

REREpublique ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité: Génie civil

Option: Structures



**ETUDE DE L'EFFET
DES MELANGES CIMENT-CHAUX-FUMEE DE SILICE SUR LA RESISTANCE
MECANIQUE DES MORTIERS**

Proposé et dirigé par:

D' KHELIL NACIM

Présenté par:

M^{lle} MISRAOUI KHADIDJA

Année 2015/2016

Remerciements

Toute ma gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à dieu le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail dans les meilleures conditions.

Je remercie ensuite monsieur **KHELIL NACIM**, Docteur à l'université de **MOULOUD MAMMARI**, qui m'a encadré pour réaliser ce travail, et qui a apporté son soutien, son aide et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier Monsieur **BOUKAIS SAID** pour sa contribution, son soutien et son encouragement. Il m'a consacré beaucoup de son précieux temps et mis à ma disposition ses connaissances dans le domaine.

Ainsi que **Mr. A. KAHIL** et **Mr. A. NEKMOUCHE** de m'avoir permis de résoudre les problèmes rencontrés dans Excel en autres...

Ma gratitude va aussi aux responsables et personnels du laboratoire de génie civil, en particulier à **Mr. BOUHERRAOUA R.**, pour sa précieuse aide à la réalisation de la partie expérimentale, ainsi qu'à **Mr. MAMMOU M.**, M^{lle} **FETOUH**, et tout les autres enseignants.

Je remercie également mon fiancé **YAHY T.** pour son aide et soutien.

Ainsi que tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce Project de fin d'études.

Je remercie enfin, les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère, à mon adorable mère, à celle qui est toujours présente et continue de l'être pour faire mon bonheur. Merci pour l'être sacrifiée pour que tes enfants grandissent et prospèrent. Merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de l'âge, de la santé, de la vie, au bien-être de tes enfants. Enfin ! merci tout simplement d'être ...ma mère.

A mon père, celui qui m'a toujours encourager et soutenu dans mes durs moments.

A mes chères sœurs : Sara et Salma qui m'a beaucoup aidé

A mon frère : Sid Ahmed

A ma cher grande famille MISRAOUI

A mes adorables amis(es) qui sont ma deuxième famille (camélia, imane, ouardia, amina, djidji, mouhend, hamid, liloucha, lynda, djidji, bilal, rachid, touet tous les autres)

Khadija

Résumé

Les recherches bibliographiques ont montré que l'ajout de la fumée de silice améliore la résistance des matériaux cimentaires (mortier/Béton), du fait de la réaction pouzzolanique (Formation de C-S-H) qui se produit entre les silicates de la fumée de silice et le calcium de la portlandite à l'intérieur de la solution interstitielle du la pâte de ciment. Partant de là, nous avons opté dans ce travail expérimental, pour une étude de la résistance mécanique sur mortiers avec substitution partielle du ciment par de la fumée de silice (FS), de la chaux (CH), et du mélange des deux (FS-CH), selon les trois configurations 5%, 10% et 15% de remplacement total. Le dernier mélange (FS-CH), lui, a consisté pour un taux de remplacement donné- en 3 mélanges : (FS 25%, CH 75%), (FS 50%, CH 50%) et (FS 75%, CH 25%).

Les essais de compression et de traction menés sur ces éprouvettes, ont permis d'arriver aux conclusions suivantes: tout d'abord, l'ajout de CH provoque une dégradation de la résistance mécanique des mortiers ; FS pour sa part améliore moyennement la résistance mécanique du mortier; quant à l'ajout des deux additions (FS+CH), il améliore très nettement la résistance mécanique du mortier.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
<u>Chapitre I : Analyse bibliographique</u>	
I.1 INTRODUCTION	2
I.2 GENERALITE SUR LE CIMENT	2
I.2.1 Histoire du ciment	2
I.2.2 Définition du ciment	3
I.2.3 Fabrication du ciment	3
I.2.4 Hydratation du ciment	7
I.2.5 Prise et durcissement des constituants du ciment.....	8
I.2.6 Les additions minérales	9
I.2.6.1 Cendres volantes.....	9
I.2.6.2 Les pouzzolanes naturelles (Z).....	10
I.2.6.3 Les laitiers de hauts fourneaux(S)	10
I.2.6.4 La fumée de silice (D)	11
I.2.6.5 Schistes calcinés (T).....	11
I.2.6.6 Fillers calcaires (L,LL).....	11
I.2.6.7 Sulfate de calcium	11
I.2.7 Les types du ciment	12
I.2.8 L'eau de gâchage	14
I.2.9 Les granulats.....	14
I.2.10 Sable	16
I.3 FUMEE DE SILICE	16
I.3.1 Justification du choix de la fumée de silice.....	16
I.3.2 Définition et fabrication de fumée de silice	16

I.3.3	Réaction pouzzolanique de la fumée de silice	18
I.3.4	Avantages de l'ajout de la fumée de silice au béton	19
I.3.5	Désavantages de l'ajout de la fumée de silice au béton	20
I.4	CONCLUSION	20

Chapitre II : Matériaux et Procédés

II.1	INTRODUCTION	21
II.2	MATERIAUX UTILISES	21
II.2.1	Le ciment	21
II.2.2	Sable	21
II.2.3	L'eau	22
II.2.4	Fumée de silice	22
II.2.5	Chaux	22
II.2.6	Melanges des mortiers (compositions)	23
II.2.6.1	Composition I : ciment seul	23
II.2.6.2	Composition II : Ciment - CH	23
II.2.6.3	Composition III : Ciment - FS	24
II.2.6.4	Composition IV : Ciment - CH - FS	24
II.3	PROCEDE EXPERIMENTAL	25
II.3.1	Fabrication des mortiers	25
II.3.2	Essai mécanique.....	28
II.3.2.1	Essai de compression	28
II.3.2.2	Essai de traction par flexion trois points	29
II.4	CONCLUSION	31

Chapitre III : Interprétation des résultats

III.1 INTRODUCTION	32
III.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX	32
III.2.1 Composition I : Ciment seul	32
III.2.1.1 Résistance à la compression	32
III.2.1.2 Résistance à la traction	33
III.2.2 Composition II : Ciment- CH	34
III.2.2.1 Rapport E/L=0,5	34
a. Résistance à la compression	34
b. Résistance à la traction.....	35
III.2.2.2 Rapport E/L=0,6	36
a Résistance à la compression	36
b Résistance à la traction.....	37
III.2.2.3 Rapport E/L=0,7	38
a. Résistance à la compression.....	38
b. Résistance à la traction.....	39
III.2.3 Composition III: Ciment- FS	39
III.2.3.1 Rapport E/L=0,5	39
a. Résistance à la compression.....	40
b. Résistance à la traction.....	40
III.2.3.2 Rapport E/L=0,6	41
a Résistance à la compression.....	41
b Résistance à la traction.....	42
III.2.3.3 Rapport E/L=0,7	43
a Résistance à la compression	43
b Résistance à la traction	44
III.2.4 Composition III : Ciment- CH-FS	45

III.2.4.1	Taux de remplacement 5%	45
a.	Résistance à la compression	45
b.	Résistance à la traction	47
III.2.4.2	Taux de remplacement 10%	47
a.	Résistance à la compression	47
b.	Résistance à la traction	49
III.2.4.3	Taux de remplacement 15%	49
a.	Résistance à la compression	49
b.	Résistance à la traction	51
III.3	CONCLUSION	51
	CONCLUSION GENERALE	53
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55
	LISTE DES FIGURES	56
	LISTE DES TABLEAUX	58



LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1:	Vue aérienne d'une cimenterie.....	3
Figure I.2:	Schéma descriptif de la fabrication du ciment.	4
Figure I.3:	organigramme de la fabrication de ciment.	6
Figure I.4:	Schéma descriptif des réactions d'hydratation.	7
Figure I.5:	Fabrication de fumée de silice [09].	17
Figure I.6:	(a) Vue microscopique (b) Photographique de fumée de silice	17
Figure I.7:	Morphologie et influence sur les propriétés [09]	18
Figure I.8:	Schéma descriptif du principe de la réaction pouzzolanique	19
Figure I.9 :	Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [21]	19
Figure I.10:	Résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice [21] ...	20
Figure II.1:	Résumé des étapes de confection des mortiers.....	27
Figure II.2:	L'éprouvette avant l'essai de compression.....	28
Figure II.3:	La force en fonction de temps.	30
Figure II.4:	(a) : Presse hydraulique ibertest (b): Epreuve avant l'essai de traction par compression.....	30
Figure III.1:	Résistance à la compression des mortiers témoins en fonction du rapport E/C (Eau/Ciment).	32
Figure III.2:	Résistance à la traction des mortiers témoins en fonction du rapport E/C (Eau/Ciment).	33
Figure III.3:	Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,5.....	34
Figure III.4:	Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,5.....	35
Figure III.5:	Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,6.....	36

Figure III.6: Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,6.....	37
Figure III.7: Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,7.....	38
Figure III.8: Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,7.....	39
Figure III.9: Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,5	40
Figure III.10: Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,5	41
Figure III.11: Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,6	42
Figure III.12: Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,6.	43
Figure III.13: Résistance à la compression du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,7	44
Figure III.14: Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour E/L=0,7	45
Figure III.15: Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 5%	46
Figure III.16: Résistance à la traction des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 5%	47
Figure III.17: Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 10%	48
Figure III.18: la résistance a la traction de remplacement de10% du ciment par la chaux et fumée de silice.....	49
Figure III.19: Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 15%	50
Figure III.20: Résistance à la traction des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 15%	51

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Statistique de production du ciment en Algérie.	2
Tableau I.2 : Ordre de grandeur des éléments chimiques principaux du clinker.	6
Tableau I.3 : Comportement à l'hydratation des différents constituants du clinker [5].....	7
Tableau I.4 : Liste des différents types de ciment	12
Tableau I.5 : Les dimensions et les caractéristiques des granulats [6].....	14
Tableau II.1 : Composition minéralogique du ciment.....	21
Tableau II.2 : Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice.....	22
(Fiche technique granitex).....	22
Tableau II.3 : Composition des mortiers témoins avec différents rapports E/C.....	23
Tableau II.4 : Composition des mortiers avec remplacement du ciment par la CH pour différents rapports E/L.	24
Tableau II.5 : Composition des mortiers avec remplacement du ciment par le FS pour différents rapport E/L.....	24
Tableau II.6 : Composition des mortiers avec remplacement du ciment par la FS et la CH pour différents rapports E/L.	25



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des ciments et bétons à la fin du 19^{ème} siècle ont mené à une révolution fondamentale dans l'art de construire. Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. La formulation des bétons hydrauliques qui durent très longtemps a reposé sur une simple association de constituants, « ciment, eau, granulats » qui s'est progressivement complexifiée au point qu'un béton actuellement comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, adjuvant et addition minérales entre autres.

Les additions minérales sont largement utilisées en remplacement du ciment portland à travers le monde, on peut en citer pour les plus communs: le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, la fumée de silice ...Etc.

Les ajouts minéraux cités proviennent aussi bien de sources naturelles (pouzzolane, Calcaire...) que de source industrielles (laitier, Cendres volantes, fumée de silice...). Ils présentent plusieurs avantages : économique, technologique et écologique.

Dans ce travail expérimental, nous nous sommes intéressés à l'étude de la résistance de mortiers avec substitution partielle du ciment par fumée de silice et chaux, afin d'en tester l'effet améliorant ou dégradant, il se compose ainsi de :

- **Introduction générale**
- **Le chapitre 1** : analyse bibliographique : elle regroupe les généralités sur les ciments et travaux de recherche traitant de l'influence de la fumée de silice sur le ciment.
- **Le chapitre 2** : matériaux et procédés : cette partie expose les principes expérimentaux utilisés : formulation des mortiers, malaxages, conservation, essais de compressions...
- **Le chapitre 3** : résultats expérimentaux ; dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats obtenus lors des essais de compression et de traction par flexion sur nos mortiers, ainsi que leurs interprétations.
- **Conclusion générale**
- **Références bibliographiques**

Chapitre I

Analyse bibliographique

Sommaire

I.1	INTRODUCTION	2
I.2	GENERALITE SUR LE CIMENT	2
I.2.1	Histoire du ciment	2
I.2.2	Définition du ciment	3
I.2.3	Fabrication du ciment	3
I.2.4	Hydratation du ciment	7
I.2.5	Prise et durcissement des constituants du ciment	8
I.2.6	Les additions minérales	9
I.2.6.1	Cendres volantes	9
I.2.6.2	Les pouzzolanes naturelles (Z)	10
I.2.6.3	Les laitiers de hauts fourneaux(S)	10
I.2.6.4	La fumée de silice (D)	11
I.2.6.5	Schistes calcinés (T)	11
I.2.6.6	Fillers calcaires (L,LL)	11
I.2.6.7	Sulfate de calcium	11
I.2.7	Les types de ciments	12
I.2.8	L'eau de gâchage	14
I.2.9	Les granulats	14
I.2.10	Sable	16
I.3	FUMEE DE SILICE	16
I.3.1	Justification du choix de la fumée de silice	16
I.3.2	Définition et fabrication de la fumée de silice	16
I.3.3	Réaction pouzzolanique de la fumée de silice	18
I.3.4	Avantages de l'ajout de la fumée de silice au béton	19

I.3.5 Désavantages de l'ajout de la fumée de silice au béton.....	20
I.4 CONCLUSION.....	20

I.1 INTRODUCTION :

Le ciment est actuellement l'un des matériaux les plus utilisés à travers le monde, il représente le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant et lier tous les ingrédients, contient des additions minérales qui sont (fumée de silice, cendre volante, laitier) qui lui donne une bonne résistance.

On a choisie de faire des recherches sur l'influence de la fumée de silice à la pâte du ciment et aussi la comparée avec les autres ajouts et enfin conclure la bonne.

I.2 GENERALITES SUR LE CIMENT

I.2.1 Histoire du ciment

C'est le matériau du 20^e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossais Aspdin prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée. Ainsi, le XX^e siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux.

L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux.

C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants accélèrent leur mise en œuvre, tracent la voie d'une modernité que chaque maçon devra inévitablement emprunter. Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. Les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner.

Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait en 1870 : 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes.

La production en Algérie s'accroît comme le montre les statistiques suivantes [01].

Tableau I.1 : Statistique de production du ciment en Algérie.

Année	quantité
1977	2,2 millions de tonnes
1982	8,0 millions de tonnes
1979	4,5 millions de tonnes
1985	10,5 millions de tonnes



Figure I.1 : Vue aérienne d'une cimenterie.

I.2.2 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il est capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissement progressivement dans le temps. [2]

Ces derniers et dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

I.2.3 Fabrication du ciment

Le clinker composant de base du ciment portland est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange de 80% de calcaire ($CaCO_3$) et près de 20% d'Argile ($SiO_2-Al_2O_3$). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par de la bauxite (source de silice et d'aluminates), l'oxyde de fer ou autre matériaux fournissant les compléments nécessaires [3].

Il existe 04 méthodes de fabrication de ciment:

- a. Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- b. Fabrication du ciment par voie semi-humide.
- c. Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- d. Fabrication du ciment par voie semi-sèche.

La fabrication par voie sèche est la plus utilisée car elle est la plus économique en énergie. Le processus de fabrication du ciment peut se décrire par la figure I.2 suivante:

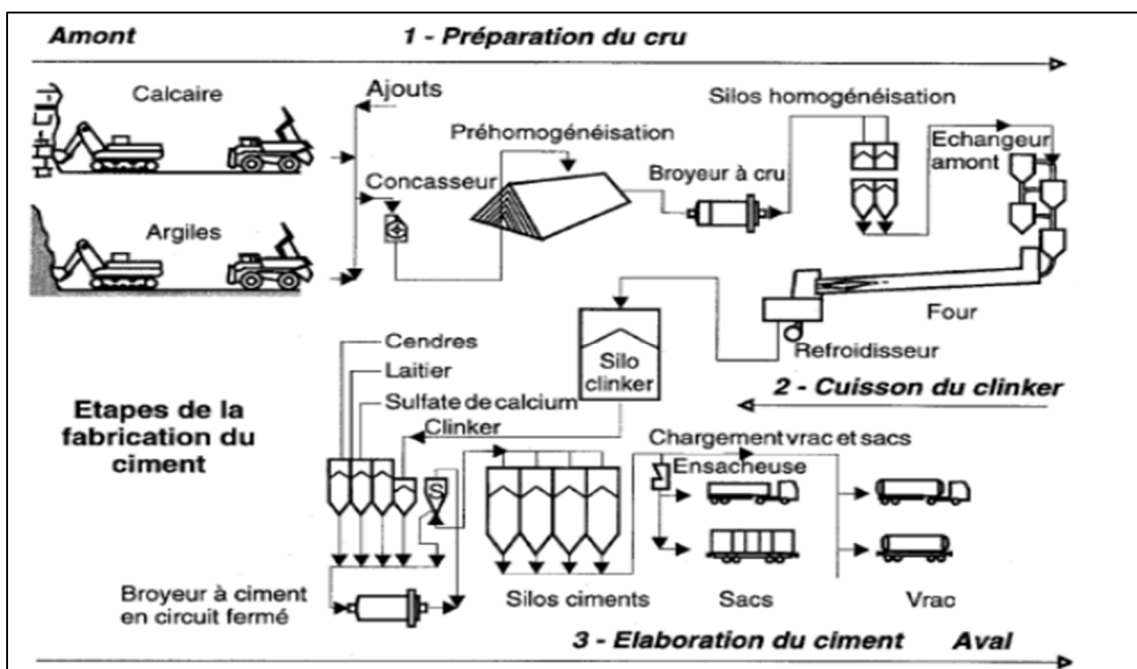


Figure I.2 : Schéma descriptif de la fabrication du ciment.

