

dre...../F.S.S.A/UAMOB/2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées  
Département Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**ADDAR Kahina**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Matériaux en Génie Civil**

**Thème :**

**Les comportements d'un mortier modifié à base de la poussière rejeté par  
la cimenterie**

Devant le jury composé de :

ARIBI CHOAI B  
SAOUDI Nacira  
HEMI BRAHIM

MAA  
MAA  
MAB

UAMOB  
UAMOB  
UAMOB  
UAMOB

Président  
Encadreur  
Examineur

**Année Universitaire 2017/2018**

## Introduction général

Le ciment est l'un des liant le plus utilisés dans la construction, une consommation aigue de ce composant provoques des effets indésirable sur l'environnement voir le rejet du CO<sub>2</sub>, taux de poussière qui est de 20à5g /m<sup>2</sup> jours [28] et des couts qui nuis l'économie des pays.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

L'utilisation des substituants dans la production des ciments peut apporter des solutions en grande partie au problème d'insuffisance en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique.

Des recherches scientifiques dans ce contexte ont pu avancer par ajouts ou substitution des déchets environnementaux, des ajouts massifs de fumée de silice, de cendres volantes et ou de laitier ont été utilisés en combinaison avec un ciment Portland afin de mettre au point différents types de ciment ainsi de répondre à la question d'environnement.

Ce mémoire présente le travail de recherche que nous avons effectué au sein du Laboratoire de la cimenterie Sour El GhozlaneBouira, pour formuler et caractériser des mortiers à base de poussière rejetée lors de fabrication de ciment. Dans un premier lieu, à partir de l'analyse des propriétés chimiques de ciment et de la poussière, une différence notable dans la composition de SiO<sub>2</sub> et le CaOest confirmé par les deux laboratoires CETIM et Sour El GHOZLANE.

A cet effet nous avons mis au point dans notre étude, l'effet de substitution de cette poussière dans les mortiers sur la résistance mécanique, et leurs durabilité.

Le sable est l'un des composants essentiels dans le mortier, sa normalisation est une charge au niveau de la cimenterie de Sour El Ghozlane , comme notre pays possède des gisements de ce dernier ExempleBoussaâda , et afin de valoriser nos matériaux locaux dans cette étude , une comparaison entre les mortiers à base de sable Boussaâda corrigé et le sable Normalisée a été menée afin d'apprécié l'utilisation des matériaux locaux.

L'étude expérimentale présentée dans ce mémoire est conçue pour apporter des données quantitatives sur le comportement mécanique des mortiers et une touche sur la durabilité de ces derniers.

En faisant varier les pourcentages de poussière substituée, peut-on obtenir des ciments pour différents domaines d'utilisation, qui résiste aux différents milieux agressif avec les propriétés physicomécaniques demandées.

Ce mémoire se compose des chapitres suivants :

Chapitre I - Etude bibliographique : sur la fabrication des ciments et leurs types et les récents travaux de recherche.

Chapitre II - Programme expérimental : caractérisation des matériaux et formulation des mortiers

Chapitre III - Les essais mécaniques compression et flexion trois points. Enfin, le dernier point nous étudions l'influence de conservation des échantillons dans l'acide sur le comportement physicomécanique de ces mortiers lorsqu'ils sont soumis à un environnement acides  $H_2SO_4$  à différents pourcentage.

Nous terminerons notre mémoire en discutons les résultats obtenus.

## **I. Recherche 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].

La majorité des études ont été effectuées sur des mortiers, représentant essentiellement la friction des bétons, pour mieux mettre en évidence les modifications engendrées par l'utilisation de fines minérales et l'adjuvant. On le documente bien que les mortiers frais, comme le béton frais, et les chercheurs ont montré que les effets de différents adjuvants et additions sur les performances des mortiers sont semblables à ceux observés avec le béton et des essais faits sur des mortiers peuvent être employés pour choisir le système ciment-adjuvant-addition, compatible et pour prévoir le comportement du béton dans différentes conditions technologiques. [2]

L'étude du comportement du béton 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 ait été faite dans un système de mortier, il est raisonnable de penser que les tendances qui ont été observées pourraient être prolongées au béton.

-Influence de la nature du ciment et le rapport E/C sur les performances des matrices cimentaire suivant deux modes de conservation : finalement les propriétés rhéologiques et mécaniques, sur différents types de ciment (influence du type de ciment et E/C sur la MV, porosité et la résistance en compression à 28 jours). Pour améliorer l'état de connaissance sur ce sujet, un programme expérimental a été établi dans le but d'obtenir des informations sur le mortier [1]

### **I.2- Historique et origine de ciment :**

Pendant la préhistoire et depuis l'antiquité, on utilisait de la terre argileuse comme liant pour maçonner les pierres. Lors de la construction des pyramides, les égyptiens utilisèrent un plâtre obtenu par cuisson d'un gypse [3].

Plus tard, les Grecs et les Romains furent les premiers à utiliser de la chaux; produit obtenu par la cuisson du calcaire, dans leur construction. Ils améliorèrent le liant en y ajoutant

despouzzolanes; particules très fines d'origine naturelle. Ils obtiennent ainsi le ciment romain [4].

Ce liant fut utilisé sans grandes modifications jusqu'à 1756, date à laquelle l'anglais Seaton, lors de la construction du phare d'Eddy détone, mélangea des chaux hydrauliques et despouzzolanes, il obtient ainsi le premier liant artificiel, avec lequel il prépara un mortier qu'il présenta comme étant ainsi dur que la pierre de Portland (région située à la presqu'île du Dorset près de Weymouth).

En 1817, l'ingénieur français Louis Vicat, suivi au début des années 1820 par Treussart ainsi que par Pavin de Lafarge, mettent au point les formules des ciments actuels, préparés dans des fours verticaux.

Les premières cimenteries apparaissent vers 1850; c'est-à-dire que le ciment est un matériau relativement récent

L'industrie des ciments est vite devenue une industrie de masse traitant des quantités énormes de matériaux. De nos jours, la production mondiale dépasse largement le milliard de tonnes par année [4].

### **I.3-Définition du ciment :**

Le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. Mélangée à de l'eau, cette poudre forme une pâte qui se fige et durcit, même sous l'eau. Selon la composition et la finesse de la poudre, les propriétés du ciment ne sont pas les mêmes [5].

En Algérie, la production de ciment est une industrie de base. L'état a consenti de très importants investissements pour le développement de la filière. Cependant, en raison de la forte demande accentuée par le programme de la relance économique (autoroutes, un million de logements, autres équipements publics), l'offre reste insuffisante, et pour remédier à cela les autorités ont décidé d'investir pour augmenter la capacité de production qui était de 11,6 millions de tonnes pour la porter à 17,6 millions de tonnes en 2012 [6].



Figure I. 1 : poudre de ciment courant [5].

#### I.4-Principe de fabrication des ciments courants :

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide ( la trempe)est le clinker[7].

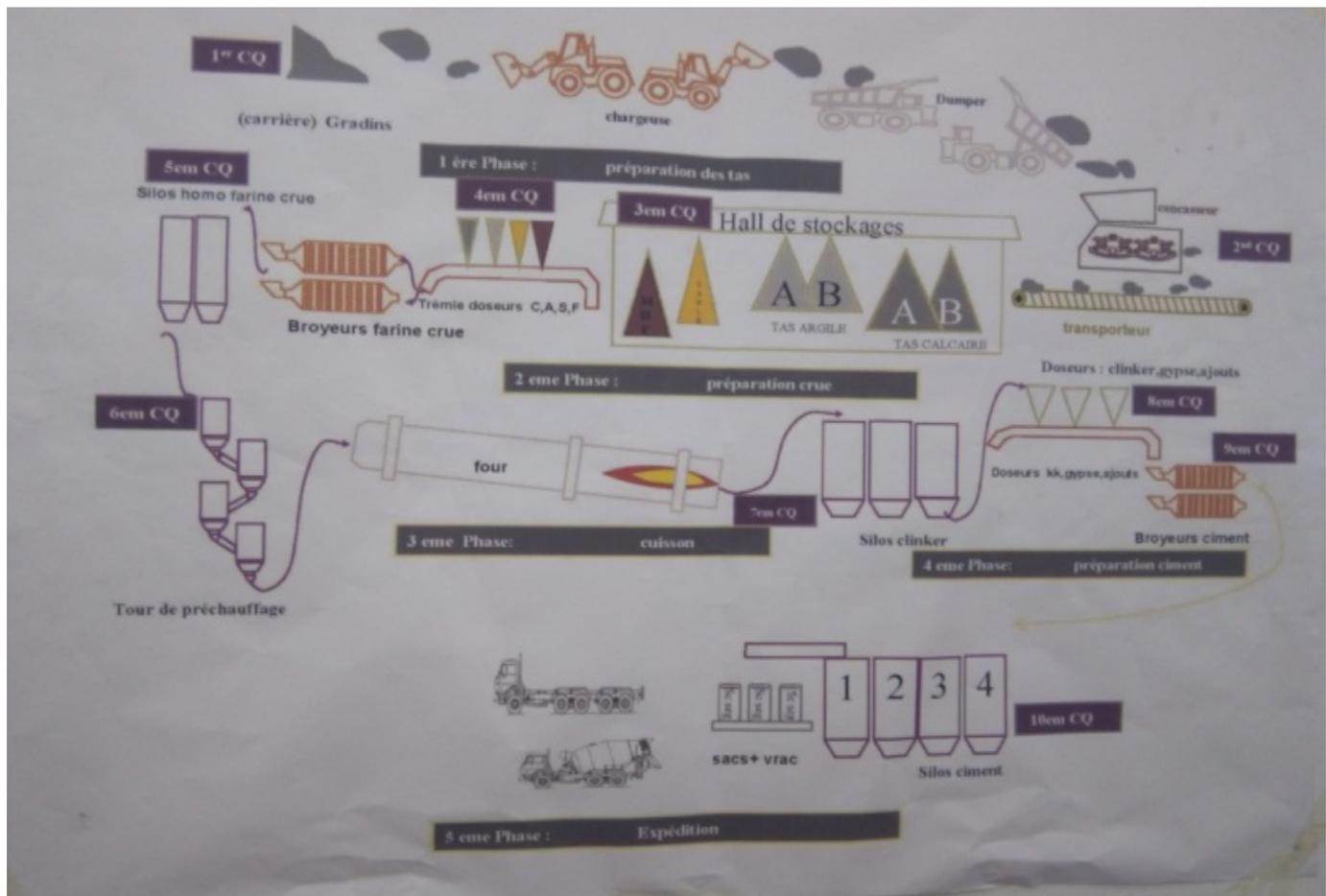
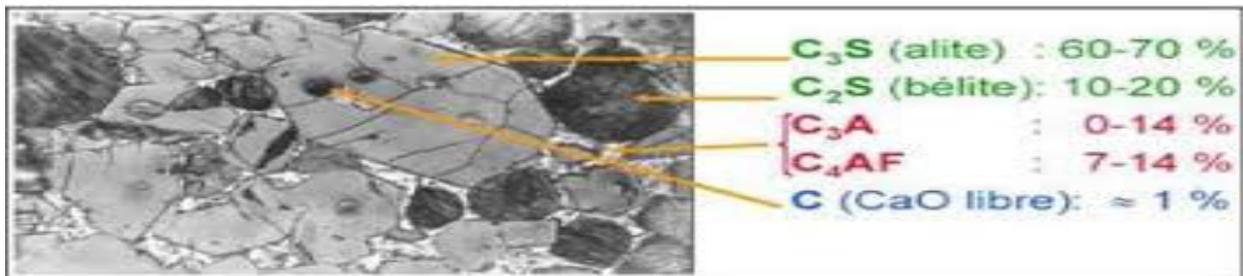


Figure I.2: fabrication de ciment

**Clinker** :C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO<sub>2</sub>) et de l'alumine (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [2] Les éléments simples (CaO, SiO<sub>2</sub>, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants : [8]

- Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) : de formule chimique 3CaO.SiO<sub>2</sub> (Alite).
- Silicate bicalcique (C<sub>2</sub>S) : de formule chimique 2CaO.SiO<sub>2</sub> (Belite).
- Aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) : de formule chimique 3CaO.AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> . (Célite)
- aluminoferrite tétra calcique (C<sub>4</sub>AF) : de formule chimique 4CaO .AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> . (Félite)



**Figure I. 3** : Microphotographie d'un clinker. [3]

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

**Tableau 1**: Composition chimique et minéralogique du clinker [9]

Composants Minéralogiques	Teneurs limites (%)	Teneurs moyenne (%)
C <sub>3</sub> S	40-70	60
C <sub>2</sub> S	00-30	15
C <sub>3</sub> A	02-15	08
C <sub>4</sub> AF	00-15	08
Oxydes	-	-
Ca O	60-69	65
SiO <sub>2</sub>	18-24	21
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	04-08	06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	01-08	03
Mg O	<05	02

K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<02	01
SO <sub>3</sub>	<03	01

## **I.5- Matières premières :**

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment sont le calcaire et l'argile à des Proportions variées. Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des Dumpers vers un atelier de concassage [10].

