

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES
FILIERE : Génie Civil
OPTION : Matériaux

N° :

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : -Ahmed Abdo Al-Eyani

Intitulé

*Valorisation du déchet de marbre et de verre
comme additif dans la production du mortier*

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. MAZA Mekki	Université de M'sila	Président
Pr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Université de M'sila	Rapporteur
Mme. BELOUADAH M	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. BELAGRAA Larbi	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

REMERCIEMENT

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE

1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHPITRE I : CIMENT ET MORTIER

Introduction

3

I-1 Ciment

3

I-2 Aperçu historique

3

I-3 Définition d'un ciment

4

I-4 les différents ajouts incorporés au ciment

4

I-5 Procèdes et techniques de fabrication du ciment

5

I-6 Constituants principaux du ciment et les additions

6

I-6-1 Le clinker

6

I-6-1-1 La composition chimique

7

I-6-1-2 La composition minéralogique

7

I-6-2 Les ajout minéraux

8

I-7 Catégories des ciments

8

I-8 Caractéristique du ciment

9

I-8-1 Caractéristique physico-chimique

9

I-8-1-1 Indice d'hydraulicité

9

I-8-1-2 prise

10

I-8-1-3 durcissement

10

I-8-1-4 Fausse prise

11

I-8-1-5 Chaleur d'hydratation

11

I-8-1-6 finesse de mouture

11

I-8-1-7 Retrait

11

I-8-1-8 Expansion

12

I-8-2 Exigences chimiques

13

I-9 Mortier

14

I-9-1 Introduction

14

I-9-2 Définition

14

I-9-3 Le rôle d'utilisation de mortier

14

I-9-4 Les caractéristiques de mortier

15

I-9-5 Composition

15

I-9-5-1 Les liants

16

I-9-5-2 Les sables	16
I-9-5-3 Les adjuvants	17
I-9-5-4 Les ajouts	17
I-10 Les différents mortiers	17
I-10-1 Les mortiers de ciment	17
I-10-2 Les mortiers de chaux	17
I-10-3 Les mortiers bâtards	17
I-10-4 Mortiers fabriqués sur chantier	17
I-10-5 Mortier industriel	18
I-11 Caractéristiques principales	18
I-12 Conclusion	18

CHAPITRE II : ADDITIONS MINERALES

II-1 Introduction	19
II-2 L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	19
II-3 Intérêt du point de vue technique	19
II-4 Intérêt du point de vue économique	19
II-5 Intérêt du point de vue environnemental	19
II-6 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux	20
II-7 Définition des ajouts cimentaires	20
II-8 Classification des ajouts minéraux	20
II-8-1 Principaux ajouts minéraux inertes	21
II-8-1-1 Fillers calcaires	21
II-8-1-2 Sable de dune	21
II-8-1-3 Le marbre	21
II-8-1-4 Le verre	24
II-8-2 Les ajouts minéraux actifs	26
II-8-2-1 La pouzzolane	26
II-8-2-2 La fumée de silice	27
II-8-2-3 Le laitier de haut fourneau	27
II-8-2-4 Les cendres volantes	28
II-8-2-5 La poussière	29
II-9 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons	30
II-9-1 Amélioration de l'ouvrabilité	30
II-9-2 Chaleur d'hydratation	30
II-9-3 Durabilité	30
II-9-4 Développement des résistances	30
II-9-5 Développement des bétons à haute résistance	31
II-10 Rôle des ajouts minéraux actifs	31
II-11 L'utilisation des ajouts en Algérie	31
II-12 Conclusion	31

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : METHODES D'ESSAI ET MATERIAUX UTILISES

III-1 Introduction	32
III-2 Matières Premières	32
III-2-1 Poudre de verre et poudre de marbre	32
III-2-2 Le clinker	32
III-2-2-1 Composition chimique et minéralogique du clinker	33
III-2-3 Le gypse	33
III-2-3-1 Composition chimique	33
III-3 Ciment	34
III-3-1 Caractéristiques du ciment CPJ-CEM II	34