Ainsi les différentes étapes de fabrication du ciment sont :

Etape 1: Extraction et préparation des matières premières.

- Extraction : les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans les concasseurs situés généralement sur le lieu même de l'extraction en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

- Préparation de la matière première : les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin « le cru ». A cette étape, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant de faibles proportions de bauxite (source de silice et d'aluminates), d'oxyde de fer...

Le cru se trouvera en fonction de la technique de fabrication utilisée, sous forme soit de granules (voie sèche ou semi-sèche) ou bien de pâte (voie humide ou semi-humide).

Etape 2 : cuisson « cru » : matière première pour l'obtention du clinker.

Un échangeur de chaleur comportant une série de 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre est déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée de four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds en sortant de ce four, et se décarbonate en partie, la poudre est portée à une température de 1000°C. Les différentes transformations se produisant pendant cette étape sont :

- 1- Zone de séchage (0 à 100°C) —————> Elimination de l'eau libre.
- 2- Zone de préchauffage (100 à 200°C) —————> Elimination de l'eau liée chimiquement.
- 3- Zone de lancements : décomposition de l'argile, de l'alumine et du calcaire... (en MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO...).
- 4- Zone de formation des minéraux et de clinkerisation.
- 5- Zone de refroidissement dans le four.

Le four rotatif à la sortie duquel sort le ciment présente certaines caractéristiques :

- Une vitesse de rotation de 1 à 3 tours par minutes.
- Il est horizontal présentant une légère inclinaison.
- Il est en tôle d'acier avec un revêtement réfractaire intérieur.
- Il a 60 à 90 m de long et 4 à 5 m de diamètre.

Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la calcination et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1450°C). Au final on obtient les produits suivants :

- a. Les silicates tricalciques : **3CaO, SiO₂ (C3S)**
- b. Les silicates bicalciques : **2CaO, SiO₂ (C2S)**
- c. Les aluminates tricalciques : **3CaO, Al₂O₃ (C3A)**
- d. Les alumino-ferrites tetracalcique : **4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ (C4AF)**

Étape 3 : Broyage de clinker avec ajout du gypse pour l'obtention du ciment.

A la fin de la cuisson, la matière refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le **clinker**. Le clinker, finement Broyé, on lui associe alors près de 5% de Gypse pour régulariser la prise, car le clinker est d'une prise rapide, et le rôle du gypse est de retarder le début de prise du clinker. Le produit ainsi obtenu est le ciment portland. Une fois prêt, le ciment est stocké dans des silos, et est par la suite conditionné soit dans des sacs ou des conteneurs fermés en fonction des commandes [4].

Pour résumer le ciment se fabrique selon ses grandes étapes :

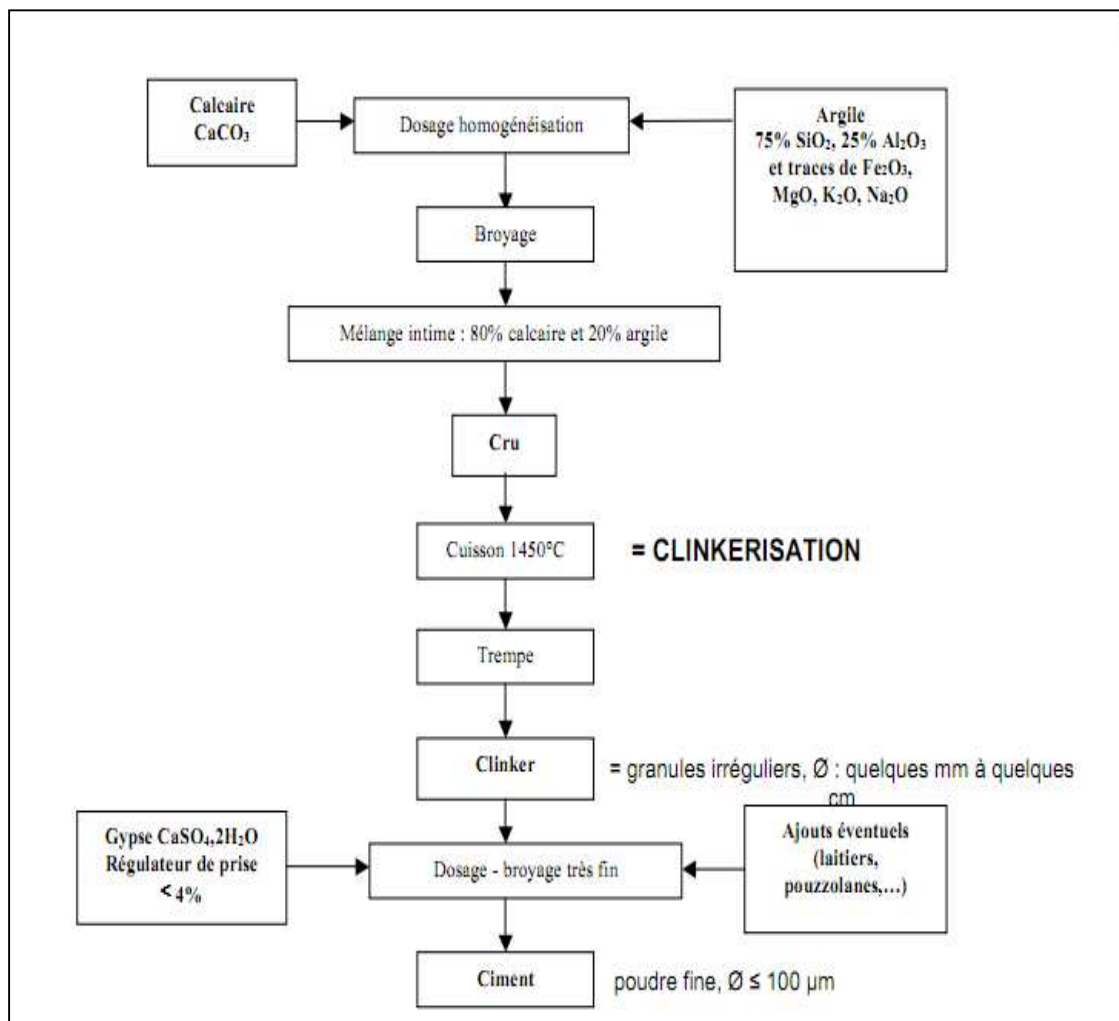


Figure I.3 : Organigramme de la fabrication du ciment.

Le clinker (composition)[5]

En s'intéressant à la composition chimique du clinker, il est noté que celle-ci est :

Tableau I.2 : Ordre de grandeur des éléments chimiques principaux du clinker.

Oxyde (élément chimique)	Pourcentage
Oxyde de calcium [CaO]	62 à 68 %
Dioxyde de silicium [SiO ₂]	21 à 24 %
Aluminates [Al ₂ O ₃]	4 à 8 %
Oxyde de fer [FeO ₃]	2 à 5 %

D'autres types de ciments sont obtenus en y ajoutant d'autres constituants généralement des sous-produits industriels, tels que le laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire, fumées de silice, fillers...etc. Ces proportions se retrouvent donc souvent modifiées et les propriétés générales altérées.

I.2.4 Hydratation du ciment

« Hydratation » est le terme utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions chimiques qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau, et qui permettent de transformer les anhydres en hydrates :

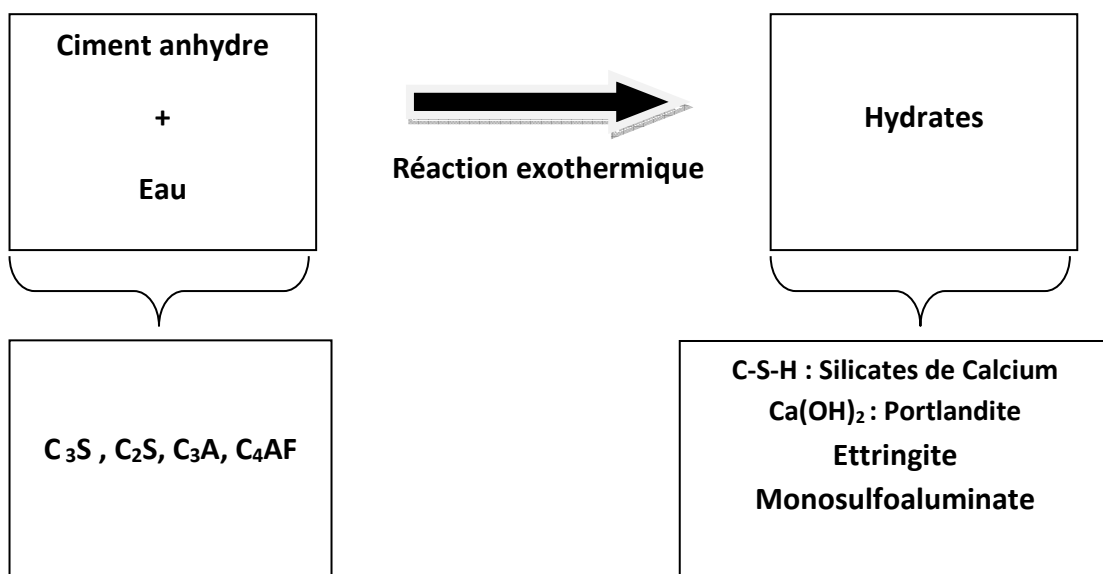


Figure I.4 : Schéma descriptif des réactions d'hydratation.

Les réactions d'hydratation sont « exothermique », elles s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et leur finesse [06, 07].

Les hydrates formés sont composées de silicates de calcium hydratés (C-S-H) à 70%, de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à 20% et d'ettringite à 10% [7].

Le processus des réactions chimiques des constituants du ciment peuvent être décrit comme suit :

- a. Dissolution des constituants du ciment (clinker) dans l'eau
- b. Solution interstitielle sursaturée en différents hydrates
- c. Précipitation et cristallisation de ces hydrates dans les vides inter-granulaires.

I.2.5 Prise et durcissement des constituants du ciment

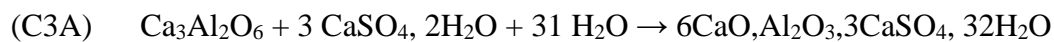
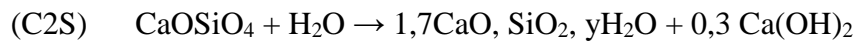
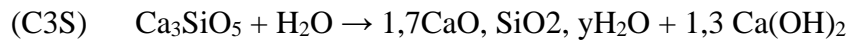
Pour mieux comprendre les propriétés des ciments, il est intéressant de comprendre comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du clinker pris individuellement (tableau 1.3).

Tableau I.3 : Comportement à l'hydratation des différents constituants du clinker

[8]

N°	Constituants	Comportement du constituant pur	Chaleur dégagée
01	C_3S	Fait prise et durcit rapidement, haute résistance atteinte à court terme.	120 Cal/gr
02	C_2S	Réagit lentement, haut résistance atteinte à long terme.	62 Cal/gr
03	C_3A	Prise de façon très désordonnée et rapide, faible résistance.	207 Cal/gr
04	C_4AF	Faible résistance, responsable de la couleur grise du ciment.	100 Cal/gr

Les phases montrées dans le tableau (I.3) précédent, réagissent selon les réactions chimiques suivantes :



En ce qui concerne la cinétique des réactions d'hydratation, il est à savoir que les réactions d'hydratation se font en quatre phases :

- a. Phase initiale : au cours de laquelle le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un mono silicate de calcium hydraté.
- b. Phase dormante : au cours de laquelle la pâte reste fluide, la réaction précédente se poursuivant moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures.
- c. Phase de prise : au cours de laquelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.
- d. Phase de durcissement : qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des années à une vitesse de plus en plus lente et dont le résultat est l'augmentation de la résistance mécanique et de la compacité.

I.2.6 Les additions minérales

Plusieurs additions minérales existent, et qui, ajoutées au ciment, permettent d'en améliorer les caractéristiques mécaniques [9].

I.2.6.1 Cendres volantes

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé et peuvent être de nature siliceuse ou calcique.

a. Cendre volante calcaire(w)

La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolanique, elle est constituée essentiellement d'oxyde de calcium (CaO) réactif, de silice (SiO₂) réactive et d'alumine (Al₂O₃), le reste contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres composants.

b. Cendre volante siliceuse(v)

La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée de particules principalement sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques.

c. Effet de cendres volantes

Les cendres volantes contribuent à la

1. Réduction de la chaleur d'hydratation.
2. Diminution du ressuage.
3. Réduction des risques de ségrégation.
4. Diminution de la perméabilité au gaz et liquide.
5. Amélioration de la durabilité aux milieux agressifs

I.2.6.2 Les pouzzolanes naturelles (Z)

Ce sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer présents, soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique), soit après activation thermique de leurs propriétés pouzzolaniques.

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les Romains pour la confection de leur liant hydraulique. Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker.

I.2.6.3 Les laitiers de hauts fourneaux(S)

Le laitier de hauts fourneaux est un sous produit de fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau. Cette opération provoque la vitrification du matériau.

C'est un matériau à caractère hydraulique latent (constitué majoritairement de 4 oxydes : CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO), c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable.

Il est le plus souvent utilisé en mélange avec du ciment Portland et c'est la Portlandite formée par hydratation du clinker qui active l'hydratation du laitier. Ces types d'additions

sont ajoutés dans les bétons, afin de réduire l'effet du dégagement de chaleur qui a pour conséquence l'apparition de fissures dommageables au jeune âge.

I.2.6.4 La fumée de silice (D)

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication de silicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon.

La fumée de silice se présente sous forme de particules sphériques de diamètre variant de 0,03 à 0,3 μm . Les particules de silice sont sous forme amorphe. Etant très fine et de très faible masse volumique en vrac (de 200 à 300 kg/m^3), la fumée de silice est aussi disponible sous forme densifiée ou sous forme de suspension.

Ces fumées sont communément ajoutées au béton, afin d'améliorer la résistance mécanique de celui-ci ainsi qu'à des fins d'amélioration de sa résistance à la corrosion en environnement agressif (durabilité).

Ces fumées de silice jouent ainsi le rôle de « filler » grâce à leur grande finesse (remplissage de la porosité), et aussi de matériau pouzzolanique grâce à son aptitude à réagir avec le calcium libre du ciment pour former des silicates hydratés C-S-H.

I.2.6.5 Schistes calcinés (T)

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

I.2.6.6 Fillers calcaires (L,LL)

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%.

I.2.6.7 Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium, généralement du gypse ($\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$), mais peut aussi être de l'anhydrite (CaSO_4), ou de l'hémi-hydrate ($\text{CaSO}_4,0,5\text{H}_2\text{O}$), est ajoutée en faible quantité aux autres constituants de ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise .

➤ *Remarque*

Le ciment est essentiellement utilisé sous forme de béton: mélange de ciment, granulats et eau. Il forme ainsi une véritable roche artificielle qui présente l'avantage de pouvoir être mis en œuvre sous forme de pâte. La libération, lors de la prise, d'hydroxyde de calcium, dénommé portlandite par l'industrie cimentière donne au ciment un PH fortement basique qui passive l'acier dans le béton armé et donc le protège de la corrosion.

I.2.7 Les types de ciments

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme NF EN 197-1, article 6). Au clinker sont ajoutées, suivant la nature de ciment voulu, les additions minérales de différentes natures [10].