### **I.5.1- Calcaire :**

Le calcaire est généralement extrait de la carrière. Il peut rentrer dans des proportions allant jusqu'à 75 % de la masse totale du mélange cru [10].

Le calcaire est une roche sédimenteuse produite par des organismes vivants ; par exemple les coquilles.

Le calcaire est formé essentiellement de calcite qui peut contenir plus de 99,9 % de CaCO<sub>3</sub>.

Les calcaires contiennent souvent des fossiles (débris de coquilles, de squelettes d'organismes coloniaux,...) qui sont liés par un ciment calcaire [11].

Le calcaire peut être identifié car il peut être dissout par les acides tels que l'acide chlorhydrique en solution ou par l'acide éthanoïque contenu dans le vinaigre ou encore par l'acide tartrique. Il forme alors de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub> et du gaz carbonique CO<sub>2</sub>[12].

**On classe les calcaires comme suit :**

- **Calcaire dur :**

On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum 80 % de CaCO<sub>3</sub> et un maximum de 5 % de MgCO<sub>3</sub>. Les calcaires durs sont imperméables à l'eau [13].

- **Calcaire mou (Craie) :**

Le calcaire mou contient un maximum de 90 % en CaCO<sub>3</sub>[14]. Les calcaires mous sont poreux, et perméables à l'eau.

### **I.5.2- Argile :**

L'argile recouvre toutes les petites particules formées par les processus d'érosion ou d'altération des roches, c'est-à-dire aussi bien du sable ( $\text{SiO}_2$ ), des oxydes (comme l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui donne la couleur rouge à certains sols), des carbonates comme la calcite, que tout autre minérale. Les argiles sont de bons catalyseurs[15].

### **I.6- Matériaux de correction :**

Des correcteurs, minerai de fer qui apporte  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , bauxite pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , calcaire pour  $\text{CaO}$ , sable pour  $\text{SiO}_2$  sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) qui est un retardateur de prise est broyé avec le clinker.[14]

#### **I.6.1- Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) :**

Il existe des gisements de minerai de fer. A titre d'exemple les cimenteries de l'ouest Algérien sont alimentées par le minerai de Beni-safe[14].

#### **I.6.2- Bauxite :**

La bauxite, minerai naturel utilisé pour produire l'aluminium, et l'un des éléments métalliques les plus abondants de la croûte terrestre. La bauxite extraite est transformée par affinage en alumine, qui est ensuite transformée en aluminium par électrolyse[16].

#### **I.6.3 Le calcaire sableux :**

Les calcaires sableux sont d'origine détritique. Leur composition est forte variable en fonction des roches dont elles sont issues. Ils contiennent beaucoup de silices [14].

#### **I.6.4 Sable :**

Le sable est fait de grains minéraux tous petits (pas plus de deux millimètres). C'est de la roche effritée par l'érosion [17].

#### **I.6.5 Le gypse :**

Le gypse est un minerai que l'on trouve dans la nature, c'est une substance blanche utilisée en cimenterie comme retardateur de prise du ciment [8].

### **I.7- Procédé de fabrication de ciment :**

La fabrication du ciment comporte tout d'abord une extraction du calcaire et de l'argile dans des grandes carrières, bien équipées mécaniquement [19].

Il existe quatre types de processus différents, la voie humide, la voie sèche, et deux processus intermédiaires appelés voie semi-humide et voie semi-sèche, et il y a des phases communes à tous ces processus [20].

Nous allons par la suite décrire la voie sèche car c'est la voie la plus utilisée et la plus économique.

### I.7.1- Extraction et préparation des matières premières:

Le calcaire et l'argile sont extraits par manutention mécanique une fois la roche abattue à l'explosif ou par ripage au niveau de deux carrières [21].

Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits dans des éléments d'une dimension maximale de 25 mm Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction.



Figure I. 4 : Gisement calcaire[22].



Figure I. 5 : Gisement argile[23].

Le mélange (calcaire et l'argile) concassé est ensuite acheminé vers la cimenterie pour entamer la succession de phases qui le transforment en ciment. Ce transport se fait de diverses manières selon l'éloignement de la cimenterie [10].



Figure I. 6 : Transport par dumpers[22].



Figure I. 7 : Hall de pré-homogénéisation [24].

Arrivée à l'usine, le mélange concassé est stocké dans des hangars de pré homogénéisation [23].

Le mélange pré homogénéisé corrigé avec différents ajouts (calcaire pur, fer, bauxite) est broyé dans un broyeur pour l'obtention d'une poudre fine, appelée cru ou farine, prête à la cuisson et Stockée dans des silos d'homogénéisation [23].

### **I.7.2- La cuisson :**

La farine avant d'atteindre le four, passe dans une tour appelée préchauffeur. Tout au long de Son parcours jusqu'au four, la farine passe des cyclones obligeant la matière à circuler dans le Sens opposé aux gaz chauds issus du four permettant une bonne homogénéisation des Constituants et surtout une décarbonatation.

Les différentes phases de la cuisson sont les suivants :

1- vaporisation de l'eau à  $t = 100^{\circ}\text{C}$

2- Départ de l'eau combinée des argiles à  $t = 450^{\circ}\text{C}$

3- Dissociation de  $\text{CaCO}_3$  (décarbonatation complète) à pression atmosphérique à  $t = 894^{\circ}\text{C}$

C selon :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

4- Combinaison de la chaux obtenue ( $\text{CaO}$ ) avec les éléments argileux qui se sont dissociés[13].

( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $t = 1450^{\circ}\text{C}$  (Clinkérisation) pour obtenir le clinker.



**Figure I. 8 :** préchauffeur et four rotatif[24].

### **I.7.3- Stockage du clinker :**

A la sortie du four, le clinker subit un refroidissement brutal appelé « trempe » dans un Refroidisseur.



**Figure I. 9 :** Le refroidisseur [24].**Figure I. 10 :** le clinker [25]

Le clinker (granules 0-----25 mm) à sa sortie du four et du refroidisseur est stocké pour être repris pour la fabrication du ciment.

#### **I.7.4- Broyage ciment :**

Le clinker additionné de gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) comme retardateur de prise avec une proportion qui ne dépasse pas 5% et éventuellement de produit secondaires (pouzzolane, calcaire...) sont broyés dans des broyeurs ciment pour obtenir le produit fini qui est le ciment.



**Figure I. 11 :** Broyeur cuit [24].

#### **I.7.5- Stockage ciment :**

Le ciment fabriqué est ensuite stocké dans des silos et prêt à être vendu soit par sacs ou en vrac.



**Figure I. 12 : Silos de stockage de ciment [24].**

### **I.8 -Classification des ciments courants :**

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme NF EN 197 1. Le tableau (I.2) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils comportent.

**Tableau I.2 : les différents types de ciment courants [18].**

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en %de l’un des constituants suivants : laitier, pouzzolanes, cendres, calcaires, schistes, fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	- De 6 à 20 % de l’un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	- De 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*) .	0 à 5 %
CHF-CEM	Ciment de haut-	35 à 64 %	36 à 65 % de laitier de haut-	0 à 5 %

III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	fourneau	20 à 35 %  5 à 19 %	fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau.	0 à 5 %  0 à 5 %
CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %  45 à 64 %	10 à 35 % de pouzzolane, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %. 36 à 55 % comme ci-dessus.	0 à 5 %  0 à 5 %
CLC-CEM V/A  CLC-CEM V/B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %  20 à 39 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % de chacun des deux constituants comme ci-dessus.	0 à 5 %  0 à 5 %

(\*) le pourcentage de fillers est limité à 5%.

## I.9- Propriétés des ciments :

### I. 9.1- Caractéristique physiques:

#### ➤ Comportement physico –chimique de la pâte :

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique :  $C_3S$
- Silicate bicalcique :  $C_2S$
- Aluminate tricalcique- :  $C_3A$
- Aluminoferritetétracalcique:  $C_4AF$

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés

stables avec formation de en aiguilles plus cristaux ou moins enchevêtrées produisant la prise. Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.[18].

➤ **La prise**

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau. La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de : 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R. 1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52,5R. D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20°C.[18]

➤ **Durcissement :**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître. Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistances [18].

➤ **Chaleur d'hydratation :**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C<sub>3</sub>A que l'on intérêt à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CPA-CEM I [18]

➤ **Finesse de mouture :**

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en cm<sup>2</sup>/g, représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment .elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm<sup>2</sup> /g, certains ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieure à 4500 cm<sup>2</sup> /g . Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'évènement du Ciment sont accrus [18]

➤ **Retrait :**

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50% . La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800µm/m pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32 ,5R.
- 1000µm/m pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R. Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :[18].

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

➤ **Gonflement :**

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

## I. 9.2 - Caractéristiques chimiques du ciment :

### I.9.2.1- Ciments courants :

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

**Tableau I.3 :** caractéristique chimique de ciment courante [17].

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤5
Oxyde de magnésium	CPA-CEM I	Toutes classes	≤5

Mg O			
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK- CEM III	Toutes classes	$\leq 5$
Sulfates SO <sub>3</sub> Limit supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II(*)	32,5 32,5 R 42,5	$\leq 3.5$
	CPZ-CEM IV Et CLC-CEM V CHF-CEM III	42.5 52.5 52.5 R Toutes classes	$\leq 4$ $\leq 4$
Chlorures	Tous types De ciment (**)	52.5 R Toutes les autres classes	$\leq 0.05$ $\leq 0.10$

(\*) Valable pour les CPJ-CEM II/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5% pour toutes les classes de résistance.

(\*\*) Les CHF-CEM III/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10 % de chlorures mais dans ce cas la teneur réelle doit être déclarée.