III-3-1-1 Description	34
III-3-1-2 Analyses chimiques de ciment	34
III-3-1-3 Caractéristiques mécaniques et physiques du ciment	35
III-3-2 Essai sur ciment anhydre	35
III-3-2-1 Détermination de la densité de ciments	35
III-3-2-2 Surface Spécifique de Blaine	36
III-3-2-3 Détermination du Refus	38
III-3-3 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)	39
III-3-3-1 Essais de consistance normale	39
III-3-3-2 Essais de Temps de Prise	40
III-3-3-3 Expansion de Chatelier	41
III-4 Mortier	43
III-4-1 Formulation des mortiers normalisés	43
III-4-1-1 L'eau de gâchage	43
III-4-1-2 Sable normalisé (Norme EN 196-1	43
III-4-1-2-1 Caractéristiques	43
III-4-1-2-2 Contrôles	44
III-4-1-2-3 Conformité	44
III-4-1-2-4 Analyse granulométrique	44
III-4-2 Essai sur mortier	45
III-4-2-1 Mortier normalisé	45
III-4-2-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques	46
III-4-2-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal	47
III-4-2-4 Chaleur d'hydratation	48
III-5 Conclusion	54

CHAPITRE IV : RESULTATS ET ANALYSES

IV-1 Introduction	55
IV-2 Les résultats d'essai physiques	56
IV-2-1 Influence de poudre de verre et marbre sur densité préparés	56
IV-2-2 Influence de poudre de verre et marbre sur la surface spécifique du ciment préparés	57
IV-2-3 Influence de poudre de verre et marbre sur la pâte de ciment préparés	58
IV-2-3-1 Influence de poudre de verre et marbre sur la consistance normale	58
IV-2-3-2 Influence de poudre de verre et marbre sur le temps de prise	59
IV-2-3-3 Influence de poudre de verre et marbre sur l'expansion de Chatelier	60
IV-2-4 Influence de poudre de verre et marbre sur le mortier	61
IV-2-4-1 Résistances à la compression.	61
IV-2-4-2 Résistances à la flexion	62
IV-2-4-3 Effet de poudre de verre et marbre sur le retrait et le gonflement	63
IV-2-4-3-1 Retrait	63
IV-2-4-3-2 Gonflement	64

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I-1 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté l'alite est le composé majoritaire du clinker	05
Figure I-2 : Composition chimique du clinker	07
FigureII-1: Différents types d'ajouts cimentaires	20
Figure II.2: poudre de marbre	21
Figure II-3 :a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen.....	24
Figure II.4 :(a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO	25
Figure II-5 : Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na ₂ O	26
Figure II.6: pouzzolane naturelle	26
Figure II-7 : Fumée de silice	27
Figure II-8 : laitier de haut fourneau	27
	22
FigureIII.1 : malaxeur	39
FigureIII.2: Appareille Vicat	39
Figure III.3: Appareil Vicat	40
FigureIII.4:Bouilloire de Chatelier	42
Figure III.5 : Distillateur (Lafarge laboratoire)	43
Figure III.6 Analyse granulométrique du sable normalisé	45
Figure. III-7: Malaxeur semi-automatique de mortier	46
Figure. III-8: Table à vibrante (Laboratoire de Lafarge M'sila)	46
Figure. III-9: La Chambre d'humidité	46
Figure II-10: Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'sila)	46
Figure. III-11 : Machine de Compression (Laboratoire de Lafarge M'sila)	47
Figure. III-12 : Comparateur de Retrait (Laboratoire de Lafarge M'sila)	48
Figure. III-13 : Calorimètre Langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila)	53
Figure IV-1 : Variation de densité de ciment en fonction de poudre de verre et marbre	56
Figure IV-2 : Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de poudre de verre et marbre	57
Figure IV-3 : Variation de la consistance normale en fonction de poudre de verre et marbre	58
Figure IV-4 : Variation des temps de prises en fonction de poudre de verre et marbre	59
Figure IV-5 : Effet de poudre de verre et marbre sur l'expansion du ciment	60

Figure IV-6 : Effet de poudre de verre et marbre sur la résistance à la compression	61
Figure IV-7 : Effet de poudre de verre et marbre sur la résistance à la flexion	62
Figure IV-8 : Evolution du retrait du mortier en fonction de poudre de verre et marbre.	64
Figure IV-9 : Evolution du gonflement du mortier en fonction de poudre de verre et marbre.	65