Le tableau (I.4) suivant donne la liste des différents types de ciments existant dans l'industrie cimentière

Tableau I.4 : liste des différents types de ciments

Main kinds	Cement name	Main components, % mas					Secondary components			
		Clinker K	Blast furnace slag S	Silica fume D ^a	Pozzolana natural P	Industrial Q	Fly ash Siliceous V	calcareous W	shale T	Lime LL
CEM I	Portland cement	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland cement	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland silica fume cement	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	0-5
CEM III	Portland pozzolana cement	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
CEM IV	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
CEM V	Portland fly ash cement	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
CEM VI	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
CEM VII	Portland burnt shale cement	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
CEM VIII	Portland limestone cement	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
CEM IX	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
CEM X	Portland composite cement	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-M	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM XI	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM XII	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM IV/A	65-89	-	11-35	-	-	-	-	-	0-5
CEM XIII	CEM IV/B	45-64	-	36-55	-	-	-	-	-	0-5
	Composite cement ^b	40-64	18-30	-	18-30	-	-	-	-	0-5
CEM XIV	CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	-	-	-	-	0-5

^a The share of microsilica is limited to 10%

^b In Portland composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in Pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in Composite cements CEM V/A and CEM V/B others components than clinker should be mentioned, for example CEM II/A-M(S-V-L).

I.2.8 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau que l'on utilise pour faire un béton, c'est un constituant indispensable pour la fabrication de ce dernier. Sa qualité influe sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci.

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium (NaCl), pour la fabrication de béton armé ou précontraint.

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton. Sa quantité varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³.

Le rapport E/C est un critère important des études sur béton, c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton, de ses performances, de sa résistance mécanique à la compression ainsi que de sa durabilité.

I.2.9 Les granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension maximale (comprise entre 0 et 125mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

- a. Fillers.
- b. Sables.
- c. Graves.
- d. Gravillons.
- e. Ballast.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et de propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés) .

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis Tableau 1.5 [2]

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau I.5 : Les dimensions et les caractéristiques des granulats [2]

<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1,25mm et 70% de passant à 0,063mm
Sables	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballaste	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

➤ **Différents types de granulats** [10]

- a. Les granulats naturels.
 - Les granulats de roche meuble.
 - Les granulats de roche massive.
- b. Les granulats artificiels.
- c. Les granulats recyclés.

I.2.10 Sable

Les grains de sable sont composés de fragments de roche, de minéraux et peuvent également contenir des débris d'origine organique ou synthétique. En plus des fragments de coquillages, on trouve maintenant sur les plages marines actuellement en formation une certaine proportion de débris d'origine synthétique comme le verre, la terre cuite et la porcelaine. Cependant, les débris d'origine organique et synthétique ne sont une composante importante uniquement dans les sables de plages et de deltas marins actuels, les sables d'origine glaciaire ou fluvioglaciaire ne contiennent pratiquement jamais de débris organiques et jamais de débris synthétiques [11].

I.3 Fumée de silice

I.3.1 Justification du choix de la fumé de silice

Les critères de notre choix :

- a. La non disponibilité dans notre pays.
- b. La moins utilisée
- c. Moins chère par rapport aux autres additions minérales.

I.3.2 Définition et fabrication de fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit des usines de fabrication d'alliages de silicium (Si) et de ferrosilicium, obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grande pureté et de charbon. Le SiO entraîné par le gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous forme de particules de silice amorphe (SiO_2) sphériques extrêmement fines voir figure I.5, cette finesse importante accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors d'hydratation du ciment portland. Lorsque le four comprend un système de récupération de chaleur, la majeure partie du carbone est brûlé et on obtient une fumée de silice sans carbone et de couleur claire [12].

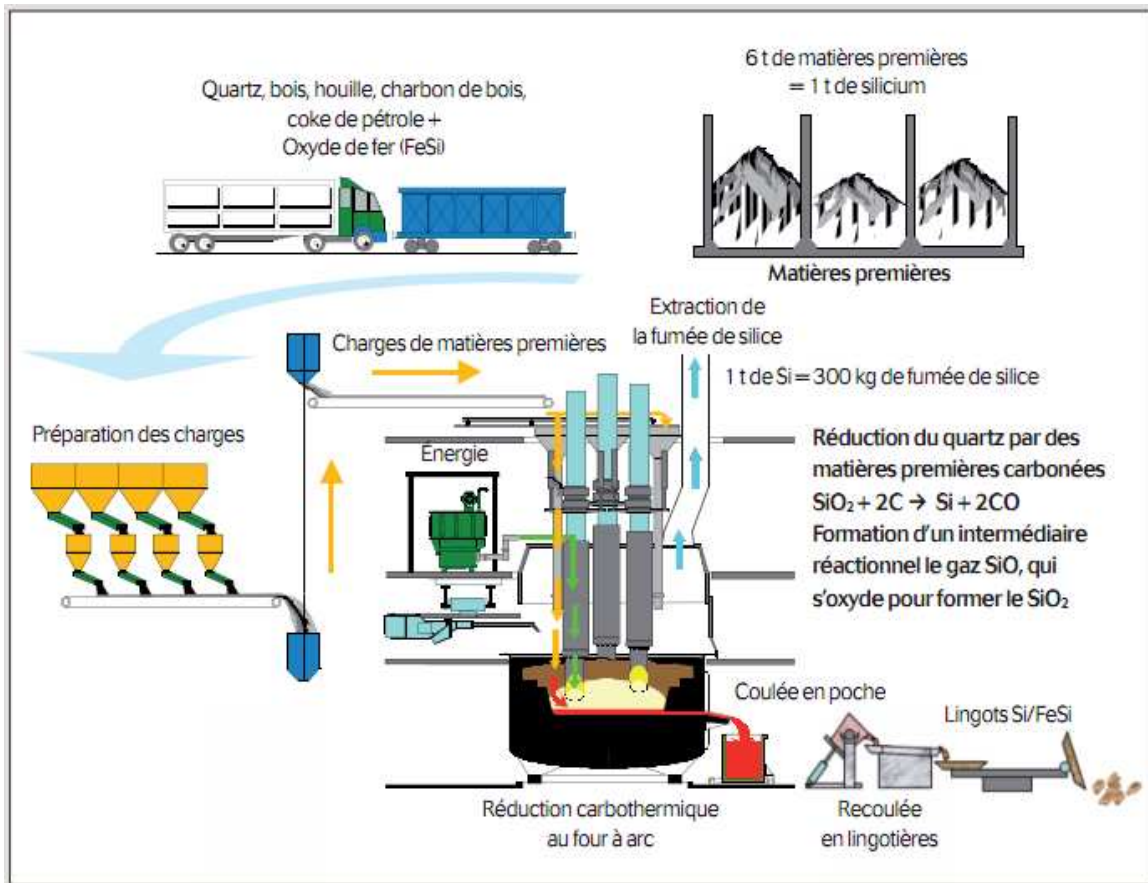


Figure I.5 : Fabrication de fumée de silice [13].

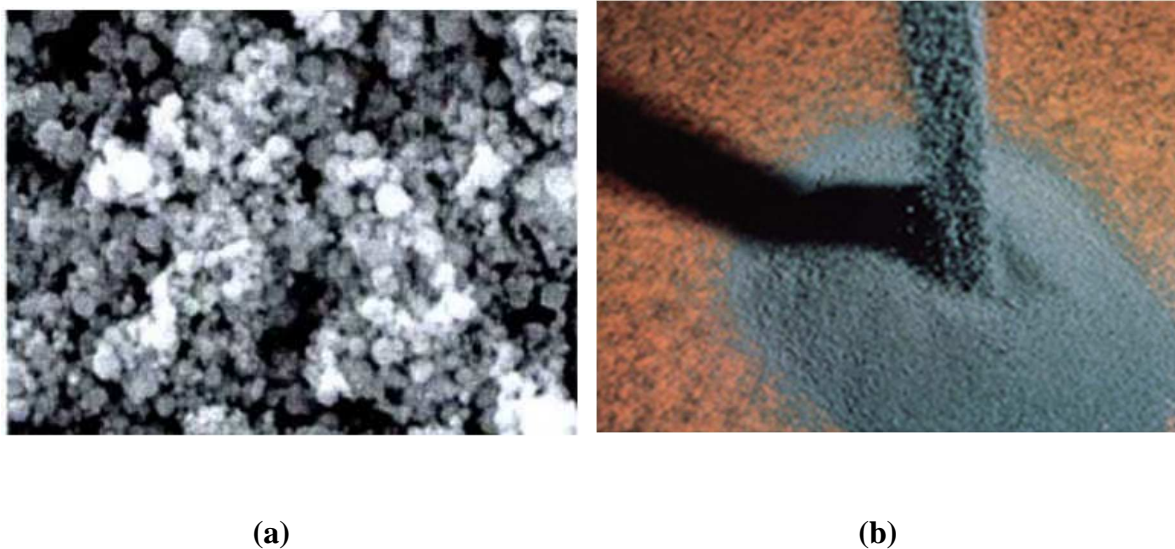


Figure I.6 : Vue microscopique (a) et macroscopique (b) de la fumée de silice.

La densité de fumée de silice peut varier de 0,1 à 0,7, le diamètre de ses particules est compris entre 0.03 et 0.3 nm, sa surface spécifique est d'environ 20000 m²/kg donnée par la méthode d'adsorption d'azote [12].

Selon la densité de la fumée de silice, on distingue trois types, non densifiée, densifiée mécanique, densifiée pneumatique, et chacune a son propre caractère, voir figure (I, 7).

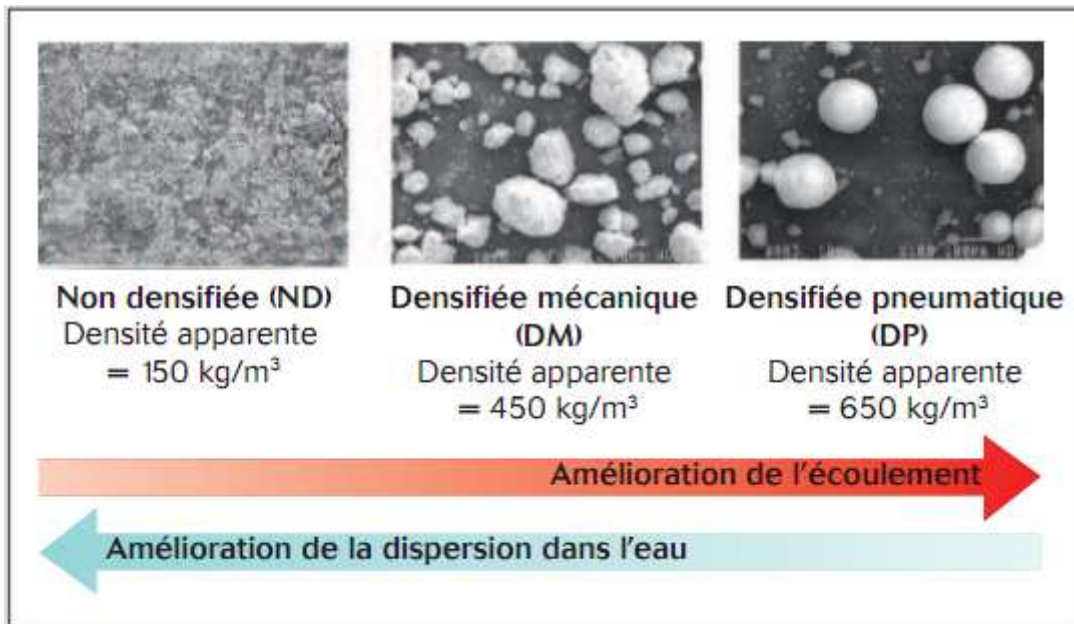
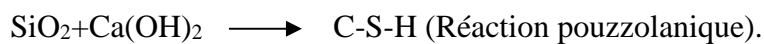
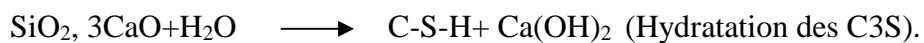


Figure I.7 : Morphologie et influence sur les propriétés [13]

I.3.3 Réaction pouzzolanique de la fumée de silice :

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel de C-S-H). Cette phase de C-S-H lie les différents composants (hydrates et anhydres non réagis) entre eux pour créer une matrice dense, rigide et compacte.

La réaction chimique pouzzolanique qui se produit est :



Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton (effet filler).

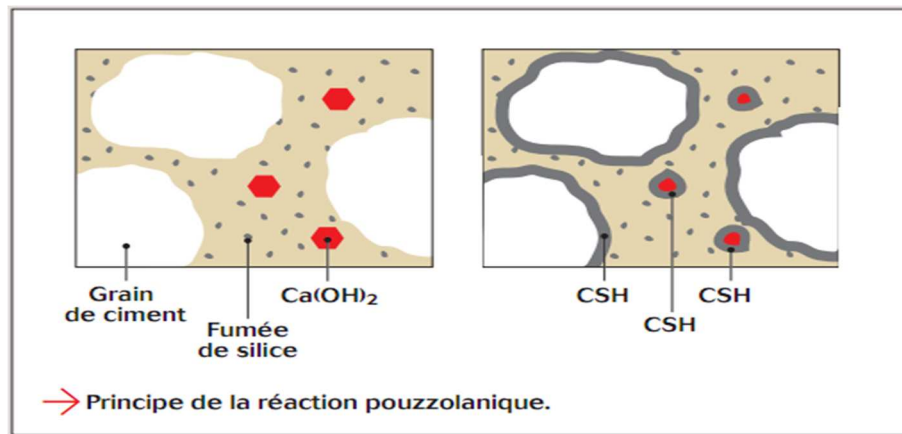


Figure I.8 : Schéma descriptif du principe de la réaction pouzzolanique [15]

I.3.4 Avantages de l'ajout de la fumée de silice au béton

Les fumées de silice sont généralement ajoutées en quantités variant entre 5 et 15 % de la masse du ciment. Cet ajout a plusieurs effets :

- Forte réduction de la porosité :

Comme la fumée de silice est très fine, elle permet, par l'effet filler (remplissant) d'augmenter la compacité du mélange par comblement de la porosité inter-granulaire et donc d'améliorer sa résistance. La porosité réduite a aussi pour avantage, de réduire la pénétration des agents extérieurs à l'intérieur du matériau, altérant sa structure et l'endommageant.

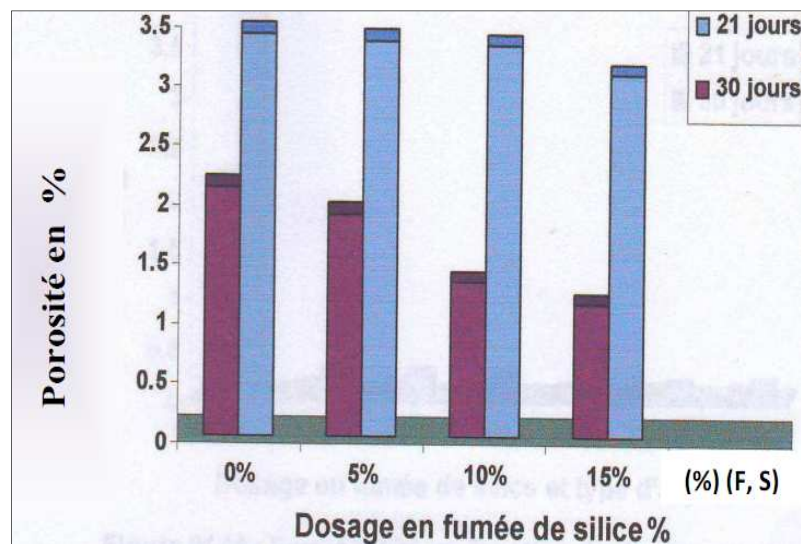


Figure I.9 : Porosité en fonction du dosage en fumée de silice [14]

- Augmentation de la résistance :

L'ajout de fumée de silice améliore la résistance mécanique du mortier ou béton, comme montré dans la figure I.10 , en effet cela est dû à la concomitance de deux phénomènes, d'une part l'effet filler du fait de sa finesse, qui permet de remplir les vides inter-granulaires, mais aussi ont par sa propriété hydraulique (pouzzolanique), i.e. la possibilité de réagir avec la chaux produite par l'hydratation du ciment, formant des C-S-H supplémentaires (transformation de la chaux et silice inerte en C-S-H rigidifiant). Finalement, les résistances mécaniques en sont améliorées parfois de manière très significative.