### I.9.3 - Caractéristiques mécaniques des ciments courants :

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

**Tableau I.4 :** caractéristique mécanique des ciments courants [17].

Classe des ciments	Résistance à 2 jours	Résistance minimale à 28jours	Résistance maximale à 28jours
32.5		$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
32.5 R	$\geq 13.5$	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
42.5	$\geq 12.5$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5 R	$\geq 20$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
52.5	$\geq 20$	$\geq 52.5$	–
52.5 R	$\geq 30$	$\geq 52.5$	–

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

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment par la norme (tableau précédent), la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90 % pour les résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % et qui sont indiquées dans le tableau (1.5) ci-dessous : [17]

**Tableau I.5 : résistances garanties des ciments courants [17]**

Classe des ciments	Résistances garanties à 2 jours	Résistances garanties à 7 jours	Résistances garanties à 28 jours
32.5		17.5	30
32.5 R	12		30
42.5	10		40
42.5 R	18		40
52.5	18		50
52.5 R	28		50

## **I.10-L'hydratation du ciment :**

### **Introduction:**

L'hydratation du ciment fait intervenir les réactions de ses constituants avec l'eau de gâchage. Les anhydres du ciment vont réagir avec l'eau du gâchage pour former des hydrates. Ces anhydres se sont principaux minéraux de clinker purs cités auparavant. Les anhydres et les hydrates cités dans ce paragraphe sont résumés dans le tableau (1.6) ci-dessous [18]:

Notation Abrégée	Formule Chimique en oxyde	Dénomination
------------------	---------------------------	--------------

C <sub>2</sub> S	(Ca O) <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	Silicate bicalcique
C <sub>3</sub> A	(Ca O) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	(Ca O) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminoferritetétracalcique
CH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandite
C-S-H	(Ca O) <sub>x</sub> -SiO <sub>2</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>y</sub>	Silicate de calcium hydraté
C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>3</sub> .H <sub>32</sub>	(Ca O) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>32</sub>	Ettringiteou "Aft"
C <sub>3</sub> A.(C $\bar{S}$ ) <sub>1</sub> .H <sub>12</sub>	(Ca O) <sub>6</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(SO <sub>3</sub> ) <sub>1</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>12</sub>	Monosulfoaluminate de calcium hydrate ou "Afm"
C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub>	(Ca O) <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>8</sub>	Aluminate dicalcique hydraté
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	(Ca O) <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	Aluminate tricalcique hydrate
C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	(Ca O) <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(H <sub>2</sub> O) <sub>13</sub>	Aluminate tétracalcique hydraté

**Tableau I.6:**Les anhydres et les hydrates de ciment [24]

➤ **Hydratation des composants du ciment portland :**

1- Hydratation des silicates :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C<sub>3</sub>S) et les silicates bicalciques (C<sub>2</sub>S) se dissolvent sous forme d'ions Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup> et H<sub>2</sub> SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C<sub>2</sub>S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [1]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

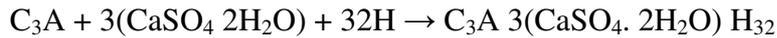


➤ **Hydratation des aluminates :**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme du gypse au clinker pour contrôler ces réactions [1].

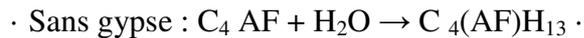
➤ **Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :**

La réaction est donnée par:



➤ **Hydratation de L'aluminoferritetétracalcique C4AF :**

Le C<sub>4</sub>AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C<sub>3</sub>A, Cependant, le C<sub>4</sub>AF réagit moins vite que le C<sub>3</sub>A. Son hydratation n'est toujours pas totalement élucidée et est souvent ignorée dans les publications portant sur l'hydratation des ciments. Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :[1].



Après l'épuisement du « gypse », un composé dérivé du MSA se forme dans lequel un atome de fer s'est substitué à un atome d'aluminium. [1].

## **I.11-Travaux réalisés sur les différents ajouts**

**Belmahi 2018**, à étudier le comportement mécanique des mortiers composés d'un mélange de ciment et de chamotte. Les résultats ont montré et confirmé que le mortier de chamotte ne peut pas donner des résistances meilleures qu'un mortier de sable normalisé. Une autre idée est d'introduire le filler calcaire fabriqué par l'ENG Tlemcen (Algérie) comme un ajout, les pourcentages proposés sont variés de 5% à 30 % de la masse de ciment. Les résultats ont montré que la substitution d'une partie de ciment par le filler calcaire aide à améliorer les résistances mécaniques et que la meilleure fraction du filler calcaire est fixée à 10%. [29]

**Khudair.M 2016**, à étudier l'emploi de la poussière de four de cimenterie dans la matrice de ciment ; minimisation les émissions CO<sub>2</sub> L'atmosphère et amélioration des propriétés physique et mécanique ;Gagner un pourcentage d'énergie et de matière premières consommées ;il montré que la finesse de ciment à base de poussière de four de cimenterie et la quantité d'eau de gâchage augment en fonction du pourcentage de notre ajout ;le temps de prise diminue avec l'accroissement de pourcentage de de poussière de four de cimenterie ,et un légère augmentation de la résistance mécanique[30].

## **Les risques de poussière**

Les risques de cancer liés à l'exposition aux poussières de ciment au sein de deux types de population : les employés des cimenteries et les maçons. Selon certains auteurs, l'augmentation du risque de cancers broncho-pulmonaires et du larynx, décrite chez les maçons, n'est en général pas attribuable au tabagisme. Cependant, en raison de l'existence de Co-expositions à la silice et à l'amiante, il est difficile de conclure quant au rôle étiologique des poussières de ciment. En raison des co-expositions possibles à d'autres polluants, il est difficile d'attribuer spécifiquement les excès de cancers, observés essentiellement chez les maçons, à l'exposition aux poussières de ciment. Un effet cancérigène ne peut toutefois pas être exclu.

➤ **Conclusion:**

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

## II-Partie expérimentale

### II.1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés dans notre programme expérimental, nous citons les différents pourcentages de poussière avec le sable normalisé ou sable Boussaâda traité et ainsi que les étapes nécessaires dans la préparation des échantillons de mortier et enfin une présentation des principales techniques expérimentales utilisées dans ce programme. Pour les besoins de cette partie, nous avons utilisé pour la préparation des mortiers, Les trois pourcentages de poussière (5%, 10%, 20%) et deux mortiers avec poussière substituée de (5%) et poudre de verre comme adjuvant (2%, 4%).

**Tableau II. 1 :** caractérisation des matériaux CETIM [26]

Composition Chimique	Teneur %	
	ciment	Poussière
SiO <sub>2</sub>	19.98	11.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.84	3.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.49	2.36
CaO	61.24	43.42
MgO	1.88	1.30
K <sub>2</sub> O	0.65	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.09
SO <sub>3</sub>	2.09	0.55
CaO <sub>L</sub>	0.78	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.12
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.16
Résidu insoluble	2.61	-
P.F	5.330	35.870

**Tableau II.2:** caractérisation des matériaux de Sour El GHOZLANE [27]

Composition chimique	Teneur %		
	ciment	poussière	Poudre de verre
SiO <sub>2</sub>	18.31	11.75	72.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.32	4.27	1.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.03	2.25	0.48
CaO	61.71	42.63	11.42
MgO	1.73	1.67	0.79
K <sub>2</sub> O	-	0.72	0.43
Na <sub>2</sub> O	-	0.52	12.85
SO <sub>3</sub>	-	0.64	0.09
CaO <sub>L</sub>	1.46	-	-
<b><u>LSF</u></b>	-	<b><u>108.20</u></b>	<b><u>=</u></b>
<b><u>MS</u></b>	-	<b><u>1.80</u></b>	<b><u>=</u></b>
<b><u>MAF</u></b>	-	<b><u>1.90</u></b>	
<b><u>P.F</u></b>	<b><u>7.91</u></b>	-	
<b><u>Refus 45µm</u></b>	-	<b><u>1.30</u></b>	

En comparaison entre ces deux tableaux : absence de quelques éléments dans la poussière

### **a) -Formulation des mélanges d'un mortier**

Le mortier témoin, confectionné selon la norme NF EN 196-1, est constitué, en masse, d'une partie de ciment (450 Kg/m<sup>3</sup>), de 3 parties de sable et d'une demi partie d'eau. Les mortiers avec différents % de poussière.

### **b) Comparaison entre sable Normalisé et sable Boussaâda**

**Normes** : la composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN196-1 et ISO 679 :2009

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des gâchés du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques selon les exigences des normes EN 196-1

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

#### **➤ Analyse granulométrique:**

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

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

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

L'analyse granulométrique a trois buts :

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

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

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

**c- Matériel nécessaire :**

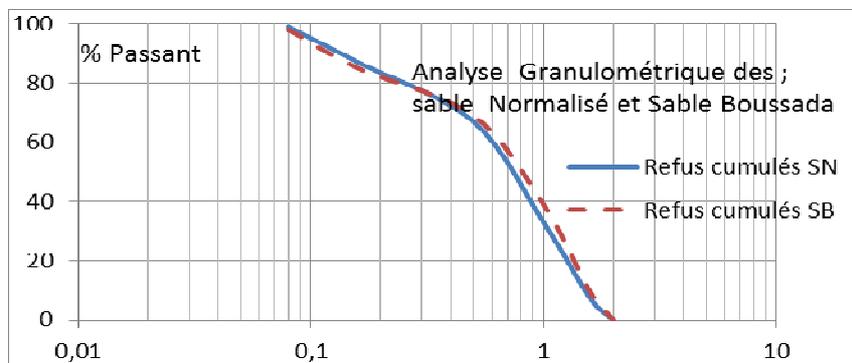
Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses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



**Figure II. 1 :** Sable Boussaâda



**Figure II. 2 :** sable normalisé



**Figure II. 3:** Courbe de l'analyse granulométrique de Sable Boussaâda traité et le Sable Normalisé

Comme le montre le graph (figure 3), les courbes sont presque identiques elle se superpose sachant que le sable de Boussaâda réellement n'a pas ces dimensions, mais nous avons tamisé les gammes désirés, pour être similaire au sable normalisé.

## II.2-L'extraction de Ciment : (Origine de la poussière utilisée)

Les quantités de matière 1<sup>er</sup> de ciment : 90%calcaire ,3%argile ,2.5% MDF,4.5% sable .

1<sup>er</sup> étape :-carrière gradins. -chargeuse.

2<sup>eme</sup> étape :-concasseur.

-transporteur 1<sup>er</sup> phase préparation des tas.

3<sup>eme</sup> étape : hall de stockages de tas calcaire et tas argile, sable et M.D.F[minerai de fer ( $Fe_2O_3$ )].

4<sup>eme</sup> étape : broyeurs farine crue.

5<sup>eme</sup> étape : silos homo farine crue.

Dans cette phase une quantité importante de farine se dégage vers l'extérieur. La poussière récupérée à ce stade fait l'objet de notre mémoire.

## II. 3- Préparation des mortiers :(NF P15.402)

- On pose 225ml d'eau et on ajoute 450 g de ciment, on introduit dans le récipient du malaxeur, et on verse 1350 g de sable normalisé ou sable Boussaâda dans le malaxeur et on met le malaxeur en marche.
- On pose 225ml d'eau, et on ajoute le ciment, et (5%) de poussière, on introduit dans le récipient du malaxeur, et on verse 1350 g de sable normalisé ou sable Boussaâda dans le malaxeur et on met le malaxeur en marche.

De la même façon pour 10% et20% de poussière.

- Ensuite, on verse le mélange dans le moule à l'aide d'une spatule et on met le moule dans l'appareil à choc pour dégager les bulles d'air et on racle la surface du moule.
- Après, on met le moule dans la chambre humide pendant 24 heures
- Ensuite on fait le démoulage et on conserve les éprouvettes dans des casiers remplis par l'eau 3jours ; pour faire la casse de 7 jours et même de 28 jours dans notre étude.



**Figure II. 4 :** Chambre humide et Malaxeur automatique

**Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont de forme prismatique de section (4 x 4 x 16) cm, Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier. Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs. Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier



**Figure II. 5 :** Le moule métallique (4\*4\*16) et la table à choc

➤ **Résistance à la compression :**

La détermination de la résistance à la compression du mortier a été effectuée selon la norme NF P18-406. Les résultats obtenus à différents échéances représentent la moyenne de trois Échantillons.

➤ **Résistance à la flexion :**

La détermination de la résistance à la flexion du mortier a été effectuée selon la norme NF P18-405. Les résultats obtenus à différents échéances représentent la moyenne de trois Échantillons



**Figure II. 6:** Appareille de flexion et compression (Cimenterie Sour)

**II.4- Conclusion:**

Cette partie porte sur l'analyse chimique de la poussière asubstituer et le sable Boussaâda fabriquer (dimensions choisi) destiné a la formulation des mortiers. Ces échantillons à soumettre à la (compression, flexion) à l'état durci à différentes échéances.

