentonite)	0,92	2,92	4,1
A2 (10% de Bentonite)	0,97	2,03	3,36
A3 (15% de Bentonite)	1,11	1,19	2,92
A4 (20% de Bentonite)	0,69	3,6	4,43
A5 (25% de Bentonite)	0,97	3,47	4,1



**Fig.III.1 :** Perte en masse des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

D’après le tableau (III. 3) et la figure(III.1):

La figure (III.1) montre la variation de perte de masse des mortiers selon la variation de temps d’immersion.

Les résultats ont été obtenus dans le tableau (III.3), on peut noter que la perte en masse est importante dans toutes les éprouvettes.



### CHAPITRE III

#### III.2.2. Perte en masse des mortiers conservés dans solution acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ):

Tab.III.4: Perte en masse des mortiers conservés dans solution  $H_2SO_4$  pendant 7 ,28 et 60 jours.

notation	PM 7 jours en %	PM 28 jours en %	PM 60 jours en %
A1 ( 0% de Bentonite)	3,9	4,49	5,59
A2 (10% de Bentonite)	1,67	2,76	4,09
A3 (15% de Bentonite)	0,35	0,6	2,38
A4 (20% de Bentonite)	1,75	1,9	3,26
A5 (25% de Bentonite)	0,5	1,02	1,32

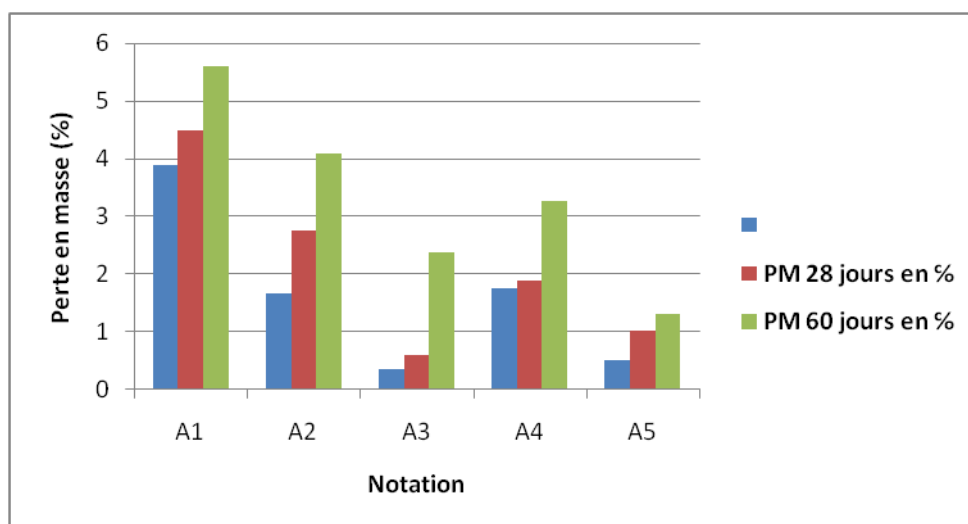


Fig.III.2 : Perte en masse des mortiers conservés dans solution  $H_2SO_4$  pendant 7 ,28 et 60 jours.

D'après le tableau (III.4) et la figure(III.2):

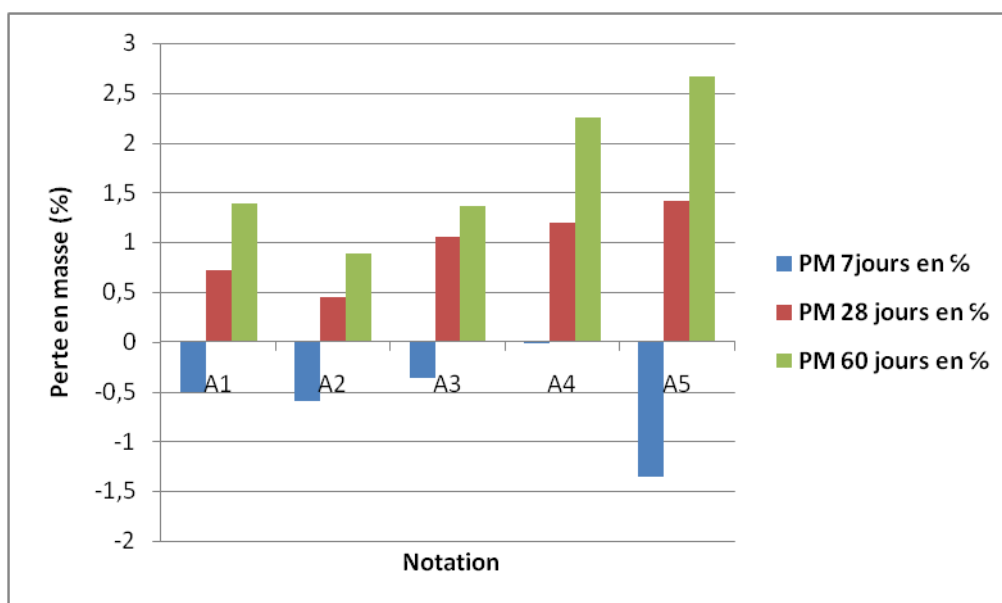
La figure (III.2) montre la variation de perte en masse des mortiers selon la variation de temps d'immersion.

Les résultats ont été obtenus dans le tableau (III.4) et montre une perte en masse importante des éprouvettes A1, A2 et A4, cette dernière diminue en A3 et A5.

**III.2.3: Perte en masse des mortiers conservés dans solution acide sodium hydroxyde ( NaOH).**

**Tab.III.5:** Perte en masse des mortiers conservés dans solution NaOH pendant 7, 28 et 60 jours.

notation	PM 7 jours en %	PM 28 jours en %	PM 60 jours en %
A1 ( 0% de Bentonite)	-0,51	0,72	1,39
A2 (10% de Bentonite)	-0,59	0,45	0,89
A3 (15% de Bentonite)	-0,36	1,06	1,36
A4 (20% de Bentonite)	-0,015	1,19	2,25
A5 (25% de Bentonite)	-1,36	1,41	2,66



**Fig.III.3 :** perte en masse des mortiers conservés dans solution NaOH pendant 7 ,28 et 60 jours.

D’après le tableau(III.5) et la figure(III.3):

La figure (III.3) montre la variation de perte en masse des mortiers selon la variation de temps d’immersion.

Les résultats ont été obtenus dans le tableau (III.5), on peut noter qu’en 7jours on a des augmentations légères en masse par contre en 28 et 60 jours on inscrit des légères diminutions de masses.

III.2 .4 : Etat visuel des éprouvettes après immersion dans les acides.



**Fig.III.4** : Perte en masse des mortiers conservés avec solutions acides  
Par ordre ( $H_2SO_4$ -HCL-NaOH)

**III.3. Résistance à la flexion simple:**

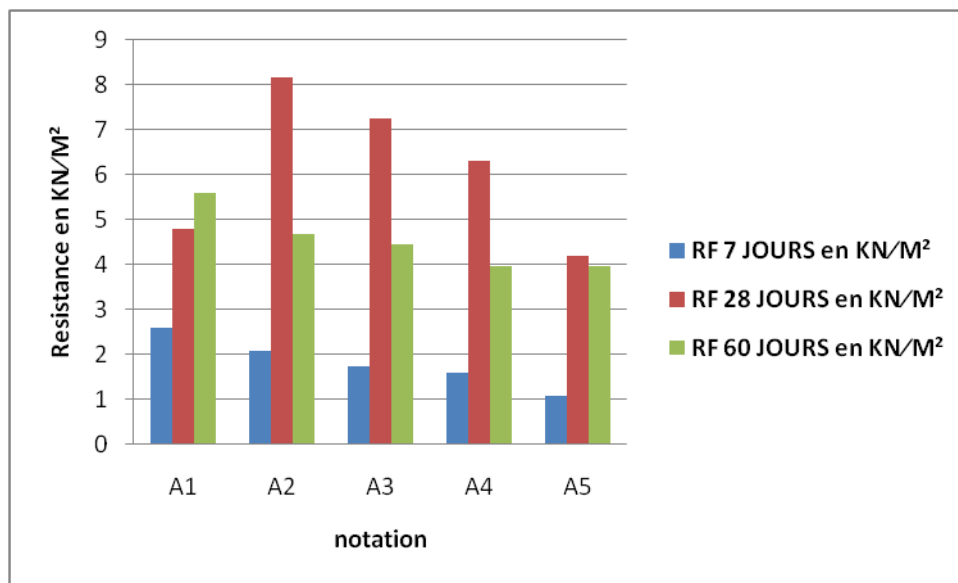
Les deux paramètres qui caractérisent le comportement en flexion des matrices cimentaires sont la première fissure et la résistance ultime en flexion [Elayesh, 2009]. Ces paramètres sont très importants et utiles pour des structures cimentaires sans renforcement. Dans cette partie, nous allons examiner le comportement à la flexion des différents mortiers modifiés par des pourcentages différents de bentonite.

