



Faculty of Sciences and Technology

Civil Engineering Department

N° d'ordre : M2...../GC/2024

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Structures

Thème

**Elaboration d'un mortier à base d'un ciment expiré**

Présenté par :

- BENDAHMANE Miloud Sid Ali
- BOUATTOU Zakaria Bakir

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

Mme BELAS Nadia	Présidente :	Université de Mostaganem
Mme GUERZOU Tourkia	Encadrante :	Université de Mostaganem
Mr BELARIBI Omar	Examineur :	Université de Mostaganem
Mr BAHAR SADEK	Invité.	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024



## REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu de nous avoir guidés et donnée la force et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près a contribué à finaliser ce modeste travail qu'on espère qu'il sera à la hauteur de leur engagement.

Un grand merci à madame **BELAS Nadia** qui a accepté de lire notre travail, et pour ses précieux conseils. On la remercie énormément pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Un grand merci à **Mr BELARIBI Omar** qui nous fait l'honneur d'être présent parmi les membres de jury et avoir accepter d'examiner ce travail.

Un énorme et chaleureux merci à **Mme GUERZOU Tourkia** qui a su nous faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique, pour son aide précieux, son disponibilité, son encouragement et ces conseils durant toute la durée de notre travail.

Un grand merci à Mr Bahar Sadek, Mme Mostefa Fouzia et Mme Bentriki Zahira pour ses aides durant tout le cursus.

Nos remerciements vont également à tous les laboratoires qui ont contribué à ce travail, LCTPE, LMPC et les laboratoires pédagogiques de l'université de.

Nous sommes reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence.

# Sommaire

1	CHAPITRE 1 : LE CIMENT .....	1
1.1	<b>Introduction</b> .....	1
1.2	<b>Définition du ciment</b> .....	1
1.2.1	<b>Processus de fabrication des ciments courants</b> .....	2
2	Elaboration du clinker :.....	2
2.1	<b>L'extraction et la préparation des matières premières :</b> .....	2
2.2	<b>Le séchage et le broyage :</b> .....	2
2.2.1	<b>La cuisson :</b> .....	3
2.3	<b>Le broyage du clinker :</b> .....	4
3	Les Constituants du ciment .....	5
3.1	<b>Clinker :</b> .....	5
3.2	<b>Le gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) :</b> .....	5
4	Classification des ciments courants .....	5
	• <b>CEM I</b> .....	5
	• <b>CEM II A/B:</b> .....	5
4.1	<b>CEM III A/B:</b> Ciment de haut fourneau (CHF) : contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker. Ce type de ciment est utilisé pour des travaux de fondations profondes, de grande masse mais aussi dans des milieux agressifs comme l'élevage agricole, les terrains gypseux, l'eau très pure ou encore les eaux de mer. ....	6
	• <b>CEM III C:</b> .....	6
	• <b>CEM IV A/B:</b> .....	6
	• <b>CEM V:</b> .....	6
5	Hydratation des composants du ciment portland : .....	6
5.1	<b>Hydratation des silicates :</b> .....	6
5.2	<b>Hydratation des aluminates :</b> .....	6
5.3	<b>Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A :</b> .....	6
5.4	Hydratation de L'aluminoferrite tétra calcique C <sub>4</sub> AF :.....	7
6	Prise et durcissement du ciment :.....	7
6.1	<b>Phase dormante :</b> .....	7
6.2	<b>Début et fin de prise :</b> .....	7
6.3	<b>Durcissement :</b> .....	7
7	Les ajouts cimentaires .....	8

7.1	<b>Rôle de l'ajout cimentaire :</b>	8
7.1.1	<b>Rôle de la granulométrie de l'ajout :</b>	8
7.1.2	<b>Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires :</b>	8
8	Principaux ajouts minéraux inertes :	9
8.1	Fillers calcaires :	9
9	Principaux ajouts minéraux actifs :	10
9.1	<b>La pouzzolane :</b>	10
9.2	<b>Pouzzolane naturelle :</b>	10
9.3	<b>Pouzzolane artificielle :</b>	10
10	L'utilisation des ajouts en Algérie :	10
11	Principales caractéristiques des ciments	11
11.1	<b>La surface spécifique (finesse Blaine) :</b>	11
11.2	<b>La masse volumique apparente :</b>	11
11.3	<b>La masse volumique absolue :</b>	11
12	Les ciments expirés	12
12.1	Conditions de stockage idéales pour préserver la qualité	12
12.2	Signes de détérioration et précautions à prendre	12
12.3	<b>Les facteurs qui affectent la durée de vie de ciment</b>	12
12.4	<b>Les conséquences de l'utilisation de ciment périmé</b>	13
12.5	<b>Les ciments expirés en Algérie</b>	13
	Introduction	15
	Définition	15
	Les différents mortiers	15
	A) Les mortiers de ciment :	15
	B) Les mortiers de chaux :	15
	C) Les mortiers bâtards :	15
	Mortiers fabriqués sur chantier	16
	Mortier industriel	16
	Emplois des mortiers :	16
	A) Le hourdage de maçonnerie	16
	12.6 Les enduits :	17
	12.7 Les chapes :	17
	Formulation et performances :	17
	12.8 Les mortiers de ciment :	17

12.9	Les mortiers de chaux :	17
12.10	Les mortiers bâtards :	17
	Conclusion.....	18
I-1	Introduction .....	18
I-2	Matériaux utilisés :	18
a)	<b>Le ciment</b> .....	18
b)	<b>Fillers calcaires</b> .....	22
c)	<b>Ajout :</b> .....	22
d)	<b>Eau de gâchage:</b> .....	23
I-3	Formulations adoptés des mortiers :	24
a)	<b>Mortiers normal (témoin) :</b> .....	24
b)	<b>Mortiers avec ajout (ciment expiré) :</b> .....	24
I-4	Conclusion :	24
II-1	Introduction .....	25
II-2	Essais de caractérisations physiques des matériaux.....	25
12.11	<b>II-2-1 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)</b> .....	25
12.12	<b>II-2-2 Module de finesse (NF P18-304)</b> .....	26
12.13	<b>II-2-3 Equivalent de sable (NF P18-598)</b> .....	26
12.14	<b>II-2-4 La masse volumique apparente</b> .....	27
12.15	<b>II-2-5 La masse volumique absolue des sables</b> .....	28
12.16	<b>II-2-6 Pourcentage des fines (NF P 18 301)</b> .....	29
12.17	<b>II-2-7 Absorption [NF P 18-554(gravillon) et NF P 18-555(sable)]</b> .....	29
12.18	<b>II-2-8 La masse volumique absolue des Ciments (CRS et CPJ)</b> .....	29
12.19	<b>II-2-9 Consistance du ciment (NF EN 196-3)</b> .....	30
12.20	<b>II-2-9 Temps de début et fin de prise (NF EN 193-3)</b> .....	31
II-3	Préparation et confection des éprouvettes.....	32
12.21	<b>II-4 Essais de caractérisations physiques des mortiers</b> .....	32
12.22	<b>II-4-1 à l'état frais (La maniabilité)</b> .....	32
II-5	Méthode de coulage des éprouvettes.....	34
II-6	Essais de caractérisations mécaniques des mortiers.....	34
12.23	<b>II-6-1 Essai de traction par flexion par trois points</b> .....	34
12.24	<b>II-6-2 Essai de compression</b> .....	35
II-7	Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique .....	36
II-8	Absorption d'eau par immersion totale.....	37

II-8 Conclusion.....	37
III. 1 INTRODUCTION.....	37
III. 2 RESULTATS ET ANALYSE.....	38
12.25    2. 1 <i>Caractéristique du mortier à l'état frais (Maniabilité)</i> .....	38
12.26    2. 2 <i>Caractéristique du mortier à l'état durci</i> .....	39
12.26.1    A. <b>Masse volumique apparente</b> .....	39
A. Absorption d'eau.....	39
A. <b>Résistance à la traction par flexion</b> .....	40
A. <b>Résistance à la compression</b> .....	42
12.26.2    Indice d'activité pouzzolanique .....	43
III. 1. 4 CONCLUSION .....	44

## Liste des Figures

Figure 1: Poudre de ciment courant .....	33
Figure 2: : Elaboration du ciment .....	36
Figure 3: Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire .....	39
Figure 4: : pouzzolane naturelle .....	41
Figure 5: : Granulométrie des sables non corrigés .....	35
Figure 6 : L'analyse des sables non corrigés et sable corrigé.....	36
Figure 7: préparation de ciment expiré .....	37
Figure 8 :La série de tamis.....	44
Figure 9 :Essai d'équivalent de sable. ....	46
Figure 10 : La masse volumique apparente du ciment .....	47
Figure 11 Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée .....	48
Figure 12 Consistance de ciment. ....	50
Figure 13 Maniabilimètre B.....	52
Figure 14: Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.....	52
Figure 15 Moule prismatique .....	54
Figure 16:Essai de traction par flexion. ....	55
Figure 17 :Essai de compression. ....	56
Figure 18 :Histogramme de temps d'écoulement en seconde .....	110
Figure 19 :Histogramme de temps d'écoulement en seconde .....	111
Figure 20 :Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers. ....	114
Figure 21 :Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers. ....	115
Figure 22 :Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers. ....	115



## ***Listes Des Tableaux :***

Tableau 1 :Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers. ....	42
Tableau 2 :Caractéristique effectué dans le laboratoire.....	32
Tableau 3 :Analyse chimique selon la fiche technique .....	33
Tableau 4 :Propriétés physiques selon la fiche technique.....	33
Tableau 5 :Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale. ....	34
Tableau 6 :Caractéristique effectué dans le laboratoire.....	37
Tableau 7 :Analyse chimique selon la fiche technique. ....	37
Tableau 8 :Propriétés physiques selon la fiche technique.....	37
Tableau 9 :la composition des mortiers.....	38
Tableau 10 : séquences de malaxage.....	51
Tableau 11 :Classe de consistance selon la durée d'écoulement .....	53
Tableau 12 :Résultats de temps d'écoulement en seconde. ....	110
Tableau 13 :Résultats d'absorption d'eau par immersion totale .....	112
Tableau 14 :Valeurs des résistances à la traction par flexion .....	113
Tableau 15 :Résultats des mesures des résistances à la compression .....	116

## RESUME

La protection de l'environnement et la préservation des ressources naturelles sont devenues des priorités mondiales. Dans ce contexte, le recyclage des ciments expirés a suscité un intérêt croissant dans l'industrie de la construction. Cette étude se concentre sur l'élaboration de mortiers à base de ciment expiré, en intégrant des proportions de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 % de ciment expiré. L'objectif est d'évaluer les avantages et les inconvénients de l'utilisation de ciment expiré dans les mortiers. Les résultats montrent qu'un certain pourcentage de ciment expiré peut être substitué dans le mélange de mortier sans compromettre les caractéristiques mécaniques et l'ouvrabilité. Cette recherche apporte une contribution significative à la valorisation des déchets de ciment, offrant ainsi une solution écologique et économique pour l'industrie de la construction.

## ABSTRACT

Environmental protection and natural resource conservation have become global priorities. In this context, the recycling of expired cement has garnered increasing interest in the construction industry. This study focuses on developing mortars using expired cement, incorporating proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% expired cement. The objective is to assess the benefits and drawbacks of using expired cement in mortars. The results indicate that a certain percentage of expired cement can be substituted in the mortar mix without compromising mechanical properties and workability. This research makes a significant contribution to the valorization of cement waste, offering an ecological and economic solution for the construction industry.