Ce qui explique notrechoix des paramètres à savoir l'influence du pourcentage de cimentsubstitué poussièreau : 5%, 10% et 20% et un rapport constant eau /ciment de 0.5.

## III-Résultats et discussions

### III.1- Introduction :

L'objectif de ce travail, est d'effectuer une étude expérimentale, afin de voir le comportement d'un mortier modifié par la poussière rejetée par la cimenterie et les attaques de L'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) sur les mortiers de forme prismatique de 4\*4\*16 cm avec différente quantité de poussière substituer à 5% ;10% et 20% de côté ont été préparés et immergés dans une solution pendant 28jour à l'air libre à de 5% ou 2% de l'acide  $H_2SO_4$  et l'eau distillé ;et 2% ou 4% de poudre de verre.

Formulations d'un mortier : [450g ciment ; 1350g sable ; E/C= 0.5 ;E= 225g

Poussière [5% ,10% ; 20%]

SN: sable normalisé

humide : éprouvette dans l'eau 28j

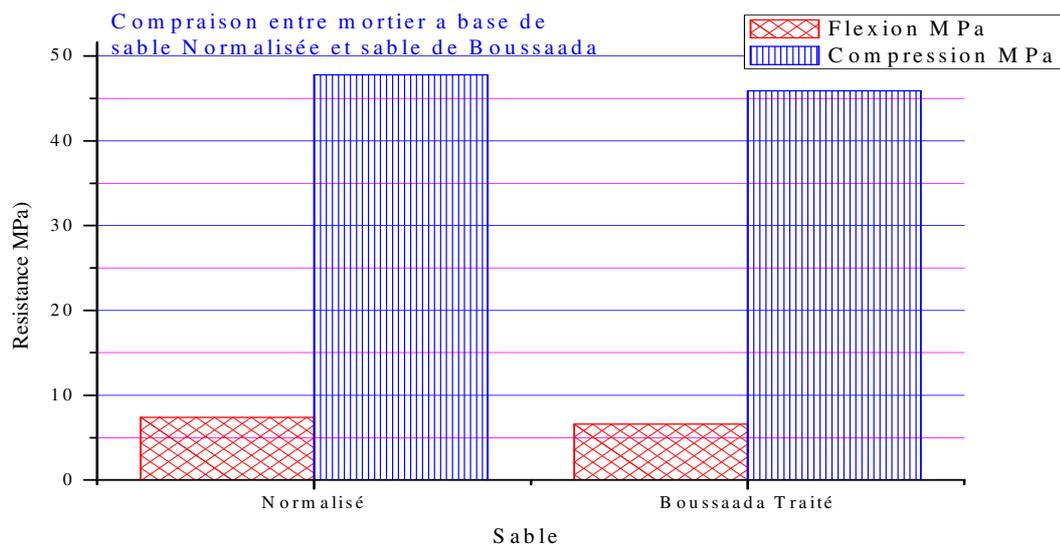
SB : sable Boussaâda

sec : éprouvette dans l'eau les trois premier jours

### III .2-Valorisation de Sable Boussaâda :Résistance mécanique

Dans cette partie nous avons comparé entre les mortiers formulé par variation d'un paramètre (le sable), et ceux vis avis de résistances mécanique compression et la flexion.Afin de valorisé nos matériaux locaux.

La comparaison est effectué pour les deux mortiers ayant un même E/C et sans aucun ajout ou substituant.



**Figure III. 1 :** Comparaison entre mortier à base de sable Normalisé et Sable Boussaâda (flexion et compression) sans poussière.

De la figure III.1 :On remarque que la résistance à la compression de mortier à base de sable Normalisé est élevée d'un taux de (1Mpa) comparé au mortier à base de Sable Boussaâda traité, par contre la résistance à la flexion de mortier à base de Sable Boussaâda est voisine de celle de sable Normalisé.

A partir de ce résultats, on peut conclure que : nos matériaux locaux (sable Boussaâda) peuvent être utilisés soit dans la recherche ou l'industrie, pour réduire les coûts d'importation de ce composant .

### III .3 – Substitution de ciment par poussière de cimenterie

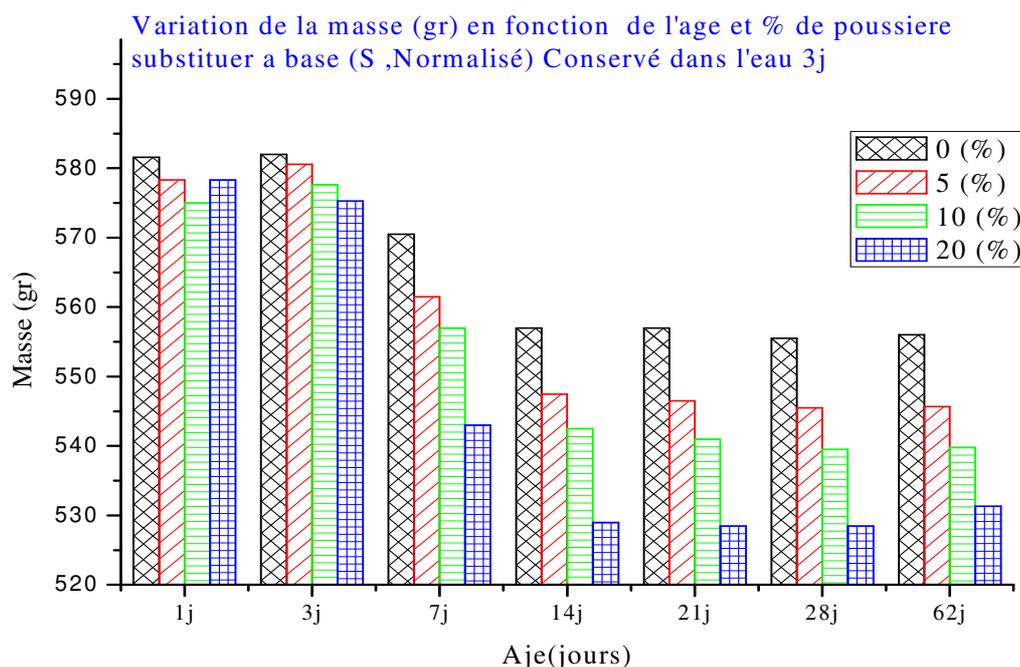
#### a) Propriétés physiques

##### ➤ Variation de la masse selon durée de conservation

Absorption le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert est lié simultanément à la structure poreuse et à l'humidité relative du mortier. L'absorption d'eau à l'intérieur du mortier sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du mortier et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un mortier. [13]

##### *Conservation dans l'eau 3jours*

Dans cette étape nous avons formulé des mortier a différents taux de poussière (5%,10% et 20%) (Comme substituant). Un suivi minutieux de l'évolution des masses a été effectué pour les échantillons conservé dans l'eau les trois (3) premier jours, pour des mortiers formulé à base de sable Normalisé et Boussaâda.



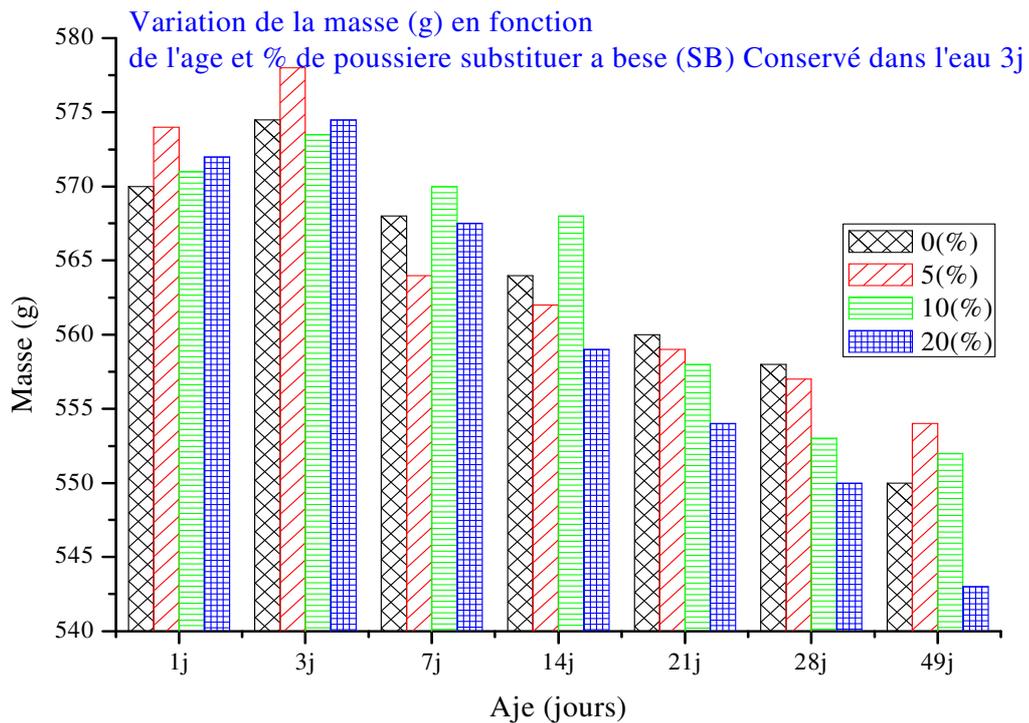
**Figure III. 2 :** Variation de la masse en fonction de l'âge et (%) de poussière Substituée à base de SN conservé dans l'eau 3jours.

De la figure III.2, on remarque que les masses des éprouvettes en fonction de pourcentage (%) de ciment substitué par poussière à 3 jours sont élevées comparé aux autres mortiers, cela s'explique par le processus d'hydratation des éprouvettes, qui ont été conservées dans l'eau (absorption).

Une diminution de la masse a été notée à 7 jours par rapport au 3ème jours, ceci s'explique par l'évaporation d'une quantité d'eau à l'air libre.

À partir de 14 jours une stabilité des masse des mortiers est observé jusqu'à 62 jours à l'exception du mortier à 20% de poussière, la masse varie sensiblement dans l'intervalle [28 ; 62j].

Comme on peut noter que la masse diminue inversement proportionnel au taux des % de ciment substitué par poussière.



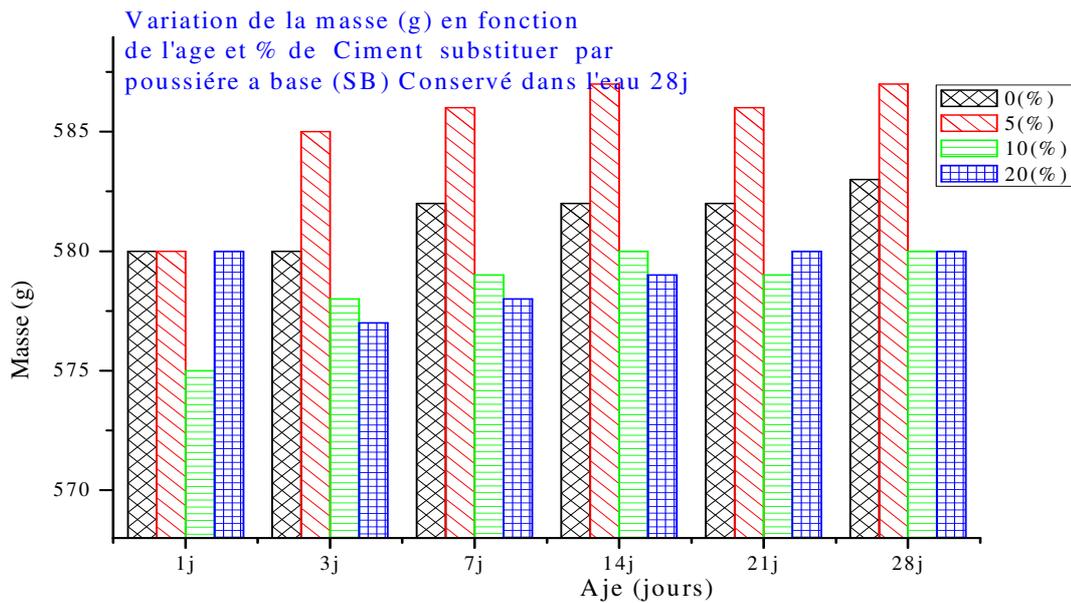
**Figure III. 3 :** Variation de la masse en fonction de l'âge et (%) de poussière substituée à base de SB conservé dans l'eau 3j

D'après la figure III.3, on observe une augmentation des masses dans tous les mélanges à 3 jours de conservation, à partir du 7<sup>ème</sup> jours une diminution des masses a été notée proportionnelle par rapport à l'âge des éprouvette.