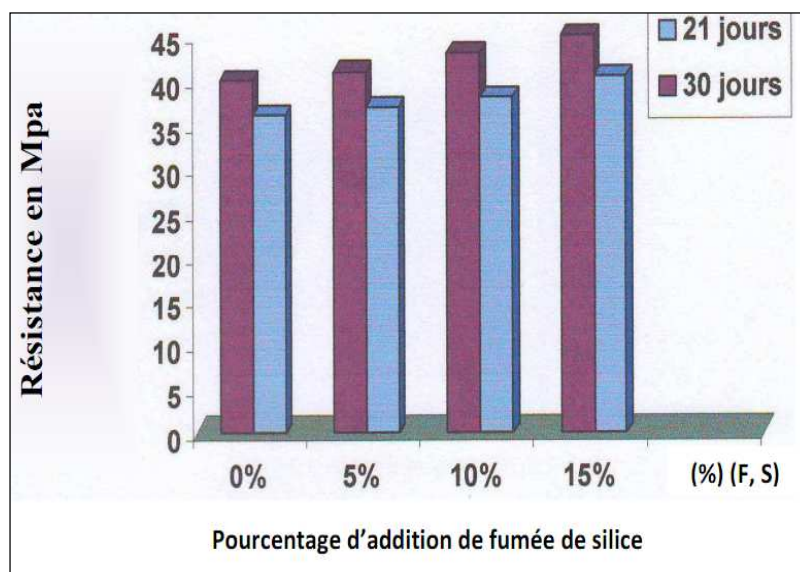


Figure I.10 : Résistance à la compression en fonction du dosage en fumée de silice

[14]

I.3.5 Désavantages de l'ajout de la fumée de silice au béton

- Diminution de l'ouvrabilité d'où l'utilisation nécessaire des super plastifiants.
- Malaxage long pour casser les agglomérats de fumée de silice.
- Prix élevé vis-à-vis du ciment.

I.4 CONCLUSION

Dans cette partie nous sommes revenus sur les généralités des ciments et ses constituants, nous avons aussi discuté sur les différentes additions minérales ainsi que l'influence de leurs ajout sur la résistance mécanique du mortier, nous avons aussi expliqué la procédure de fabrication du ciment.

Chapitre II

Matériaux et procédés

Sommaire

II.1	INTRODUCTION	21
II.2	MATERIAUX UTILISES	21
II.2.1	Le ciment	21
II.2.2	Sable.....	21
II.2.3	L'eau	22
II.2.4	Fumée de silice	22
II.2.5	Chaux	22
II.2.6	Mélanges des mortiers (compositions)	23
II.2.6.1	Composition I : ciment seul	23
II.2.6.2	Composition II : Ciment - CH.....	23
II.2.6.3	Composition III : Ciment - FS.....	24
II.2.6.4	Composition IV : Ciment - CH - FS	25
II.3	PROCEDE EXPERIMENTAL	25
II.3.1	Fabrication des mortiers.....	25
II.3.2	Essai mécanique.....	28
II.3.2.1	Essai de compression	28
II.3.2.2	Essai de traction par flexion trois points	29
II.4	CONCLUSION	31

II.1 INTRODUCTION

Ce second chapitre du rapport de fin d'étude a pour objectif d'exposer l'ensemble des matériaux et les procédures utilisées durant notre travail de recherche. Comme nous l'avons montré dans le chapitre de revue bibliographique, l'ensemble des choix effectués en termes de matériaux ou de paramètres se justifient par rapport à la littérature.

Ce chapitre comporte aussi bien les compositions et quantités des matériaux utilisés, que les modes opératoires de confection et de casses sous presse des nos éprouvettes.

II.2 MATERIAUX UTILISEE

Dans notre étude on a confectionnée un mortier qui se compose de ciment, sable et de l'eau, puis on lui ajoute la FS et le CH pour les étudier

II.2.1 *Le ciment*

Le ciment utilisé pour la confection de nos éprouvettes est de type CPJ-CEMII/B de classe 42,5 N provenant de la cimenterie **LAFARGE** d'Alger. Celui-ci a été conservé au laboratoire à température ambiante et recouvert d'un sac plastique pour éviter toute pré-hydratation éventuelle. Ce ciment présente les caractéristiques minéralogiques montrées dans les tableau (II.1).

Tableau II.1 : Composition minéralogique du ciment.

Composition minéralogique (%)			
C3S	C2S	C3A	C4AF
58-64	12-18	6-8	10-12

II.2.2 *Sable*

Le sable utilisé pour la confection du mortier étudié est de nature siliceuse et provenant de l'oued, dont le diamètre maximum a été limité à 2 mm maximum (passage sur tamis). Il a été lavé pour réduire les impuretés (matières organiques) puis séché à l'étuve à température de 105°C pendant 24 heures.

II.2.3 L'eau

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau potable, et donc supposée propre.

II.2.4 Fumée de silice

La fumée de silice utilisée dans ce travail est de la silice grise commercialisée sous le nom MEDAPLAST HP (Société GRANITEX Oued Smar Alger), ses caractéristiques chimiques et physiques sont regroupées dans le tableau (II.2) :

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques et chimiques de la fumée de silice

(Fiche technique Granitex).

Aspect	Poudre
Densité	0,5
Surface spécifique	> 15(m ² /gr)
humidité par étuve à 105°C	< 1%
Taille des particules	< 0,1(microns)
Composants	
SiO ₂	> 85%
SO ₃	< 2,5%
Cl ⁻	< 0,2%

II.2.5 Chaux

En plus de la fumée de silice, présentée plus tôt, nous avons utilisé dans ce travail de la chaux hydraulique naturelle Ca(OH)₂ de couleur blanche inerte (non réactive), obtenue par calcination d'un calcaire plus ou moins argileux ou siliceux, avec réduction en poudre par extinction.

II.2.6 Melanges des mortiers (compositions)

II.2.6.1 Composition I : ciment seul

Une première formulation de mortier a été confectionnée, constituée uniquement de sable, ciment et eau. La quantité de sable et de ciment demeure constante quelque soit la variante, ne change que la quantité d'eau caractérisée par le rapport E/C, Cette quantité fut variée de 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; afin de voir son effet sur les résistances mécaniques de compression ainsi que traction.

Tableau II.3 : Composition des mortiers témoins avec différents rapports E/C.

Ciment (gr)	Sable (gr)	Eau (gr)	E/C
450	1350	180	0,4
450	1350	225	0,5
450	1350	270	0,6
450	1350	315	0,7

II.2.6.2 Composition II : Ciment - CH

Une deuxième formulation de mortier a été confectionnée, cette fois-ci en y apportant un élément nouveau qui est la chaux hydraulique.

Lors de la préparation du mortier nous avons procédé aux changements suivants (par rapport à la composition de base) :

- Remplacement du ciment à différents taux (5% 10% 15%) par de la chaux (CH ou Ca(OH)_2).
- La quantité d'eau et de sable ont été maintenus inchangés comme pour la 1^{ère} composition

Ainsi, pour chaque taux de remplacement, 3 mortiers différents ont été obtenus (3 E/L différents).

Tableau II.4 : Composition des mortiers avec remplacement de ciment par la CH pour différents rapports E/L.

		Chaux %		
E/L	0,4	5%	10%	15%
	0,5			
	0,6			
	0,7			

II.2.6.3 Composition III : Ciment - FS

Pour cette troisième composition, une seule addition aussi a été adoptée, il s'agit dans ce cas de la fumée de silice SiO₂, sa préparation se fait comme suit:

- Remplacement du ciment à différents taux (5% 10% 15%) par la fumée de silice .
- La quantité d'eau et de sable ont été maintenus inchangés comme pour la 1^{ère} et 2^{ème} composition.

De la même manière que le mortier de chaux, chaque taux de remplacement a donné lieu à 4 mortiers différents:

Tableau II.5 : Composition des mortiers avec remplacement de ciment par la FS pour différents rapports E/L.

		Fumée de Silice %		
E/L	0,4	5%	10%	15%
	0,5			
	0,6			
	0,7			

II.2.6.4 Composition IV : Ciment - CH - FS

Enfin une quatrième composition a été fabriquée, celle-ci présente la particularité de contenir la combinaison deux additions étudiées c'est-à-dire la fumée de silice et la chaux hydraulique, pour ces mélanges, le procédé expérimental fut comme suit :

- Remplacement d'une quantité de ciment (5% 10% 15%) par le mélange de chaux et de fumée de silice.
- Ces taux représentent 100% du mélange (la chaux + fumée de silice), à l'intérieur duquel nous avons fait varier les proportions de chaque constituant (3 variations), voir tableau (II.6)
- Etude effectuée uniquement pour le rapport E/L=0.5 car c'est de loin le plus utilisé dans la confection des béton/mortiers.
- La quantité de sable reste la même que la 1^{ère} composition

Donc pour chaque pourcentage on obtient 3 mortier différent

Tableau II.6 : Composition des mortiers avec remplacement du ciment par le FS et le CH pour différents rapports E/L.

	Taux de remplacement du ciment	Type d'addition minérale	Composition (pourcentage du mélange FS-CH)		
Rapport E/l=0,5	5%	Chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	25%	50%	75%
		FS	75%	50%	25%
	10%	Chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	25%	50%	75%
		FS	75%	50%	25%
	15%	Chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	25%	50%	75%
		FS	75%	50%	25%

II.3 PROCÉDE EXPERIMENTAL

II.3.1 Fabrication des mortiers

La confection du mortier destiné à être étudié durant ce travail de master a nécessité plusieurs étapes, comme suit :

- Calcul des quantités nécessaires des matériaux en fonction des différentes formulations (dosages).
- Pesée de la quantité de (ciment, sable, eau) selon le calcul précédent.
- Mise en marche de malaxeur à mortier.
- Versement du ciment dans le bol du malaxeur en lui ajoutant de l'eau.
- Mise en marche le malaxeur à la 1^{ère} vitesse pendant 30 secondes.
- En laissant le malaxeur tourner, ajout du sable peu à peu pendant une durée de 30 secondes.
- Passage à la 2^{ème} vitesse pour 30 secondes, à ce moment là, le mélange commence à être homogène.
- Mise en stand by du malaxeur pour une durée de 30 secondes et rabattement du mortier collé sur les parois du bol vers le centre du bol.
- Réenclenchement du malaxeur en 2^{ème} vitesse pendant 1 minute.
- versement du mélange dans des éprouvettes pré-huilées.
- Placement des éprouvettes sur une table vibrante pour une durée de 10 secondes au total (2 cycles de vibrations de 5s chacun).

➤ **Remarque**

Le choix du procédé de malaxage a été effectué en concordance avec la norme (NF P 15-411) qui conditionne le mode opératoire de malaxage de mortiers normalisés.

Couverture des éprouvettes avec un film plastique humide pour minimiser les échanges hydriques avec l'environnement extérieur.

Le démoulage se fait après 24 heures à l'aide des outils de démoulage (clés, marteaux ...) une fois démoulés.

Notation du nom et la date de confection des formulations de mortier sur la surface supérieure des éprouvettes.

Immersion des éprouvettes dans un bac à eau pendant 28 jours.

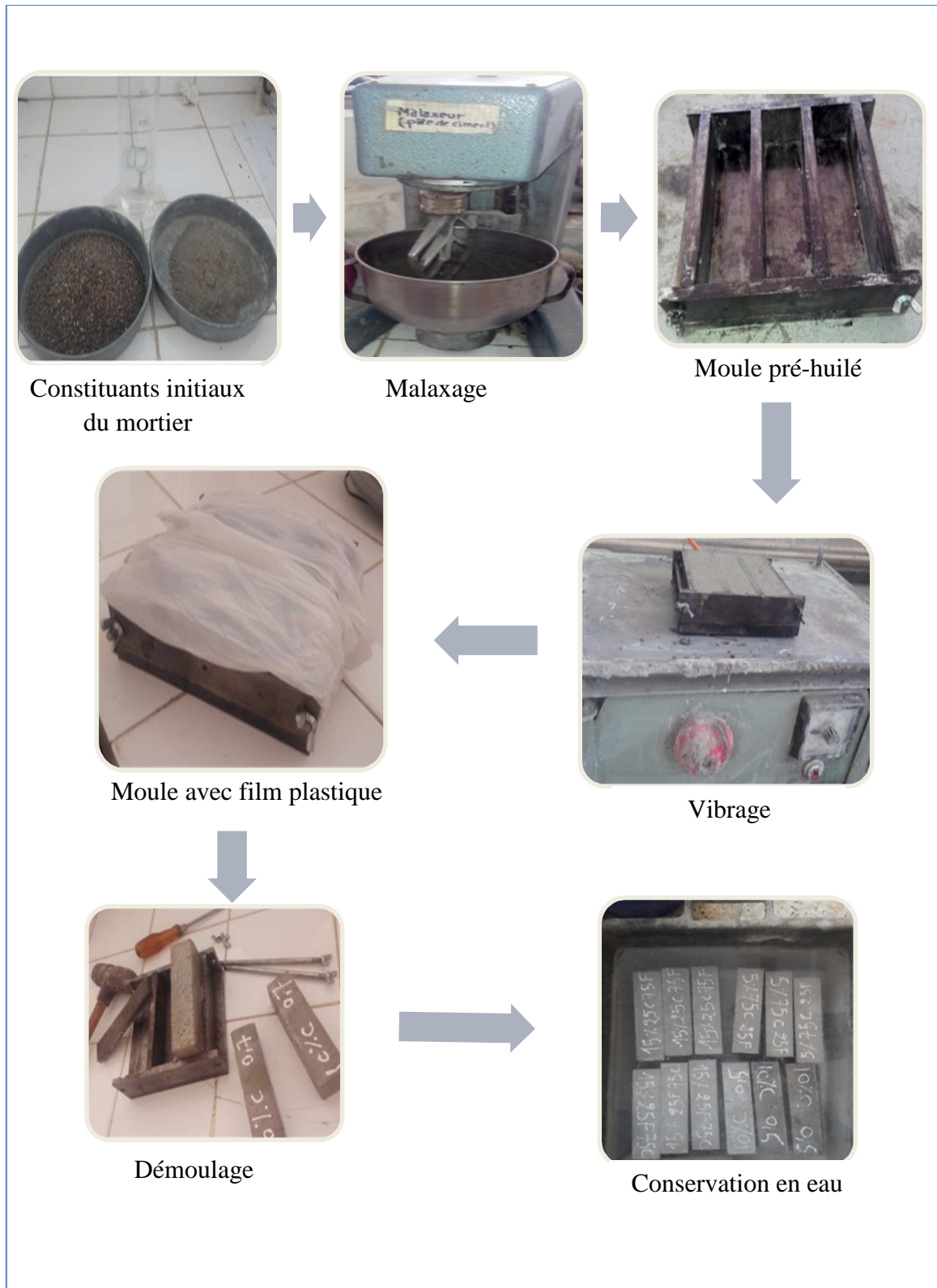


Figure II.1 : Résumé des étapes de confection des mortiers.

II.3.2 Essai mécanique

II.3.2.1 Essai de compression :

La résistance mécanique en compression d'un béton ou d'un mortier correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle des matériaux béton ou mortier, c'est le paramètre fondamental de notre étude. Au cours de notre étude, la résistance à la compression des différents mortiers a été déterminée à 28 jours.



Figure II.2 : Eprouvette avant l'essai de compression.

La presse utilisée est une presse hydraulique de marque IBERTEST reliée à un ordinateur, d'une capacité maximale 200kN, elle permet d'évaluer la résistance en compression des mortiers selon la norme NF P 18-406, sous vitesse de chargement de 2,4KN/s.

A l'issue de l'essai de flexion on obtient pour chaque éprouvette deux parties (éprouvette scindée en 2), dans la presse (lors de l'essai de compression), deux plaques métalliques de largeur 40mm viennent se placer à la surface supérieure et inférieure des demi-éprouvettes sur une surface de contact de 40x40 mm (figure II.2).

La résistance en compression est obtenue par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{p}{S} \quad (\text{Eq II.1})$$

Où :

p : la charge maximale en (KN).

S : la surface de chargement (m²).

σ : Contrainte maximale. (Résistance à la compression MPa).

Pour ce qui est de la déformation, elle est obtenue par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Eq II.2})$$

Où :

ΔL : la course (mm).

L : Largeur de l'éprouvette (40 mm).

II.3.2.2 Essai de traction par flexion trois points

Les essais mécaniques qui ont été menés sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm) selon les normes NFP18- 407 (NA428). Ils ont consisté en des essais de traction par flexion 3 points, sous la presse hydraulique décrite précédemment. Au lancement de l'essai, l'application des contraintes se fait conformément à la norme NF P 18-407 [AFNOR, 2001], à une vitesse de chargement de 0,5 KN/s jusqu'à la rupture. Les résultats obtenus nous permettent d'obtenir des graphes de type force en fonction du temps (figure II.3).