Les résultats de ces essais sont représentés dans les tableaux ci dessus:

**III.3.1. Résistance à la flexion simple des mortiers témoins:**

**Tab.III.6 :** Résistance à la flexion simple des mortiers témoins pendant 7, 28 et 60 jours.

Notation	RF 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RF 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RF 60 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	2,6	4,8	5,61
A2 (10% de Bentonite)	2,1	8,16	4,68
A3 (15% de Bentonite)	1,75	7,25	4,45
A4 (20% de Bentonite)	1,6	6,318	3,98
A5 (25% de Bentonite)	1,1	4,21	3,98



**Fig.III.5:** Résistance à la flexion simple des mortiers témoins pendant 7, 28 et 60 jours.

### CHAPITRE III

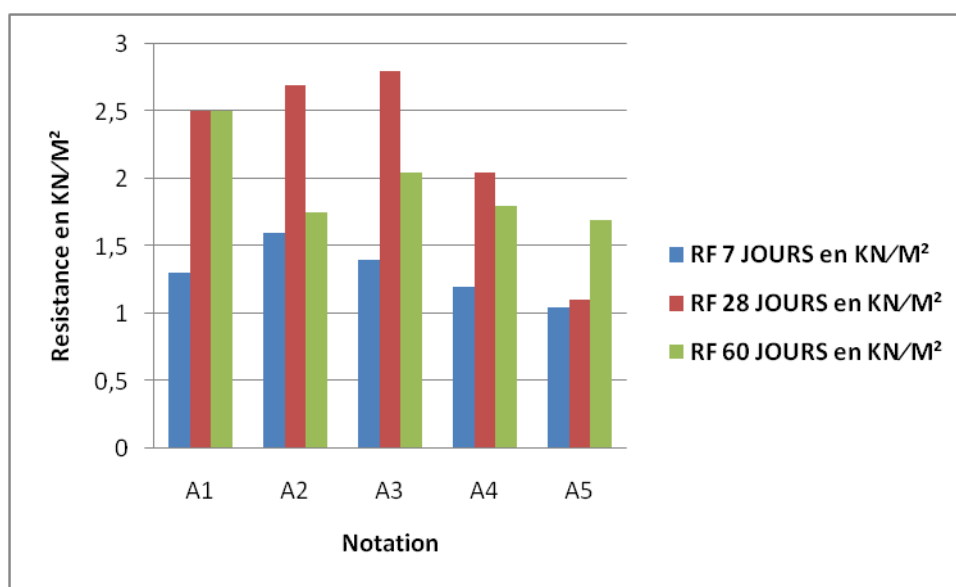
Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion simple ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.6) et la figure (III.5) :

On remarque des diminutions des valeurs de la résistance de flexion simple en jeune âge (7 jours) des mortiers A1 et A2, convergence des valeurs pour A3, A4, et A5 par rapport aux mortiers témoins, une diminution très importantes des valeurs en 28 et 60 jours.

#### III.3.2: Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution acide chlorhydrique( HCL)..

**Tab.III.7 :** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

Notation	RF 7 JOURS en KN/M <sup>2</sup>	RF 28 JOURS en KN/M <sup>2</sup>	RF 60 JOURS en KN/M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	1,3	2,5	2,5
A2 (10% de Bentonite)	1,6	2,7	1,75
A3 (15% de Bentonite)	1,4	2,8	2,05
A4 (20% de Bentonite)	1,2	2,05	1,8
A5 (25% de Bentonite)	1,05	1,1	1,7



**Fig.III.6:** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion simple ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le

### CHAPITRE III

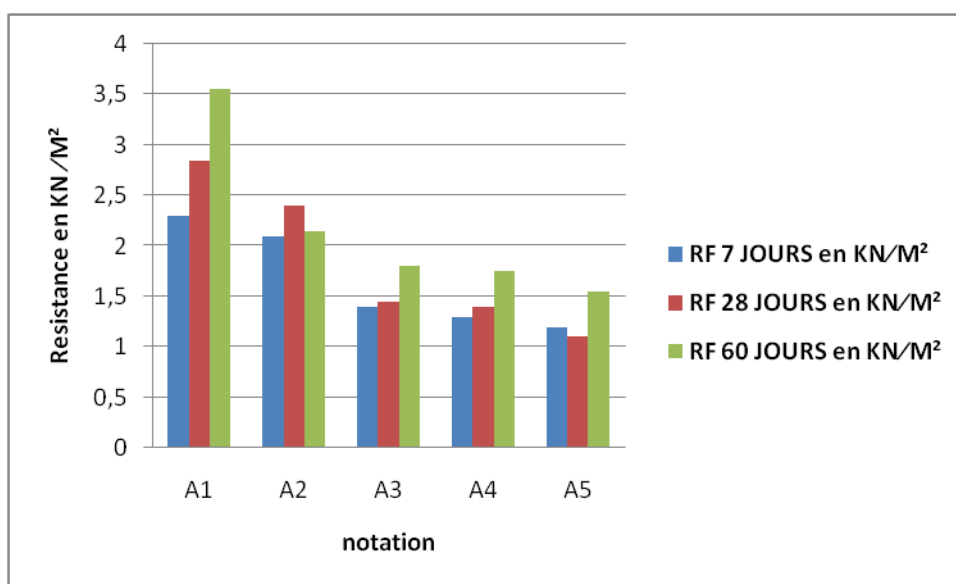
(tableau III.7) et la figure (III.6) :

On remarque des diminutions importantes des valeurs de la résistance de flexion simple pour tous les mortiers en 7, 28 et 60 jours.

#### III.3.3. Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ):

**Tab.III.8:** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution  $H_2SO_4$  pendant 7, 28 et 60 jours.

Notation	RF 7 JOURS en KN/M <sup>2</sup>	RF 28 JOURS en KN/M <sup>2</sup>	RF 60 JOURS en KN/M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	2,3	2,85	3,55
A2 (10% de Bentonite)	2,1	2,4	2,15
A3 (15% de Bentonite)	1,4	1,45	1,8
A4 (20% de Bentonite)	1,3	1,4	1,75
A5 (25% de Bentonite)	1,2	1,1	1,55



**Fig.III.7:** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution  $H_2SO_4$  pendant 7, 28 et 60 jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion simple ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.8) et la figure (III.7) :

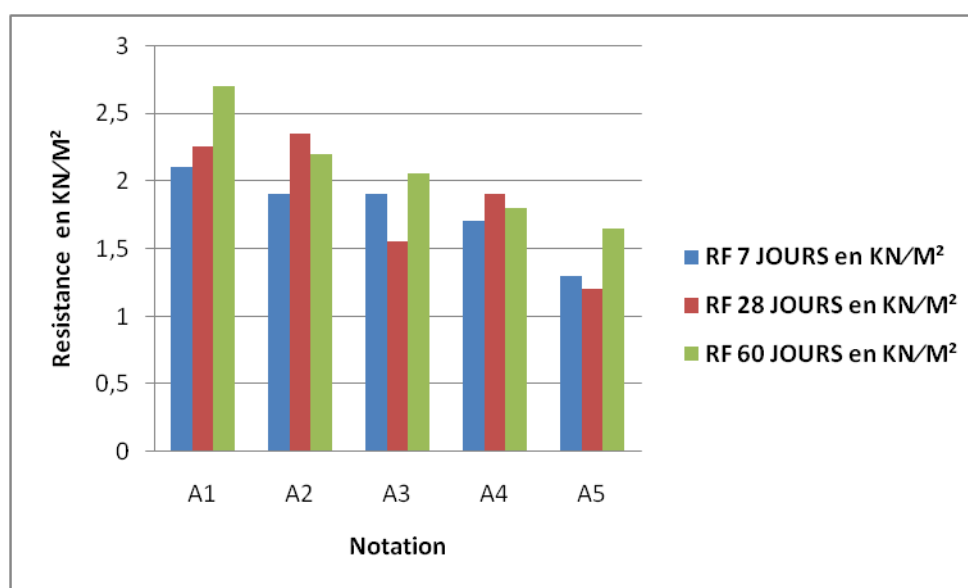
### CHAPITRE III

On remarque une convergence des valeurs de la résistance de flexion simple en jeune âge (7jours) de tous les mortiers, diminution très importantes des valeurs en 28 à 60 jours par rapport aux mortiers témoins.

#### III.3.4: Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution acide sodium hydroxyde ( NaOH).

**Tab.III.9:** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution NaOH pendant 7, 28 et 60 jours.

Notation	RF 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RF 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RF 60 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	2,1	2,25	2,7
A2 (10% de Bentonite)	1,9	2,35	2,2
A3 (15% de Bentonite)	1,9	1,55	2,05
A4 (20% de Bentonite)	1,7	1,9	1,8
A5 (25% de Bentonite)	1,3	1,2	1,65



**Fig.III.8:** Résistance à la flexion simple des mortiers conservés dans solution NaOH pendant 7, 28 et 60 jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de flexion simple ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.9) et la figure (III.8) :

### CHAPITRE III

On remarque une convergence des valeurs de la résistance de flexion simple en jeune âge (7jours) de tous les mortiers, diminution très importantes des valeurs en 28 à 60 jours par rapport aux mortiers témoins.

#### III.4 : Résistance à la compression:

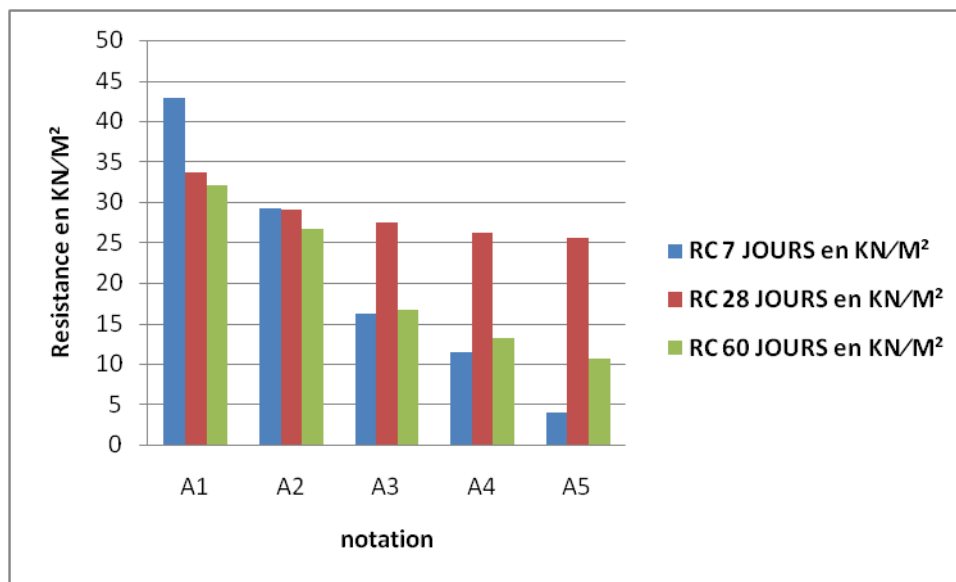
Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de compression ont été effectués sur les échantillons.