## ملخص

اصبحت حماية البيئة والحفاظ على الموارد الطبيعية من الأولويات العالمية. في هذا السياق، أثار إعادة تدوير الأسمنت المنتهي الصلاحية اهتمامًا متزايدًا في صناعة البناء. تركز هذه الدراسة على تطوير ملاط باستخدام الأسمنت المنتهي الصلاحية، بإدماج نسب 5% و10% و15% و20% و25% من الأسمنت المنتهي الصلاحية. الهدف هو تقييم الفوائد والمساوئ لاستخدام الأسمنت المنتهي الصلاحية في الملاط. تشير النتائج إلى أنه يمكن استبدال نسبة معينة من الأسمنت المنتهي الصلاحية في خليط الملاط دون التأثير على الخصائص الميكانيكية وقابلية التشغيل. تسهم هذه الدراسة بشكل كبير في تعزيز إعادة استخدام نفايات الأسمنت، مما يقدم حلاً بيئيًا واقتصاديًا لصناعة البناء.

# **Introduction générale**

## INTRODUCTION GENERALE

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux et des exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets. La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre.

Il a été observé ces dernières années dans le secteur du BTP, une augmentation conséquente du ciment expiré stocké chez les distributeurs des sacs de ciment.

La problématique environnementale se retrouve également en fin de vie du matériau. L'industrie produit des quantités de ciment extrêmement importante dont la partie principale est aujourd'hui expiré et éliminée en décharge. Parmi les différents modes de gestion des stocks, le recyclage est considéré comme la voie principale de la valorisation de ces derniers, les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire de suivre cette voie.

Les chercheurs, actuellement, étudient la possibilité de recycler les ciments expirés dans des pâtes, mortier ou des bétons.

Et par ce qu'il y a peu de recherche dans ce domaine, nous avons entamé cette étude expérimentale comparative dans un but écologique et technique en valorisant les ciments expirés dans des nouveaux mortiers.

**Ce manuscrit comporte trois parties:** Après une introduction générale sur la problématique actuelle sur les grandes quantités des ciments expiré en Algérie et l'impact de la décharge sur l'environnement et sur l'économie. Une revue bibliographique comportant un ensemble de généralités sur les ciments: un rappel sur les différents types de ciment, un aperçu général sur les méthodes et les moyens nécessaires de sa production et enfin l'ensemble des caractéristiques des ciments (chimiques, mécaniques et thermiques). Le principe d'hydratation, les différents ajouts utilisés dans la fabrication de ciment, une revue bibliographique sur les mortiers, le type de mortier et le domaine d'utilisation, les propriétés des mortiers frais et durci sont présentée dans la première partie.

La seconde partie sera consacrée aux matériaux utilisés et aux essais définissant les caractéristiques des matériaux utilisés et les méthodes expérimentales selon les normes en

vigueur.

La dernière partie concerne les résultats et discussions sur les essais physiques et mécaniques (résistances mécaniques).

Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion générale et des perspectives susceptibles d'ouvrir d'autres horizons vers d'autres axes de recherches toujours bénéfiques à l'environnement et à la qualité de la construction.

*Partie I :*

**Revu**

**bibliographique**

*Chapitre 1 :*

**Le ciment**

## CHAPITRE 1 : LE CIMENT

### 1. Introduction

Cette partie porte sur les constituants du ciment portland, processus de fabrication des ciments courants et leurs classifications, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation.

Les chercheurs ont été intrigués par la composition d'une roche naturelle présente à Portland, en Angleterre, dont les remarquables propriétés hydrauliques (faculté de durcir en présence d'eau) laissaient entrevoir, si sa production pouvait être maîtrisée, des développements considérables pour les bâtisseurs. C'est au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle que la structure du ciment fut vraiment découverte par le français Louis Vicat.

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment portland est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction [Aitcin, 1995]. On peut théoriquement fabriquer du ciment Portland à partir de matériaux renfermant de la chaux, de la silice, de l'alumine et du fer. Quel que soit son lieu de fabrication, le ciment Portland possède toujours, à quelques exceptions près, la même composition. Cependant, cette simplicité apparente cache une série de réactions chimiques très complexe que l'on ne sait pas toujours expliquer de façon précise. On peut donc dire que les produits à base de ciment Portland sont le fruit d'une technologie simple et d'une science complexe.

### 2. Définition du ciment

Le ciment est une substance liante composée d'une combinaison de calcaire (calcaire), d'argile (argile) et d'autres minéraux. Il est utilisé dans la construction de bâtiments, de ponts, de routes et de barrages. Il a la capacité de prendre, de durcir, d'adhérer à d'autres matériaux et de les lier ensemble. Le ciment est l'un des matériaux les plus utilisés et, après l'eau, c'est la ressource la plus consommée de la planète.

Le ciment est un liant hydraulique, en autres termes, un matériau finement broyé qui réagit avec à l'eau et forme une pâte qui durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation conservant sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [Belhocine. Negoudi, 2013].





**Figure 1** : Poudre de ciment courant [Belhocine. Negoudi, 2013].

### 3. Processus de fabrication des ciments courants

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Le processus de fabrication du ciment peut se diviser en deux étapes principales.

La première concerne la fabrication de la roche artificielle appelée clinker, constituant principal du ciment et la deuxième étape consiste à broyer finement ce clinker avec d'autres constituants minéraux pour obtenir un ciment ayant des propriétés bien déterminées [Djobo yankwa, 2013].

Les différentes étapes de la fabrication sont décrites ci-après.

#### A) Elaboration du clinker :

La fabrication du clinker est un processus qui se déroule en trois grandes étapes qui sont :

- **L'extraction et la préparation des matières premières :**

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps [Romilliat, 2006].

- **Le séchage et le broyage :**

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des

broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économes en énergie et permettent un séchage plus efficace.

Ensuite 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et demi-sèche.

La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Aujourd'hui, Ciments n'utilise plus que la voie sèche ou la voie demi-sèche.

Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en "granules" par humidification (voie demi-sèche) [Ph. Demail, et al, Guerville].

- **La cuisson :**

La cuisson se fait à une température voisine de 1450 °C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tours/minute et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se combine en venant à la rencontre de la source de chaleur, une longue flamme alimentée au charbon pulvérisé, au fuel lourd, au gaz, ou encore partiellement avec des combustibles de substitution (valorisation de résidus d'autres industries).

L'énergie calorifique consommée est considérable : 3200 à 4200 K Joules (l'équivalent de 100 kg de charbon) par tonne de clinker produit. Pour améliorer le bilan thermique, on utilise en amont du four un échangeur thermique qui préchauffe le cru à environ 800 °C.

Deux types d'échangeurs sont utilisés :

- ✓ L'échangeur à cyclone si le cru est introduit dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche),
- ✓ L'échangeur à grille s'il est introduit sous forme de granules humidifiées (voie demi-sèche).

Entre l'échangeur et le four, est quelquefois installé un brûleur supplémentaire assurant une « pré-calcination », c'est à dire une décarbonatation partielle qui favorise les réactions ultérieures de clinkérisation et améliore la fiabilité de l'atelier de cuisson.

A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100 degrés.

Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker :

✓ La décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive,

L'argile se scinde en ses constituants : silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation [Ph. Demail, M. Robinson, D. Sarraute, Guerville].

### B) Le broyage du clinker :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 40 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur.

C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments "à ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple dans les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [Romilliat, 2006].

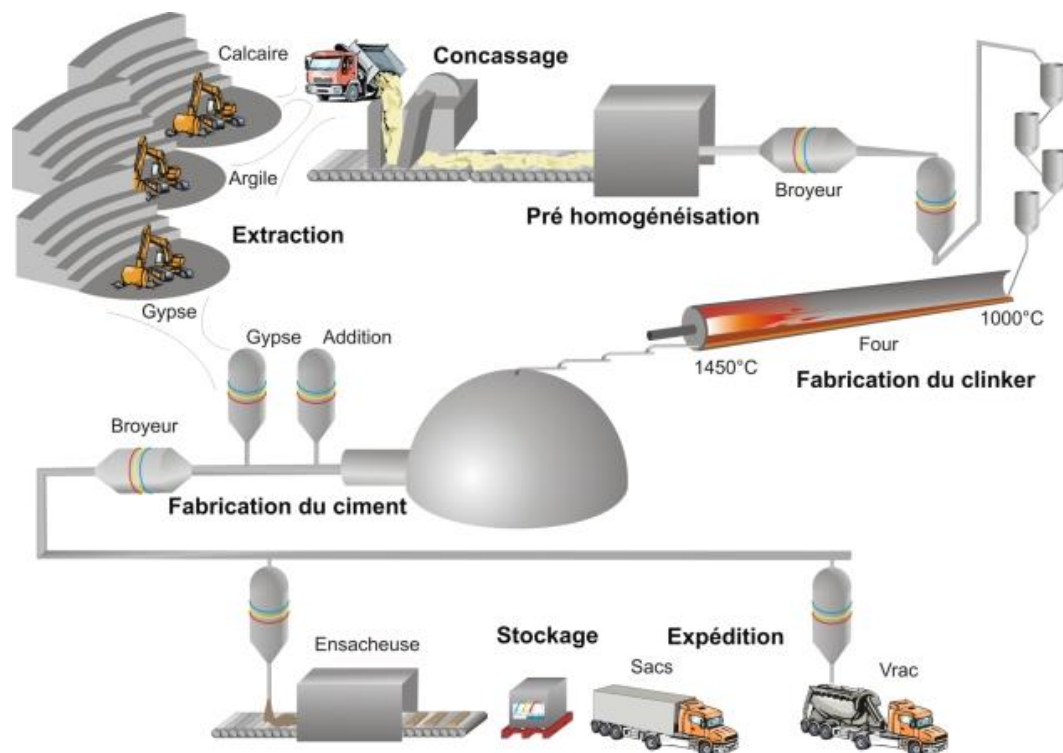


Figure 2 : Elaboration du ciment [Romilliat, 2006]

#### 4. Les Constituants du ciment

##### A) Clinker :

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) 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>) [Djobo yankwa, 2013].

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. 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 :

- Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S)
- Silicate bi calcique (C<sub>2</sub>S)
- Aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A)
- Ferro aluminate calcique (C<sub>4</sub>AF)

##### B) Le gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) :

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement [Belhocine.Negoudi, 2013].

#### 5. Classification des ciments courants

Les ciments sont classés selon des appellations et des catégories précises en fonction de l'usage qui peut en être fait et doit répondre à la norme NF EN 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- **CEM I:** Ciment portland (CPA - dans la notation française) : contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires. C'est le ciment le plus utilisé, notamment pour réaliser du béton armé, du béton précontraint ainsi que des produits préfabriqués performants tels que des poutrelles ou des tuyaux. Il permet aussi de fabriquer de l'enduit, des produits de ragréage ou encore de la colle.

- **CEM II A/B:** Ciment portland compose (CPJ) : contient au moins 65% de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires. Il est utile dans les travaux de masse et d'usage courant en béton armé ou la maçonnerie.

- **CEM III A/B:** Ciment de haut fourneau (CHF) : contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker. Ce type de ciment est utilisé pour des travaux de fondations profondes, de grande masse mais aussi dans des milieux agressifs comme l'élevage agricole, les terrains gypseux, l'eau très pure ou encore les eaux de mer.

- **CEM III C:** Ciment de haut fourneau (CHF) : contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

- **CEM IV A/B:** Ciment pouzzolanique (CPZ) : Avant l'introduction de la norme **NF EN 197-1**, il était connu sous l'appellation CPZ.

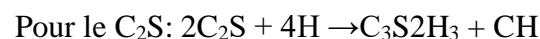
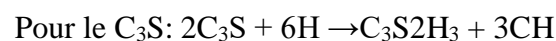
- **CEM V:** Ciment au laitier et aux cendres (CLC) : (anciennement ciment au laitier et aux cendres) contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.

## 6. Hydratation des composants du ciment portland :

### A) Hydratation des silicates :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques ( $C_3S$ ) et les silicates bis calciques ( $CS$ ) se dissolvent sous forme d'ions  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  et  $H_2SiO_4$ . Qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés ( $C-S-H$ ) et de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du  $C_2S$ , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [R. Chaid, 2006].