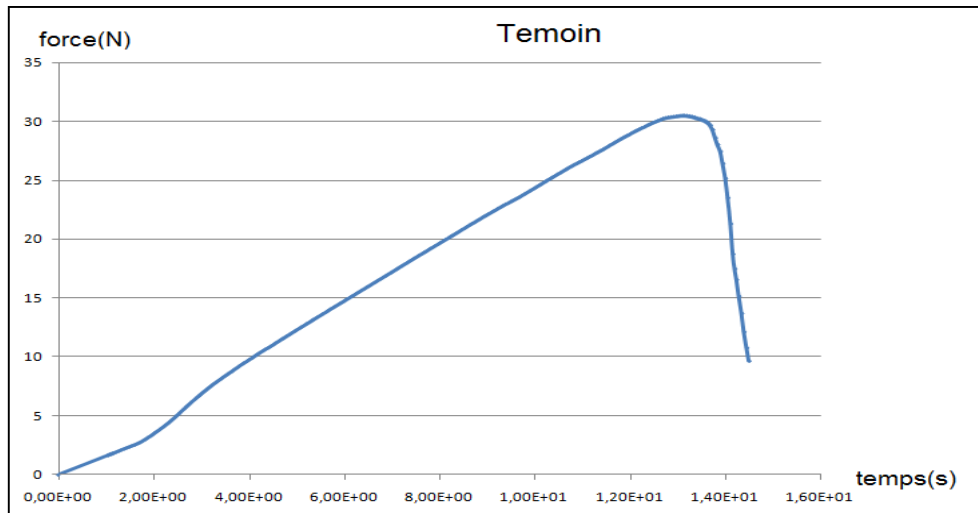


Figure II.3 : La force en fonction de temps.

Le chargement en deux points est effectué à une vitesse de 0,5KN/s jusqu'à la rupture. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au milieu de rouleau supérieur et de deux roulette inférieure sachant que la distance entre les deux est égale à 10cm (figure II.4).

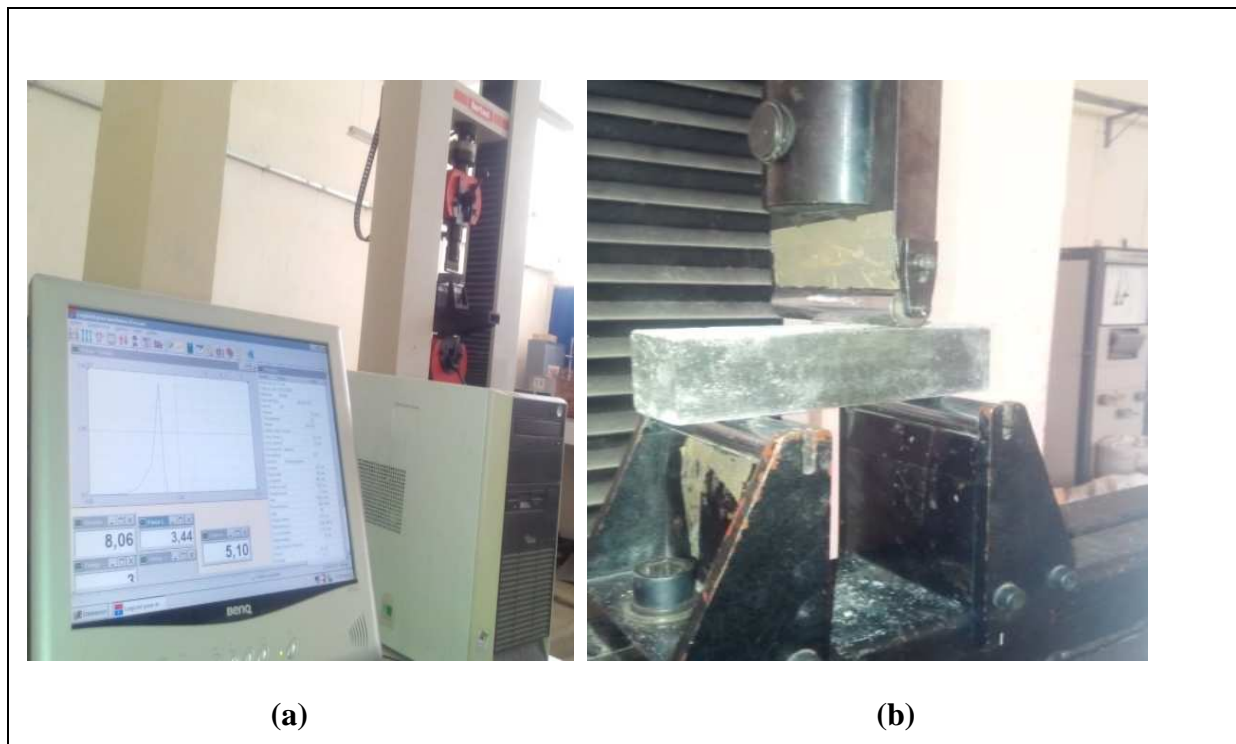


Figure II.4 : Presse hydraulique ibertest (a) et éprouvette avant l'essai de traction par compression (b).

Cet essai a l'avantage de nous permettre de tracer la courbe contrainte en fonction de la déformation.

En effet, la force étant connue, il nous est possible de déterminer la contrainte mécanique de traction suivant l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (\text{Eq II.3})$$

Où :

F: désigne la valeur de la charge maximale appliquée à la rupture.

l : distance entre l'axe des 2 appuis l=100mm.

b : largeur de l'éprouvette b= 40mm.

h : hauteur de l'éprouvette h=40mm.

Quant à la déformation, elle est obtenue en s'aidant de l'équation :

$$\varepsilon = \frac{6hS}{L^2} \quad (\text{Eq II.4})$$

Où :

h : hauteur de l'éprouvette h=40mm.

S : la course (mm).

L : distance entre axe d'appuis L=100mm

II.4 CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour objectif de présenter l'ensemble des matériaux et des procédures expérimentales que nous avons utilisés durant ce travail de fin d'étude. Le chapitre suivant aura pour but de présenter les résultats expérimentaux (résistance à la traction et compression) que nous avons obtenus ainsi que l'interprétation et la discussion de ces résultats.

Chapitre III:

Interprétation des résultats

Sommaire

III.1 INTRODUCTION	32
III.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX	32
III.2.1 Composition I : Ciment seul	32
III.2.1.1 Résistance à la compression	32
III.2.1.2 Résistance à la traction	33
III.2.2 Composition II : Ciment- CH	34
III.2.2.1 Rapport E/L=0,5	34
a. Résistance à la compression	34
b. Résistance à la traction.....	35
III.2.2.2 Rapport E/L=0,6	36
a Résistance à la compression	36
b Résistance à la traction.....	37
III.2.2.3 Rapport E/L=0,7	38
a. Résistance à la compression.....	38
b. Résistance à la traction.....	39
III.2.3 Composition III: Ciment- FS	39
III.2.3.1 Rapport E/L=0,5	39
a. Résistance à la compression.....	40
b. Résistance à la traction.....	40
III.2.3.2 Rapport E/L=0,6	41
a Résistance à la compression.....	41
b Résistance à la traction.....	42
III.2.3.3 Rapport E/L=0,7	43

a	Résistance à la compression	43
b	Résistance à la traction	44
III.2.4	Composition III : Ciment- CH-FS	45
III.2.4.1	Taux de remplacement 5%	45
a.	Résistance à la compression	45
b.	Résistance à la traction	47
III.2.4.2	Taux de remplacement 10%	47
a.	Résistance à la compression	47
b.	Résistance à la traction	49
III.2.4.3	Taux de remplacement 15%	49
a	Résistance à la compression	49
b	Résistance à la traction.....	51
III.3	CONCLUSION	51

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons effectuer une comparaison entre le mortier normalisé (0 % de remplacement) et le mortier avec additions minérales qui sont les fumées de silice et la chaux en considérant trois configurations différentes (5%; 10 % et 15%). Ce dernier se compose de 3 variations qui sont : (FS 25%,CH 75%), (FS 50%,CH 50%) et (FS 75%,CH 25%)

Ce chapitre expose les résultats des études mécaniques effectuées sur ces différents mélanges (résistances à la compression, à la traction).

Ces résultats vont nous permettre de comprendre l'effet des différentes additions minérales et leurs proportions sur l'amélioration éventuelle des résistances mécaniques des mortiers.

III.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.2.1 Composition I : Ciment seul

III.2.1.1 Résistance à la compression

La figure (III.1) présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression pour les mortiers témoins (sans additions minérales).

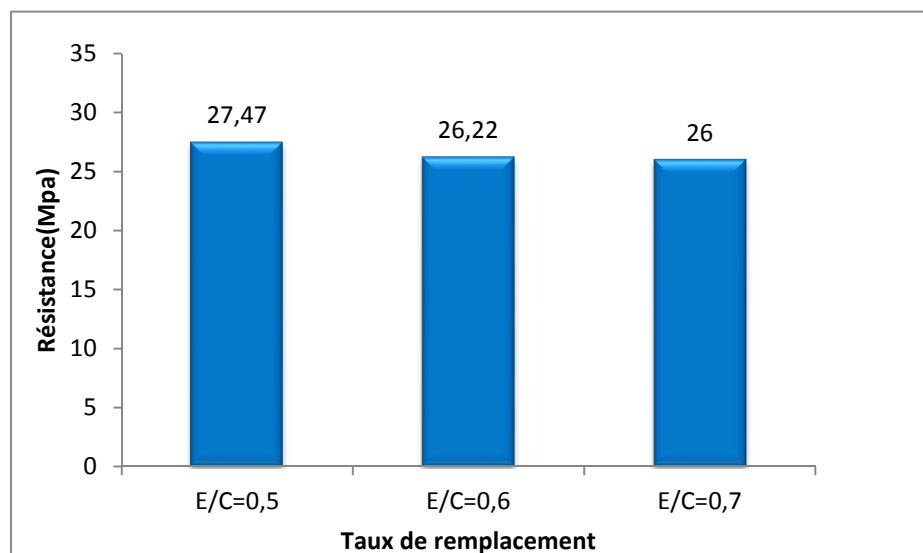


Figure III.1 Résistance à la compression des mortiers témoins en fonction du rapport E/C (Eau/Ciment).

La figure (III.1) montre les résistances à la compression des différents mortiers témoins, dont la teneur en eau a été variée au cours des expérimentations, allant de 0,5 (mortier normalisé), à 0,6 et 0,7.

Comme il peut être observé à travers la figure, après casse à 28 jours, les meilleures résistances mécaniques de compression sont obtenues dans le cas du mortier ayant un rapport $E/C=0,5$ (27,47 MPa), tandis que pour des valeurs de E/C plus élevée, les résistances baissent, atteignant 26,22 MPa (4,55% de chute) et 26 MPa (5,35% de chute) pour des $E/C=0,6$ et $E/C=0,7$ respectivement.

Ces observations sont en concordance avec ce qui est depuis longtemps observé sur les mortiers/bétons dans la littérature concernant l'effet de l'eau et donc de la porosité après durcissement du ciment sur la baisse de résistance mécaniques des mortiers/ciments.

III.2.1.2 Résistance à la traction

La figure (III.2) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction.

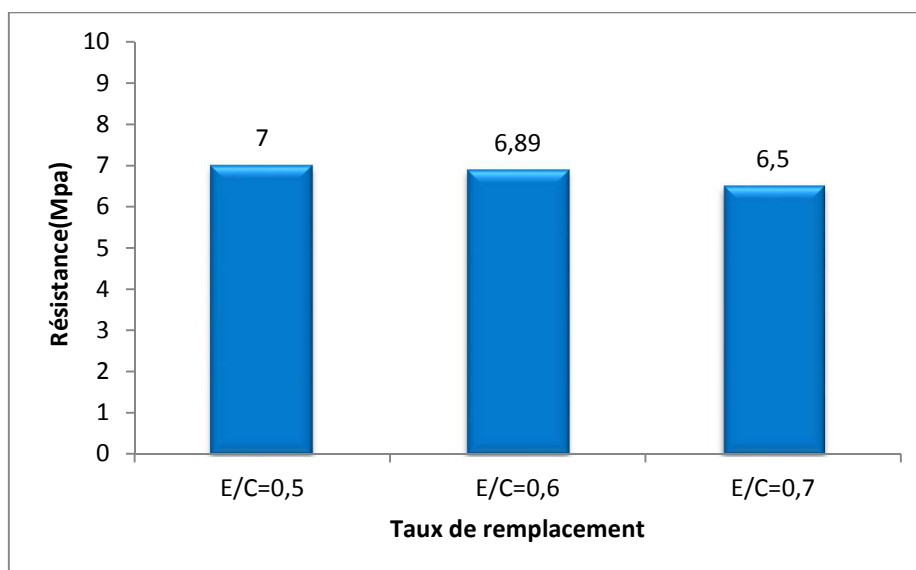


Figure III.2 Résistance à la traction des mortiers témoins en fonction du rapport E/C (Eau/Ciment).

La figure (III.2) montre les résistances en traction des différents mortiers témoins, dont le dosage en eau a été variée au cours des expérimentations, allant de 0,5 (mortier normalisé), à 0,6 et 0,7.

Comme nous le voyons, à 28 jours, les meilleures résistances mécaniques de compression sont obtenues dans le cas du mortier ayant un rapport $E/C=0,5$ (7 MPa), tandis que pour des valeurs de E/C plus élevée, les résistances baissent à 6,89 MPa (1,57 % de chute) et 6,5 MPa (7,14 % de chute) pour des $E/C=0,6$ et $E/C=0,7$ respectivement.

Comme dans le cas de la résistance à la compression, ces valeurs sont en concordance avec ce qui est observé dans la littérature sur les mortiers/bétons au sujet de l'effet de l'eau et par conséquent de la porosité post-durcissement du ciment sur la baisse de résistance mécanique des mortiers/ciments.

III.2.2 Composition II : Ciment- CH

III.2.2.1 Rapport $E/L=0,5$

a. Résistance à la compression

La figure (III.3) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

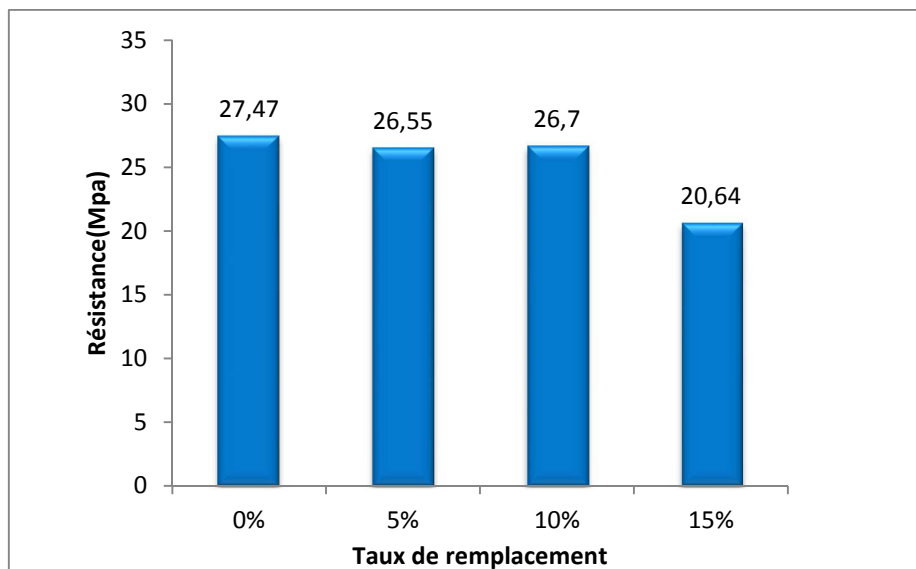


Figure III.3 Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour $E/L=0,5$.