Les résultats de ces essais sont représentés dans le tableau ci dessus:

##### III.4.1. Résistance à la compression des mortiers témoins:

**Tab.III.10:**Résistance à la compression des mortiers témoins.

Notation	RC 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 60 JOURS en KN/M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	42,9	33,69	32
A2 (10% de Bentonite)	29,15	29,1	26,62
A3 (15% de Bentonite)	16,15	27,4	16,66
A4 (20% de Bentonite)	11,4	26,25	13,16
A5 (25% de Bentonite)	4	25,6	10,63



**Fig.III.9:** Résistance à la compression des mortiers témoins.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de compression ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.10) et la figure (III.9) :

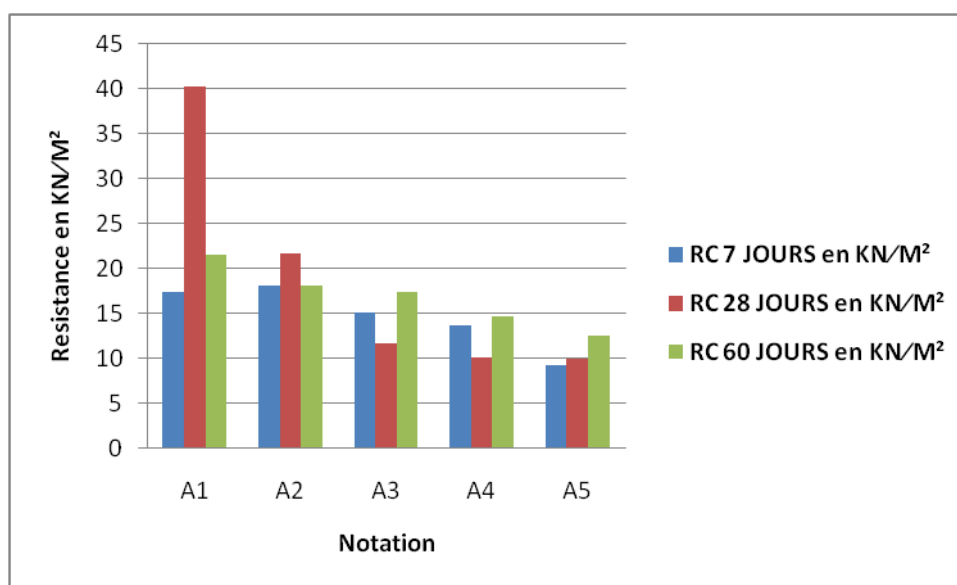


On remarque une diminution des valeurs de résistance en 7,28 et 60 jours toute en variant le pourcentage de bentonite par rapport aux mortiers témoins.

**III.4.2. Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution acide chlorhydrique( HCL).**

**Tab.III.11:** Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

Notation	RC 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 760JOURS en KN/ M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	17,5	40,25	21,53
A2 (10% de Bentonite)	18,19	21,7	18,13
A3 (15% de Bentonite)	15,19	11,75	17,5
A4 (20% de Bentonite)	13,7	10,1	14,78
A5 (25% de Bentonite)	9,28	10	12,6



**Fig.III.10:** Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution HCL pendant 7, 28 et 60 jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de compression ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.11) et la figure (III.10) :

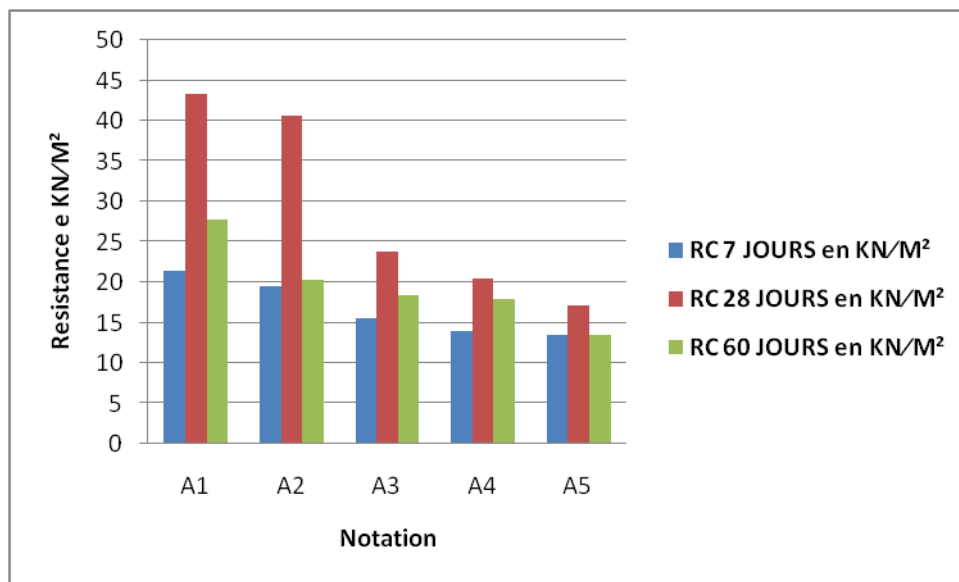
### CHAPITRE III

On remarque une diminution des valeurs de résistance en 7,28 et 60 jours toute en variant le pourcentage de bentonite par rapport aux mortiers témoins. On constate aussi que tous les mortiers perdent leurs résistances sauf A1 ( $40.25 \text{ kn/m}^2$ ) en 28 jours.

#### III.4.3 : Résistance à la compression des mortiers conservés avec solution acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ):

**Tab.III.12:** Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pendant 7, 28et 60jours.

Notation	RC 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 60JOURS en KN/ M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	21,4	43,34	27,75
A2 (10% de Bentonite)	19,56	40,56	20,3
A3 (15% de Bentonite)	15,5	23,84	18,47
A4 (20% de Bentonite)	14	20,4	18
A5 (25% de Bentonite)	13,5	17,1	13,5



**Fig. III.11 :** Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pendant 7,28et 60jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de compression ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le (tableau III.10) et la figure (III.9) :

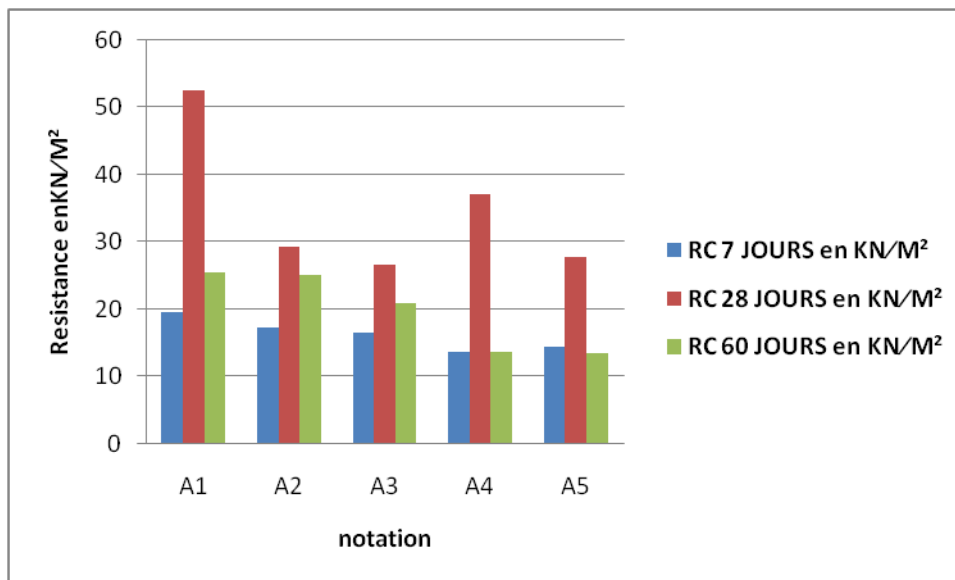
### CHAPITRE III

On remarque une diminution des valeurs de résistance en 7,28 et 60 jours toute en variant le pourcentage de bentonite par rapport aux mortiers témoins. On constate aussi que tous les mortiers perdent leurs résistance sauf A1 (543.34  $\text{kn/m}^2$ ), A2 (40.56  $\text{kn/m}^2$ ) en 28 jours et A1 (27.75  $\text{kn/m}^2$ ) en 60 jours

#### III.4.4: Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution acide sodium hydroxyde ( NaOH).

**Tab.III.13:** Résistance à la compression des mortiers conservés dans solution NaOH pendant 7,28et 60jours.

Notation	RC 7 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 28 JOURS en KN/ M <sup>2</sup>	RC 60JOURS en KN/M <sup>2</sup>
A1 ( 0% de Bentonite)	19,6	52,63	25,5
A2 (10% de Bentonite)	17,28	29,31	25,1
A3 (15% de Bentonite)	16,6	26,7	20,94
A4 (20% de Bentonite)	13,75	37,2	13,75
A5 (25% de Bentonite)	14,4	27,87	13,53



**Fig.III.12:** Résistance à la compression du mortier conservé dans solution NaOH pendant 7, 28 et 60jours.

Pour comprendre le comportement mécanique des échantillons, des essais de compression ont été effectués sur les échantillons, les résultats de ces essais sont représentés dans le

### CHAPITRE III

(tableau III.10) et la figure (III.9) :

On remarque une diminution des valeurs de résistance en 7,28 et 60 jours toute en variant le pourcentage de bentonite par rapport aux mortiers témoins. On constate aussi que tous les mortiers perdent leurs résistance sauf A1 (52.63 kn/m<sup>2</sup>), A2 (29.31 kn/m<sup>2</sup>) en 28 jours et A1 (25.5 kn/m<sup>2</sup>) A2 (25.1 kn/m<sup>2</sup>) en 60 jours

#### III.5.Absorption capillaire :

Les figures et les tableaux montrent la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de temps, pour les mortiers à différents dosage avec l'ajout de bentonite.