À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :



### B) 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 [R. Chaid, 2006].

**C) Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A :**

La réaction est donnée par :

**D) Hydratation de L'aluminoferrite tétra calcique C<sub>4</sub>AF :**

Le C<sub>4</sub>AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C<sub>3</sub>A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

**7. Prise et durcissement du ciment :**

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique 3CaO, SiO<sub>2</sub> (ou, par abréviation, C<sub>3</sub>S) ; le silicate bi calcique 2 CaO, SiO<sub>2</sub> l'aluminate tricalcique 3 CaO, Aluminoferrite tétracalcique 4 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives. (Ou C<sub>4</sub>AF) [CIM béton fiche technique, tome1].

**A) Phase dormante :**

La pâte de ciment – ciment + eau – reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment et la température). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse [CIM béton fiche technique, tome1].

**B) Début et fin de prise :**

Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur.

La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide [CIM béton fiche technique, tome1].

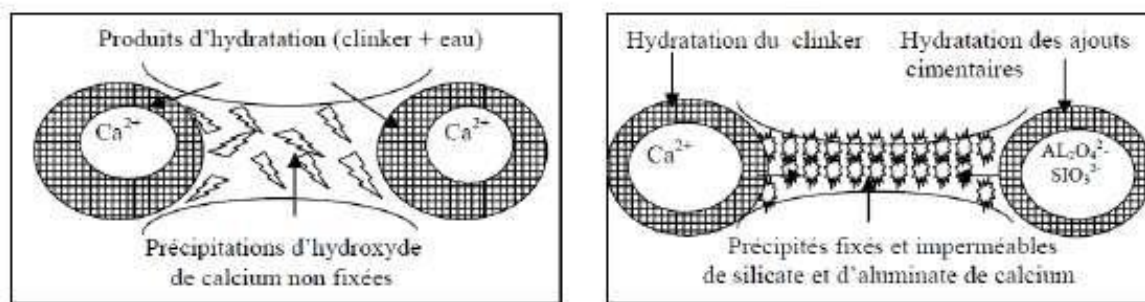
### C) Durcissement :

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle [CIM béton fiche technique, tome1].

## 8. Les ajouts cimentaires

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

Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux [R. Chaid, 2006].



(a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire

(b) Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire

**Figure 3:** Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.

### A) Rôle de l'ajout cimentaire :

- **Rôle de la granulométrie de l'ajout :**

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [Mounir, 2008].

- **Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires :**

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction d'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton qui augmente la perméabilité de lessivage. Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [Mounir, 2008].

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



**B) Principaux ajouts minéraux inertes :**

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les schistes calcinés [Belhocine.Negoudi, 2013].

➤ **Fillers calcaires :**

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

Les fillers se différencient les uns des autres par :

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

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [Mounir, 2008].



**C) Principaux ajouts minéraux actifs :****➤ 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 possédants des propriétés liantes.

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

**✓ Pouzzolane naturelle :**

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



**Figure 4 : pouzzolane naturelle [Belhocine. Negoudi, 2013]**

**✓ Pouzzolane artificielle :**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite [Belhocine. Negoudi, 2013].

**D) L'utilisation des ajouts en Algérie :**

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

Le tableau 1 donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

**Tableau 1** : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts utilisés
ERCE	Ain-Touta	Pouzzolane
	Ain El Kbir	
	Hamma Bouziane	
	H'djarEssaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire /tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

## 9. Principales caractéristiques des ciments

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, de sable et d'eau défini par la norme NF EN 196-1). [CIM béton fiche technique, tome1].

### A) La surface spécifique (finesse Blaine) :

Permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5 000  $\text{cm}^2/\text{g}$  [G. Dreux, 1998].

### B) La masse volumique apparente :

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de  $1000 \text{ kg/m}^3$  (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

### C) La masse volumique absolue :

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150  $\text{kg/m}^3$  suivant le type de ciment. [CIM béton fiche technique, tome1].

## 10. Les ciments expirés

Le ciment est un liant hydraulique composé principalement de calcaire et d'argile. La proportion de clinker, un constituant du ciment, et d'autres additifs détermine en partie la qualité et la durée de vie du ciment. En général, un ciment correctement conditionné peut avoir une longévité de plusieurs mois voire un an.

### A) Conditions de stockage idéales pour préserver la qualité

Pour conserver sa qualité, le ciment doit être stocké dans un lieu sec, à l'abri de l'humidité et sur une surface propre qui évite le contact direct avec le sol. L'utilisation de palettes et une protection adéquate sont recommandées pour prévenir l'absorption d'humidité.

Parmi les techniques de préservation du ciment utilisé :

- Méthodes d'empilement des sacs de ciment qui doit se faire de manière ordonnée et avec un nombre limité de sacs en hauteur pour éviter une pression excessive sur les sacs inférieurs.
- Utilisation de palettes pour éviter le contact avec le sol. C'est une méthode efficace pour éviter que le ciment entre en contact direct avec le sol, ce qui pourrait le contaminer avec de l'humidité.
- L'isolation contre les parois humides, qui est également conseillé d'isoler les sacs de ciment des murs humides pour prévenir toute absorption d'humidité.

### B) Signes de détérioration et précautions à prendre

Des signes comme les grumeaux durs ou une couleur anormale indiquent une détérioration du ciment. Si ces signes sont visibles, il est préférable de ne pas utiliser le produit car il a perdu de ses propriétés.

### C) Les facteurs qui affecte la durée de vie de ciment

Plusieurs facteurs peuvent affecter la durée de vie du ciment, notamment l'humidité, la température, la présence d'air et la manière dont le sac est fermé après usage. Une exposition prolongée à ces éléments peut provoquer une dégradation du ciment.

Le ciment peut expirer pour plusieurs raisons, notamment :

- Pré-hydratation: si le ciment est stocké dans un endroit inapproprié pendant longtemps, il peut absorber l'humidité et commencer à durcir prématurément.
- Exposition aux intempéries: l'exposition à l'humidité et aux conditions météorologiques peut affecter la force et la stabilité du ciment.

- Type de ciment utilisé : certains types de ciment ont une durée de vie plus longue que d'autres en fonction de leur composition chimique et de leur utilisation prévue. Il est important de stocker le ciment dans un endroit sec pour éviter ces problèmes.

#### **D) Les conséquences de l'utilisation de ciment périmé**

L'utilisation de ciment périmé peut entraîner une réduction significative de la résistance et de l'adhérence du mélange. Cela peut compromettre la durabilité et la sûreté des structures construites, menant potentiellement à des effondrements ou à des réparations coûteuses [<https://www.toutenciment.fr>]

#### **E) Les ciments expirés en Algérie**

La Direction du contrôle de la concurrence et des prix (DCP) de la région d'Oran a saisi 9.000 tonnes de de ciment expiré destiné à la vente, déclenchant une enquête sur le scandale qui a éclaté dans un secteur gravement touché par la récession économique.

L'inspection de la DCP a révélé que ces quantités de ciment expiré avaient été sorties de la zone sous douane. Une saisie conservatoire a été ordonnée pour toutes les quantités de ciment proposées à Oran. Le CTC a effectué des contrôles sur différents chantiers afin de déterminer la nature et la provenance du ciment utilisé dans la construction. [S. BENSAYEH, **Journal national d'information, Maison de la presse Kouba Alger, www.lexpressiondz.com**]

Afin de réduire la pression exercée par la crise énergétique et l'effet de serre lors de la fabrication du ciment, l'article de Yening Yu propose une technique de recyclage du ciment périmé en le mélangeant avec de la fumée de silice et du laitier vieillis, grâce à la conception d'un emballage serré des particules. Pour vérifier l'accessibilité de l'agencement optimal, plusieurs mesures de la structure poreuse sont effectuées, notamment la porosimétrie par intrusion de mercure, l'adsorption d'azote, la microscopie électronique à balayage, la résonance magnétique nucléaire et le développement de la résistance au durcissement avec l'analyse thermo-gravimétrique. Les résultats obtenus montrent que la structure poreuse de la pâte durcie est principalement divisée en trois gammes de diamètres : <11 nm, 11-50 nm et environ 80 nm ; grâce à l'effet de remplissage de la fumée de silice vieillie sur les pores inférieurs à 12,2 nm et à l'effet de remplissage du laitier sur les pores supérieurs à 12,2 nm, le mélange optimal présente manifestement une meilleure distribution des pores que les pâtes sans conception d'emballage serré ; en outre, la photographie à balayage vérifie effectivement l'effet de remplissage des particules fines et des produits d'hydratation dans les espaces des pores d'air, et l'intensité du signal magnétique liquide montre en outre la modification de la

densité de la microstructure, en particulier après 28 jours. Dans l'ensemble, la conception de l'emballage fermé s'avère être une méthode efficace pour réutiliser le ciment périmé avec la fumée de silice et le laitier vieillis, et cette proposition transformera de manière significative trois déchets de construction non qualifiés en matériaux utiles dans un souci de respect de l'environnement. [Yening Yu & al, 2019]

Le ciment Portland est largement utilisé dans le monde entier pour produire du béton. Lorsque le ciment Portland n'est pas utilisé correctement, en suivant les prescriptions normatives, son utilisation peut compromettre l'esthétique et la sécurité des structures. La présente recherche a consisté à analyser l'ouvrabilité du béton à l'état frais et la résistance à la compression à l'état durci lors de l'utilisation de ciment Portland avec une date supérieure à 90 jours définie par la norme brésilienne NBR. Pour les essais, trois ciments ont été sélectionnés avec des dates de fabrication différentes : novembre 2018, juillet 2019 et août 2020. L'ouvrabilité a été évaluée par le test d'affaissement et le test de résistance à la compression aux âges 1, 7, 8 et 10 jours. Le mélange utilisé était destiné à une résistance à la compression de 25 MPa à l'âge de 28 jours. Les essais d'affaissement ont montré des valeurs divergentes en ce qui concerne les ciments périmés, ce qui a conduit à des résultats non concluants, car même avec le rapport eau/ciment, l'affaissement obtenu pour le béton à base de ciment 2019 était inférieur à celui recommandé pour un béton ordinaire. Il a été conclu que la résistance à la compression diminuait pour les bétons produits avec du ciment expiré. [Stéphanie Rocha, 2022]

## 11. Conclusion

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur une variété de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. Ils ont étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

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.

*Chapitre 2 :*

# **Les mortiers**

## CHAPITRE 2 : MORTIER

### 1. Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant - pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement [CIM béton fiche technique, tome2].

### 2. Définition

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agrégats avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Techniquement parlant c'est une colle. Les professionnels du bâtiment qui utilisent le mortier sont le maçon, le carreleur et le tailleur de pierre.

### 3. Les différents mortiers

Dans les travaux publics et génie civil on utilise différents types de mortier:

**A) Les mortiers de ciment :** 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 sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

**B) Les mortiers de chaux :** sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

**C) Les mortiers bâtards :** 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 des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

#### 4. Mortiers fabriqués sur chantier

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

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

Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.

#### 5. Mortier industriel

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

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

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

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

#### 6. Emplois des mortiers :

##### A) Le hourdage de maçonnerie :

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques



mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. [CIM béton fiche technique, tome2].

#### **B) Les enduits :**

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. A côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201-1 et 2 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.

#### **C) Les chapes :**

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol [CIM béton fiche technique, tome2].

### **7. Formulation et performances :**

Selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants [CIM béton fiche technique, tome2].

#### **A) Les mortiers de ciment :**

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m<sup>3</sup> de sable [CIM béton fiche technique, tome2].

#### **B) Les mortiers de chaux :**

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique. [CIM béton fiche technique, tome2].

#### **C) Les mortiers bâtards :**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. 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.

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges.

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables [CIM béton fiche technique, tome2].

## 8. Conclusion

Le mortier est un mélange homogène de liant (chaux ou ciment) et d'agrégats fins (sable, surki, sciure de bois .....) et d'une quantité spécifique d'eau. Différents types de mortiers sont utilisés dans la construction de maçonnerie en fonction de leurs applications, de leurs liants, de leur résistance, de leur densité apparente et de leurs objectifs.