Tableau I.1 : Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire	08
Tableau I.2 : Principales catégories de ciment	11
Tableau I.3 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants	11
Tableau II.1 : composition chimiques de la fumée de silice	21
Tableau II.2: Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	22
Tableau II.3 : composition chimiques de cendres volantes	22
Tableau III-1: Analyse chimique de la poudre de verre	35
Tableau III.2: Analyse chimique de la poudre de marbre	36
Tableau III.3 : caractéristiques physique du clinker	39
Tableau III.4 : Composition chimique et minéralogique du clinker	59
Tableau III.5 : Composition chimique du gypse	61
Tableau III.6 : Analyses chimiques de ciment	63
Tableau III.7 : Caractéristiques du CPJ	64
Tableau III-8: Analyse granulométrique du sable normalisé	64
Tableau III.9: les compositions du mortier	64
Tableau I.1 : Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire	66
Tableau I.2 : Principales catégories de ciment	9
Tableau I.3 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants	13
Tableau II.1 : composition chimiques de la fumée de silice	27
Tableau II.2: Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	28
Tableau II.3 : composition chimiques de cendres volantes	27
Tableau III-1: Analyse chimique de la poudre de verre	32
Tableau III.2: Analyse chimique de la poudre de marbre	32
Tableau III.3:Caractéristique physique du clinker	33
Tableau III.4 : composition chimique et minéralogique du clinker	33
Tableau II.5 :Composition chimique de gypse	34
Tableau III.6 : Analyses chimiques de ciment	34

Tableau III.7 : caractéristique du CPJ	35
Tableau III.8 : tamisage de sable normalisé	44
Tableau III.9 : analyse granulométrie du sable normalisé	44
Tableau III.10 :les composition de mortier	45



Résumé

Il est devenu le développement de nouveaux matériaux de construction, le problème du temps où les chercheurs essayant de trouver un matériel peu coûteux adaptés en ligne avec le domaine d'utilisation, l'utilisation de matériaux supplémentaires dans l'industrie du ciment continue d'augmenter et est souvent appelé sur ces matériaux ajouts métalliques, que nous obtenons à partir de sources naturelles ou des restes de matériaux industriels. De plus, l'utilisation conduit à une réduction de la consommation de clinker et de contribuer à résoudre les problèmes d'environnement d'une manière simple et économique. L'objectif principal de ce travail expérimental est d'étudier la proportion de poudre de verre et poudre de marbre sur le comportement physique et mécanique du ciment composite et de mortier. Les résultats obtenus montrent que la compensation partielle de verre de la poudre de ciment 5% donnent les meilleures valeurs.



Abstract

He became the development of new building materials, the problem of time where researchers trying to find an inexpensive equipment adapted in line with the field of use, the use of additional materials in the cement industry continues to increase and is often called on these metal additions materials we get from natural sources or remnants of industrial materials. In addition, the use leads to a reduction of clinker consumption and contribute to solving environmental problems in a simple and economical manner. The main objective of this experimental work is to study the proportion of powdered glass and marble dust on the physical and mechanical behavior of the composite cement and mortar. The obtained results the results obtained show that the partial compensation of glass cement powder 5% give the best values.



Introduction générale

Contexte générale de l'étude:

Le ciment est nécessaire à la fabrication du béton. En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental. La minimisation de l'élimination de ces résidus industriels et la diminution de la demande en ressources présente généralement une durée de vie plus longue que le béton « traditionnel »

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico- mécaniques demandées.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. Dans cette étude, on a utilisé deux sortes d'ajouts.

L'utilisation de la poudre de verre et poudre de marbre en remplacement du clinker présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets. Certains ajouts cimentaires finement broyés ont une influence plus au moins marquée sur les caractéristiques physico – mécaniques des liants en fonction de leur composition minéralogique, leur finesse et leur pourcentage. Nous traitons à partir de cette étude l'influence de l'addition de la poudre de verre sur le comportement physique et mécanique du ciment composé et du mortier.

Objectif de l'étude :

L'étude entreprise dans ce mémoire vise à atteindre un objectif principal suivant : valorisation du déchet du marbre additif dans la production du mortier.



Organisation du mémoire :

Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

Une introduction générale

Le premier chapitre :

Ce chapitre destiné à l'étude bibliographique.

Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ciments et les mortiers

Le deuxième chapitre :

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les additions minérales.