Pour 21 et 28 jours les variations de masse pour sable Normalisé et sable Boussaâda sont le même, c.-à-d. plus le pourcentage de poussière augmente plus la masse diminue.

### *Conservation dans l'eau 28 jours*

Dans cette partie, pour le sable Normalisé nous sommes limités par l'indisponibilité ce composant, donc en présente uniquement le sable Boussaâda



**Figure III. 4 :** Variation de masse en fonction de l'âge a base SB conservé dans l'eau 28j.

De la figure III.4, on remarque que la masse des éprouvettes a augmenté au 3<sup>ème</sup> j, une stabilisation des masses a été notée pour tous les mélanges jusqu'à 28 j, à l'exception du mélange avec 10% de poussière qui varie légèrement en fonction de l'âge.

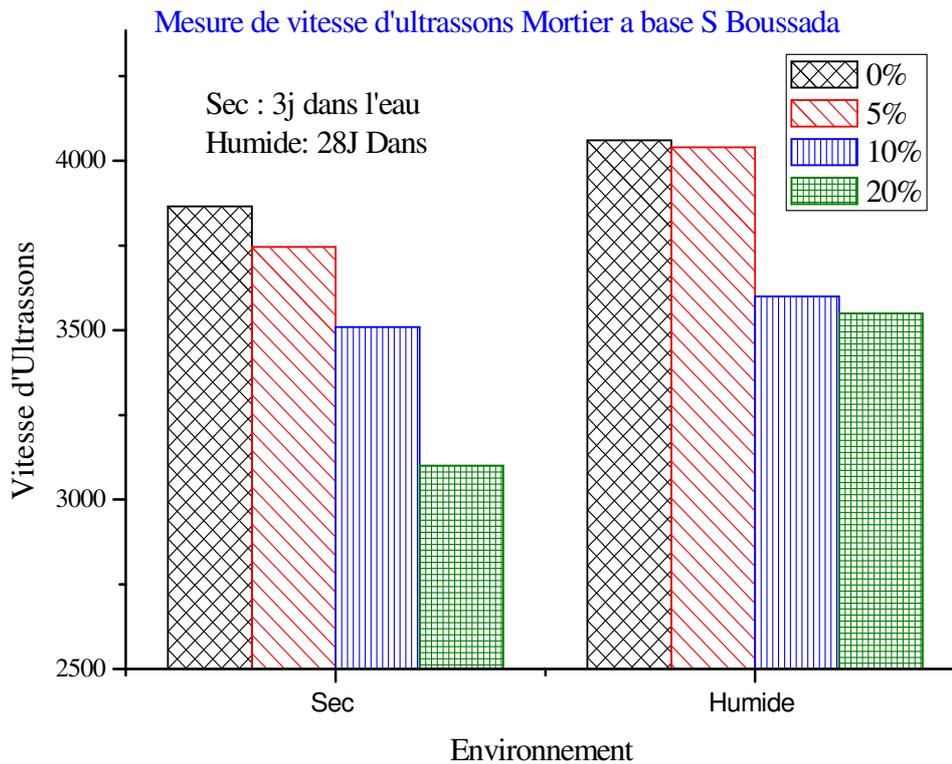
À partir du 3<sup>ème</sup> jours, on remarque que la masse du mélange avec 5% de poussier est élevée comparé aux autres mélanges d'un taux près de 2%.

### ➤ Porosité : vitesse d'Ultrasons

Afin de mesurer la porosité et /ou la perméabilité des mesures de la vitesse d'ultrasons de tous les échantillons a été prévue et exécuté au laboratoire LNHC **Bouira**.



**Figure III. 5 :** ultrasons

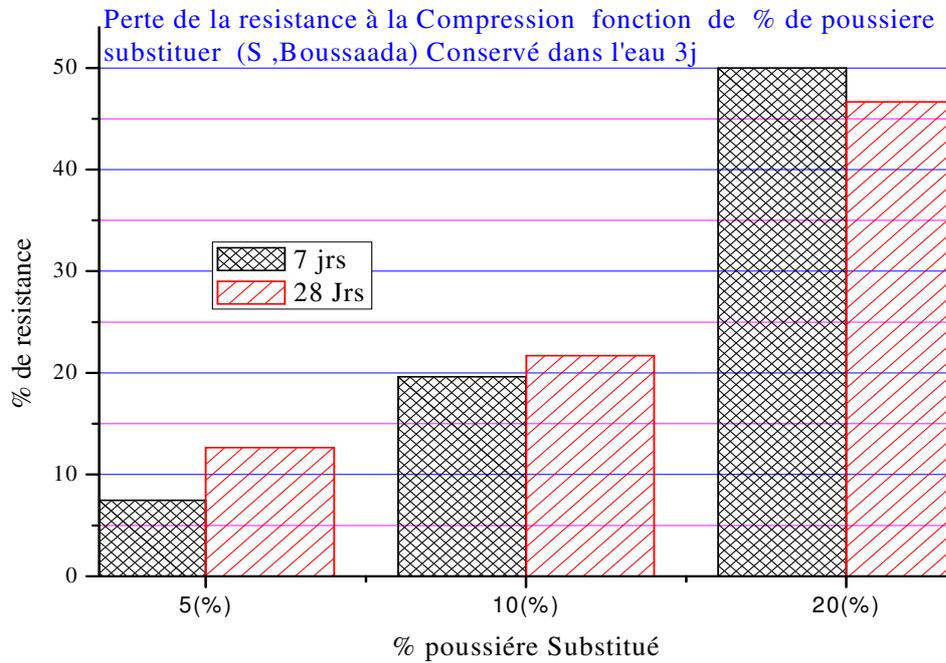


**Figure III. 6 :** Mesure de vitesse d’ultrasons mrrtier a base de Sable boussaada

D’après la Figure III.6, on remarque que la vitesse d’ultrasons des éprouvettes conservée dans l’environnement humide est élevée comparé à la vitesse des éprouvettes conservée dans l’environnement sec, et que la vitesse d’ultrasons diminue proportionnellement avec le pourcentage de ciment substitué par poussier dans les deux environnements.

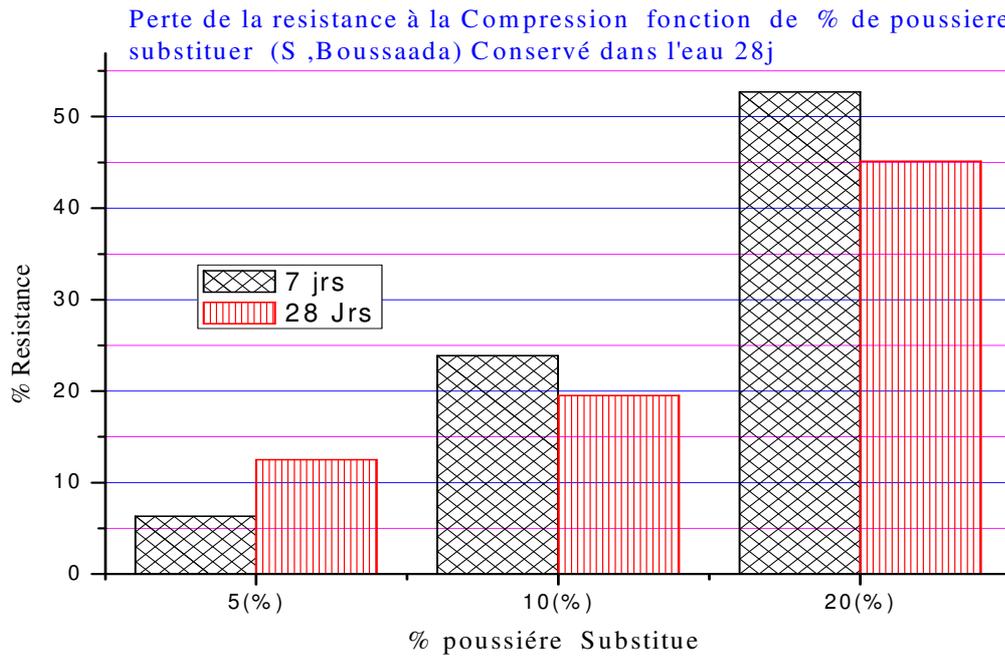
Ces résultats peuvent s’expliquer par l’effet de présence de la poussière dans le mortier, ce dernier devient poreux a fur et à mesure on rajoute la poussière.

**b) Résistance mécaniques(différents taux % poussière)**



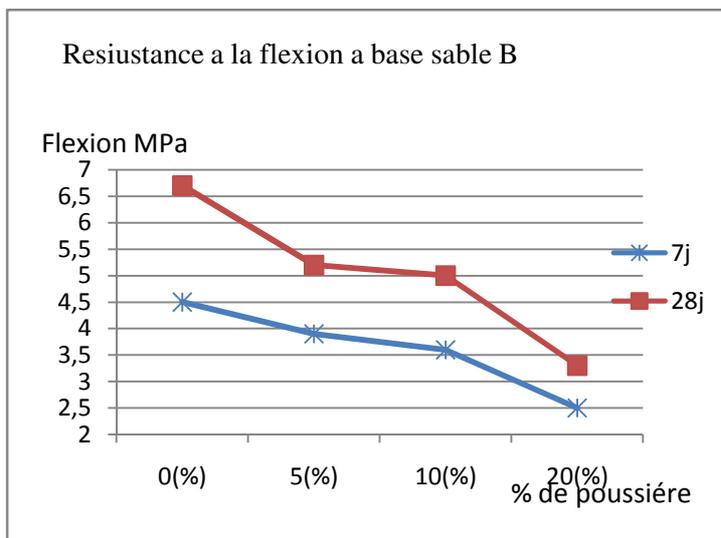
**Figure III. 7 :** perte de résistance à la compression à base de SB conservé dans l’eau 3j

De la figure III.7, on remarque que la perte de résistance à la compression à 7 et 28 jours est élevée proportionnellement au pourcentage de ciment substitué par poussière, ceci peut être expliqué par la quantité de poussière substitué qui a influencé sur la résistance mécanique du mortier. Pour substitution de 20%, la perte de résistance à la compression atteint 50%, nous conseillons la cimenterie de ne pas réincorporer cette quantité.