# **Axes de la recherche et problématique**

## AXES DE RECHERCHE ET PROBLEMATIQUE

Les besoins universels de conserver les ressources naturelles, de protéger l'environnement et de diminuer l'émission des gaz à effet de serre doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie de la construction. Le recyclage des ciments expirés a attiré des intérêts croissants de l'industrie du bâtiment.

Le présent travail consiste à élaborer des mortiers à base d'un ciment expiré dans un mortier cimentaire à des proportions de 5%, 10%, 15%, 20% et de 25%. Nous s'intéresserons aussi à la connaissance des différents avantages et inconvénients de l'incorporation des ciments expirés.

Un peu des recherches et des travaux ont été fait dans ce domaine, et ils ont relevé qu'on peut substituer un pourcentage de ciment expiré dans un mélange de mortier.

À l'issue de la recherche bibliographique effectuée dans ce domaine, les axes de recherches ont été fixés et à travers lesquels, on essayera de répondre à certaines questions importantes:

- Comment peut-on recycler les ciments expirés ?
- Quelle est la proportion optimum pour ce recyclage ?
- Est-ce que le ciment expiré influe les caractéristiques de mortier en terme de l'ouvrabilité et les caractérisations mécaniques ?

Toutes les réponses aux questions précédemment posées seront exposées dans les parties qui suivent.

*Partie II :*

**Matériaux et Méthodes  
expérimentales**

# *Chapitre 1 :*

## **Matériaux et méthode de formulation**

## I-1 Introduction

Le mortier est un matériau de construction usuel, qui s'apparente à une pierre artificielle. Il est un mélange de sable, un liant hydraulique qui assure la cohésion entre les différents grains du squelette, tel que le ciment, et de l'eau.

- Eventuellement, et en faible quantité, des produits d'addition, les adjuvants, influençant certaines propriétés ou comportements du mortier.

L'intérêt du matériau de mortier réside dans sa facilité de mise en œuvre puisqu'il se présente à l'état pâteux et qu'il suffit de remplir des moules de la forme de l'élément à réaliser.

Les différents essais pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux ont été effectués dans des laboratoires spécialisés suivants :

- Laboratoire du Département de Génie Civil-FST de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LCTPE de l'Université de Mostaganem.

## I-2 Matériaux utilisés :

### a) Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment gris pour béton de haute performance, destiné à la construction des ouvrages d'art. C'est un ciment composé CPJ-CEM II/B 42.5 N nommé « Matine » en provenance de la cimenterie LAFARGE, dont les caractéristiques physiques et analyse chimique moyenne de ce ciment sont données respectivement dans les tableaux (1-2-3) suivants :

**Tableau 1** : Caractéristique effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.9 g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique apparente	1.04 g/cm <sup>3</sup>
Consistance	26.5%
Début de prise	2h 38min
Fin de prise	3h 50 min
Temps de prise	1h 12 min

**Tableau 2:** Analyse chimique selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	9
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> ) (%)	2.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.04
C3S (%)	60
C3A (%)	7.5

**Tableau 3 :** Propriétés physiques selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	4200
Retrait à 28 jours (µm/m)	950
Expansion (mm)	2.9
Début de prise (min)	150
Fin de prise (min)	230
2 jours (MPa)	11
28 jours (MPa)	44

**b) Granulats**

Les granulats utilisés sont un sable de carrière issus de la carrière de MASCARA et un sable de mer qui provient de la carrière de SIDI LAKHDER.



Désignation	Sable de mer	Sable de carrière
Apparence		
Nature	Siliceux d/D=0/3	Calcaire d/D=0/3

Dans notre composition du mortier on a utilisé des granulats bien lavés. En vue de leur utilisation dans la confection du mortier, les essais des granulats ont été réalisés au sein de laboratoire MDS/MDC au sein de notre université. Les résultats son introduit au tableau 4 suivant.

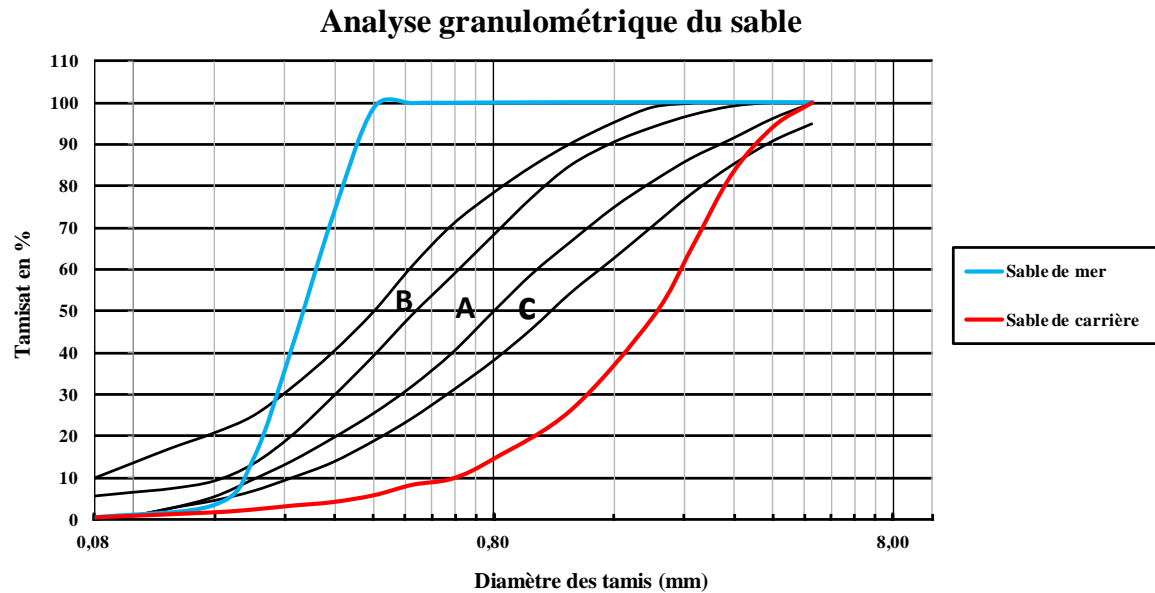
**Tableau 4** : Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale.

Caractéristiques	Sable de mer SM	Sable de carrière SC
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.5
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.43
Equivalent de sable	95.9%	95.47%
Module de finesse	1.2	3.6
Pourcentage des fines (%)	0,01	0.01
Absorption (%)	0.64%	1.82%

La valeur de la masse volumique de sable de mer est celle d'un sable siliceux.

La valeur d'équivalent de sable dépassent 90%, significatif d'un sable très propre, ceci a été constaté lors de lavage de ce sable pour la récupération des fines.

Les courbes granulométriques des granulats sont représentées dans la figure 1 suivant :



**Figure 1** : Granulométrie des sables non corrigés

Nous remarquons que la courbe de sable de carrière n'appartient pas au fuseau privilégié, pour cette raison on a effectué des corrections par le sable de mer et les fillers calcaires en utilisant la méthode de module de finesse comme suit :

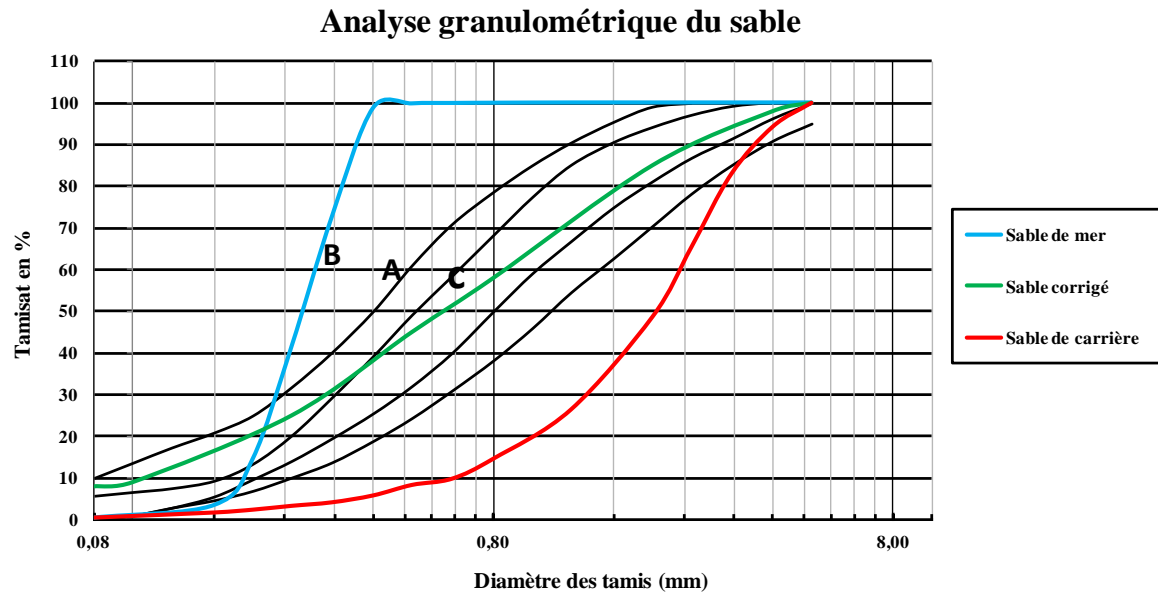
En utilisant la règle d'Abrams, on a utilisé un SC de module de finesse important  $M_{f1}=3.6$  et  $M_{f2}=1.2$  pour un SM fin, afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait  $M_f=2.7$ . Les proportions des deux sables sont les suivantes :

$$SC = \frac{(M_f - M_{f2})}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3 - 1,2)}{(3,6 - 1,2)} = 0,75 = 75\%$$

$$SM = \frac{(M_{f1} - M_f)}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3,6 - 3)}{(3,6 - 1,2)} = 0,25 = 25\%$$

Selon la norme Française [NF EN 206-1], avec l'ajout d'une quantité de 8% des fillers calcaire, on a trouvé un sable de  $M_f= 2.38$ .

La Figure 2 représente l'analyse granulométrique des sables (avant et après correction).



**Figure 2:** L'analyse des sables non corrigés et sable corrigé.

Le sable corrigé avec 23% sable de mer, 69% sable carrière et 8% de fine.

### c) Fillers calcaires

Les fillers utilisés composés d'éléments fins passant à un tamis de mailles 80  $\mu\text{m}$  sont de nature calcaire provenant de la carrière de Kristel.

On a lavé un sable de carrière passant au tamis de 80  $\mu\text{m}$ , puis on a séché les fillers obtenues dans une étuve et on les a broyés.

### d) Ajout :

Le ciment résistant sulfate CRS expiré: CPA-CEM I-42,5 ES NA 443 en provenance de la cimenterie ZAHANA certifié et conforme à la norme algérienne (NA442) et européenne (EN CE 197-1). Ce ciment a été stocké avant l'an 2018 dans le laboratoire LCTPE. Ce ciment a été tamisé à 63  $\mu\text{m}$  pour avoir une finesse proche d'un ciment neuve.



**Figure 3:** préparation de ciment expiré

Les caractéristiques physiques ainsi que l'analyse chimique moyenne de ce ciment sont présentées aux tableaux (Tableau 5, Tableau 6, Tableau 7) :

**Tableau 5:** Caractéristique effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2,9 g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique apparente	1.15 g/cm <sup>3</sup>
Consistance	20.5%

**Tableau 6:** Analyse chimique selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	0,5 à 3
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> ) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	<0,1
C3A (%)	<3,0

**Tableau 7 :** Propriétés physiques selon la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤ 2.0
Chaleur d'hydratation	<270j/g
Début de prise (min)	>60
Fin de prise (min)	240 à 400
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	≥10
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	≥42,5

**e) Eau de gâchage:**

Eau de gâchage est l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour

le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF P 18-303.

### I-3 Formulations adoptés des mortiers :

#### A. Mortiers normal (témoin) :

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1.