La figure (III.3) présente la comparaison des résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été menés, i.e. 5%, 10% et 15% pour un premier rapport $E/L=0,5$ (Eau/Liant=0,5). Une baisse de résistance à la compression par rapport au mortier témoin (0% de chaux) a été notée au fur et à mesure de l'augmentation du pourcentage de remplacement. En effet, le mortier témoin i.e. ($E/L=0,5$;

0% chaux), a présenté une résistance de 27,47 MPa, tandis qu'après remplacement, les valeurs de 26,55 MPa; 26,7 MPa et 20,64 MPa ont été obtenues pour des remplacements de 5%, 10% et 15% respectivement. Cette dégradation au niveau des résistances représentant une baisse de l'ordre de 3,35%; 2,80%; 24,86 % respectivement. Ici, il est important de mentionner, que la plus forte baisse de résistance est obtenue lors du remplacement de 15%, effectivement, la résistance du mortier passe de 27,47 MPa à une valeur de 20,64 MPa, ce qui est très important. Par contre un remplacement de 5 % ou 10 % ne présente pas de modification notable en termes de baisse de résistance mécanique.

b. Résistance à la traction

La figure (III.4) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction par flexion

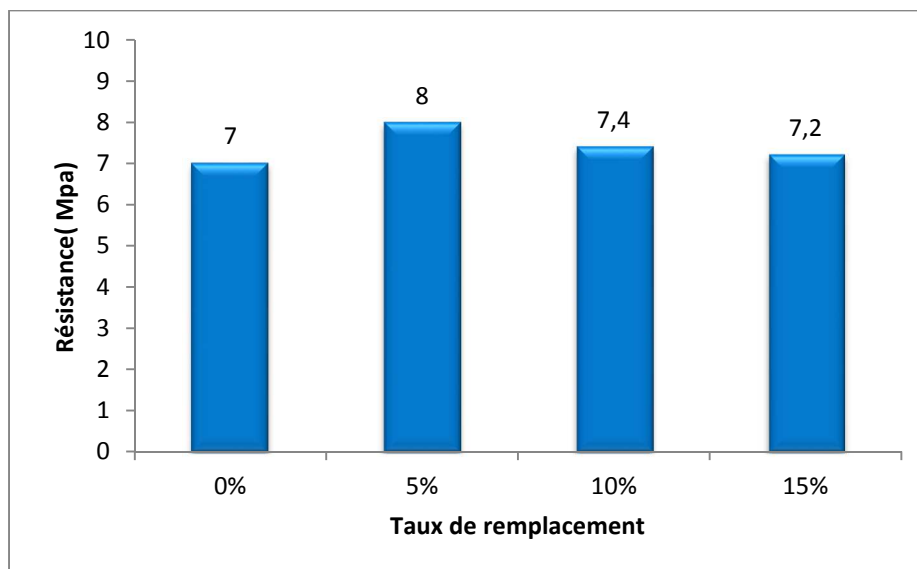


Figure III.4 Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour E/L=0,5

La figure (III.4) présente la comparaison des résistances à la traction pour les différents taux de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été effectués, i.e. 5%, 10% et 15% pour le même rapport E/L=0,5. Contrairement aux résultats obtenus sur les éprouvettes cassées en compression, une augmentation de la résistance mécanique à la traction par rapport au mortier témoin (0% de chaux) a été observée. En effet, pour tous les cas de figures, il y a augmentation de résistance, celle-ci étant plus élevée à 5 % de remplacement (8 MPa, amélioration de près de 14%) puis baisse au fur et à mesure que le pourcentage de remplacement augmente. Effectivement, à 10% de CH ajouté, la résistance est de 7,4 MPa (amélioration de 5,7%) et pour 15% de CH ajouté, la résistance est de 7,2 MPa, soit 2,89%

d'amélioration. Notons ici, que le mélange ayant obtenu les meilleures caractéristiques (pour notre objectif de résistance) est le mélange 5% de Chaux. Pour les taux supérieurs (10%, 15%), les résultats obtenus ne présentent pas d'améliorations significatives.

III.2.2.2 Rapport $E/L=0,6$

a Résistance à la compression

La figure (III.5) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

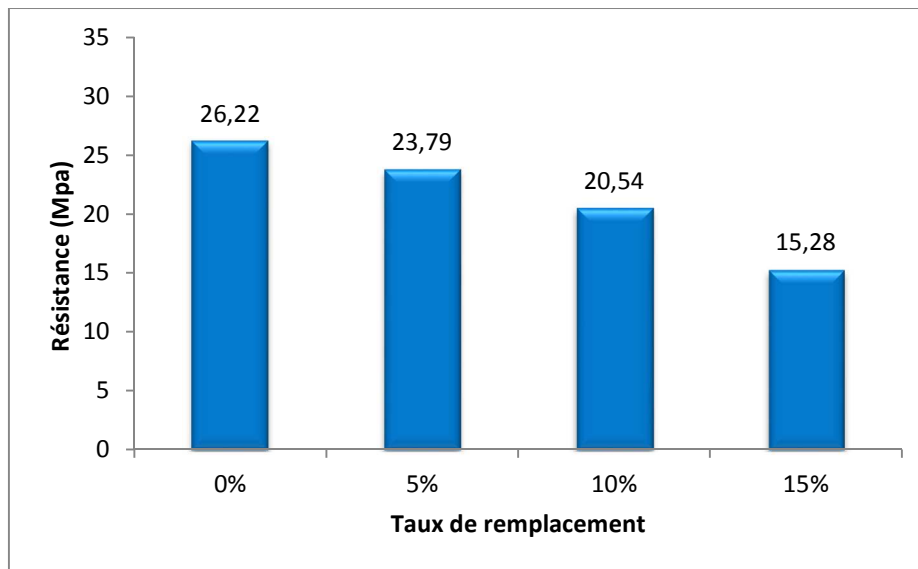


Figure III.5 : Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour $E/L=0,6$

La figure (III.5) présente le comparatif des résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été menés, i.e. 5%, 10% et 15% pour le second rapport $E/L=0,6$. Une baisse de résistance à la compression par rapport au mortier témoin a été observée au fur et à mesure qu'on augmente le taux de remplacement du pourcentage de remplacement. En effet, le mortier témoin i.e. ($E/C=0,5$, 0% chaux), a présenté une résistance de 26,22 MPa, tandis qu'après remplacement, les valeurs de 23,79 MPa; 20,54 MPa et 15,28 MPa ont été obtenues pour des remplacements de 5%, 10% et 15% respectivement. Cette dégradation au niveau des résistances représentant une baisse de l'ordre de 9,26 %; 21,66% et 41,72 % respectivement. Ici, notons que la perte de résistance est très importante au fil de l'augmentation du taux de remplacement. Ce qui montre que pour ce

rapport $E/L=0,6$; l'ajout de chaux même à des taux faibles présentent un comportement médiocre.

b Résistance à la traction

La figure (III.6) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction.

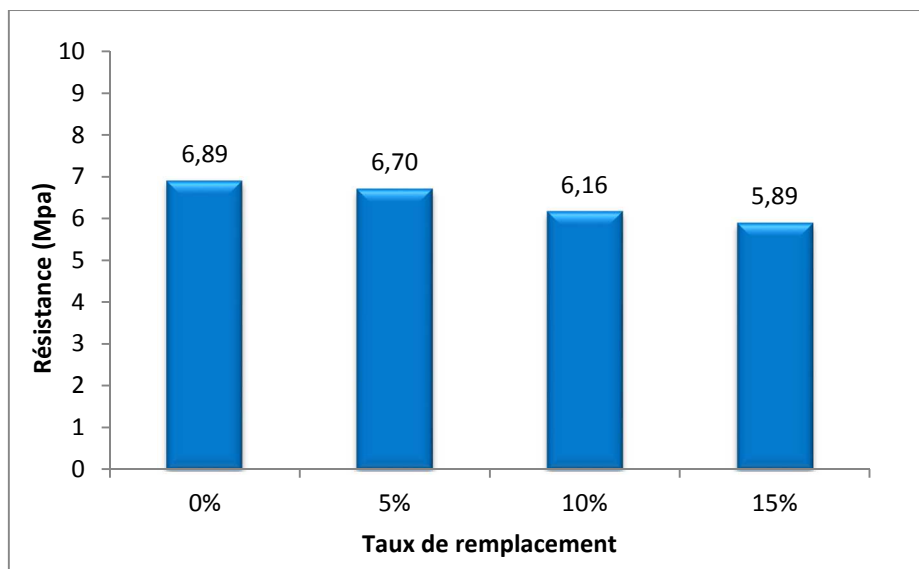


Figure III.6 : Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour $E/L=0,6$

La figure (III.6) présente le comparatif des résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été menés, i.e. 5%, 10% et 15% pour le second rapport $E/L=0,6$. Une baisse quasi-linéaire de la résistance à la traction par rapport au mortier témoin a été observée au fur et à mesure qu'on augmente le taux de remplacement. En effet, le mortier témoin la présentée la meilleure résistance (6,89 MPa), tandis qu'après remplacement, les valeurs de 6,70 MPa; 6,16 MPa; et 5,89 MPa ont été obtenues pour des remplacements de 5%; 10% et 15% respectivement. Cette dégradation au niveau des résistances représentant une baisse de l'ordre de 2,74 %; 10,6% et 14,5 % respectivement. La baisse de résistance obtenue à l'air de suivre une tendance linéaire, bien que celle-ci ne soit pas très importante

III.2.2.3 Rapport $E/L=0,7$

a. Résistance à la compression

La figure (III.7) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression

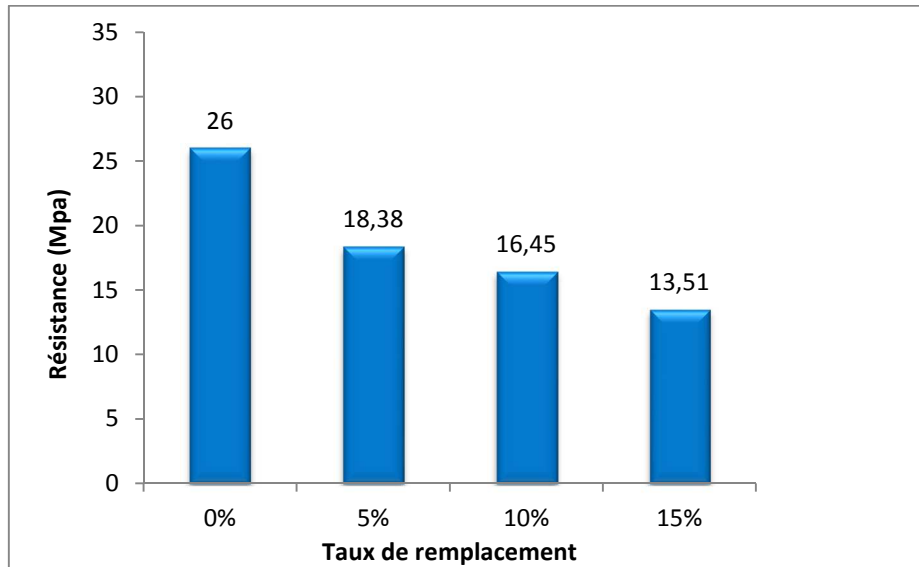


Figure III.7 : Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour $E/L=0,7$

La figure (III.7) présente le comparatif des résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été menés, i.e. 5%, 10% et 15% pour le rapport $E/L=0,7$. Une baisse de résistance à la compression par rapport au mortier témoin a été observée au fur et à mesure qu'on augmente le taux de remplacement du ciment. En effet, le mortier témoin ($E/C=0,5$; 0% chaux), a présenté une résistance, de l'ordre de 26 MPa, tandis qu'après remplacement, les valeurs de 18,38 MPa, 16,45 MPa, et 13,51 MPa ont été obtenues pour des remplacement de 5%; 10% et 15% respectivement. Cette dégradation au niveau des résistances représentant une baisse de l'ordre de 29,31 %; 36,73% et 48,04% respectivement. Ici, notons que la perte de résistance est très importante, au fur et à mesure que le pourcentage de remplacement augmente.

b. Résistance à la traction

La figure (III.8) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction par flexion

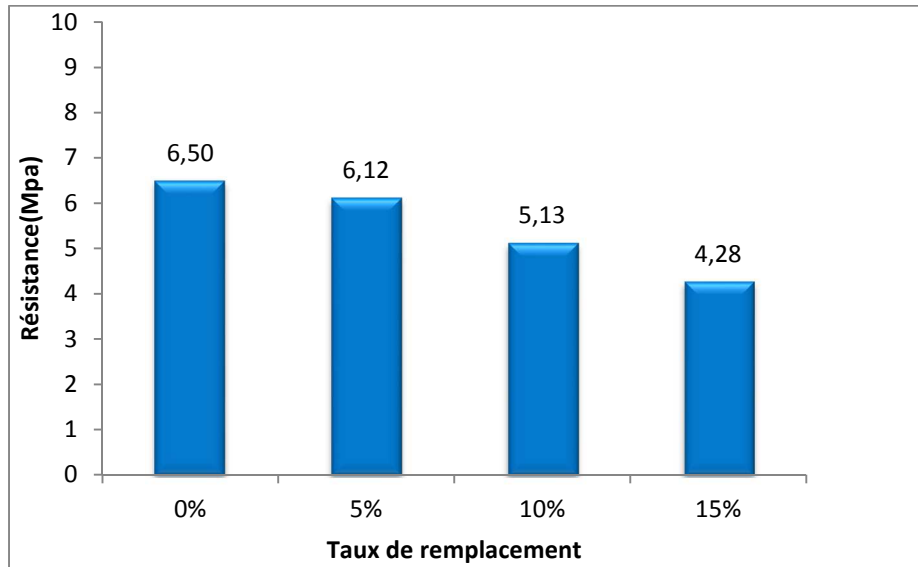


Figure III.8 : Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la Chaux (CH), pour $E/L=0,7$

La figure (III.8) ci-dessus nous renseigne sur les résistances à la traction pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la chaux (CH), qui ont été effectués, i.e. 5%, 10% et 15% pour le rapport $E/L=0,7$. Comme dans le cas de la compression, un même comportement de baisse de résistance a été constaté comparativement au mortier sans addition, cette baisse allant en augmentant au fil de l'augmentation du % de remplacement. Effectivement, Pour 0 % de chaux, $R_{t28} = 6,5$ MPa, tandis que pour 5%, 10% et 15% (6,12 MPa, 5,13 MPa, 4,28 MPa). Cette dégradation des résistances représente une chute d'environ 5,77 %, 21,08% et 34,15% respectivement. Ici, notons que la perte de résistance est quasi-linéaire, à mesure que le pourcentage de remplacement augmente.

III.2.3 Composition III: Ciment- FS**III.2.3.1 Rapport $E/L=0,5$**

a. Résistance à la compression

La figure (III.9) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

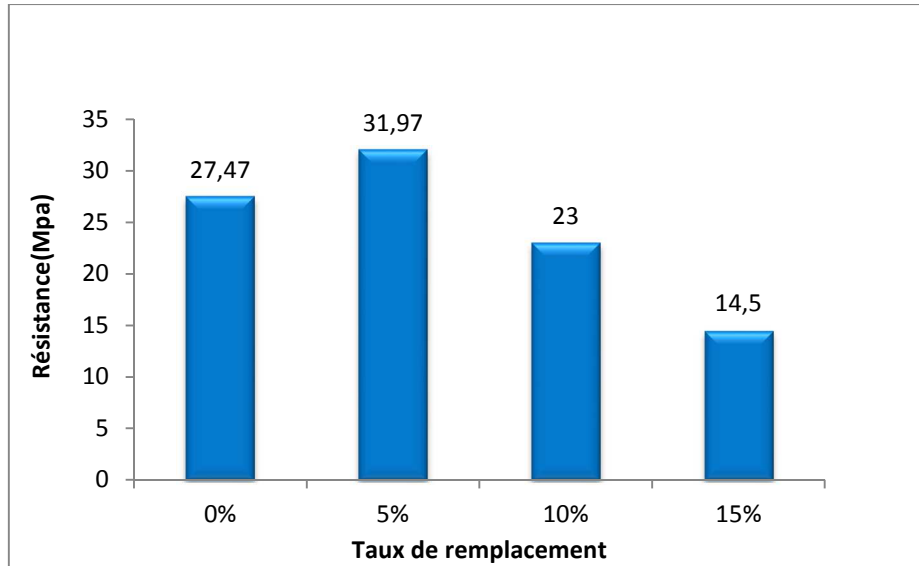


Figure III.9 : Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,5$

La figure (III.9) expose les valeurs des résistances en compression pour les différents taux de remplacement du ciment par la fumée de silice (FS), qui ont été effectués, i.e. 5%, 10% et 15% pour le cas du rapport Eau/Liant=0,5. A partir de ce graphique, il est remarqué, l'apparition d'un optimum (valeur maximale) de résistance mécanique pour le pourcentage de remplacement de 5%, qui est de l'ordre de 31,97 MPa soit une augmentation de la résistance mécanique de 16,38% par rapport au mortier de référence. Pour 10% et 15% de FS ajoutée, une chute de résistance est observée comparativement au mortier de référence. Effectivement, les résistances tombent à 23 MPa et 14,5 MPa, soit une chute de 16,27% et 47,22% respectivement. A partir de ces résultats nous pouvons dire que le remplacement à plus de 5 % est préjudiciable vis-à-vis de la résistance mécanique du mortier.

b. Résistance à la traction

La figure (III.10) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

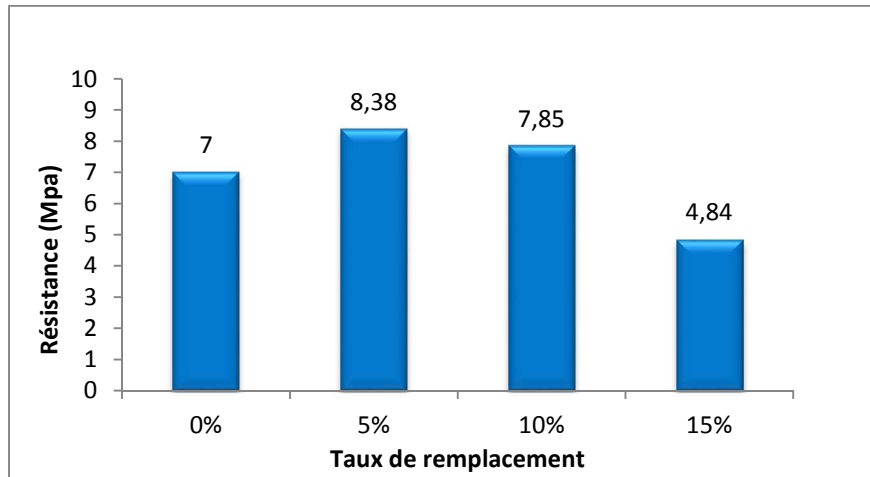


Figure III.10 : Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,5$

La figure (III.10) représente les résistances en traction des différents mélanges de mortiers confectionnés (\neq pourcentages de remplacement du ciment par la fumée de la silice, $E/L=0,5$). Nous remarquons que pour les pourcentages de 5% et 10%, il y a une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 19,7% et 12,14% respectivement par rapport au mortier témoin, tandis que pour 15% il y a une chute de résistance de 30,86% et non pas une augmentation. A ce niveau ci, nous pouvons dire que le meilleur taux de remplacement est le tout premier, i.e. 5 % de FS, bien qu'à 10% de FS, la résistance soit plus élevée que le témoin, elle n'en demeure pas moins plus faible que le pourcentage précédent (5%). Concernant le remplacement au taux le plus élevé, celui-ci présente un effet préjudiciable, se caractérisant par une chute importante de résistance.