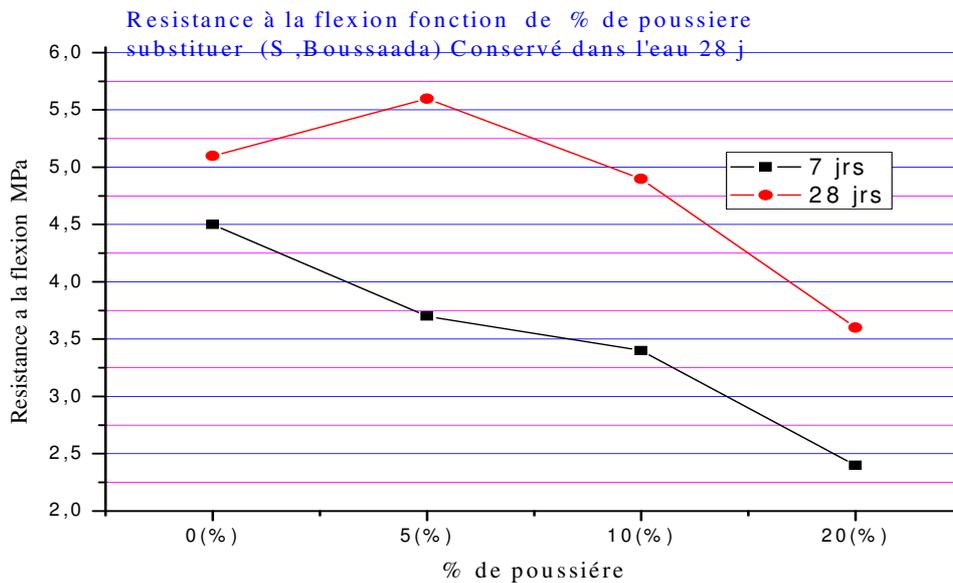
**Figure III. 8 :** Perte de résistance à la compression à base de SB conservé dans l'eau 28j.

De la figure III.8, on constate que la conservation des éprouvettes pendant 28 jours dans l'eau a influencé peut (diminution d'un taux de 1%) comparer à celle conservé dans l'eau pendant 3 jours. Ceci peut être expliqué par le processus d'hydratation qui est complet lors de la conservation dans l'eau.



**Figure III. 9 :** Résistance à la flexion en fonction de ciment substitué par poussière conservé dans l'eau 3 jours.

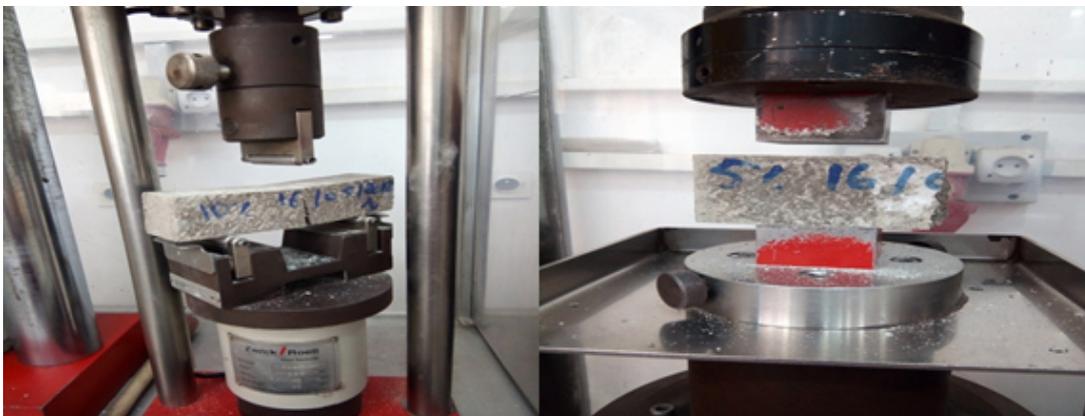
On remarque : une diminution de la résistance à la flexion à base de sable de Boussaâda, plus le pourcentage de poussière substitué augmente plus la résistance diminue.



**Figure III. 10 :**Résistance à la flexion en fonction de Ciment substitué par poussière conservé dans l'eau 28j.

De la figure III.10, On remarque que la courbe de résistance à la flexion à 28j est supérieure à celle de 7jours. Le murissement des éprouvettes de mortier dépend de l'âge.

Une augmentation de résistance à la flexion à 28j dans le mélange avec 5% poussier substitué puis elle diminue proportionnellement au pourcentage de poussière substitué. Par contre celle de 7 jours diminue proportionnellement au pourcentage substitué. Pour le taux 5% , la résistance est proche a celle de mortier 100% ciment.



**Figure III. 11 :**Appareil de flexion et de compression (Cimenterie Sour)

### **III.4-Effet de l'acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sur la résistance mécanique :**

Pour la caractérisation de la résistance mécanique, des éprouvettes prismatique de mortier 4 x 4 x 16 cm. Les éprouvettes sont immergées dans un bac contenant l'eau distillé et l'acide pendant 28 jours. Jusqu'au moment de l'essai mécanique c-à-dire flexion et compression.

Cette étude expérimentale nous a permis d'obtenir des résultats concernant l'estimation de la durabilité des mortiers à l'attaque chimique dans un milieu agressif à différents pourcentages d'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pour des séjours différents d'une part et d'autre part les résistances mécaniques à la compression et à la flexion.

A titre comparatif, les mêmes essais ont été effectués sur des échantillons témoins (le milieu est l'eau distillé).

#### **A-Caractéristiques des solutions utilisées :**

L'acide minéral : sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

La provenance : PROLABO

La pureté : 95%

Masse molaire : 98.079 g/mol

La masse volumique : 1.84 g/cm<sup>3</sup>

#### **B-Préparation des solutions d'acide sulfurique(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) :**

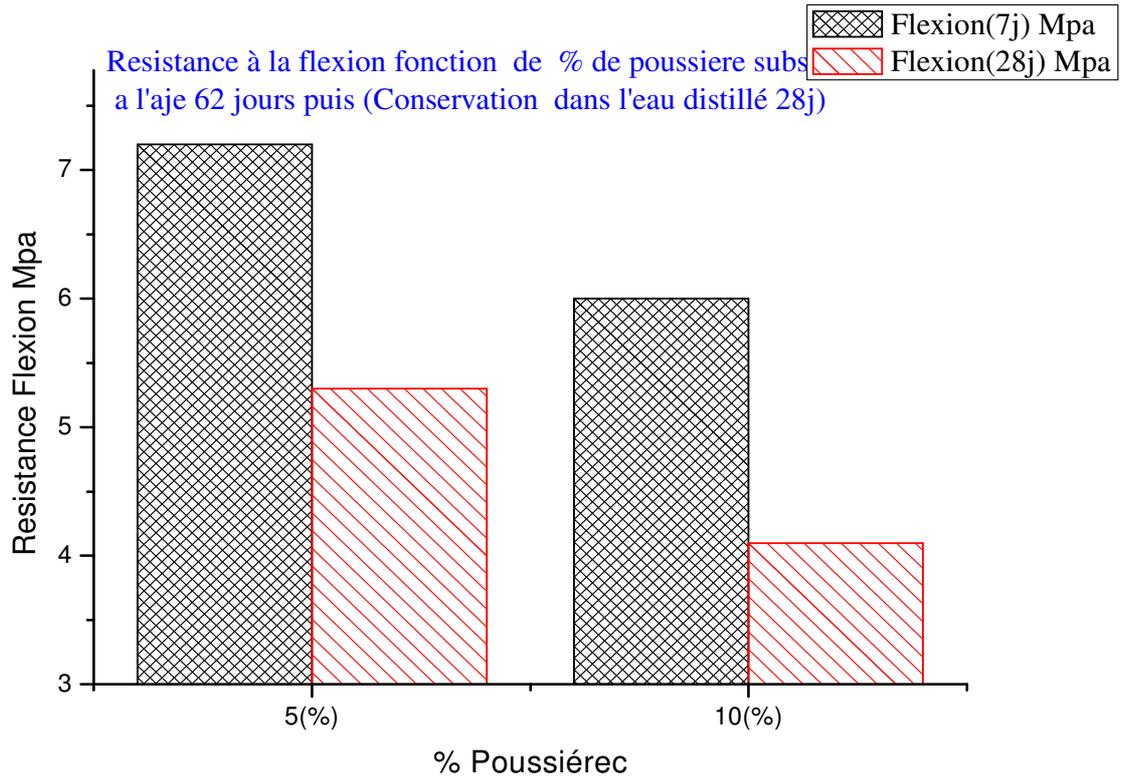
On commence par calculer les volumes de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nécessaires à la préparation des solutions de 5L d'environ à 2% et 5% pour chacun million.

Après tous les calculs des volumes nécessaires, on mesure ces volumes à l'aide d'une éprouvette.

On introduit ensuite ces volumes dans un récipient, et on complète jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée.

On laisse les solutions au repos afin d'être bien homogénéiser. Ensuite, on les transverse dans les récipients, et on a ainsi les solutions désirées.

Les résultats relatifs à l'attaque chimique des éprouvettes sont donnés par la figure (III.12) suivant :

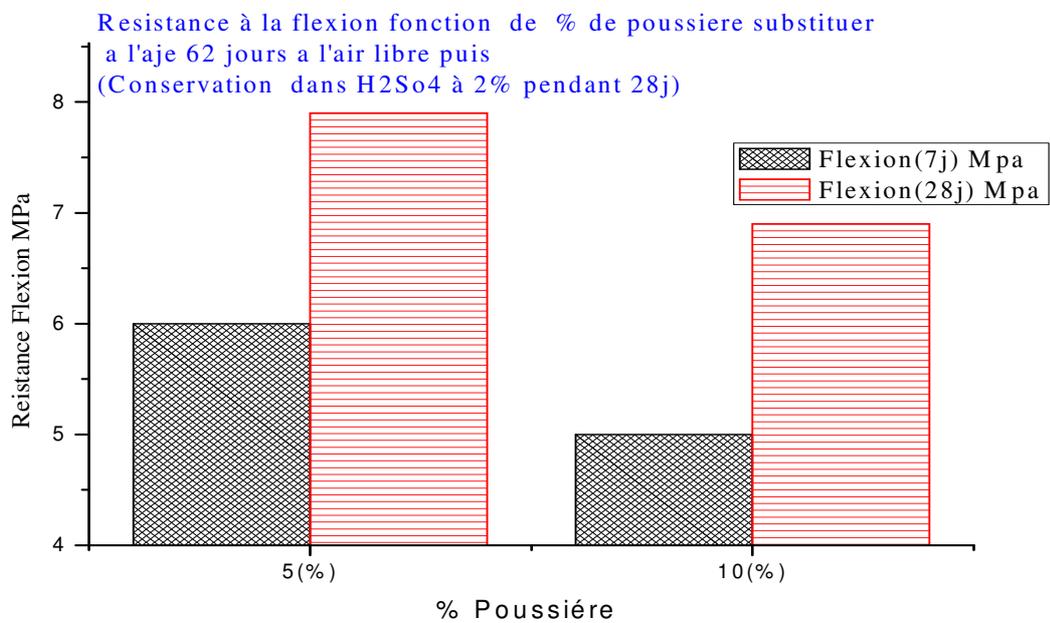


**Figure III. 12 :** Résistance à la flexion en fonction ciment substituer conservé dans l'eau distillé 28j à l'âge de 62 jours

De la figure III.12, On remarque que la résistance à la flexion des mortiers avec 5% de poussière est élevée comparé à celle des mortiers avec 10% de poussière à 7 jours, puis une diminution proportionnelle à la substitution de la poussière a été notée à 28 jours.