Le principe d'essai consiste à préparer un mortier normal à l'aide d'un sable corrigé obtenue par un mélange de 75% sable concassé et 25% de sable mer. La courbe granulométrique du mélange de sable se situe à l'intérieur du fuseau granulaire de sable (plage préférentiel).

Pour obtenir un mortier normal témoin on doit :

- Mélanger le sable avec le ciment CPJ-CEM II/B - 42,5 N et de l'eau dans les proportions suivantes : **450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5g de sable** et **225 ± 1 g d'eau (E/C=0,5)**.

#### B. Mortiers avec ajout (ciment expiré) :

Pour étudier notre objectif, on a besoin de préparé des mélanges du mortier avec quatre (4) proportions d'ajout en ciment expiré CRS de 5%, 10%, 15% et de 20% en masse.

Les tableaux ci-dessous représentent les différentes compositions du mortier.

**Tableau 8** : la composition des mortiers

Les masses en gramme (g)							
Taux d'ajout		0%	5%	10%	15%	20%	25%
Ciment Matine		450	427,5	405	382,5	360	337,5
Ciment CRS Expiré		0	22,5	45	67,5	90	112,5
Eau		225	225	225	225	225	225
Sable 1350 g	Sable concassé	1012,5	1012,5	1012,5	1012,5	1012,5	1012,5
	Sable de mer	337,5	337,5	337,5	337,5	337,5	337,5

### I-4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers. Puis nous avons déterminé les compositions de chaque type de mortier.

## *Chapitre 2 :*

# **Méthodes expérimentales**

## II-1 Introduction

Dans ce chapitre, on va décrire les essais expérimentaux réalisés au cours de notre étude. Ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux utilisés et des mortiers confectionnés. En débutant par des essais sur les sables, sur le ciment et en terminant par des essais de caractérisation de mortier à l'état frais et durci. Les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

## II-2 Essais de caractérisations physiques des matériaux

### II-2-1 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

La granulométrie est la recherche de la distribution en poids des particules solides d'un sol suivant leurs dimensions.

Les résultats de l'analyse granulométrique facilitent l'identification du matériau et permet de prévoir certaines propriétés de perméabilité, aptitude au compactage.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (figure 1), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.



**Figure 1:** La série de tamis.

Le résultat de la granulométrie est traduit dans une courbe dont l'ordonnée y représente le pourcentage de tamisâtes passants, et l'abscisse x représente les ouvertures de tamis.

### II-2-2 Module de finesse (NF P18-304)

Le module de finesse est un nombre compris entre 1.8 et 3.3 qui caractérise la finesse des granulats du matériau. Il est proportionnel à la surface située au-dessus de la courbe granulométrique du matériau.

Le module de finesse est défini selon la norme française [NFP 18-540] par le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable. Lorsque MF est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.

### II-2-3 Equivalent de sable (NF P18-598)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent (figure II-2).

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution lavante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

Le but de cet essai est de permettre de mesurer rapidement l'importance relative des éléments fins au sien d'un matériau sableux, il rend compte globalement de la quantité et la qualité des éléments fins qui flocculent et l'élément sableux qui sédimentent.



On a rempli l'éprouvette jusqu' au premier repère avec la solution lavante, puis on a introduit l'échantillon avec l'entonnoir donné des petits coups sous l'éprouvette afin de déloger des bulles d'air et laisser imbiber pendant 10min. On ferme l'éprouvette et on secoue (90cycle d'aller et retour de 20cm de course dans le sens horizontal en 30 s) avec l'agitation manuelle. On a ôté le bouchon rincé au-dessus avec la solution lavante. On a introduit ensuite le tube de laveur au fond de l'éprouvette et on a lavé pour la suspension des éléments argileux et attendre pendant 20min. On a mesuré à l'aide du régle la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette puis la hauteur  $h_2$  du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

Puis on a appliqué la formule  $ES = \frac{h_2}{h_1} * 100$



**Figure 2 :** Essai d'équivalent de sable.

#### II-2-4 La masse volumique apparente

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

Cela implique la détermination par pesée de la masse totale  $M$  et du volume total  $V$ .

On a rempli un récipient dont on connaît le volume  $V = 1L$  en granulat (Sable de mer et sable de carrière) avec une hauteur de 10cm entre la main et le récipient cylindre, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On racle le granulat avec une règle. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient. La masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau (figure II-3).

Soit :  $M_1$  : la masse du cylindre vide  $M_2$  : la masse du cylindre plein

VT : le volume total intérieur du cylindre ( $V = 1L$ )

La masse volumique :  $MV = (M2 - M1)/VT$  ;



**Figure 3** : La masse volumique apparente du ciment.

### II-2-5 La masse volumique absolue des sables

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

Elle est déterminée ; pour les granulats (Sable de mer et sable de carrière); à l'aide d'une éprouvette graduée (figure II-4). On a rempli l'éprouvette en eau jusqu'au repère destiné V1. On a pesé une masse de granulat M puis on la versé dans l'éprouvette. On prend le nouveau volume (volume d'eau + granulat) V2. On calcule la masse volumique par la loi  $\rho_s = M/(V2 - V1)$ .



sable de carrière



Sable de mer

**Figure 4**: Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée

Remarque : La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la norme [NF P 18-555], par le pycnomètre de Le Chatelier et le benzène.

### II-2-6 Pourcentage des fines (NF P 18 301)

Nous avons mettes un échantillon déshydraté complètement dans un récipient et on la pèse. Puis nous avons la versé dans un tamis de 80  $\mu\text{m}$  et on a lavé sous l'eau jusqu'à obtenir une propreté parfaite, on a séché l'échantillon, puis on a la pesé à nouveau.

Le pourcentage d'impureté (fine) est calculé par :

$$\%fine = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

Telle que :

P1= masse de granulat sec avant lavage

P2= masse de granulat sec après lavage

### II-2-7 Absorption [NF P 18-554(gravillon) et NF P 18-555(sable)]

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable à la résistance au gel des bétons. En effet l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures. On détermine un coefficient d'adsorption définie comme le rapport de l'augmentation de la masse ( $M_a$ ) de l'échantillon après imbibition par l'eau pendant 24heures, à la masse sèche ( $M_s$ ) après passage à l'étuve à 105° C de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est calculé par la formule suivante :

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} . 100$$

### II-2-8 La masse volumique absolue des Ciments (CRS et CPJ)

La méthode utilisée pour mesurer la densité absolue des éléments fins inférieurs à 0,075 mm est la méthode du pycnomètre ou la méthode des trois poids.

La méthode concerne de :

- Peser un pycnomètre rempli jusqu'à la marque par un liquide non réactif avec le matériau de densité absolue connue ( $M_1$ ).
- Peser une quantité de matière fine ( $M_2$ ).

- Vider légèrement le pycnomètre et introduire le matériau à tester, puis remplir à nouveau le pycnomètre avec le liquide.
- Peser la combinaison du liquide et du matériau (M3).
- Calculer la masse de liquide remplacée par le matériau :  $M = M1 + M2 - M3$
- Calculer le volume de liquide remplacé par le matériau :  $V = \frac{M}{\rho_l}$
- Calculer la densité absolue du matériau :  $\rho = \frac{M2}{V}$

**Remarque :**

Pour déterminer la densité absolue du ciment, il convient d'utiliser un liquide non réactif au ciment, par exemple le toluène (méthylbenzène) ou le naphta lourd (white spirit).

**II-2-9 Consistance du ciment (NF EN 196-3)**

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

En réglant un appareil de VICAT muni de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle, on relève la sonde en position d'attente.

On prépare la pâte de ciment, introduisant une quantité d'eau choisie ( $E/C=0.26$ ) et une quantité de 500 g de ciment dans la cuve de malaxeur.

On malaxe comme introduit le tableau II-1 suivant :

**Tableau 1** : Mode de malaxage de pâte de ciment.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec.
Etat du malaxeur	<i>Arrêt</i>		<i>Vitesse lente</i>	<i>Arrêt</i>	<i>Vitesse lente</i>

Après le malaxage, en introduisant rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane, puis on les place dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. On abaisse la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. 30s après avoir lâché la sonde, on note la distance d entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base plane. On renouvèle l'opération jusqu'à obtenir de  $d=6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  ( $d= 5\text{mm} ,6\text{mm} ,7\text{mm}$ ) (FigureII-5).



**Figure 5:** Consistance de ciment.

### **II-2-9 Temps de début et fin de prise (NF EN 193-3)**

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.

On règle l'appareil de VICAT muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle. Puis on relève l'aiguille en position d'attente. On prépare la pâte de ciment comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eaux déterminé pour la pâte de consistance normalisée. En introduisant rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane. On place le moule et la plaque de base dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. Puis on abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. On l'ache l'aiguille sur la pâte et noter ce moment comme temps zéro. On note la distance  $d$  entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base plane. On nettoie l'aiguille après chaque pénétration. On renouvèle la mesure de  $d$  tous les 5 min jusqu'à obtention de  $d=4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . On note le temps du début de prise à partir du temps zéro.

En retournant le moule tronconique rempli sur la plaque de base plane et on place le moule inversé et la plaque de base plane dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. On abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à arrive au contact de la pâte. Puis on lâche l'aiguille sur la pâte. On renouvèle la mesure de  $d$  tous les 5 min jusqu'à obtention du  $d=0.5 \text{ mm}$ . On note le temps de fin de prise à partir du temps zéro.

Le temps de prise est égal à la déférence du temps entre le début et la fin de prise.

### II-3 Préparation et confection des éprouvettes

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique, ce mortier doit être malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1 :

Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.  
Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le **tableau 5**.

**Tableau 5** : séquences de malaxage

Opération	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée	/	/	30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Statues de malaxeur	Stop		Vitesse lente		Vitesse rapide	Stop		Vitesse rapide

### II-4 Essais de caractérisations physiques des mortiers

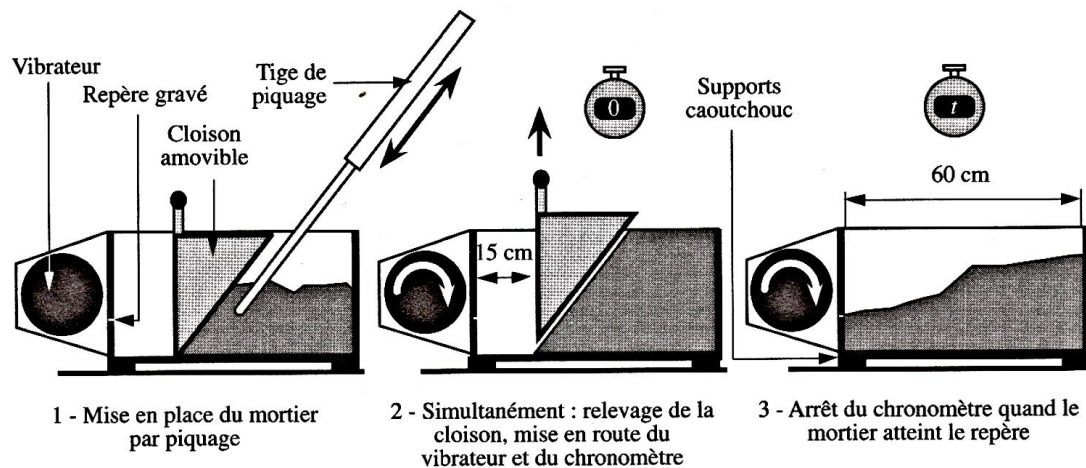
#### II-4-1 à l'état frais (La maniabilité)

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



**Figure 6** : Maniabilimètre B.

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



**Figure 7 :** Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

- Le mortier est introduit, à l'aide d'une truelle, dans la plus grande partie délimitée par la cloison et mis en place en 4 couches à peu près égales. Chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage qui doit être tenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison amovible.

- 2 minutes et 30 secondes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.

- Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps  $t$  mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide (ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil) comme illustré au tableau. 6.

**Tableau 6 :** Classe de consistance selon la durée d'écoulement. [47]

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

## II-5 Méthode de coulage des éprouvettes

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules normalisés en acier de forme prismatique ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ).