III.2.3.2 Rapport $E/L=0,6$

a. Résistance à la compression

La figure (III.11) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

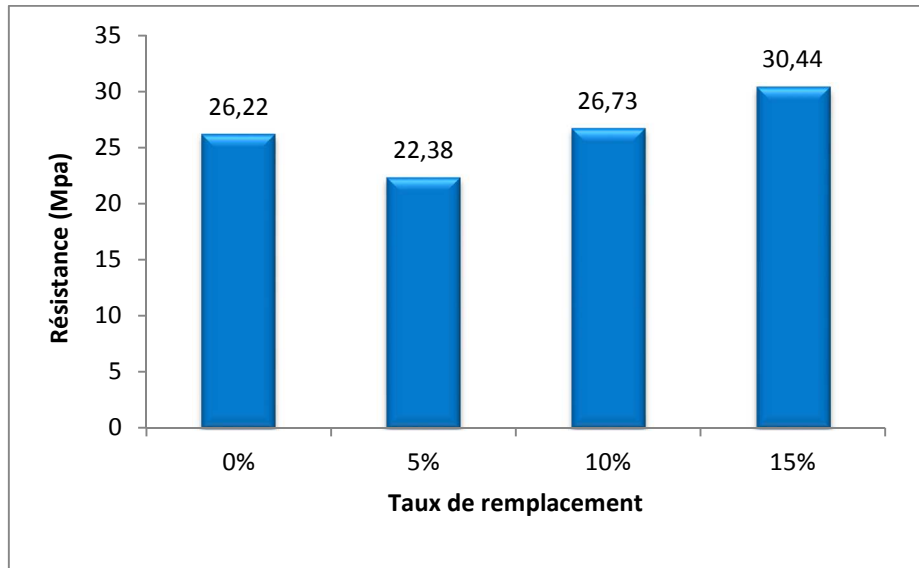


Figure III.11 : Résistance à la compression en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,6$

La figure (III.11) présente les résistances en compression des différents remplacements de ciment par la fumée de silice ($E/L=0,6$) dans le mortier. Nous remarquons que pour les pourcentages de 10% et 15%, il y a une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 1,94% et 16,1% respectivement par rapport au mortier témoin, tandis que pour 5% il y a une chute de résistance de 32,55% et non pas une augmentation. A ce niveau ci, nous pouvons dire que le meilleur taux de remplacement est le tout dernier, i.e. 15 % de FS, bien qu'à 10% de FS, la résistance soit plus élevée que le témoin, elle n'en demeure pas moins plus faible que le pourcentage précédent (15%). Concernant le remplacement au taux le plus faible, celui-ci présente un effet préjudiciable, se caractérisant par une chute importante de résistance

b. Résistance à la traction

La figure (III.12) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction

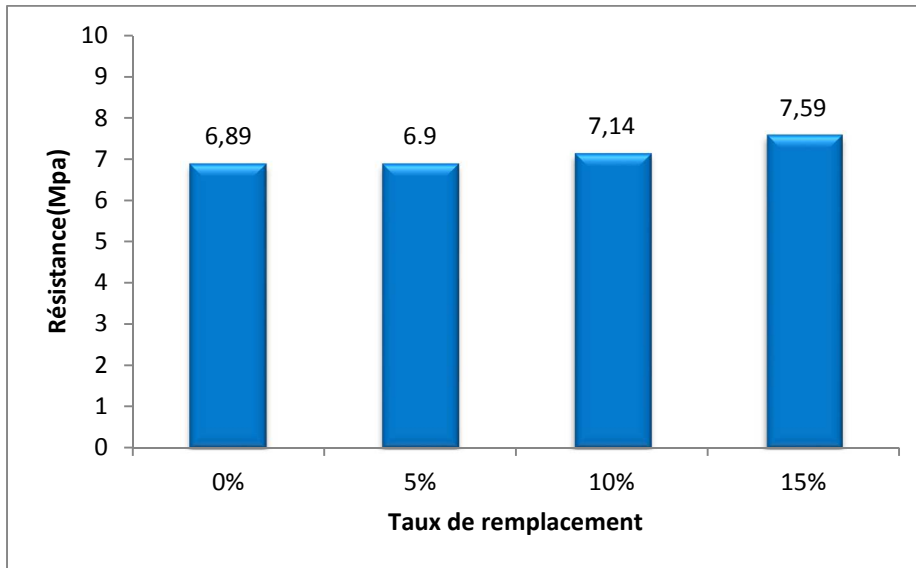


Figure III.12 : Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,6$.

La figure (III.12) présente les résistances en traction des éprouvette présentés en Figure 3.11 ($E/L=0,6$). Nous remarquons que pour les pourcentages de 10% et 15%, il y a une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 3,63% et 10,15% (7,14 MPa et 7,59 MPa) respectivement par rapport au mortier témoin, tandis que pour 5% il n'y a pas de changement en termes de résistance. A ce niveau, nous pouvons dire que taux de remplacement de 5% est inefficace (6,9 MPa), et l'augmentation de résistance n'apparaît qu'à partir d'un remplacement de 10%.

III.2.3.3 Rapport $E/L=0,7$

a Résistance à la compression

La figure (III.13) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

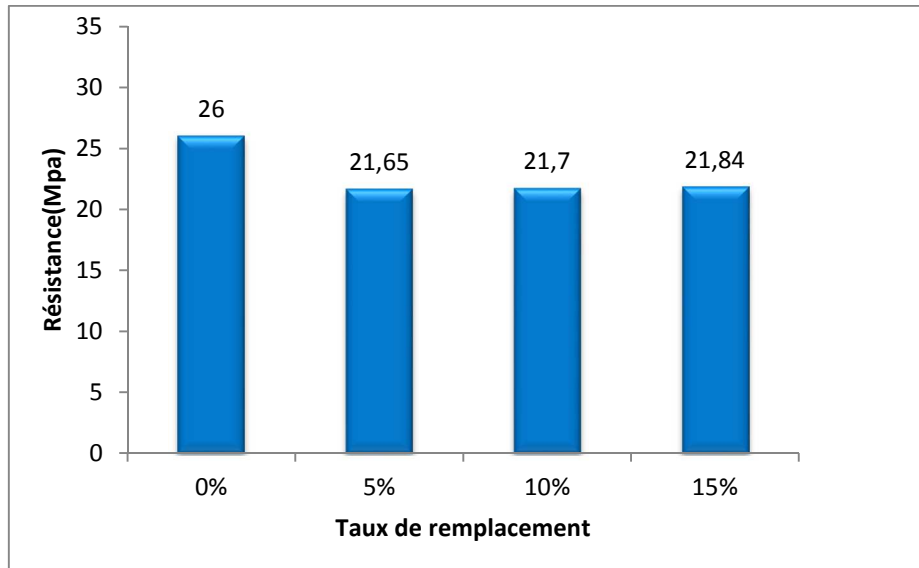


Figure III.13 : Résistance à la compression du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,7$

La figure (III.13) ci-dessus présente les résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la fumée de silice (FS), qui ont été effectués, i.e. 5%, 10% et 15% pour le rapport $E/L=0,7$, un même comportement de baisse de résistance a été constaté comparativement au mortier sans addition. Effectivement, Pour 0 % de fumée de silice, $R_{28} = 26$ MPa, tandis que pour 5%, 10% et 15% (21,65 MPa; 21,84 MPa; 21,84 MPa). Cette dégradation des résistances représente une chute d'environ 16,73 %, 16,54% et 16% respectivement. Ici, notons que les résistances sont presque les mêmes quelque soit le pourcentage de remplacement étudié.

c. Résistance à la traction

La figure (III.14) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de traction.

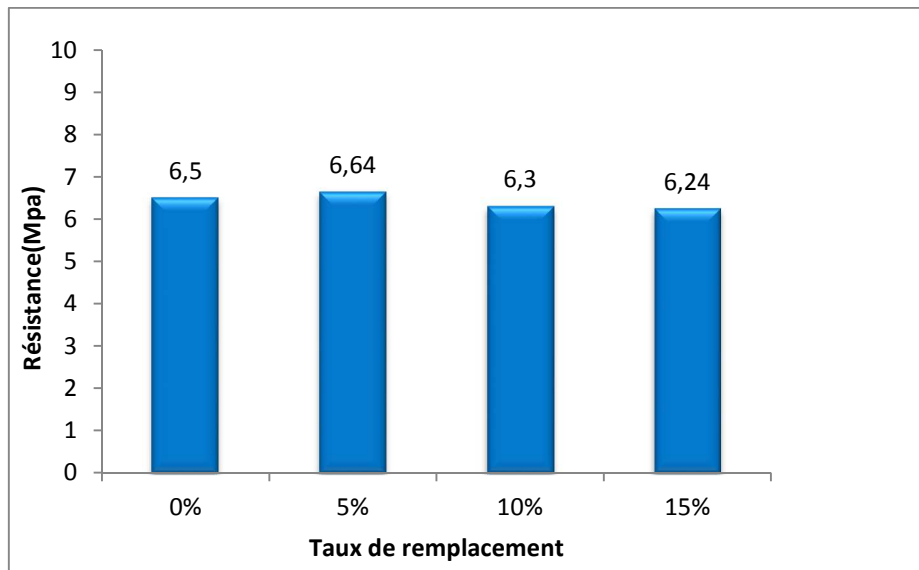


Figure III.14 : Résistance à la traction en fonction du taux de remplacement du ciment par la fumée de Silice (FS) pour $E/L=0,7$

La figure (III.14) présente le comparatif des résistances à la compression pour les différents pourcentages de remplacement du ciment par la fumée de silice (FS), qui ont été menés, Pour 5% il y a une petite augmentation de l'ordre de 2,15 % à 6,64 MPa. Une légère baisse de la résistance à la traction par rapport au mortier témoin a été observée aux taux de remplacement de 10% et 15% représentant des valeurs de 6,3 MPa et 6,24 MPa respectivement. Cette dégradation au niveau des résistances représentant une baisse de l'ordre de 3,1% et 4 % respectivement. Ici nous remarquons qu'il n'y a pas d'effet notable de l'ajout de fumée de silice sur l'amélioration de la résistance mécanique de mortier.

III.2.4 Composition III : Ciment- CH-FS

III.2.4.1 Taux de remplacement 5%

a. Résistance à la compression

La figure (III.15) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

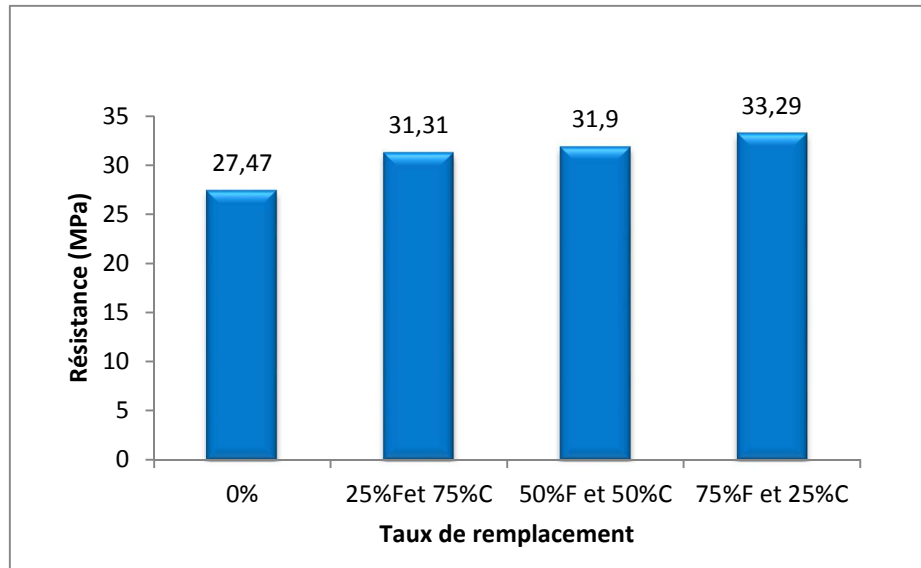


Figure III.15 : Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 5%

La figure (III.15) présente les résistances en compression des éprouvettes avec 5% de remplacement du ciment par le mélange de chaux et de fumée de silice en différentes proportions). Nous remarquons que pour les pourcentages de remplacement de (25%FS et 75%CH), (50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH), il y a une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 13,98% , 16,13% et 21,19% représentant (31,13 MPa et 31,9 MPa et 33,29 MPa) respectivement par rapport au mortier témoin. Il est constaté que le remplacement de (75%FS et 25%CH) représente la formulation la plus intéressante car donnant la meilleure résistance (21,19% d'augmentation par rapport au témoin) .

b. Résistance à la traction

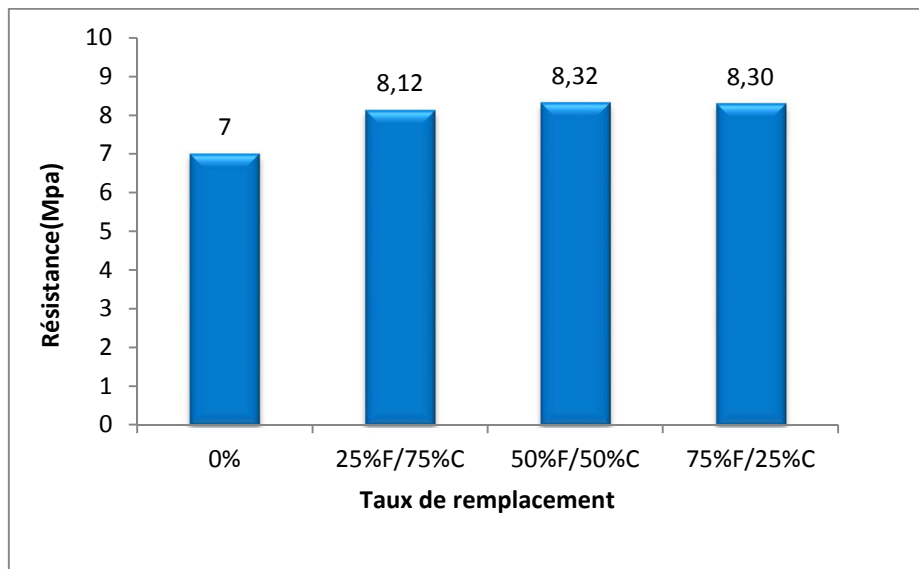


Figure III.16 : Résistance à la traction des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 5%

Figure (III.16) présente la comparaison des résistances à la traction pour différents pourcentages de remplacement du ciment par (25%FS et 75%CH), (50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH). Pour tous les cas de figures, une amélioration de cette dernière par rapport au témoin est observée. Concernant le pourcentage de remplacement par de la chaux et fumée de silice à (50%FS et 50%CH) une augmentation de 18,86% en terme de résistance est notée. Pour ce qui est des pourcentages de remplacement de (25%FS et 75%CH) et (75%FS et 25%CH) un gain de l'ordre de (16% et 18,43%) respectivement est obtenu par rapport au témoin. La meilleure résistance est obtenue par le remplacement à (50%FS et 50%CH). Il est important tout de même de pointer le fait que les valeurs des résistances, témoin exclu, sont quasi-semblables.