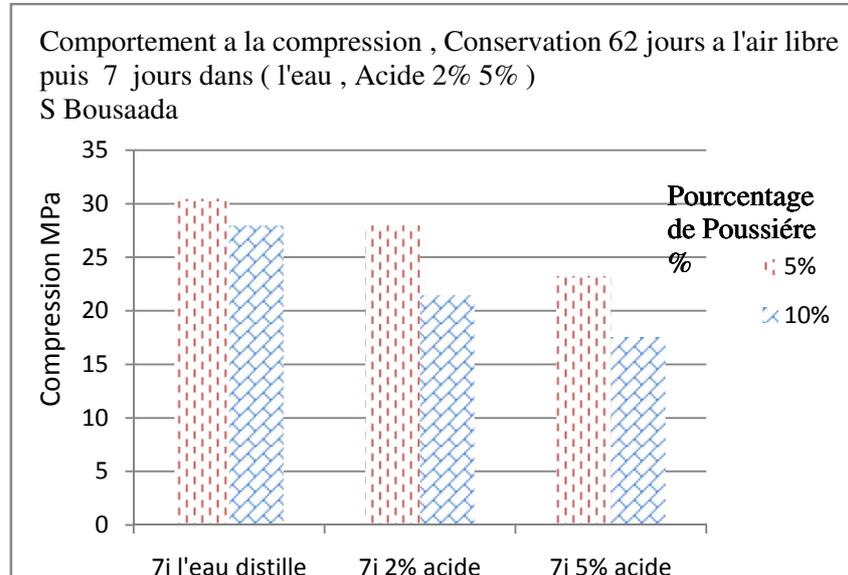


Figure III.13; photo éprouvette soumises 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durant 28jours



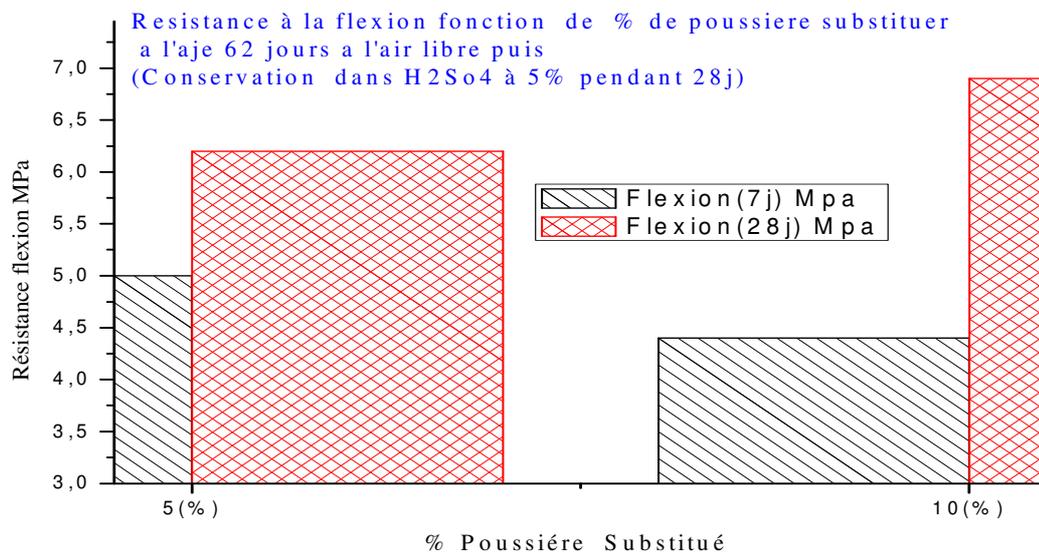
**Figure III. 14** :résistance à la flexion avec poussière substitué conservé dans l'eau distillée + 2% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant 28j à l'âge de 62jours.

De la figure III.14, on constate que l'ajout de 2% de  $H_2SO_4$  a inversé le phénomène, c'est-à-dire les résistances des mortiers avec 5% de poussière substitué sont élevées comparé aux mortiers avec 10% de poussier substitué à 28 jours. Puis elle diminue proportionnellement à la substitution de poussières à 7 jours.



**Figure III. 15 :** Résistance à la compression des mortiers (substitution) conservé à l'âge de 62 jours l'air libre, puis dans l'eau distillée, 2%, 5% de  $H_2SO_4$  pendant 7j.

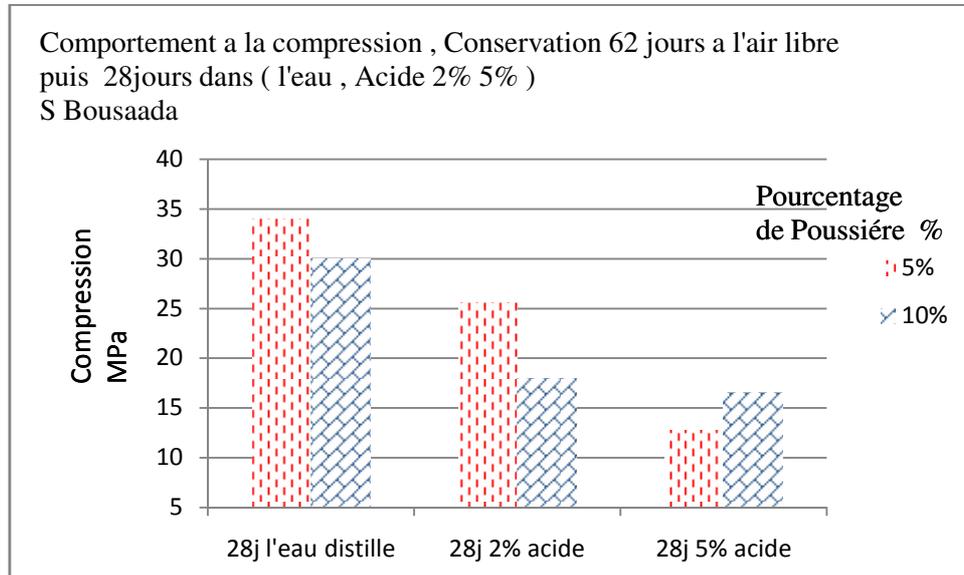
On remarque que la résistance diminue proportionnellement au pourcentage de l'acide



**Figure III. 16 :** Résistance à la flexion avec poussière substitué conservé dans l'eau distillée + 5% de  $H_2SO_4$  pendant 28j à l'âge de 62 jours.

## Résultats et discussions

De la figure III.16, on remarque que la résistance à la flexion des mortiers avec 10% de poussière substitué est élevée comparé à celle des mortiers avec 5% de poussières substitué. La résistance à la flexion des deux mortiers a augmenté à 28 jours comparés à 7 jours.



**Figure III. 17 :** Résistance à la compression des mortiers (substitution) conservé à l'âge de 62 jours l'air libre , puis dans l'eau distillée, 2%, 5% de  $H_2SO_4$  pendant 28j.

Après l'analyse de ces résultats, et vue le manque de minerai  $SiO_2$ , On a pensé a ajouté une quantité de verre, en plus de poussière.



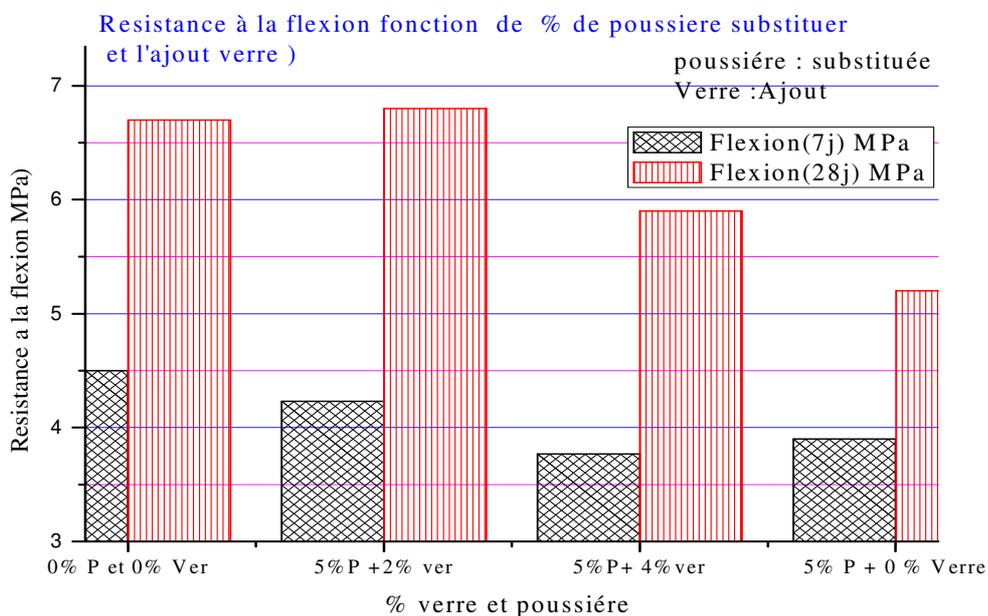
**Figure III. 18 :** éprouvette dans l'acide 28j[  $H_2SO_4$  (5%) ]

## III.5-Les avantages de la poudre de verre :

Est une source de déchet industriel,

1. Etant un matériau artificiel,
2. la composition chimique du verre est stable et bien définie.
3. Cela permet de prévenir les réactions chimiques inattendues et de modifier ou de traiter le verre si nécessaire.
4. L'absorption d'eau dans le verre est négligeable.
5. Donc C'est un avantage pour améliorer la résistance de mortier.

Les résultats sont :

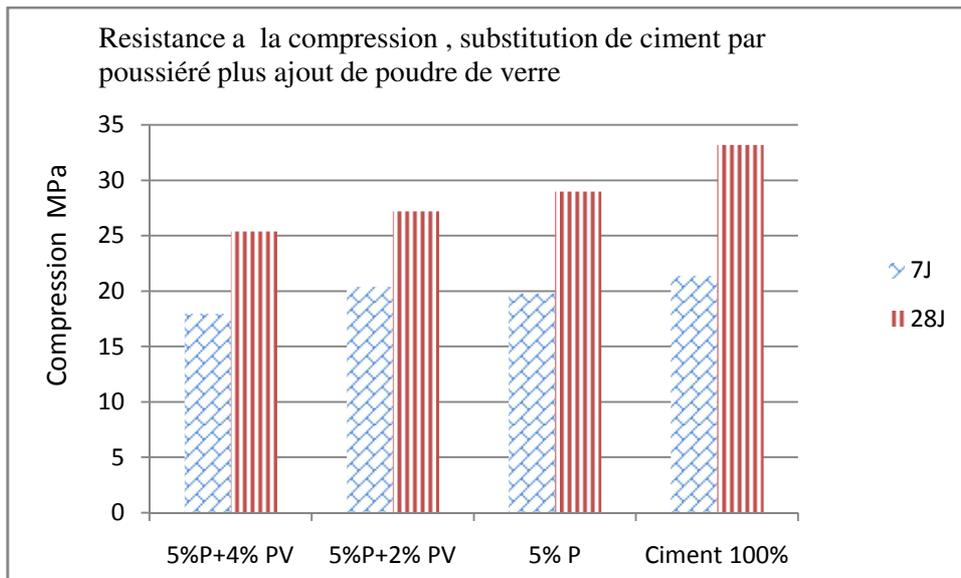


**Figure III. 19 :** Résistance à la flexion en fonction de poussière substituée et l'ajout poudre de verre.

D'après la figure III.19, on remarque que :

La résistance à la flexion des mortiers avec (5% de poussière + 2% de verre) est élevée est proche de mortier de (100% ciment) est supérieure comparé aux autres mélanges.

La résistance à la flexion de tous les mortiers augmentent à 28 jours comparés à 7 jours.



**Figure III. 20 :** Résistance à la Compression en fonction de poussière substituée et l'ajout poudre de verre.

Il est intéressant de remarquer que les meilleures performances sont obtenues pour une valeur optimale entre 5% et 10% de poussière qui permet l'obtention des résistances les plus élevées.



**Figure III. 21 :** échantillons à base de 5% poussière et (2% ou 4% poudre de verre)

### Conclusion Générale

Selon la recherche bibliographique le dépoussièrément causé par les cimenteries est de l'ordre de 5 à 28g/m<sup>2</sup>. Or, la réduction de ce problème repose sur la volonté de réduire au maximum le rejet à l'extérieur ainsi détérioré l'environnement. Pour cela il faut développer par des moyens de récupération de cette poussière et les modes de valorisation en équilibre avec le milieu naturel et industriel.

Dans ce travail nous avons choisi l'incorporation de cette poussière dans les mortiers afin de limiter sa présence dans l'environnement et d'évaluer ces conséquences sur la résistance mécanique.