##### III.5.1. Absorption capillaire des mortiers témoins.

Tab.III.14 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (7jours)

		absorption d'eau capillaire (7jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
A1 ( 0% de Bentonite)		1,612	2,019	2,444	3,381	3,988	4,513	5,456
A2 (10% de Bentonite)		1,656	1,962	2,369	3,287	3,875	4,381	5,288
A3 (15% de Bentonite)		1,581	2,144	2,312	3,225	3,856	4,331	5,269
A4 (20% de Bentonite)		1,781	2,344	2,506	3,444	4,125	4,575	5,531
A5 (25% de Bentonite)		1,775	2,244	2,388	3,238	3,831	4,225	5,572

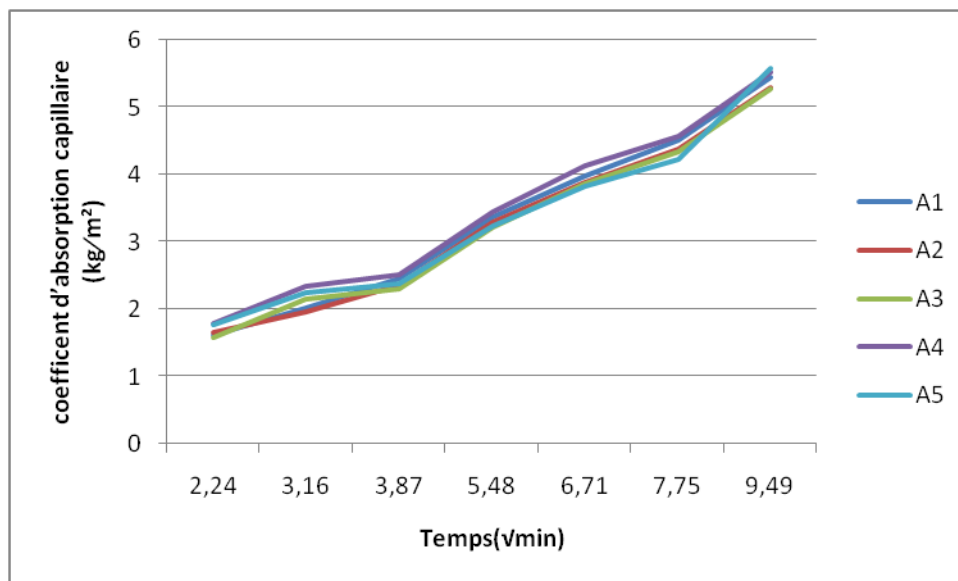


Fig. III.13: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (7jours)

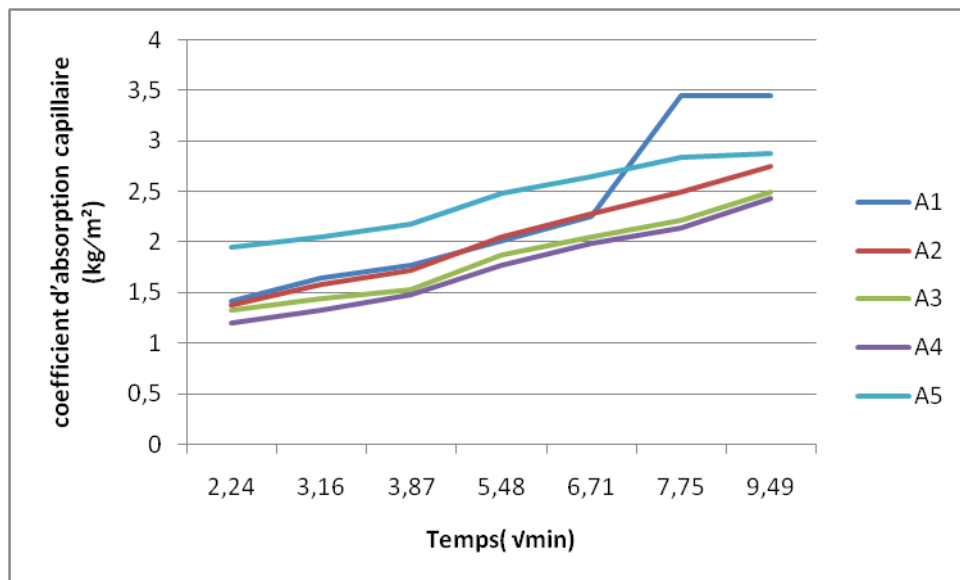
### CHAPITRE III

D'après le tableau (Tab.III.14) et la figure (Fig. III.13) :

-En 7 jour, on observe que la quantité d'eau absorbée converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,572) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (5,269) dans l'échantillon A3 contenant 15 % de bentonite.

**Tab.III.15** : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (28jours).

		Absorption d'eau capillaire (28jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
notation	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,419	1,65	1,769	2,019	2,256	3,437	3,442
	A2 (10% de Bentonite)	1,375	1,575	1,719	2,05	2,275	2,5	2,75
	A3 (15% de Bentonite)	1,331	1,444	1,531	1,875	2,05	2,219	2,494
	A4 (20% de Bentonite)	1,194	1,325	1,469	1,763	1,975	2,138	2,425
	A5 (25% de Bentonite)	1,95	2,056	2,181	2,481	2,65	2,831	2,463



**Fig. III.14**: Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (28jours)

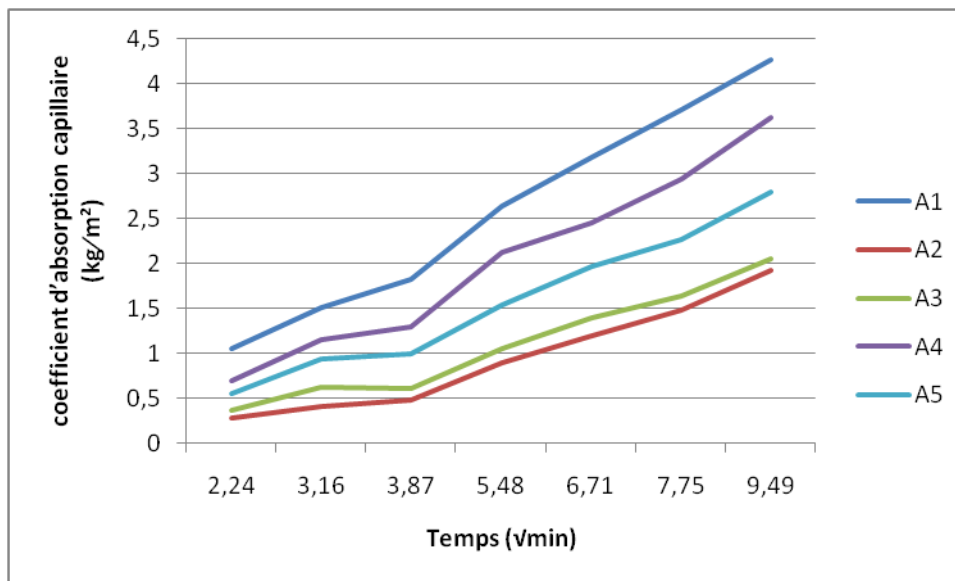
D'après le tableau (Tab.III.15) et la figure (Fig. III.14) :

### CHAPITRE III

-En 28 jour, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (3,442) dans l'échantillon A1 contenant 0 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (2,463) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite.

**Tab.III.16:** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (60jours).

		absorption d'eau capillaire (60jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
$\sqrt{t}$	$\sqrt{t}$	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
notation								
A1 ( 0% de Bentonite)		1,056	1,519	1,831	2,644	3,194	3,713	4,275
A2 (10% de Bentonite)		0,281	0,413	0,475	0,894	1,194	1,481	1,931
A3 (15% de Bentonite)		0,369	0,625	0,612	1,062	1,4	1,644	2,062
A4 (20% de Bentonite)		0,694	1,15	1,288	2,125	2,456	2,937	3,625
A5 (25% de Bentonite)		0,562	0,95	1	1,544	1,969	2,263	2,794



**Fig. III.15:** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers témoins (60jours)

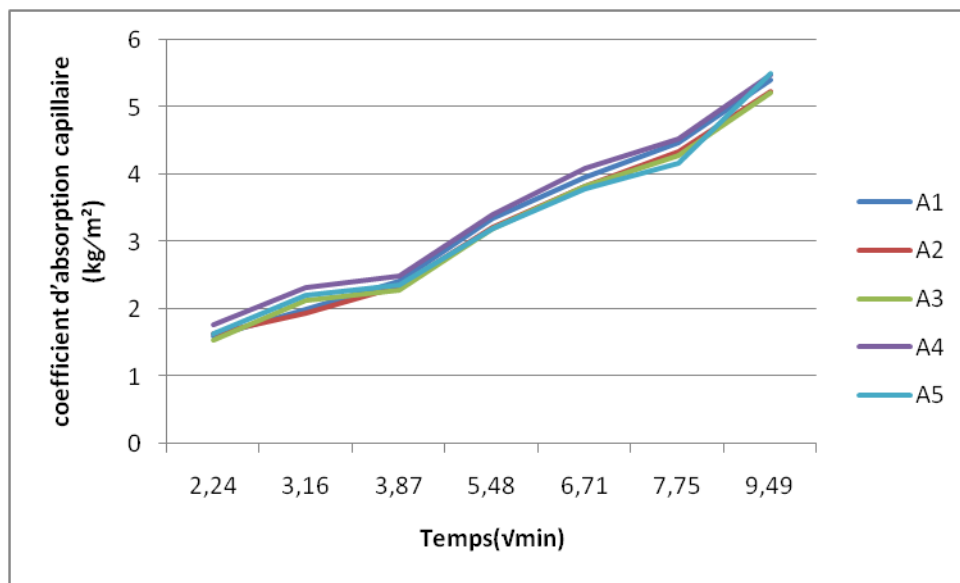
D'après le tableau (Tab.III.16) et la figure (Fig. III.14) :

-En 60 jour, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (4,275) dans l'échantillon A1 contenant 0 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (1,931) dans l'échantillon A2 contenant 10 % de bentonite.