- Le moulage des échantillons se fait immédiatement après la préparation du mortier.
- Introduire la première couche de mortier (environ 300g) dans chacun des compartiments du moule. Étendre la couche uniformément et compacter la première couche à l'aide de 60 coups.
- Introduire la deuxième couche de mortier, l'égaliser et la compacter à l'aide de 60 coups supplémentaires.
- Enlever l'excès de mortier à l'aide de la règle métallique, tenue presque verticalement et déplacée lentement, avec un mouvement de scie transversal. Lissez la surface des éprouvettes à l'aide de la même règle tenue presque à plat
- Après lissage, chaque moule a été couvert avec une feuille plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stocké dans l'ambiance du laboratoire.
- Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24 h après le coulage.
- Les moules sont marqués pour identifier les spécimens.
- Les éprouvettes sont introduits dans un bain d'eau.



Figure 8 : Moule prismatique

Ces éprouvettes confectionnées sont pour des écrasements à :

- 3 jours.
- 7 jours.
- 14 jours.
- 28 jours.

## II-6 Essais de caractérisations mécaniques des mortiers

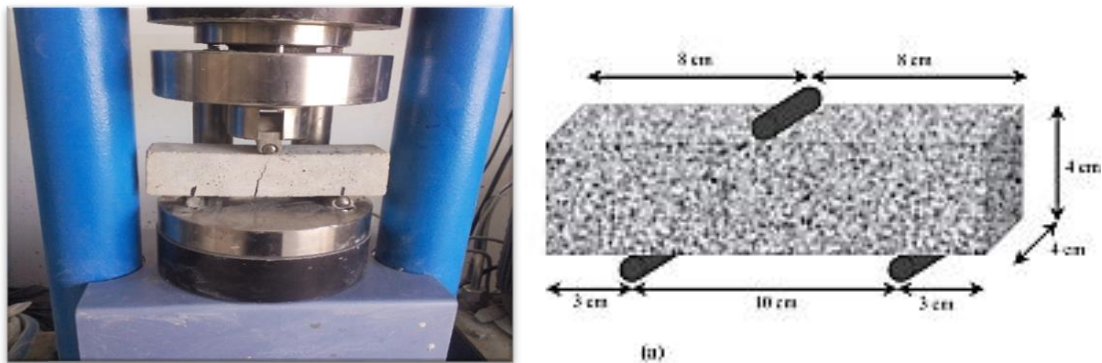
### II-6-1 Essai de traction par flexion par trois points

Il détermine la contrainte de traction par flexion  $\sigma_{tf}$  conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de mortier. Il s'effectue sur les éprouvettes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ). Les



essais sont réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II-14). Ils ont élaboré au laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem.

On place le prisme dans la machine d'essai avec une face latérale sur les rouleaux de support et avec son axe longitudinal normal aux supports. La distance entre les supports est de  $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . Appliquer la charge verticalement au moyen du rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter progressivement à un taux de  $50 \pm 10 \text{ N/s}$  jusqu'à la rupture.



**Figure 9** : Essai de traction par flexion.

Calcul de la résistance à la flexion selon l'essai des trois points

$$\sigma = \frac{3FL}{2wd^2}$$

**F** est la force maximale appliquée, **L** est la longueur de l'échantillon, **w** est la largeur de l'échantillon et **d** est la profondeur de l'échantillon.

### II-6-2 Essai de compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression  $\sigma_c$  conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de mortier. Il s'effectue sur les deux parts des éprouvettes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) qu'ils sont obtenue après la traction par flexion.

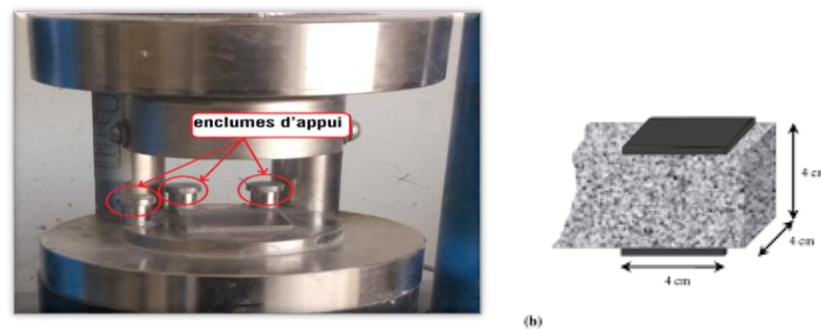
Les essais d'écrasements de compression ont été effectués au laboratoire LCTPE de la pathologie à l'université de Mostaganem.

Centrer latéralement les moitiés de prisme sur les plateaux auxiliaires en acier dur, qui déterminent exactement la zone de compression (parce que les moitiés de prisme ont une forme irrégulière). Selon la norme EN 196-1, les dimensions des plateaux sont de  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  et leur épaisseur est d'au moins  $10 \text{ mm}$ . Pendant la charge, l'attitude relative des plateaux

supérieur et inférieur doit rester fixe. La résultante des forces doit passer par le centre de l'échantillon. Augmenter la charge en douceur au taux de  $2\,400 \pm 200$  N/s pendant toute la durée de l'application de la charge jusqu'à la rupture.

Un résultat d'essai est défini comme la moyenne arithmétique des six déterminations de la résistance à la compression effectuées sur un ensemble de trois prismes.

Si un résultat parmi les six déterminations s'écarte de plus de  $\pm 10\%$  de la moyenne des six déterminations, ce résultat est écarté et la moyenne des cinq résultats restants est calculée. Si un autre résultat de ces cinq déterminations s'écarte de plus de  $\pm 10\%$  de leur moyenne, rejeter l'ensemble des résultats.



**Figure 10** : Essai de compression.

## II-7 Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique

L'indice d'activité, noté  $i$ , est défini comme le rapport de la résistance moyenne en compression de mortier avec ajout (ciment expiré dans notre cas) et la résistance moyenne à la compression de mortier témoin (sans addition).

Au sens des normes EN 450 et NFP 18- 506, cet indice est déterminé pour  $E/C = 0.5$  et  $p=0,25$ .

$$i = \frac{\sigma_A}{\sigma_t}$$

Des prismes de  $4 \times 4 \times 16$  cm<sup>3</sup> doivent être confectionnés pour les deux mortiers respectivement à base de ciment et à base de liant équivalent afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-échantillons à 28 jours.

## II-8 Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NBN B15-215 :1989 [36].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à prendre la masse des éprouvettes ( $4 \times 4 \times 16$ ) cm<sup>3</sup> du mortier directement après le démoulage et séchage à l'air libre.

Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  durant des périodes définies (3, 7, 14 et 28 jours). Avant la pesée, l'éprouvette est essuyée avec une éponge de manière à la débarrasser de son eau superficielle. Une fois la masse saturée obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion  $A_b$  est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

$M_a$  : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

$M_s$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ .

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.

## II-8 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les modes expérimentaux qui déduisent les caractéristiques physiques des matériaux, le mode de malaxage et de coulage des mortiers.

*Partie III :*

**Analyse des  
Résultats**

# *Chapitre 1 :*

## **Analyse des Résultats**

### III. 1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats des travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de notre recherche. Des interprétations seront émises sur les propriétés à l'état frais et durci des mortiers. Pour montrer l'influence d'utilisation d'un ciment expiré en tant qu'ajout dans un mortier, cinq proportions sont testés (5%, 10%, 15% et 20%).

### III. 2 RESULTATS ET ANALYSE

#### III. 2. 1 Caractéristique du mortier à l'état frais (Maniabilité)

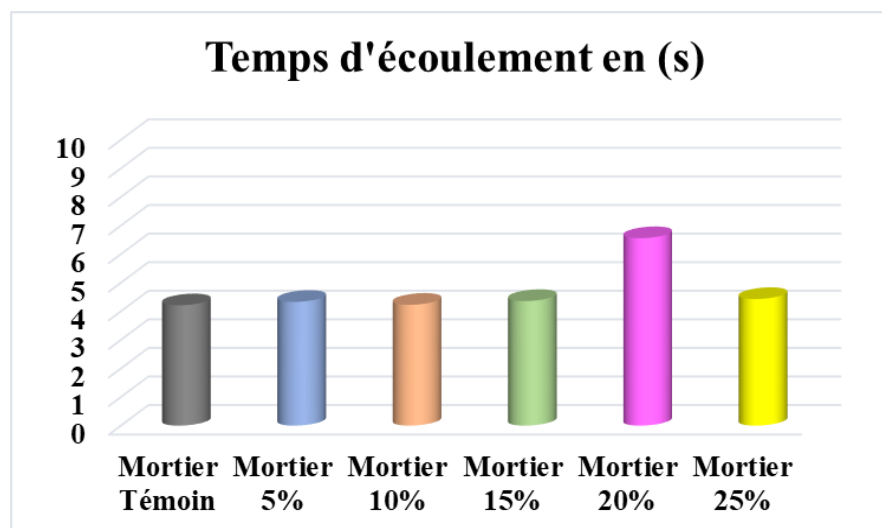
Les résultats à l'état frais des mortiers concernent essentiellement les mesures de la maniabilité. Un maniabilimètre à mortier a été utilisés pour déterminer la maniabilité dynamique en mesurant leur temps d'écoulement dans une cuve métallique vibrée.

Les résultats obtenus sont montrées ci-dessous :

**Tableau 1** : Résultats de temps d'écoulement en seconde.

	Mortier Témoïn	Mortier 5%	Mortier 10%	Mortier 15%	Mortier 20%	Mortier 25%
Temps d'écoulement en (s)	4,21	4,33	4,23	4,36	6,56	4,43

La figure III. 1 ci-dessous présente l'histogramme de temps d'écoulement en seconde des mortiers testés.



**Figure 1** : Histogramme de temps d'écoulement en seconde

Le tableau 1 et la figure 1 montrent que tous les mortiers élaborés ont un temps d'écoulement inférieur de 10 secondes ( $t \leq 10$ ). D'après l'histogramme, on constate que les mortiers à base d'un ciment expiré sont des mortiers fluides et ont une maniabilité du même

ordre que le mortier témoin. D'après ces résultats on constate que pour un rapport E/C constant, l'ajout de ciment expiré n'influe pas sur l'état physique de la pâte de mortier frais.

### III.2. 2 Caractéristique du mortier à l'état durci

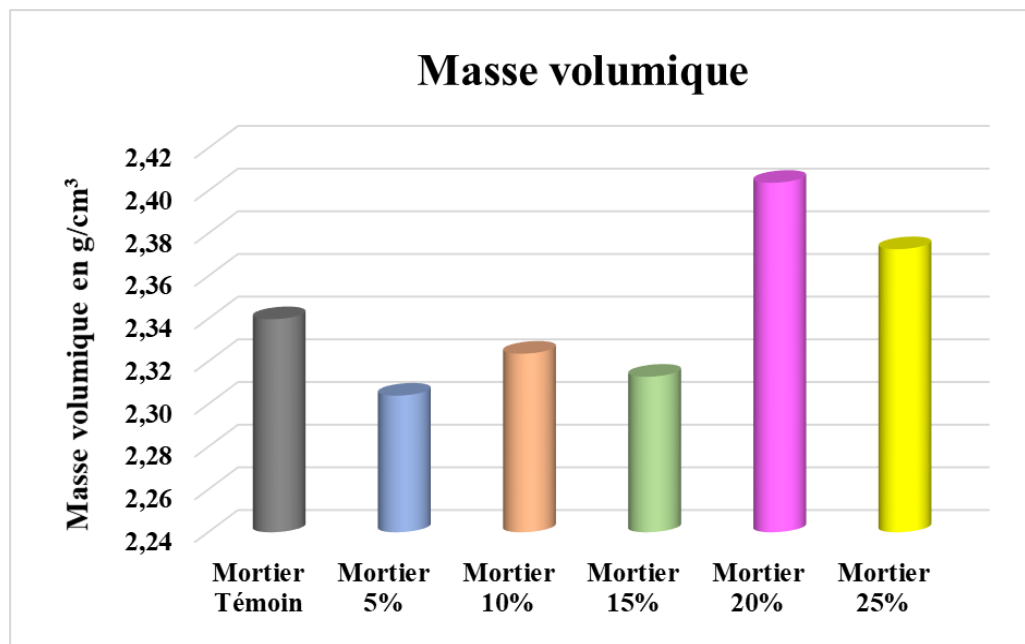
#### A. Masse volumique apparente

Les mesures expérimentales des masses volumiques à l'état durci des mortiers de ciments élaborés sont reportées dans le tableau 2 et la figure 2.