Au cours de ce travail, nous avons réussi à caractériser des échantillons de poussière par deux laboratoires.

La poussière rejetée et au niveau de la cimenterie Sour El Ghozlane, la comparaison de l'analyse chimique de celle du ciment issu de la même cimenterie sont presque les mêmes.

En effet ; Les analyses de ces échantillons ont montré les taux des éléments sont proches de ciment Portland Sauf pour le CaO et SiO<sub>2</sub>. Leur concentration dans la poussière est inférieure à celle du ciment, ceci peut s'expliquer par leurs réactions durant le processus de fabrication.

La substitution de cette poussière à nouveau dans le four ou dans les mortiers à différentes taux (5%, 10 %, 20%), a révélé une perte de résistance physico-mécanique de l'ordre important voir 50% pour une substitution de 20%, cette dernière est peut être expliquée par la substitution d'une quantité de ciment par la poussière qui joue le rôle de liant

L'analyse de la résistance mécanique soit par flexion ou Compression des mortiers nécessite un composant primordial c'est bien le sable. Cette nécessité a mis en évidence l'importance des matériaux locaux. La comparaison entre les formulations des mortiers à base de sable Boussaâda et sable Normalisé a fait l'objet d'une partie de notre mémoire.

ça nous a permis de déduire de point de vue analyse granulométrique l'approche du sable fabriqué ou corrigé par rapport au sable Normalisé.

L'estimation de la durabilité des mortiers à l'attaque chimique dans un milieu agressif à différents pourcentages d'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pour des séjours différents d'une part et d'autre part

## Résultats et discussions

---

les résistances mécaniques à la compression et à la flexion, nous a permis d'apprécier les taux 5 et 10% de ciment substituer .

Ces poussière rejeté dans le milieu naturel a ce jour a fait l'objet de beaucoup de sujet de recherche, de notre part elles peuvent être valorisées dans le four de la cimenterie de Sour el Ghouzlane en réintroduisons un pourcentage qui dépend de type de ciment a produire.

Evidemment, afin d'arriver à une conclusion satisfaisante de ce point de vu (remplacement), il est nécessaire de compléter ce travail avec une étude des essais de production des échantillon du ciment en utilisant d'autre ajouts, puis de les soumettre à différentes analyses (DRX MEB,,,,,etc

Tableau III.1 : comparaison entre SN et SB (sable normalisé et sable Boussaâda)

maille des tamis	Refus cumulés SN (g)	Refus cumulés SB(g)
0.08	99	98
0.16	87	85
0.5	67	69
1	33	39
1.6	7	9
2	0	0

Tableau III.2: Comparaison entre mortier à base de sable Normalisé et Sable Boussaâda (flexion et compression) sans poussières

	Flexion(Mpa)	Comprissions(Mpa)
Sable normalisé (SN)	7.4	47.8
Sable Boussaâda( SB)	6.6	45.9

Tableau III. 4 : perte de masse des éprouvettes de SN

	O(%)	5(%)	10(%)	20(%)
1j	581.6	578.3	575	578.3
3j	582	580.6	577.6	575.3
7j	570.5	561.5	557	543
14j	557	547.5	542.5	529
21j	557	546.5	541	528.5
28j	555.5	545.5	539.5	528.5
62j	556	545.7	539.8	531.3

Tableau III. 5 : l'hydratation des éprouvettes a bas desable Boussaâda avec(%) poussière

	0(%)	5(%)	10(%)	20(%)
1j	580	580	575	580
3j	580	585	578	577
7j	582	586	579	578
14j	582	587	580	579
21j	582	586	579	580
28j	583	587	580	580

## Résultats et discussions

Tableau III.6 : Lavitesse du sens dans les éprouvettes (Ultrasons)

Poussière(%)	0(%)		5(%)		10(%)		20(%)	
	SN	SB	SN	SB	SN	SB	SN	SB
Sec	3865	4055	3745	3845	3510	3750	3100	3530
Humide	4060	4030	4040	3990	3600	3880	3550	3350

Tableau III.7 : la résistance mécanique (flexion et compression) éprouvette dans l'eau 3j

3j 1emr dans l'eau	Flexion	Flexion	comprissions	comprissions
	7j	28j	7j	28j
0(%)	4.5	6.7	21.4	33.2
5(%)	3.9	5.2	19.8	29.0
10(%)	3.6	5.0	17.2	26.0
20(%)	2.5	3.3	10.7	17.7

Tableau III.8 la résistance mécanique (flexion et compression) éprouvette dans l'eau 28j

28j dans l'eau	Flexion	Flexion	comprissions	comprissions
	7j	28j	7j	28j
0(%)	4.5	5.1	22.2	32.8
5(%)	3.7	5.6	20.8	28.7
10(%)	3.4	4.9	16.9	26.4
20(%)	2.4	3.6	10.5	18

Tableau III.9: la résistance mécanique des éprouvettes a bas de 5% et 10% poussière et(2%ou5% acide H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>)

	Flexion (7j) MPa	Flexion (28j)MPa	Comprissions (7j)MPa	Comprissions (28j)MPa	
5(%)	7.2	5.3	30.5	34.0	L'eau distillée
10(%)	6.0	4.1	28	30	
5(%)	5.0	6.2	23.3	12.8	Acide 5%(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
10(%)	4.4	6.9	17.6	16.5	
5(%)	6.0	7.9	28.0	25.6	Acide 2%(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
10(%)	5.0	6.9	21.5	18.0	

Tableau III.10:la résistance mécanique des éprouvettes a bas de 5%poussièr et(2% et 4%poudre de verre)

## Résultats et discussions

---

	Flexion (7j)MPa	Flexion (28j) MPa	Compression (7j)MPa	Compression (28j)MPa
2% Poudre de verre	4.23	6.8	20.4	27.2
4% Poudre de verre	3.77	5.9	17.97	25.4

### Références bibliographiques

- [1] **HOUARI Hacène** «Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », THESE , Doctorat en science en Génie Civil Option : Matériaux : *Soutenue le2009 ;1-3 -21-25p.*
- [2] **M. Venuat**« La pratique des ciments, mortiers et bétons » Tome 1 : Caractéristiquesdes liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers - édition2 – CollectionMoniteur. - 1989– 277p.
- [3] **Le site web** : [www.perso.médiafiltre.com/web/master gp/ ciment.ntm](http://www.perso.médiafiltre.com/web/master_gp/ciment.ntm). Mai 2015.
- [4] **Y. Chérait, Z. Nafa**,« Elément de matériaux de construction et essai », Direction de la publication universitaire de GUELMA ; 2007.
- [5] **Le site web** : <http://www.vicat.fr/fr/Activites/Ciment/Qu-est-ce-que-le-ciment>. Juin 2015.
- [6] **A. C. D. E** ; « Production et perspective, Rapport de gestion, Exercice 2009, Mai 2010, 112 p.
- [7] **ElodieRomilliat**« Étude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker », Génie de procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet de Saint-Etienne. N°d'ordre : 396GP, France, 20janvier 2006, 3-8p.
- [8] **Abdelkader Ameer**« Influence de l'ajout pouzzolane sur la résistance du ciment de la cimenterie de Saïda », mémoire d'ingénieur d'état en chimie et génie des procédés, Département de chimie, Université Abou-BakrBelkaïd, 13/11/2006, 13p.
- [9] **J. Baron, J.P. ollivier et J.C. Weiss**, « Les bétons, bases et données pour leurformulation », Edition Eyrolles,Troisième tirage, 1999, 3-12p.
- [10] **Christophe Charon Holcim**; L'industrie du ciment, Données générales ; Ecole Thématique « Matériaux cimentaire » du 21au 26 septembre 2008 ; ATIH : Association technique de l'industrie des liants hydraulique ; France,17-69p
- [11] **Amina Sidi Aïssa, Leila Sidi Yakoub**« Optimisation du taux des incuits pour lafabrication de ciment CPj CEM I A/42,5 », mémoire DEUA en chimie industrielle, Département de chimie, Université Abou-BakrBelkaïd, 2007/2008, 4p.
- [12] **BoucifBelhachemi, Nasr Eddine Hassaïne**« Etude d'un milieu agressif acidesur un mortier à base de ciment composé », Communication Science &Technologie (COST) N°10 Janvier 2012, 37-44p.
- [13] **Fatima Zahra Hasni, Ahmed El-Bouslemti**« Influence de la composition minéralogique du clinker sur la qualité de ciment », mémoire DEUA en chimie industrielle, Département de chimie, Université Abou-BakrBelkaïd, 25 novembre 2007, 7-8p.

[14] **Mohammed Amine Benhadda** « La durabilité du mortier à base de ciment de Béni-Saf vis-à-vis de milieux basiques NaOH et NH<sub>4</sub>OH », mémoire d'ingénieur d'état en chimie industrielle, Génie des procédés, Université Abou-Bakr Belkaïd, NH<sub>4</sub>OH ; 2011/2012 ; 2-13p.

[15] **Claudine Noguera** « Les argiles ». CNRS-UPMC Institut des Nanosciences de Paris, UMR 7588, 140 rue de Lourmel, 75015 Paris, France, des nanomatériaux modernes, au passé millénaire, N° 2, 2010, 98-101p. [Claudine.noguera@insp.jussieu.fr](mailto:Claudine.noguera@insp.jussieu.fr)

[16] **Rio Tinto Alcan** « Navire d'évacuation de l'aluminium » ; Colombie-Britannique, [www.riotintoalcan.com](http://www.riotintoalcan.com). Date de consultation (02/2013).

[17] **Pablo Picasso** « Dossiers rallye », N°5, France, 11 novembre 2004.

[18] **G. Dreux** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Edition, Eyrolles- Paris- 1998, 29-41p

[19] **Lafarge Amérique du Nord**, 2013, Ciment Fabrication du ciment.

[20] **Jacques Vecoven; Holcim ; CNRS ;** Centre national de la recherche scientifique ; L'industrie du ciment données générales ; ATIH (Association techniques de l'industrie des liants hydrauliques ; Ecole thématique « matériaux cimentaire » du 25 au 30 septembre 2005.

[21] **Société de Ciment de Ain El Kbira** ; [dirgem@scack.dz](mailto:dirgem@scack.dz); web : [www.erce-dz.com](http://www.erce-dz.com); 2008.

[22] Site web: SOS-planète .

[23] [www.amidesneuneus.free.fr](http://www.amidesneuneus.free.fr).

[24] **Holcim**, « Guide pratique ; Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » ; Une publication de **Holcim** Belgique, S.A.

[25] **A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB** . Les ajouts cimentaires et le développement durable. Département de génie civil, Université de Sherbrooke.

[26] **CETIM** « Résultats des essais chimiques de poussière et ciment » ; mai 2018

[27] **SOUR EL GHOZLANE** « Résultats des essais chimiques de poussière et ciment » ; mai 2018.

[28] **Khadidja henni-Chebra**: « détermination de niveau d'empoussièrement engendrée par la fabrication du ciment. », université Hassiba Ben Bouali Chlef, Algérie ; rencontre Universitaires de génie Civil, 29 au 31 mai 2011.

[29] **Samir, Belmahi, Zidour Mohammed et Bensatallah Tayeb** : « Comportement mécanique des mortiers de chamotte à base d'un mélange de ciment-chargeur calcaire. » ; Journal Scientifique Libanais, 19(1): 95-104. C ; 2018.

[30] **KHUDHAIR MOHAMMED** : « l'emploi de la poussière de four de cimenterie dans la matrice de ciment ; minimisation des émissions CO<sub>2</sub> L'atmosphère et amélioration des

propriétés physique et mécanique.» Taylor, Francis online ,International Journal of Computers and Applications,novembre 2016

**[31] EQIOM :** «ciments.» ;fiche de données de sécurité ;selon le Règlement (CE) N° 1907/2006(REACH) ;produit :ciments ;version 4.1 /France ;date d'édition :11/12/2017