**III.5.2 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution acide chlorhydrique ( HCL).**

**Tab.III.17 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (7jours).

		absorption d'eau capillaire (7jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
notation	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,597	2	2,421	3,35	3,951	4,471	5,405
	A2 (10% de Bentonite)	1,644	1,943	2,346	3,225	3,837	4,335	5,236
	A3 (15% de Bentonite)	1,536	2,12	2,286	3,189	3,813	4,282	5,21
	A4 (20% de Bentonite)	1,768	2,327	2,489	3,42	4,096	4,543	5,493
	A5 (25% de Bentonite)	1,644	2,222	2,364	3,206	3,793	4,184	5,513



**Fig.III.16:** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (7jours).

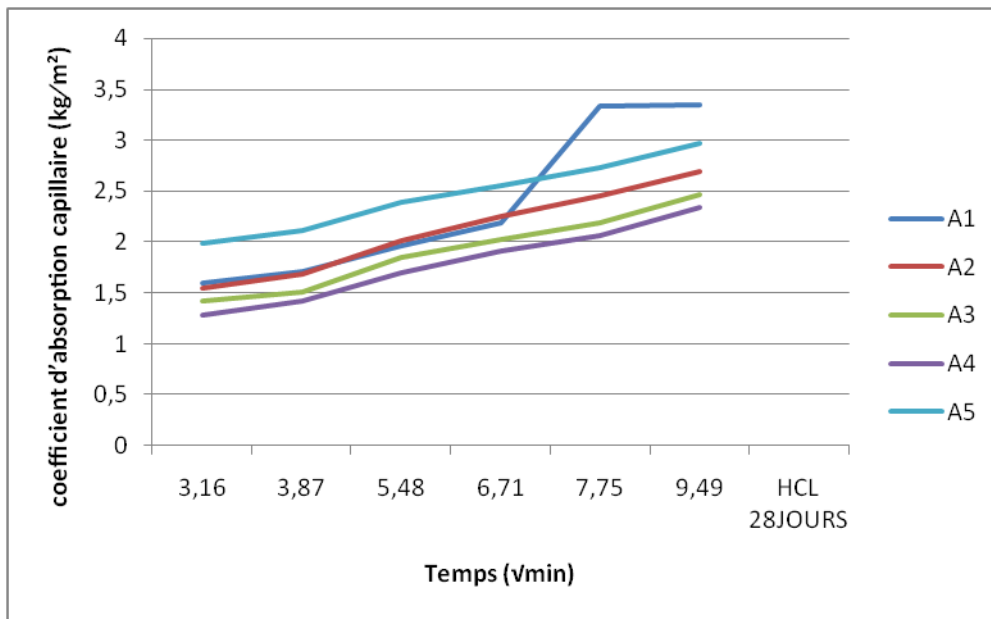
D'après le tableau (Tab.III.17) et la figure (Fig. III.16) :

-En 7 jours, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistré (4,275) dans l'échantillon A1 contenant 0 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistré (1,931) dans l'échantillon A2 contenant 10 % de bentonite.

### CHAPITRE III

**Tab.III.18 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (28jours).

		Absorption d'eau capillaire (28jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,406	1,601	1,717	1,96	2,19	3,336	3,345
	A2 (10% de Bentonite)	1,347	1,543	1,684	2,008	2,247	2,449	2,694
	A3 (15% de Bentonite)	1,315	1,426	1,512	1,852	2,025	2,192	2,464
	A4 (20% de Bentonite)	1,151	1,277	1,416	1,699	1,904	2,061	2,337
	A5 (25% de Bentonite)	1,882	1,984	2,105	2,394	2,558	2,732	2,974



**Fig.III.17 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (28jours).

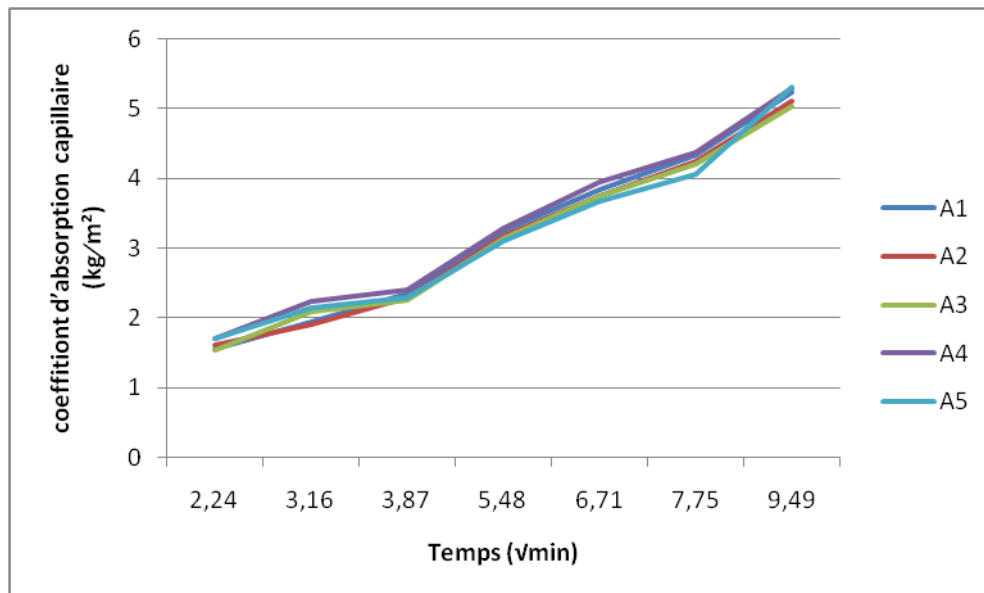
D'après le tableau (Tab.III.18) et la figure (Fig. III.17) :

-En 28 jours, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (3,345) dans l'échantillon A1 contenant 0 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (2,337) dans l'échantillon A4 contenant 20 % de bentonite.



**Tab.III. 19:** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (60jours).

		Absorption d'eau capillaire (60jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
vmin	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,546	1,936	2,343	3,242	3,824	4,327	5,232
	A2 (10% de Bentonite)	1,6	1,896	2,289	3,176	3,744	4,233	5,11
	A3 (15% de Bentonite)	1,534	2,081	2,244	3,131	3,743	4,204	5,035
	A4 (20% de Bentonite)	1,702	2,24	2,395	3,291	3,942	4,372	5,286
	A5 (25% de Bentonite)	1,702	2,151	2,29	3,105	3,674	4,051	5,311



**Fig. III.18 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution HCL (60jours).

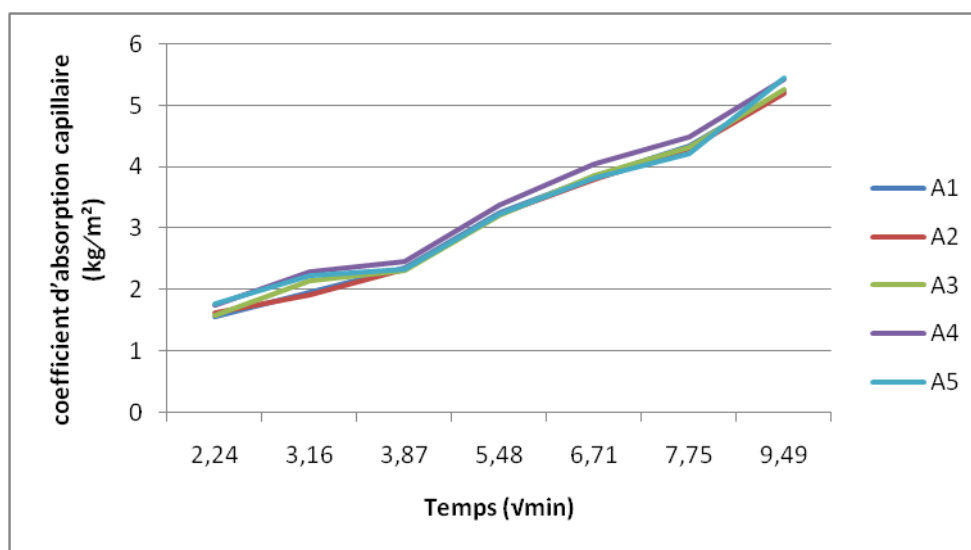
D'après le tableau (Tab.III.19) et la figure (Fig. III.18) :

-En 60 jours, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistre (5,311) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistre (5,035) dans l'échantillon A3 contenant 15 % de bentonite.