Le troisième chapitre :

Ce chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés (poudre de verre et marbre, clinker, gypse) et les méthodes d'essais réalisés sur les ciments préparés et mortiers.

Le quatrième chapitre :

Présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, dans la conclusion générale, on présente les principaux résultats dégagés lors de cette étude ainsi en terme d'expérimentation pour une meilleure utilisation de l'addition (ajout poudre de verre et marbre) pour la confection des ciments avec ajouts secondaires, ainsi que des perspectives relatives à ce sujet

Enfin une conclusion générale et quelques recommandations et perspectives.

CHAPITRE I : ciment et mortier

I-1 Introduction :

Le ciment est un matériau de base dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. Il est utilisé dans la fabrication du béton, qui est le deuxième matériau le plus utilisé sur la planète. C'est un matériau de construction durable, versatile et totalement recyclable.

Le ciment est fabriqué dans plus de 150 pays dans des centaines d'usines locales. Sa production progresse régulièrement depuis le début des années cinquante. Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement en particulier en Asie, qui s'est taillé la part du lion dans l'augmentation de la production mondiale de ciment pendant la dernière décennie. Cette augmentation de productivité est due à l'apparition d'unités de production de plus en plus grandes, à la mise en œuvre de la conduite automatique des procédés et à l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus qualifié requis par cette automatisation.

Les marchés du ciment sont avant tout locaux. Il existe cependant un commerce mondial et dans certains cas l'expédition internationale de ciment est économiquement viable. La concurrence internationale est surtout une menace pour les usines au niveau individuel. Ce chapitre est construit autour du fil conducteur de la production cimentière. Il présente les techniques et les procédés dont sont issues les ciments, après avoir connu les matières utilisées pour la fabrication de ce liant hydraulique, et ses types.

I-2 Aperçu historique :

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la "chaux éteinte" (Ca(OH)_2) et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice.

L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation et les secrets de fabrication de ce matériau se sont ensuite perdus à la chute de l'Empire face au retour de la maçonnerie en pierre. [1]

J. Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le

mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. J. Apsdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Mais la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, moulable avec une bonne résistance à la compression et qui rend inutile la taille de la pierre. [2]

I-3 Définition d'un ciment :

Le ciment est un liant hydraulique. C'est un matériau anhydre finement broyé qui, par simple mélange avec l'eau, développe des hydrates dont l'imbrication rigidifie le matériau granulaire non cohésif de départ en matériau cohésif présentant des propriétés mécaniques élevées.

D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être définie comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO₂, noté S, AL₂O₃, noté A, ou Fe₂O₃, noté F, en notation cimentaire. [3]

Il existe deux grandes familles de Ciments :

1. Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui utilisée principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil ;
2. Les ciments alumineux qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont développés au début du 20^{ème} siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière. [4]

I-4 les différents ajouts incorporés au ciment :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire ;
- du laitier de haut fourneau ;
- des cendres volantes ;
- des fines calcaires ;
- de la pouzzolane naturelle ;
- des schistes calcinés ;
- des fumées de silice ;

Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. [5]

I-5 Procèdes et techniques de fabrication du ciment :

La production du ciment dans l'Union européenne est environ 10,5 % de la production mondiale. En 2008, on dénombrait dans l'Union européenne 268 installations produisant du clinker et du ciment fini, regroupant 377 fours au total. On recensait également 90 usines de broyage (broyeurs à ciment) et deux installations de production de clinker sans broyeur. En règle générale, les fours ont une capacité d'environ 3 000 tonnes de clinker/jour.

La production du ciment en Algérie est d'environ 18 millions de tonnes /an. Le pays compte 15 installations de cimenteries, 12 publiques et 3 privées (Lafargeholcim), réparties à travers le nord du territoire.