III.2.4.2 Taux de remplacement 10%

a. Résistance à la compression :

La figure (III.17) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

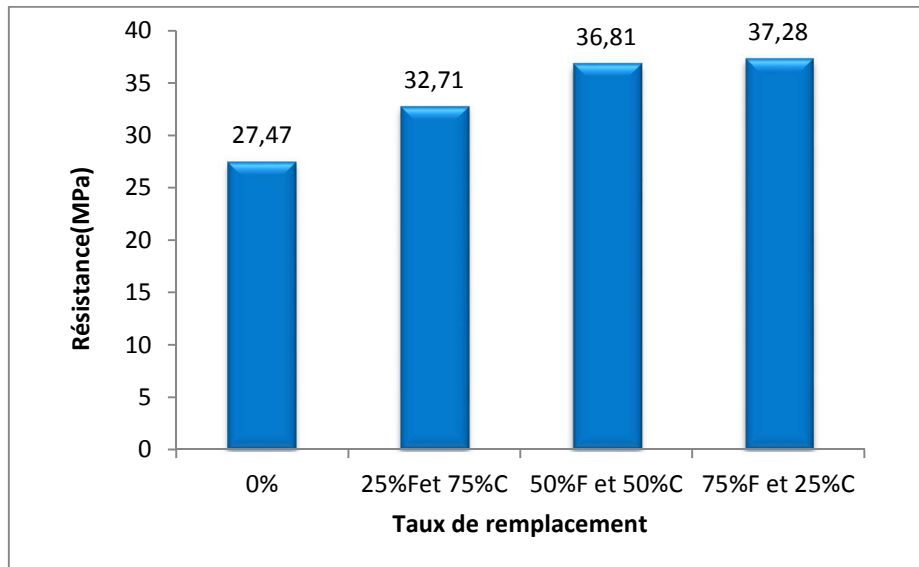


Figure III.17 : Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 10%

La figure (III.17) présente les résistances en compression des éprouvettes avec 5% de remplacement du ciment par le mélange de chaux et de fumée de silice en différentes proportions). Nous remarquons que pour les pourcentages de remplacement de (25%FS et 75%CH),(50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH), il y a une amélioration de la résistance mécanique de l'ordre de 19,08% , 34% et 35,71% (32,71MPa, 31,9 MPa et 33,29 MPa) respectivement par rapport au mortier témoin. Il est constaté que le remplacement de (75%FS et 25%CH) représente la formulation la plus intéressante car donnant la meilleure résistance (35,71% d'augmentation par rapport au témoin).

b. Résistance à la traction

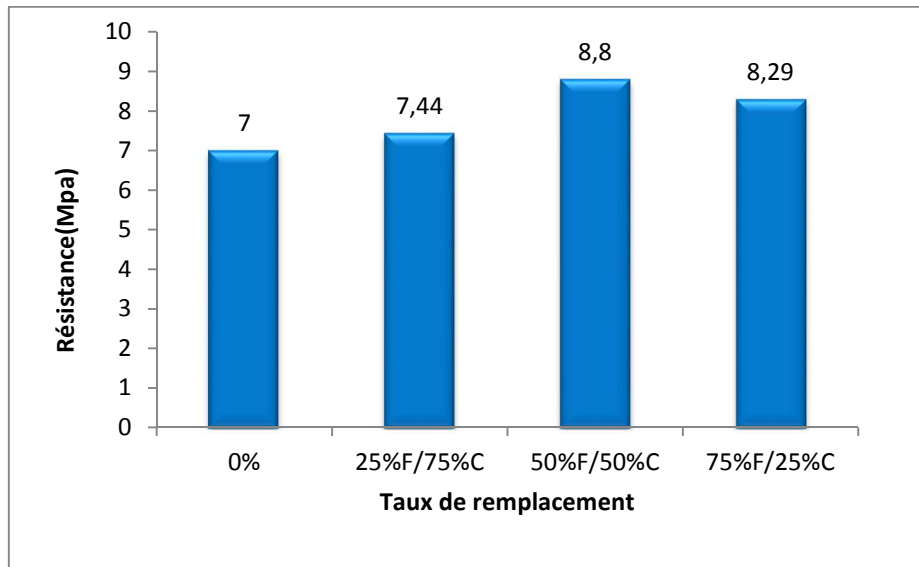


Figure III.18 : Résistance à la traction de remplacement de 10% du ciment par la chaux et fumée de silice

Figure (III.18) présente la comparaison des résistances à la traction pour différents pourcentages de remplacement du ciment par (25%FS et 75%CH), (50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH). Pour tous les cas de figures, une amélioration de la résistance est observée comparé au témoin. Concernant le pourcentage de remplacement par de la chaux et fumée de silice à (50%FS et 50%CH) une augmentation de 25,71% en terme de résistance est notée. Pour ce qui est des pourcentages de remplacement de (25%FS et 75%CH) et (75%FS et 25%CH) un gain de l'ordre de (6,29% et 18,43%) respectivement est obtenu par rapport au témoin. La meilleure résistance est obtenue donc par le remplacement à (50%FS et 50%CH).

III.2.4.3 Taux de remplacement 15%

a. Résistance à la compression

La figure (III.19) suivante présente les résultats obtenus à l'issue de l'essai de résistance mécanique de compression.

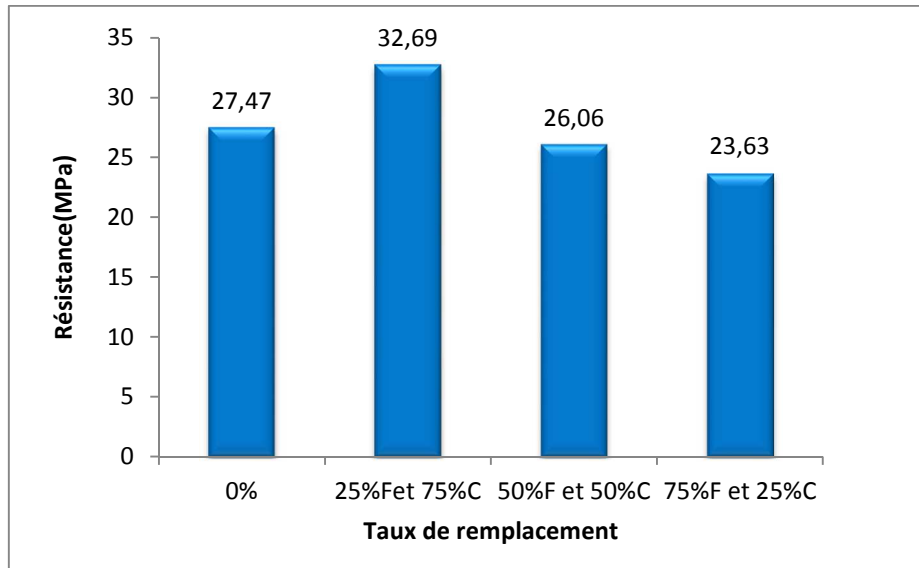


Figure III.19 : Résistance à la compression des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 15%

La figure (III.19) expose les valeurs des résistances en compression pour les différents taux de remplacement du ciment par la fumée de silice (FS) et la chaux(CH), qui ont été effectués, pour 15% pour le cas du rapport Eau/Liant=0,5. A partir de ce graphique, il est remarqué, l'apparition d'un optimum (valeur maximale) de résistance mécanique pour le pourcentage de remplacement de (25%FS et 75%CH), qui est de l'ordre de 32,69 MPa soit une augmentation de la résistance mécanique de 19% par rapport au mortier de référence. Pour (50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH), une chute de résistance est observée comparativement au mortier de référence. Effectivement, les résistances tombent à 26,06 MPa et 23,63 MPa, soit une chute de 5,13% et 13,98% respectivement. A partir de ces résultats nous pouvons dire que le remplacement (25%FS et 75%CH) présente le meilleur résultat en termes de résistance mécanique par rapport au mortier témoin.

b. Résistance à la traction

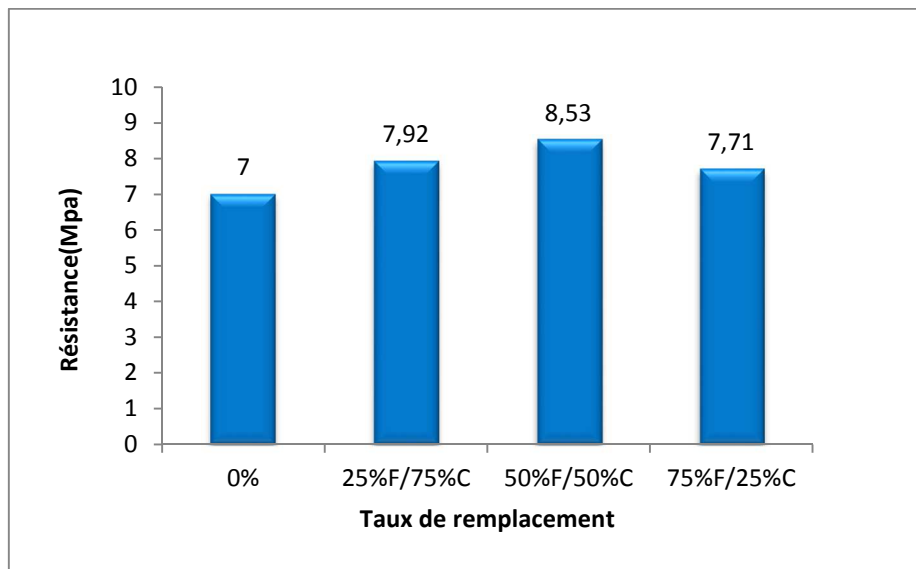


Figure III.20 : Résistances à la traction des mortiers Ciment-CH-FS pour un taux de remplacement de 15%

Figure (III.20) présente la comparaison des résistances à la traction pour différents pourcentages de remplacement du ciment par (25%FS et 75%CH), (50%FS et 50%CH) et (75%FS et 25%CH). Pour tous les cas de figure, une amélioration de la résistance mécanique par rapport au témoin est observée. Concernant le pourcentage de remplacement par de la chaux et fumée de silice à (50%FS et 50%CH) une augmentation de 21,86% en terme de résistance est notée. Pour ce qui est des pourcentages de remplacement de (25%FS et 75%CH) et (75%FS et 25%CH) un gain de l'ordre de 13,14% et 10,14% respectivement est obtenu par rapport au témoin. La meilleure résistance est correspond donc au remplacement à (50%FS et 50%CH)

III.3 CONCLUSION

A l'issue des résultats obtenus (montrés) dans ce chapitre nous pouvons conclure sur plusieurs points :

- Le mélange Ciment-CH présente des résistances mécaniques plus faibles que les mélanges témoins. Ceci serait selon nous dû au fait que la chaux a une demande d'eau élevée (forte consommatrice), ce qui a pour conséquence, l'absorption d'une partie de l'eau destinée à réagir avec le ciment. Le ciment ne peut donc pas réagir de manière optimale.

- Le mélange Ciment-FS présente des résistances mécaniques plus importantes que les mélanges témoins. Ceci serait dû au fait que la FS réagit avec la portlandite du ciment, comme nous le pensions, par réaction pouzzolanique. Les C-S-H ainsi formées comblent la porosité inter-granulaire d'une part, et ayant des propriétés résistantes d'autre part, augmente la résistance à l'échelle macroscopique du mortier.

- Le mélange Ciment-FS-CH présente des résistances mécaniques les plus élevées de tous les mélanges. Ceci serait dû au fait que la FS réagit avec la chaux en quantité élevée, par réaction pouzzolanique. La quantité de FS et CH étant toutes deux importante, la quantité de C-S-H potentiellement formée l'est elle aussi, d'où les résistances mécaniques très importantes obtenues.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons présenté une étude expérimentale portant sur les propriétés mécaniques de mortiers. L'objectif étant plus particulièrement de caractériser la résistance mécanique de mortiers dont la formulation a été altérée par des ajouts de chaux et de fumée de silice (en remplacement partiel du ciment).

Trois compositions différentes ont été ainsi confectionnées avec différents pourcentages de remplacement (5%, 10% et 15%) de remplacements, puis comparés au mortier témoin (0% de remplacement par additions minérales).

D'après les résultats obtenus au cours du travail, nous pouvons dire qu'effectivement, les mortiers avec un faible pourcentage de remplacement ont généralement donné les meilleures caractéristiques mécaniques qu'avec les pourcentages élevés.

En effet, de par les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Pour la composition Ciment-CH, nous avons trouvé que le mortier témoin sans remplacement présente de meilleures résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion que le mortier avec remplacement par la chaux, et plus on augmente le pourcentage de remplacement, plus la résistance diminue, la chaux y jouant certainement un rôle du fait de son caractère consommateur d'eau ; en effet, la quantité d'eau disponible pour réagir avec le ciment devenant plus faible, la résistance mécanique finale est par conséquent plus faible aussi.

Pour la composition Ciment-FS, nous avons remarqué que le remplacement du ciment par la fumée de silice, a eu pour effet d'améliorer la résistance mécanique par rapport au témoin, ce qui était prévu, car la chaux créée à l'issue de l'hydratation du ciment, ne possédant pas de propriétés mécaniques, réagit avec la fumée de silice par réaction pouzzolanique formant des C-S-H, qui eux, ont des propriétés mécaniques de résistance.

Pour la composition Ciment-CH-FS, nous avons noté que le remplacement du ciment par le mélange (CH-FS), présente comparativement au mortier témoin et aux autres compositions

(Ciment-CH et Ciment-FS), les meilleurs résultats de résistance mécanique. En effet, la réaction pouzzolanique, comme toute réaction chimique est régie par la quantité de réactifs disponible. Cette quantité étant sciemment choisie élevée, la proportion de C-S-H après réaction de la chaux et de la fumée de silice, est elle aussi élevée, ce qui se répercute sur les résistances mécaniques obtenues, qui furent de loin les plus élevées.

Ce travail de recherche, comme nous le voyons ici, nous a permis d'investiguer plusieurs formulations de mortiers afin d'en trouver la meilleure en termes de caractéristiques mécaniques (résistance mécanique dans notre cas). Nous avons vu que la fumée de silice additionné à la chaux permettait d'avoir des augmentations de résistance mécanique, dans le meilleur des cas de figures étudiés, de plus de 35% (10% remplacement de ciment, 25%CH et 75%FS), ce qui est très intéressant.

En perspectives donc, une étude plus fine des pourcentages de remplacement du ciment, du rapport E/C, ainsi que des proportions CH-FS serait intéressante, sans oublier des études chimiques ou éventuellement thermique afin de mieux comprendre les phénomènes en jeux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] GHOMARI F., "Science des matériaux de construction HIM 12", document de cours (1^{ère} année architecture) (2004).
- [2] Fichier technique Tome(1), "les constituant des bétons et des mortiers" ; édition septembre (2005).
- [3] FOLLIOT A. Build M., "la structuration progressive de la pierre de ciment", le béton hydraulique, GranDuBé, " Grandeurs associées a la durabilité des bétons", Association française du Génie civil, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, édition (2007).
- [4] BASF, "The chiminal Company of France ", "la technologie du béton" (2009).
- [5] ROMUALDI, J.P., BASTON, G. B "Mechanics of crack arrest in concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 89, 1963, EM 3, pp.147-168,(196).
- [6] DREUX G, FESTA J, "Nouveau Guide de béton et de ses constituants", 8^{ème} éditions Eyrolles (2002).
- [7] NEVILLE A, "Propriété des bétons", (Version françaises de properties of concrete, édition Eyrolles (2000).
- [8] ADAM M.NEVILLE, "propriété des bétons", (Centre de recherche inter-universitaire sur le béton Sherbrooke-Laval,2006.
- [9] OULMAS F, "étude de comportement mécanique des mortiers avec ajout de fines, conserves en environnement agressifs", Mémoire de fin d'étude, Université mouloud mammeri, Tizi-Ouzou (2014).
- [10] BOUFEDAH BADISSI, «Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristique des granulats et sur les propriétés des béton ordinaire », thèse de magistère Université Mentouri Constantine (2000).
- [11] CHOMANI F. & BENDI-OUIS A, "Science des matériaux de construction, travaux pratique (2007-2008).
- [12] AITCIN C. Ed, "Condensed silica fume in concrete", faculté des sciences appliquées Universités de Sherbrooke, (1983).

[13] FAY A., "la fumée de silice l'addition incontournable pour des bétons durables", FERROPEM newsletter, (2012).

[14] BELOUADAH M., "évaluation des effets secondaires liés à l'incorporation des adjuvants sur les propriétés de durabilité des bétons à base de matériaux locaux", mémoire de magistère, université de Mohamed Boudiaf de Msila, (2004).