**III.5.3 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).**

**Tab.III.20 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (7jours).

		Absorption d'eau capillaire (7jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
notation	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,549	1,94	2,348	3,249	3,832	4,336	5,243
	A2 (10% de Bentonite)	1,628	1,929	2,329	3,232	3,81	4,307	5,199
	A3 (15% de Bentonite)	1,575	2,136	2,304	3,213	3,842	4,315	5,25
	A4 (20% de Bentonite)	1,749	2,303	2,462	3,383	4,052	4,495	5,434
	A5 (25% de Bentonite)	1,766	2,232	2,326	3,221	3,811	4,203	5,444



**Fig. III.19 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (7jours).

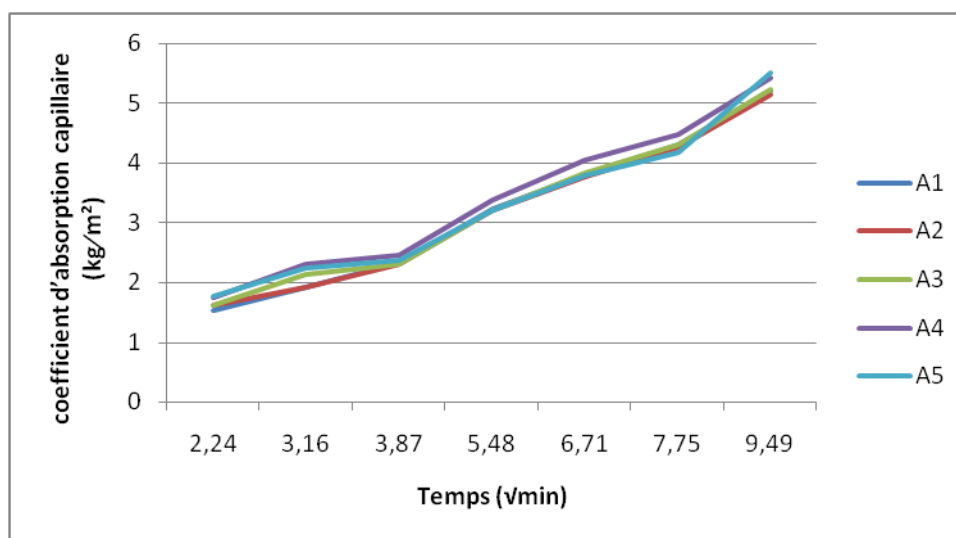
D'après le tableau (Tab.III.20) et la figure (Fig. III.19) :

-En 7 jour, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistré (5,444) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistré (5,199) dans l'échantillon A2 contenant 10 % de bentonite.

### CHAPITRE III

**Tab.III.21** : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (28jours).

		Absorption d'eau capillaire (28jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,539	1,928	2,334	3,229	3,808	4,31	5,211
	A2 (10% de Bentonite)	1,61	1,907	2,303	3,196	3,768	4,26	5,142
	A3 (15% de Bentonite)	1,606	2,131	2,298	3,205	3,832	4,305	5,232
	A4 (20% de Bentonite)	1,747	2,299	2,458	3,378	4,046	4,488	5,426
	A5 (25% de Bentonite)	1,756	2,221	2,363	3,205	3,792	4,182	5,513



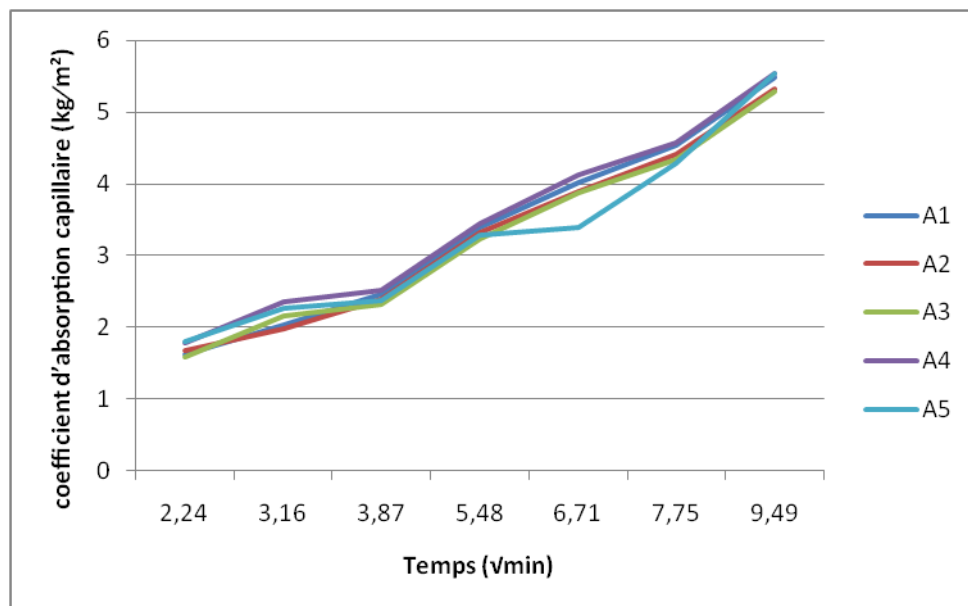
**Fig. III.20** : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (28jours).

D'après le tableau (Tab.III.21) et la figure (Fig. III.20) :

-En 28 jour, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistré (5,513) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistré (5,142) dans l'échantillon A2 contenant 10 % de bentonite.

**Tab.III.22 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (60jours).

		Absorption d'eau capillaire (60jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,62	2,029	2,456	3,398	4,008	4,536	5,483
	A2 (10% de Bentonite)	1,665	1,973	2,383	3,306	3,889	4,406	5,319
	A3 (15% de Bentonite)	1,586	2,151	2,32	3,236	3,87	4,346	5,287
	A4 (20% de Bentonite)	1,781	2,344	2,506	3,444	4,125	4,575	5,531
	A5 (25% de Bentonite)	1,799	2,273	2,37	3,282	3,3883	4,282	5,542



**Fig.III.21 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (60jours).

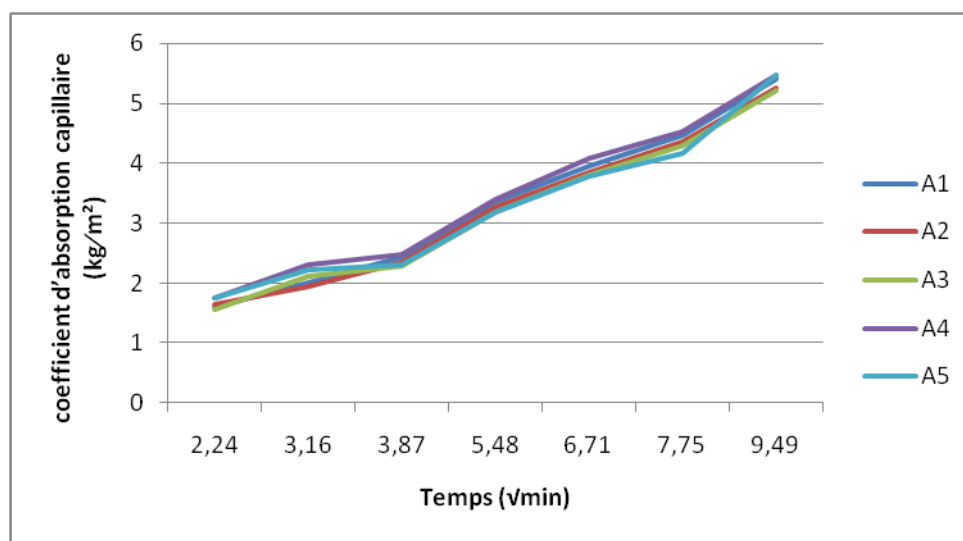
D'après le tableau (Tab.III.22) et la figure (Fig. III.21) :

-En 60 jours, on observe que la quantité d'eau absorbée converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,542) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (5,287) dans l'échantillon A3 contenant 15 % de bentonite.

**III.5.4 : Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution acide sodium hydroxyde ( NaOH).**

**Tab.III.23 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (7jours).

		Absorption d'eau capillaire (7jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
notation	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,6	2,004	2,426	3,356	3,959	4,48	5,416
	A2 (10% de Bentonite)	1,648	1,953	2,358	3,27	3,857	4,361	5,264
	A3 (15% de Bentonite)	1,564	2,121	2,287	3,191	3,81	4,285	5,213
	A4 (20% de Bentonite)	1,759	2,316	2,476	3,403	4,076	4,52	5,465
	A5 (25% de Bentonite)	1,75	2,212	2,305	3,192	3,777	4,165	5,471



**Fig. III.22 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (7jours).

D'après le tableau (Tab.III.23) et la figure (Fig. III.22) :

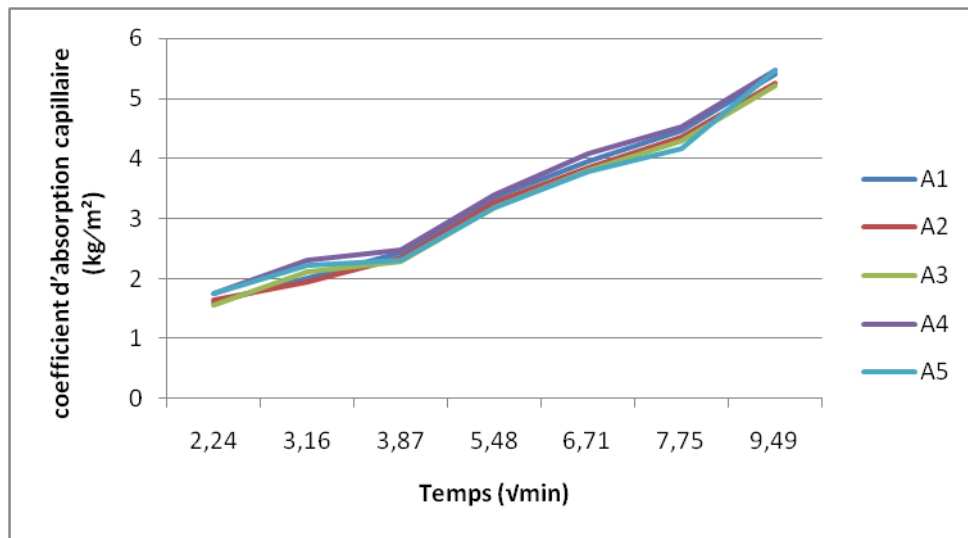
-En 7 jours, on observe que la quantité d'eau absorbé converge et augmente avec le temps

### CHAPITRE III

avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,471) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite et la valeur la plus basse a été enregistrée (5,213) dans l'échantillon A3 contenant 15 % de bentonite.