Le ciment portland est constitué principalement de clinker. Ce dernier est obtenu par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) : l'argile ou le kaolin. Le cru est ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker. [6]

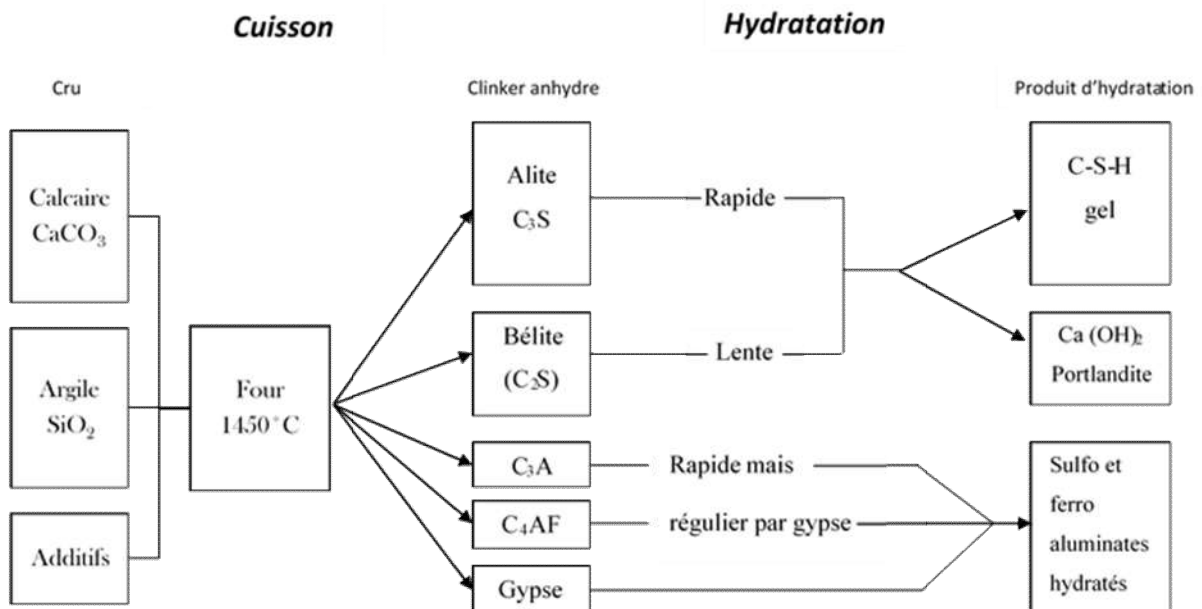


Figure I-1 : Le ciment Portland, du cru au ciment hydraté l'alite est le composé majoritaire du clinker [7]

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide ;

- Dans le **procédé par voie sèche**, la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

- Dans le **procédé par voie semi-sèche**, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.

- Dans le **procédé par voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

- Dans le **procédé par voie humide**, La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1er choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche.

I-6 Constituants principaux du ciment et les additions :

I-6-1 Le clinker :

Produit obtenue par mélange de matières premières naturelles de composition chimique adéquate. La préparation du cru consiste à mélanger de manière homogène du calcaire (80%) et des minéraux riches en silice et alumine (20%) : l'argile ou le kaolin .le cru et ensuite calciné à 1450°C pour former le clinker.

Les granules de clinker, d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm, sont finement broyées avec addition de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ de 3 à 5 % en masse) dont le rôle est de réguler la prise. [6]

I-6-1-1 La composition chimique :

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃), représentant environ 95% en masse.

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau suivant :

Composants du clinker	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Notations cimentière	S	A	F	C	M	S	K	N
% (en masse)	19-25	2-9	1-5	62-67	0-3	1-3	0.6	0.6

Tableau I-1 : Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire [3]