**Tableau 2** : Résultats des masses volumiques en  $\text{g/cm}^3$ .

	Mortier Témoin	Mortier 5%	Mortier 10%	Mortier 15%	Mortier 20%	Mortier 25%
1	2,34	2,30	2,32	2,31	2,4	2,37

La figure 2 ci-dessous présente l'histogramme des masses volumiques à l'état durci des mortiers testés.



**Figure 2:** Résultats des masses volumiques en  $\text{g/cm}^3$ .

De l'histogramme et de tableau, on remarque clairement que les masses volumiques des mortiers à base de ciment expiré sont proche de la masse volumique de mortier témoin, avec une légère augmentation pour le mortier à 20% de ciment expiré.

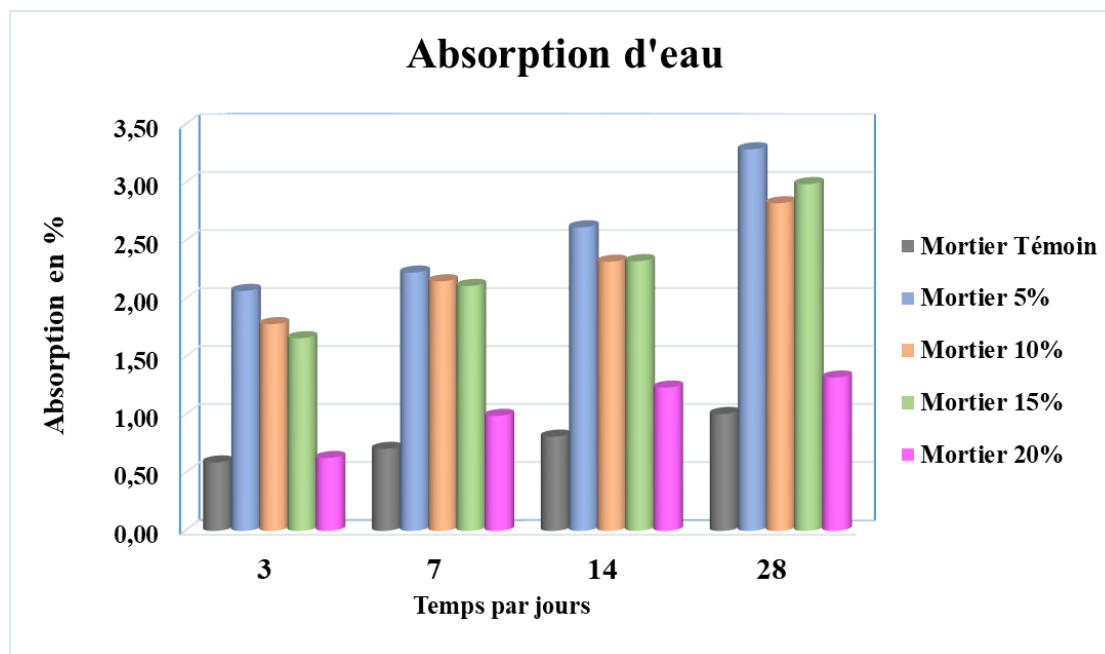
#### B. Absorption d'eau

Les mesures d'absorption d'eau par immersion totale prise en 3, 7, 14 et 28 jours pour tous les mortiers élaborés sont montrées dans le tableau 3 et la figure 3.

**Tableau 3:** Résultats d'absorption d'eau par immersion totale.

Temps (jours)	Mortier Témoin	Mortier 5%	Mortier 10%	Mortier 15%	Mortier 20%
3	0,59	2,07	1,78	1,66	0,63
7	0,71	2,23	2,15	2,11	0,99
14	0,81	2,62	2,32	2,33	1,24
28	1,01	3,29	2,82	2,99	1,32

La figure 3 présente les résultats d'absorption d'eau par immersion totale.

**Figure 3:** Résultats d'absorption d'eau par immersion totale.

De la figure 3, on constate que les mortiers à base de 5%,10% et 15% de ciment expiré absorbent une quantité d'eau énorme par rapport au mortier témoin. Le mortier à base de 20% de ciment expiré a développé des absorptions d'eau proche de mortier témoin.

### C. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée sur des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> jusqu'à l'échéance de 28 jours. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance moyenne à la traction par flexion.

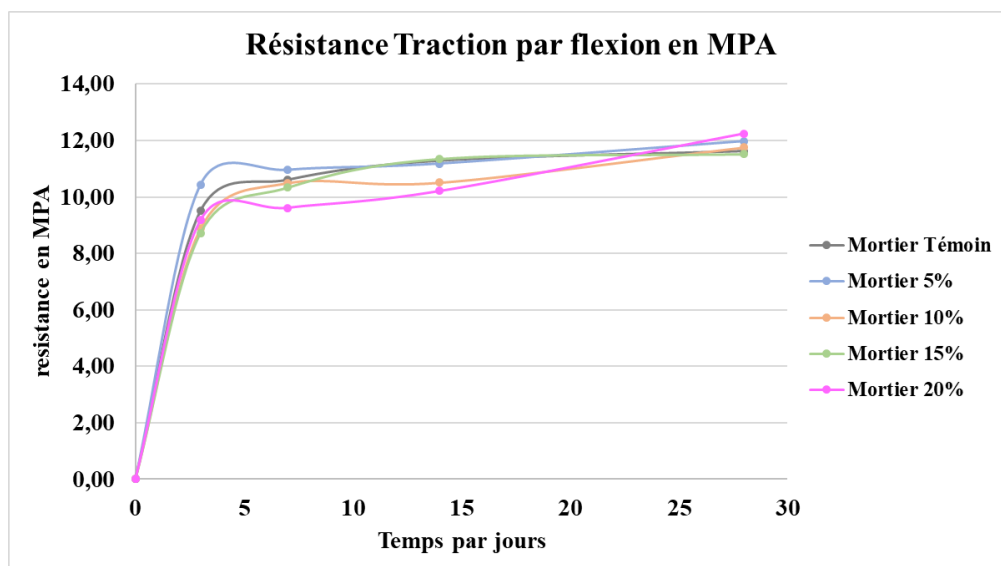
Le tableau 4 présente les valeurs des résistances à la traction par flexion (MPa) des différents mortiers en fonction du temps.



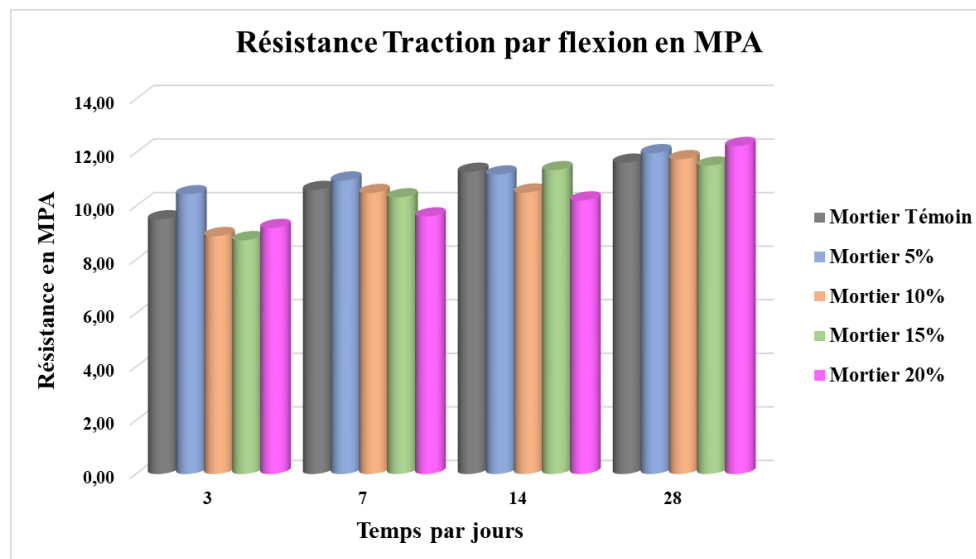
**Tableau 4:** Valeurs des résistances à la traction par flexion

	Mortier Témoin	Mortier 5%	Mortier 10%	Mortier 15%	Mortier 20%
<b>3</b>	9,51	10,44	8,88	8,73	9,18
<b>7</b>	10,60	10,96	10,49	10,33	9,61
<b>14</b>	11,28	11,18	10,51	11,34	10,21
<b>28</b>	11,62	11,97	11,75	11,51	12,24

La figure 4 ci-dessous présente les résistances à la traction des différentes éprouvettes de mortier élaborées avec des taux différents en plus de celles du mortier témoin à différentes échéances.

**Figure 4 :** Courbe de résistance à la traction des différents mortiers.

La figure 5 suivante représente Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers.

**Figure 5 :** Histogramme de résistance à la traction des différents mortiers.

De la figure 4 et la figure 5, on remarque clairement que toutes les résistances ont évolué de la même façon et d'une façon similaire à celles du mortier témoin. On constate aussi une augmentation régulière des résistances à la traction par flexion des différents bétons avec l'âge (3, 7, 14 et 28 jours).

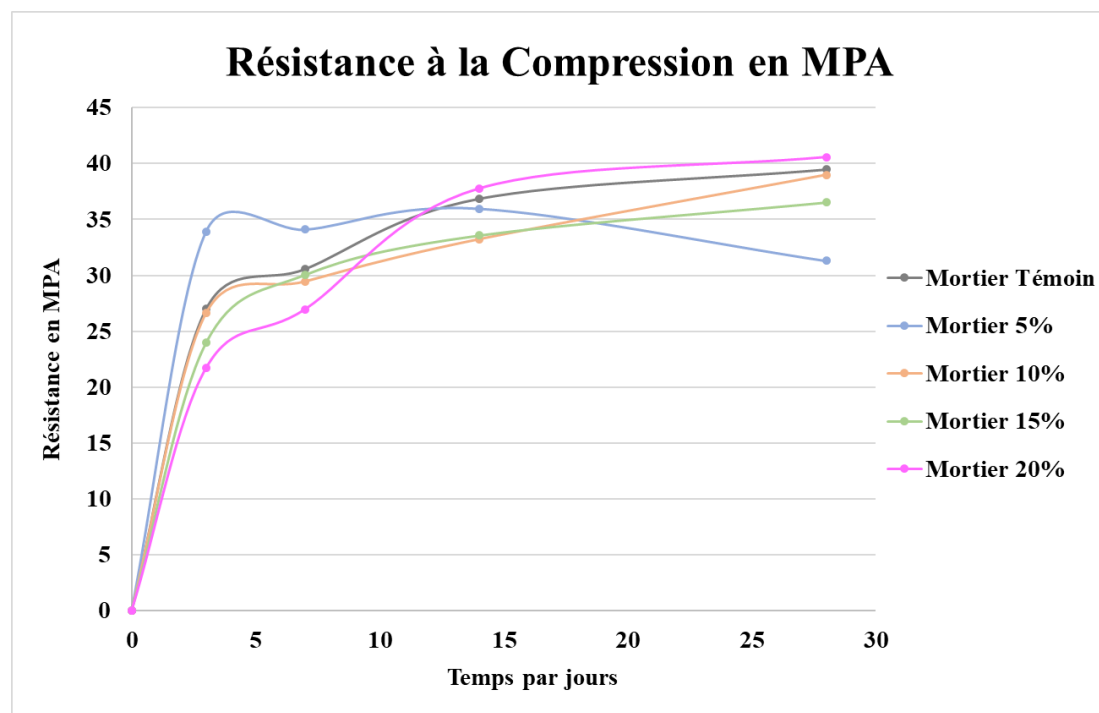
#### D. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur des demi-épreuves obtenues après l'essai de traction par flexion (si celles-ci ne sont pas endommagées). Ces mesures ont donc été effectuées sur six (06) demi-épreuves. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance à la compression.