**Tab.III.24 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (28jours).

		Absorption d'eau capillaire (28jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
notation	vmin	2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,6	2,004	2,426	3,356	3,959	4,48	5,416
	A2 (10% de Bentonite)	1,648	1,953	2,358	3,27	3,857	4,361	5,264
	A3 (15% de Bentonite)	1,564	2,121	2,287	3,191	3,81	4,285	5,213
	A4 (20% de Bentonite)	1,759	2,316	2,476	3,403	4,076	4,52	5,465
	A5 (25% de Bentonite)	1,75	2,212	2,305	3,192	3,777	4,165	5,471



**Fig. III.23 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (28jours).

D'après le tableau (Tab.III.24) et la figure (Fig. III.23) :

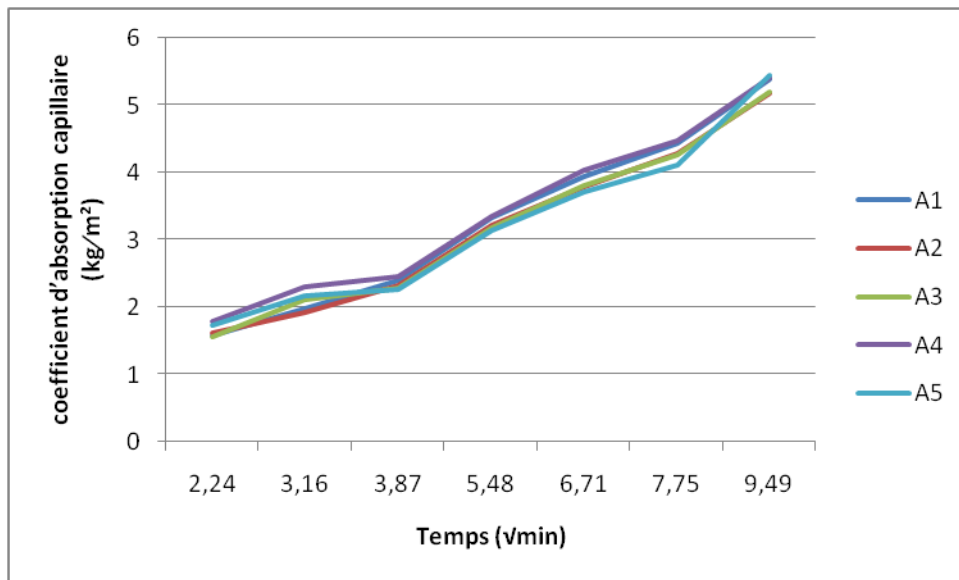
-En 28 jours, on observe que la quantité d'eau absorbée converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,471) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite

### CHAPITRE III

et la valeur la plus basse a été enregistrée (5,213) dans l'échantillon A3 contenant 15 % de bentonite.

**Tab.III.25 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (60jours).

		Absorption d'eau capillaire (60jours) en (kg/m <sup>2</sup> )						
Temps (min)		5	10	15	30	45	60	90
vmin		2,24	3,16	3,87	5,48	6,71	7,75	9,49
	notation							
	A1 ( 0% de Bentonite)	1,589	1,991	2,41	3,334	3,932	4,427	5,38
	A2 (10% de Bentonite)	1,624	1,925	2,324	3,225	3,801	4,298	5,188
	A3 (15% de Bentonite)	1,559	2,115	2,28	3,181	3,803	4,272	5,197
	A4 (20% de Bentonite)	1,781	2,291	2,449	3,336	4,032	4,472	5,406
	A5 (25% de Bentonite)	1,741	2,184	2,275	3,152	3,729	4,112	5,453



**Fig. III.24 :** Absorption d'eau capillaire par unité de surface des mortiers conservés dans solution NaOH (60jours).

D'après le tableau (Tab.III.25) et la figure (Fig. III.23) :

-En 60 jours, on observe que la quantité d'eau absorbée converge et augmente avec le temps avec la valeur la plus élevée enregistrée (5,453) dans l'échantillon A5 contenant 25 % de bentonite

### CHAPITRE III

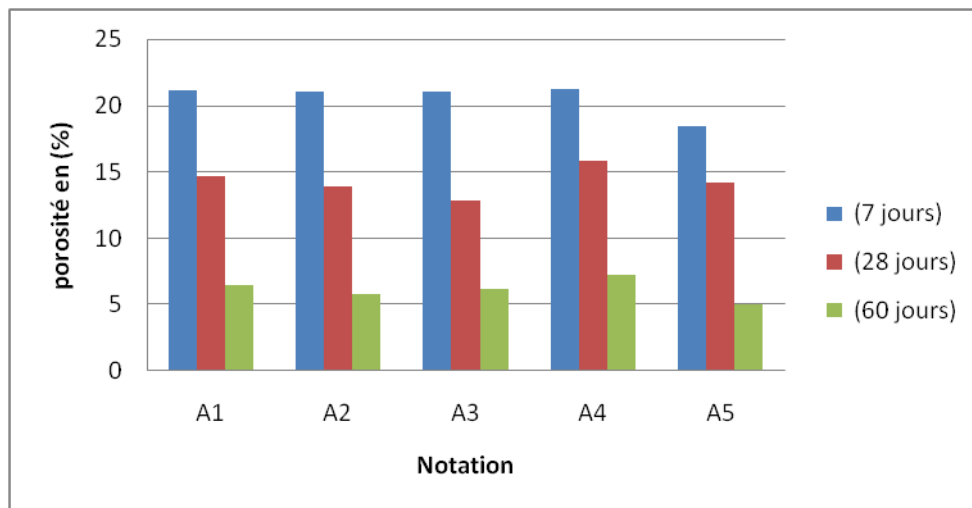
et la valeur la plus basse a été enregistré (5,188) dans l'échantillon A2 contenant 10 % de bentonite.

#### III.6.Porosité accessible à l'eau.

Le tableau (III.6) montre la porosité accessible à l'eau pour les mortiers avec différents pourcentages de bentonite.

**Tab. III.26** : résultats de porosités accessibles à l'eau.

Notation	Porosité accessible à l'eau		
	7 JOURS	28 JOURS	60 JOURS
	POROSITE(%)	POROSITE(%)	POROSITE(%)
A1 ( 0% de Bentonite)	21,18	14,7	6,5
A2 (10% de Bentonite)	21,02	13,86	5,75
A3 (15% de Bentonite)	21,06	12,82	6,18
A4 (20% de Bentonite)	21,26	15,8	7,24
A5 (25% de Bentonite)	18,4	14,17	4,98



**Fig. III.25:** Résultats de porosités accessibles à l'eau.

-D'après le tableau (Tableau III.26) et la figure (Figure III.25 ), nous notons que Porosité accessible à l'eau le 7 jours a donné des valeurs similaires, et la valeur la plus élevée



### CHAPITRE III

(21,26 %) a été enregistrée dans l'échantillon A4 qui contient une proportion (20%) de bentonite et la valeur la plus faible (18,40%) était dans l'échantillon A5 qui contient une proportion (25%) de bentonite.

-Le jour 28, nous notons que la valeur la plus élevée dans le Porosité accessible à l'eau était 15,80% dans l'échantillon A4 contenant une proportion de (20%) de bentonite Par rapport à l'échantillon A3, il a donné la valeur la plus faible de (12,82%) et qui contient (15%) de bentonite.

-Le jour 60 Nous notons que le Porosité accessible à l'eau est faible par rapport aux 7 et 28 jours, où la valeur la plus élevée a été enregistrée (7,24%) dans l'échantillon A4 qui contient une proportion (20%) de bentonite La valeur la plus basse enregistrée (4,98%) dans l'échantillon A5 avec une proportion (25%) de bentonite.

#### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des travaux expérimentaux sur les mortiers formulés du point de vue caractéristiques mécaniques en compression et en flexion ainsi que l'absorption capillaire, porosité accessible à l'eau, ont été réalisés dans le cadre de notre projet de fin d'études et de donner des interprétations à ces résultats et les justifier.

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude a permis de confirmer l'impossibilité de la valorisation de l'argile de type bentonite de la région de MAGNIA en tant que matériaux substituables en partie de ciment, il a été utilisé dans ce travail différents teneurs de bentonite pour la confection des mortiers (10%, 15%, 20% et 25%).