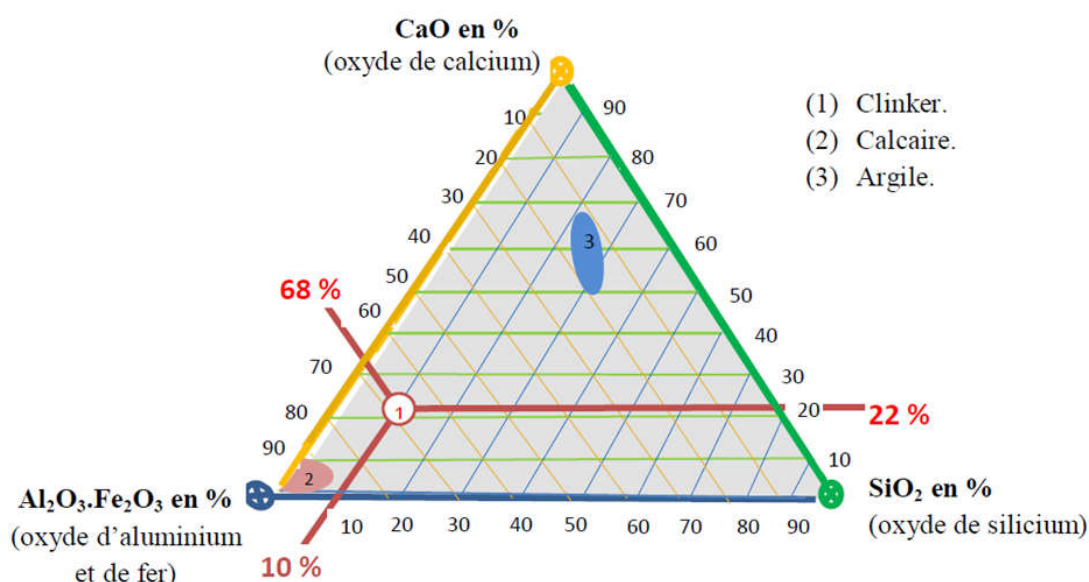


Figure I-2 : Composition chimique du clinker.

I-6-1-2 La Composition minéralogique :

Divers composés chimiques se forment, dont les principaux sont :

- Le silicate tricalcique C₃S (alite) : 3CaO, SiO₂ [45 à 65 %] ;
- Le silicate bicalcique C₂S (bélite) : 2CaO, SiO₂ [10 à 30 %] ;
- L'aluminate tricalcique C₃A (célite) : 3CaO, Al₂O₃ [5 à 15 %] ;
- L'alumino-ferrite tétracalcique C₄AF (Aluminoferrite) : 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ [5 à 15 %].

I-6-2 Les ajouts minéraux :

Ces ajouts jouent le rôle suivant d'après leur composition ; ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant du clinker.

I-7 Catégories des ciments :

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

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier - pouzzolanes - cendres -calcaires - schistes - fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland composé	80 à 94 %	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	36 h 55 % comme ci-dessus.	0 à 5 %

CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus.	0 à 5 %
(*) Le pourcentage de fillers est limité à 5%.				

Tableau I-2 : Principales catégories de ciment

I-8 Caractéristiques du ciment :

I-8-1 Caractéristiques physico-chimiques :

Comme cela a été étudié précédemment, le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C_3S ;
- Silicate bicalcique : C_2S ;
- Aluminate tricalcique : C_3A ;
- Ferro-Aluminate tetracalcique : C_4AF .

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydrates avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise.

I-8-1-1 Indice d'hydraulicité :

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique :

$$I = \frac{\text{Fraction acide}}{\text{Fraction basique}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice d'hydraulicité est plus élevé :

- quand $I > 0,5$, le ciment est dit basique (Portland) ;
- quand $I < 0,5$, le ciment est dit neutre (riche en laitier) ;
- quand $I \neq 1$, le ciment est dit acide (conventionnellement), ce sont ceux qui font prise en mettant en liberté non de la chaux mais de l'alumine (ciment alumineux).

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$1,40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1,45$$
$$0,45 < \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 0,50$$

I-8-1-2 Prise :

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- le type du ciment, certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- la finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande ;
- la température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C ;
- la présence de matières organiques dans l'eau ;
- l'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1 h 30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5 R ;
- 1 h pour les ciments des classes 42,5 - 42,5 R - 52,5 - 52,5 R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20 °C.

I-8-1-3 Durcissement :

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R » c'est à dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide », Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance.

I-8-1-4 Fausse prise :

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau : $\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [$\text{SO}_4\text{Ca}, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$] dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

I-8-1-5 Chaleur d'hydratation :

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C_3A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 J/g par exemple pour certains CHF-CEM I/B et 300 J/g pour certains CPA-CEM I.

La finesse de mouture a également une action sur l'exothermie.

I-8-1-6 Finesse de mouture :

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en m^2/kg , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1 kg de ciment.

Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (pour mémoire rappelons que la finesse s'exprimait auparavant en cm^2/g et que de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi ; il ressort qu'une finesse de 300 m^2/kg correspond à 3000 cm^2/g). Certains ciments tels les ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieur à 450 m^2/kg .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du ciment sont accrus.

I-8-1-7 Retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4 cm. conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %.