**Tableau 5** : Résultats des mesures des résistances à la compression en fonction de temps des bétons ordinaires.

	Mortier Témoin	Mortier 5%	Mortier 10%	Mortier 15%	Mortier 20%
<b>3</b>	26,984	33,91	26,61	23,96	21,71
<b>7</b>	30,582	34,10	29,44	30,06	26,98
<b>14</b>	36,863	35,97	33,22	33,57	37,77
<b>28</b>	39,478	31,29	38,98	36,53	40,58

Les figures 6 et 7 ci-après présentent respectivement, les courbes de résistances à la compression et histogramme de résistance à la compression des différents mortiers



**Figure 6** : Courbe de résistances à la compression des différentes éprouvettes.

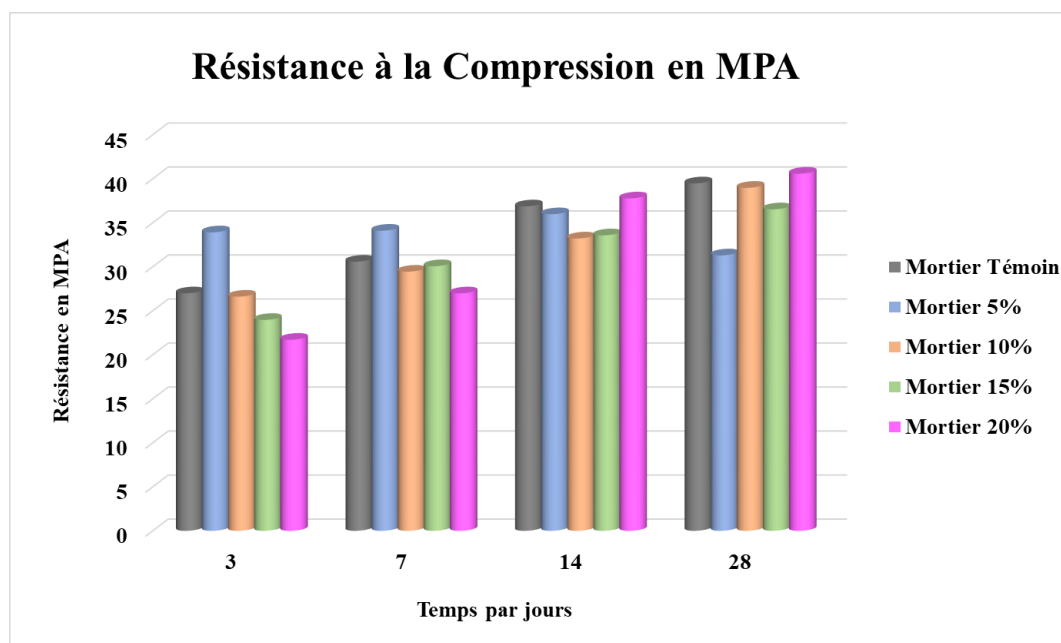


Figure 7 : Histogramme de résistance à la compression.

A première vue, toutes les résistances augmentent en fonction du temps sauf le mortier à base de 5% est démarqué par la diminution de sa résistance à la compression à 28 jours.

On remarque aussi que le mortier à base de 5% de ciment expiré développe des résistances à la compression intéressante au jeune âge qui dépassent le mortier témoin, mais une diminution remarquable au-delà de 14 jours. Par ailleurs, le mortier à base de 20% de ciment expiré développe des résistances à la compression faible par rapport au mortier témoin au jeune âge, au contraire il présente de bonnes résistances à la compression et supérieures à celles de mortier témoin et cela est remarquable au-delà de 14 jours.

### E. Indice d'activité pouzzolanique

Un mortier contenant 25 % de ciment expiré a été élaboré pour tester sa réactivité. Les résultats de résistance à la compression de 6 demi-prisme à 28 jours ont présenté dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Résultats des mesures des résistances à la compression

	1	2	3	4	5	6	$\sigma_m$
<b>Mortier Témoin</b>	42,306	38,483	42,545	35,309	39,333	38,892	40,312
<b>Mortier 25%</b>	40,176	36,210	35,278	39,124	36,140	34,516	36,215

Indice d'activité pouzzolanique a été calculé comme suit :

$$0,67 < i = \frac{\sigma_A}{\sigma_t} = \frac{36,215}{40,312} = 0,898 < 1$$

On constat que le ciment expiré a une activité pouzzolanique ( $0,67 < i < 1$ ), et cela peut signifier que le ciment expiré reste réactif.

### III. 1. 4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué des essais sur le mortier à l'état frais et à l'état durci. Nous avons remarqué que le ciment expiré a une activité pouzzolanique.

Nous avons aussi comparé et commenté les résultats trouvés, en constatant que le mortier à base de 20% ciment expiré a donné des résistances intéressantes et une absorption d'eau proche à celle du mortier témoin.

# **Conclusion générale et perspectives**

## CONCLUSION GENERALE

De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux dans la production de béton. Pour avoir ce dernier, nous sommes en besoin d'une grande quantité de ciment. Parallèlement à cela, on assiste à une grande marge de ciment expiré rapidement à cause de non-respect des conditions de stockage et de conservation. Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer des nouvelles approches de recyclage de ces ciments expirés permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie de ce matériau. Parmi les nombreuses méthodes explorées actuellement, la valorisation de ciment expiré dans des mortiers pour un double objectif de préserver les ressources naturelles et diminuer de l'émission de CO<sub>2</sub> (environnemental) ainsi que de désengorger les sites de stockage (économique).

L'augmentation inquiétante des quantités des ciments expirés sont sujettes aux critiques des écologistes. La réutilisation des ciments expirés en tant qu'ajout dans des nouvelles compositions de mortier a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets d'usage stockage et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières.

L'étude a été effectuée sur trois grandes parties dont la première concerne une synthèse de recherche bibliographique reportant des généralités sur les ciments, leurs caractéristiques, les additifs (ajout), ainsi qu'une généralité sur les mortiers, la seconde porte sur une série d'essais expérimentaux effectués sur les ciments (neuve et expiré), matériaux utilisés (sables concassés et sables de mer) en ce qui concerne leurs propriétés physiques (masse volumiques, granularité, absorption .....), et la troisième concerne la présentation des différents résultats obtenus, leurs analyses et discussion.

Notre projet a été mené dans le but d'atteindre un principal objectif qui consiste à recycler un ciment expiré dans un mortier. Il a été constaté que la confection de mortier à base d'un ciment expiré n'a pas affecté la maniabilité des mortiers. Le mortier à base d'un 20% de ciment expiré (CEM I 42,5 N – ES) a donné des résultats intéressants de point de vue d'absorption d'eau, masse volumique à l'état durci et des résistances mécaniques (à la flexion et à la compression) proche à celle du mortier témoin. On a remarqué aussi que le ciment expiré a une réactivité pouzzolanique.

D'après cette étude, on peut dire que recyclé un ciment expiré peut ouvrir un axe de recherche neuve pour préserver l'environnement dans le monde.

Cette étude se voulait préliminaire. Elle laisse donc de nombreuses perspectives à prévoir parmi lesquelles :

- Notre travail s'est basé sur les mortier, nous proposons de faire les mêmes essais sur les bétons et de procéder à des essais approfondis.
- Etude chimique et minéralogique de ciment expiré.
- Enfin, nous proposons une étude de quelques indicatifs de durabilité (carbonatation, gel-dégel...) pour compléter les connaissances apportées par la présente recherche.

**Références  
bibliographiques**



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] **AMOURI Chahinez** : « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », thèse doctorat, université de Constantine, 2009.
- [02] **A. Tagnit Hamou** : Les ajouts cimentaires et le développement durable, Université de Sherbrooke, Québec, CANADA.
- [03] **A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB** : Les ajouts cimentaires et le développement durable. Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
- [04] **Belhocine.Negoudi** : « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux »  
Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil, 2013 à l'université KASDI MERBAH OUERGLA.
- [05] **Bouglada Mohamed Salah**, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier», Mémoire de Magister, Université de M'sila, Année 2007 / 2008.
- [06] **CEN EN 196 1. , 1990 - Norme européenne, Ciments** : Détermination des résistances mécaniques.
- [07] **[CIM béton fiche technique, tome1]** : BETONS ET MORTIERS PREPARATION ET MISE EN ŒUVRE SUR CHANTIER
- [08] **[CIM béton fiche technique, tome2]** : FORMULATION, FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE
- [09] **COURS EN LIGNE** : Matériaux de construction, Les ciments, Chapitre 2, Disponible sur site web <<http://www.coursenligne.refer.org/>>, (Consulté le 06/09/2006)
- [10] **Cours en ligne matériaux de construction** : sommaire [http // www.larefer.org /matériaux/sommaire](http://www.larefer.org/matériaux/sommaire).
- [11] **CYRILE GUERANDEL** : « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de lixiviation », Thèse de doctorat, 2009 à l'Université Paul Verlaine- METZ, 2009

[12] **DJEKRIF.D, BENCHIKH.A** : « ETUDE DE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DU MORTIER ET BETON A BASE DES CIMENTS TERNAIRES » PEF master- université bordj Bou Arreridj, 25-06-2013.

[13] **DJOBBO YANKWA Jean Noël** : effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les Propriétés de ciments géopolyinères a base scories volcanique.

[13] **DOCUMENTS**, « Pechiney Électrométallurgie », Tour Manhattan, Cedex 21, 92087 Paris la Défense.

[14] **Dr. GHOMARI. FOUAD** : Science des matériaux de construction, Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, (2006)

[15] **(EN 933-8) « Équivalent de sable »**

[16] **(EN 196-1,2009)** Sable normalisé ISO, conforme ISO 679 : 2009.

[17] **G. Dreux** : "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41 WEAST R.C., ASTEL M.J., BEYER W.H., CRC handbook of chemistry and Physices, 67 Edition, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1986.

[18] **Mladenka Saric-Coric** : Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, Université de Sherbrooke, 2002.

[19] **Mounir .B** : Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux. Mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie (2008) 101p.

[20] **NF P 15 – 403** «Sable normal et mortier normal » AFNOR – Paris – 1996.

[21] **NF EN 197 1** : normes française-partie 1 : composition Spécifications et critère de conformité des Ciments courants

[22] **NF P 18-406** relative aux essais de compression des bétons.

[23] **Norme française** : «Ciments courants », NFP 15-301, Juin 1994

[24] **Ph. Demail, et al, Guerville** : ciment calcia, fabrication du ciment

[25] **PIERRE CHAUFOR**, La Chaux (histoire-fabrication propriétés), disponible sur site web <la-chaux.net > (consulte le 30/11/2004).

[26] **R.CHAID** : Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006.

[27] **R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT ARROMAN** : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition casteilla2004 PP, 17-25.

[28] **Rev. Future. Sciences, matériaux de construction**, disponible sur site <http://www.futura-sciences.com/fr/comprendre/glossaire/definition/t/terre> (Consulte le 06/09/2006).

[29] **Romilliat A** : Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2006) 136p.

[30] **Yening Yu, Yong Ge, Penghuan Liu**, Journal of Cleaner Production, "Recycling of expired cement and aged supplementary cementitious materials based on close packing theory and space filling effect"

[31] **Stéphanie Rocha, Cássio Gonçalves, and Lino Maia**, "Cement After Expiry Date: Effect in the Concrete Properties", under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2022 D. K. Ashish and J. de Brito (eds.), Environmental Restoration, Lecture Notes in Civil Engineering 232, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96202-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96202-9_8)