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Le ciment artificiel à base de bentonite calcinée en pourcentage de 10% vérifie les conditions requises pour un matériau pouzzolanique,
- Le ciment artificiel à base de bentonite calcinée perd sa résistance en présence d'acides chlorhydrique (HCL) et l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

## REFERENCES

### REFERENCES:

- [1] Ramade, F., 2007, Introduction à l'écotoxicologie, Fondements et explications, TEC & Doc Lavoisier, Paris-Sud, 618p.
- [2] Ronneau, C., 2004, Énergie, pollution et développement durable. Presses universitaires de Louvain, Louvain-La-Neuve, 304p.
- [3] Leguay, J.P., 1999, La Pollution au Moyen-Âge, Ed. Broché, Paris, 127p.
- [4] Bugge, H.C., 1976, La pollution industrielle: problèmes juridiques et administratifs, PUF, Paris, 301 p.
- [5] <https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20150401/35577.html>
- [6] Damtoft, J.S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.M.; Gartner, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. Cem. Concr. Res. **2008**, *38*, 115–127.
- [7] HOUARI Hacène « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », THÈSE, Doctorat en science en Génie Civil Option : Matériaux : Soutenue le 2009 ; 1-3-21-25p.
- [8] M. Venuat, « La pratique des ciments, mortiers et bétons » Tome 1 : Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers - édition 2 – Collection Moniteur. - 1989 – 277p.
- [9] Thomas Point. « Influence des hydroxypropylguar sur les propriétés du mortier de ciment à l'état frais » 27 juin 2014. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00936958/document>
- [10] [www.chapitre1revue.de.ladocumentation.com](http://www.chapitre1revue.de.ladocumentation.com)
- [11] Brocard J. Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment, Tome I. Paris ; Librairie Aristide Quillet 1968. p 813-815.
- [12] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base d'argile gréseuse et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires »
- [13] <https://www.infociments.fr/ciments/types-et-composition>
- [14] El-Batouti, M., O. Ivi. Sadek et F. F. Assaad. 2003. « Kinetics and Thermodynamics Studies of Copper Exchange on Na-montmorillonite Clay Mineral ». Journal of Colloid and Interface Science, vol. 259, p. 223-227
- [15] Abassi, T. (2013). « Influence des additions locales pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons à jeunes âges ». Mémoire
- [16] L. PLISKIN: « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p - Paris 1993.
- [17] R. CHAID. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006.
- [18] M. Regourd, H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87-1975.
- [19] R. Gané « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2 - Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [20] E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires – Modélisation de l'influence des équilibres physico-

## REFERENCES

- chimiquessurlamicrostructureetlespropriétés mécaniquesrésiduelles»,  
thèsededoctorat,ENSCachan/CNRS/UniversitéParis6,France-2004.
- [21] **Y. Older**, « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans *Lea's- Chemistry of Cement and Concrete*, chap.6,Arnold, 4th éd-1998.
- [22] **Kiran Pokkuluri**«Effectof admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» -  
Masterthesis– VirginiaUniversity– 210p-October 1998.
- [23] BELHOCINE, A. and N. NAGOUDI, Etude expérimentale d'un mortier avec  
ajouts minéraux.
- [24] Pierre MEUKAM.«Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique  
des bâtiments»,Thèsededoctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [25] Vénuat, M., *L'art de la pratique des cimentés, mortiers et bétons*. 1989: Editions du Moniteur.
- [26] Ollivier JP, Carles-  
Gibergues A, Hanna B.«Activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée  
de silice dans la matrice de béton de haute résistance». *Cem Concr Res* 1988.
- [27] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base d'argile  
gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire ».
- [28] Khadidja, Z., Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières  
premières-Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement. 2011, Université  
Hassiba Ben Boualide Chlef.
- [29] BOUGDAH N. 2007. Etude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite  
.Mém. Mag. Univ. Skikda.
- [30] Pharmacopée européenne. 6th ed, 2008.
- [31] BOURAS O. (2003) propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles synthèse  
et caractérisation. Mém. Doctorat. Univ. LIMOGES.
- [32] McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms. Retrieved June 12, 2008.
- [33] MEBARKI K, TABAHRII M. N. 2011, Géochimie de la bentonite du gisement  
de la région de Maghnia et applications industrielles. Mém. Mast. Univ. Tlemcen.
- [34] LOPEZ-GALINDO A., VISERAS C. Pharmaceutical and cosmetic application of  
clays, In. *Clay Surfaces, Fundamentals and Applications*, Elsevier ; Amsterdam, 2004,  
267.
- [35] LOPEZ-GALINDO A, VISERAS C, CEREZO P. Compositional, technical and  
safety specifications of clay to be used as pharmaceutical and cosmetic products. *Applied  
Clay Science*. 2007, 36, 51.
- [36] BOMBLEDJ-  
P, «Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment», *Proceeding of  
RILEM, Leeds Seminar*, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973.
- [37] De Larrard F., 2000, Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par  
Lecomte A., LCPC, OA34.
- [38] Melle GUEMMADIZ., TOUMIB., Dr HOUARI H., Pr CLASTRE P. AMELIORATION  
DES PERFORMANCES DES BETONS PAR LES AJOUTS DE FINES  
CALCAIRES. Séminaire International de  
Géomatériaux GEOMAT'02. Université Mohamed Boudiaf de Mascara - Algérie, les 10-  
11 Mars 2003.

## REFERENCES

- [39] CARES.,LINDERR.,BAROGHELBOUNYV.,DELARRARDF.,ETCHARONNA T Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d’usage du béton - Pland’expérience etanalysestatique,LCPC,Ouvragesd’artOA33.Février2002.
- [40] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., Efficiency of mineral admixtures in mortars,Quantification of physical andchemical effects of fine admixtures in relation withcompressivestrength,CementandconcreteresearchVol. 36(2),pp.264-277, 2006.
- [41] Dreux .G & J. Festa: «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Edition.Eyrolles.Mai (1998).
- [42] S .Husson,« Étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fibres :Applicationsauxmortiers»,ThèseDoct.Ing,p.166INSA-Lyon,(mars1991).
- [43] A.Komar, « Matériaux et éléments de construction», Edition mir, pp 1-56, Moscou(1976).
- [44] Documentationdelacimenterie deHammaBouziane;Lecimentportland.
- [45] Guy,A.,P.RolandetG.Claude.1978.Précisde minéralogie.Paris,Masson,335p.
- [46] **SIMONECAILLERE**.MinéralogiedesargilesP355.
- [47] Bouras Omar, 2003. Propriétés adsorbantes d’argiles pontées organophiles: synthèse etcaractérisation.Thèsededoctoratde l’université deLimoges
- [48] S. Caillère, S. Hénin et M. Rautureau, 1982. Minéralogie des argiles : Classification etNomenclature;EditionsMasson; Paris.
- [49] P.Liao,Z.Zhan,J.Dai,X.Wu,W.Zhang,K.Wang,S.Yuan,Adsorptionoftetracycline and chloramphenicol inaqueous solutions by bamboocharcoal:Abatchandfixed-bed column study, Chem. Eng. J. 228(2013)496–505.
- [50] Brindley, G.W. and Brown, G. (1980) X-Ray Diffraction Procedures for Clay MineralIdentification.In:Brindley,G.W.andBrown,G.,Eds.,CrystalStructuresofClay Mineralsand Their X-RayIdentification, MineralogicalSociety, 305-356.
- [51] Aliprandi, G. (1979) Matériaux réfractaires et céramiques techniques, Edition septima,Paris.
- [52] BENKHEDAAA.(2016):Initiationàuneétudegéotechniqueetanalyseminéralogique des argiles oxfordiennes de la région Tiaret. Mémoire de fin d’étudesmaster,UniversiteKasdiMerbah– Ouargla
- [53] EL HACHMI, Abdelhadi. 2013.« Argile et minéraux argileux: propriétés physico-chimiquesetpropriétéssetpropriétéscolloïdes».
- [54] BICH.CHRISTEL,contributionàl’étudedel’activationthermiquedukaolin:évolutiondel astructurecristallographiqueetactivitépouzzolanique.thèse,MEGA deLyon,2005,p559.
- [55] BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des pontsetchaussées paris.p559.
- [56] Z. Mahi. Récupération de métaux lourds par l’argile de Maghnia modifiée : cas ducuiuret du plomb. Mémoiredemagister. Universitéd’Oran,Oran, 2006.
- [57] F. Gomri. Synthèses et caractérisations d’argiles cationiques et anioniques organophiles.Elimination des chlorophénols. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas, Sétif,2010.
- [58] Chakchouk A., Samet B., Mnif T., «Study on the potential use of Tunisian clays

## REFERENCES

- as pozzolanic material», *Applied Clay Science*, vol 33, 2006, p. 79–88.
- [59] Pagliari L., Dapiaggi M., Pavese A., Francescon F., «A kinetic study of the quartz–cristobalite phase transition», *Journal of the European Ceramic Society*, vol 33, 2013, p.3403–3410.
- [60] SIMONECAILLERE. *Minéralogie des argiles* P355.
- [61] JEAN-PIERRE MAGNAN. *Mécanique des sols et des roches*. 2000. vol1.
- [62] MESSI. A. *Propriétés des cimentspouzzolaniques élaborées à partir de latérites actives*.
- [63] SADR-MONTAZI A. *Conception de nouveaux ciments composés*. Thèse .Lyon: INSA de Lyon 1988, p256.
- [64] AMBROISE J. *Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques*. Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1984, 165p.
- [65] BRINDLEY G.W, NAKAHIRA M. The kaolinite - mullite reaction series: I Survey of outstanding problems .II The high temperature phase .*Journal of American ceramic society*, 1959, vol.42, p311-324.
- [66] HORVATH I, KRANZ G.A .Thermoanalytical study of high temperature dehydration of kaolinites with various structural arrangements. *Silikaty*, 1980, vol24. p149-156.
- [67] GNIEWEK J. *Réactivité des montmorillonites calcinées .Utilisation dans le génie civil*. Thèse. Lyon: INSA de Lyon, 1987, 184p.
- [68] BICH. CHRISTEL, *Contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin: évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique* . Thèse, MEGA de Lyon, 2005, p264.
- [69] BARRON J. SAUTEREY R. *Le béton hydraulique* .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris. p559.
- [70] Mr. Benyahia Abdeslam *Mémoire Master 2016/2017* .
- [71] AKOMAR. *Matériaux et éléments de construction*, Editions Mir Moscou 1976, p540.
- [72] KAKALI G, PERRAKIT, TSIVILLIS, et al. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. *Applied Clay Science*, 2001, vol20, p73-80.
- [73] AMBROISE J. *Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques*. Thèse . Lyon : INSA de Lyon, 1984, 165p.
- [74] **Bouali. Khaled**, « *Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires* », mémoire de magister , « *Option Physique et Mécanique des Matériaux* », université m'hamed bougaraboumerdes (2013/2014).
- [75] **Maisonbrico.com Maçonnerie**, « *matériaux, produits, mélanges et proportions*.