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments Portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32.5 ;
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identiques mais des classes 32.5 R, 42.5 et 42.5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment (la proportion de certains constituants a une action défavorable sur la valeur totale du retrait) ;
- La finesse de mouture ;
- Le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;
- La propreté et la nature des granulats ;
- La protection après coulage.

Il est parfois utile d'avoir une estimation de la grandeur du retrait du béton, le ciment n'étant pratiquement jamais utilisé pur. À défaut de mesures au cas par cas, le BAEL 91 indique, en fonction des conditions climatiques, les valeurs suivantes dans le cas de pièces non massives, à l'air libre, comportant un pourcentage moyen d'armatures :

- $1,5 \times 10^{-4}$ dans les climats très humides ;
- 2×10^{-4} en climat humide ;
- 3×10^{-4} en climat tempéré sec ;
- 4×10^{-4} en climat chaud et sec ;
- 5×10^{-4} en climat très sec ou désertique.

I-8-1-8 Expansion :

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libres.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment à tester, et conservé dans de l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les CPA-CHM I ainsi que pour le clinker.

I-8-2 Exigences chimiques :

Les exigences les plus importantes à respecter sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale (%)
Perte au feu	CPA-CEM I	Toutes les classes	< 5
	CHF-CEM III		
	CLK-CEM III		
MgO	CPA-CEM I	Toutes les classes	< 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I	Toutes les classes	< 5
	CHF-CEM III		
	CLK-CEM III		
	CPA-CEM I	32.5	< 3.5
	Et	32.5R	
	CPJ-CEM II (*)	42.5	
SO ₃	CPZ-CEMIV	42.5	< 4
	Et	52.5	
	CLC-CEM V	52.5R	
Chlorures	CHF-CEM III	Toutes les classes	< 0.05
	Tous les types de ciment (**)	52.5R	
		Toutes les autres classes	

Tableau I.3: Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques des ciments courants.

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

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

I-9 Mortier

I-9-1 Introduction

Les mortiers sont présents dans tous les secteurs d'activité du bâtiment et des Travaux publics.

A chaque domaine d'application correspond un type de mortier pouvant être dédié à :

- la protection et la décoration (sous-enduits, enduits de parement colorés, enduits monocouche),
- la pose des carrelages (mortier colles et mortier des joints),
- la préparation des sols (chapes, ragréages, enduits de lissage, d'égalisation),
- les assemblages (élément de maçonnerie, fixation des éléments de cloisons et de doublage),
- l'isolation et l'étanchéité (système d'isolation thermique par l'extérieur, d'imperméabilisation, d'étanchéité, d'isolation phonique, d'ignifugation),
- les travaux spéciaux (gunitage, épations d'ouvrage d'art et de génie civil, scellement et calages, coulis d'injection, cuvelages). [5]

I-9-2 Définition :

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier 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.

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être:

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs préposés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers. [5]

I-9-3 Le rôle d'utilisation de mortier:

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels : [5]

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.

- Sous forme d'enduits aériens.
- Sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure, un pour dallages en béton.
- Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux et divers éléments moulés.
- Etre le constituant essentiel du béton
- Consolide certains sols de fondations sous forme d'injection.

I-9-4 Les caractéristiques de mortier :

Elles sont nombreuses .A savoir : [5]

- Résister à l'écrasement en répartissant régulièrement les pressions ;
- Etre compact : pour éviter l'infiltration des eaux dans les ouvrages, et accroître la résistance mécanique ;
- Etre imperméable: pour obtenir un maximum d'étanchéité des joints de maçonnerie, et des enduits ;
- Adhérer aux matériaux: pour mieux transmettre les charges, ou créer un écran durable contre les intempéries;
- Conserver un volume constant pendant la prise et le durcissement pour éviter les tassements ou les dislocations des ouvrage;
- Résister aux agents agressifs d'une atmosphère ou d'un sol pollués ;
- Etre ouvrable, afin que l'exécutant puisse le mettre en place dans les meilleures conditions;
- Conserver toutes ses qualités, et notamment la permanence de la résistance.

De quoi dépendront tous ces qualités ?des constituants:

- de leur nature;
- de leur dosage.

I-9-5 Composition

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

Les mortiers sont constitués par des mélanges de: [5]

- liant (ciment ou chaux);
- eau;
- sable;
- adjuvants.

I-9-5-1 Les liants:

Généralement, on peut utiliser: [5]

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..);
- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes.

I-9-5-2 Les sables:

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs; spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
- sable de laitier;
- sable d'oxydes de fer, de chromite;
- corindon;
- sable de briques concassées;
- liège torréfié;
- polystyrène expansé;
- vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm. [5]

I-9-5-3 Les adjuvants:

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre. [5]

I-9-5-4 Les ajouts:

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont: [5]

- poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);
- Polymers.

I-10 Les différents mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier: [5]

I-10-1 Les mortiers de ciment : Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

I-10-2 Les mortiers de chaux : 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.

I-10-3 Les mortiers bâtards : Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

I-10-4 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.

I-10-5 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 jointoiment;
- mortier de ragréage;
- mortier de scellement, mortier pour chapes;
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc...
- mortier de réparation.

I-11 Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des mortiers sont:[5]

- ouvrabilité;
- prise;
- résistances mécaniques;
- retraites et gonflements, etc.

I-12 Conclusion :

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

Conclusion générale

L'incorporation d'une grande quantité d'ajout au ciment et les mortiers est très importante du point de vue économique. De plus l'ajout de filler marbre et verre est matières inerte qui ne modifient pas grandement les performances mécaniques de ciment de base.

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

- L'influence de la finesse des ciments aux ajouts cimentaire (poudre de verre et marbre) sur les propriétés physique et mécanique des matériaux (ciment, mortier) diffère d'un ciment à un autre (type et nature de l'ajout minérale).
- La diminution de la finesse (surface spécifique) des ciments composés influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- Le temps de début et la fin de prise augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse des ciments composés.
- La résistance à la traction par flexion et la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout poudre de verre et marbre.

Perspectives :

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- Etude des mortiers avec l'incorporation des ajouts minéraux inertes (calcaires) et actifs (Pouzzolane – Laitier de haut fourneau, fumé de silice) au ciment CPJ type (ELMATINE)
- Elargir l'étude de la durabilité des mortiers avec ajouts.

-
-
- [1] **D.Platel**, "impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physicochimiques des coulis de ciment", thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie, Physique et Chimie des Matériaux, 2004.
- [2] **D.Trembley** "Béton de ciment", Modulo Editeur, 1983.
- [3] **H.F.W. Taylor**, "Cement chemistry", 2nd edition, University of Aberdeen, 2007.
- [4] **J.M.Auvray**, "Elaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaire à base d'alumine Spinelle" thèse de doctorat, université de Limoges Science et technologie de santé 2003.
- [5] **Jean FESTA**, Georges DREUX, nouveau guide du béton et ses constituants, 8ème édition, EYROLLES, 2007.
- [6] **A, Govin**, "Aspects Physico -Chimique de l'interaction bois-ciment modification de l'hydratation du ciment par le bois" thèse de Doctorat de l'université de Limoges, 2004.
- [7] **M.N. Noirfontaine**, "Étude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment anhydre : le silicate tricalcique" thèse de doctorat, école polytechniques, 2000.
- [8] **Cembureau**, 1997. Procédés et techniques de fabrication du ciment. Bruxelles, Belgique, Available from: URL: www.ciments-calcia.fr
- [9] **Defossé, C**, 2004. Chimie du ciment –valorisation des déchets en cimenterie. Laboratoire de chimie industrielle, FDSA, Université Libre de Bruxelles.
- [10] **Mouss, Dj**, 2005. Modélisation et simulation d'un procédés industriel par approche à base de connaissance - cas de SCIMAT, Ain Touta. Département de génie industriel, Batna.
- [11] **Bogue, R.-H**, 1952. La chimie du ciment portland.
- [12] **NF EN 197-1 (P15-101-1)** : Ciment-partie1 : composition, spécifications et critères de conformité de ciment courants.
- [13] **Rompaey, G. V.** (2006), Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloré. 372 pp, ULB, Bruxelles.
- [14] **Signes-Frehel, M, Maes P., Haehnel, C.**, 1996. Etude des phases d'un clinker par diffractométrie des rayons X - vers la quantification. Centre Technique, Groupe Italcementi-Cements, Volume 6. Guerville, France. available at <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1996414>
- [15] **Senisna Zoubida**, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux (thèse de Master), Université KasdiMerbah – Ouargla, Année universitaire 2010/2011.