



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

effet de l'activation mécanique de l'argile cuite
(déchets de briques) sur le comportement
mécanique du mortier

**Dirigé par :
Mr. Benyahia Abdeslam**

**Présenté par :
Aissa Salem**

Promotion : 2016/2017.



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

effet de l'activation mécanique de l'argile cuite
(déchets de briques) sur le comportement
mécanique du mortier

**Dirigé par :
Mr. Benyahia Abdeslam**

**Présenté par :
Aissa Salem**

Promotion : 2016/2017.

REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée au sein du département de Génie Civil de l'Université «Mohamed Boudiaf » de M'sila.

Nous tenons à remercier :

Monsieur le **Dr. Benyahia Abdeslam** Enseignant à l'Université de M'sila, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail de recherche.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à :

Monsieur Boubakri Mohamed , Chargé des essais physiques.

Monsieurs :

Haddad Naoui ; Dahmani Bachir

Ainsi que tous les personnes du laboratoire de L'Usine Lafarge M'sila.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Résumé

Abstract

Introduction.....	1
Contexte générale de l'étude.....	1
Objectifs de l'étude	2
Méthodologie du travail.....	2

PREMIER CHAPITRE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Le ciment et les ajouts minéraux

1ère partie : le ciment

I-1 Introduction.....	3
I-2 Historique	3
I-3 Principe de fabrication ciment portland.....	4
I-4 Constituants principaux du ciment et les additions.....	7
I-5 Principales Catégories de Ciments.....	9
I-6 Les Constituants anhydres du ciment (CPA).....	10
I-7 Hydratation du ciment Portland.....	14
I-8 Les caractéristiques du ciment portland.....	17

2ème partie : Les ajouts minéraux

I-9 Généralités	25
I-10 Classification des ajouts minéraux	25
I-10-1 Les ajouts minéraux actifs.....	26
I-10-1-1 La pouzzolane.....	26
I-10-1-2 Fumée de silice.....	27
I-10-1-3 Le laitier de haut fourneau.....	28
I-10-1-4 Les cendres volantes.....	31
I-10-1-5 les déchet de brique	32
I-10-2 Principaux ajouts minéraux inertes.....	33
I-10-2-1 La poussière.....	33
I-10-2-2 Fillers calcaire.....	33
I-11 Conclusion.....	34

DEUXIEME CHAPITRE

ARGILE CUITE ET VALORISATION DES DECHET

II-1-Histoire.....	35
II-2- les argiles.....	37
II- 2 -1 les grandes familles de minéraux argileux	38
II-2 -2 classification et nomenclature des minéraux argileux.....	39
II-2 -3 Argile calciné.....	39
II- 2 -4 Domaine d'utilisation.....	41
II- 2 -5 rôle de l'argile calcinée	42
II- 2 -6 réactivités pouzzolanique des argiles calcinées.....	42
II-3 Introduction.....	43
II-3-1 Brique de terre cuite.....	43
II-4 La valorisation des déchets.....	46
II-5 La valorisation matière	47
II-6 La valorisation énergétique.....	47
II-7Valorisation des déchets en Algérie.....	47

TROISIEME CHAPITRE Expérimentation

III -1 Matières Premières.....	50
III -1-1 les déchet de brique.....	50
III -2 Le clinker.....	51
III -3 Le gypse.....	52
III -4 Formulation des Ciments.....	52
III -5 Formulation des mortiers normalisés	54
III -6 Mesures expérimentales.....	54
III -6-1 Essai sur ciment anhydre.....	54
III -6-1-1 Masse volumique absolue.....	54
III -6-1-2 Mesure de la finesse du ciment.....	55
III -6-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine).....	57
III -7 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment).....	59
III -7-1Essai De Consistance	59
III -7-2 Essai de Prise.....	60
III -7-3 Essai de stabilité	61
III -8Essai sur mortier.....	62
III -8-1 Mortier normalisé	62
III -8-2Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques...	63
III -8-3Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal.....	65
III -8-4Mesure de La Maniabilimètre de Mortier	67
III -8-5La Chaleur d'hydratation : (La méthode semi adiabatique).....	68

QUATERMET CHAPITRE RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

IV -1 Introduction.....	73
IV -2 Influence du Taux de déchet de brique Sur le Poids Spécifique du Ciment .	73
IV -3 Influence du Taux de déchet de brique Sur la Surface Spécifique du Ciment	74
IV -4 Influence du Taux de déchet de brique Sur la Pâte de Ciment	75
IV-4-1 Influence du taux d'ajout de déchet de brique Sur la consistance normale	75
IV -4-2 Influence du Taux d'ajout de déchet de brique sur le Temps de Prise	77
IV -4-3 Influence du Taux d'ajout de déchet de brique sur la Stabilité du Ciment	78
IV -5 Influence du Taux de déchet de brique sur Le Mortier à base de sable Normalisé	79
IV -5-1 Résistance à la compression.....	79
IV -6 Effet du Taux de déchet de brique (effet chimique) sur le retrait et le gonflement	81
IV -7 Effet du Taux de déchet de brique (effet chimique) sur La Chaleur d'hydratation.....	83
IV -7-1 Effet du Chaleur d'hydratation sur le Temps de Prise.....	84
IV -8Granulométrie à Méthode Alpine.....	86
IV -9 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques.....	87
IV -10 Granulométrie A LASER	88
Conclusion Générale	90
Annexe	
Bibliographie	

--	--

Liste des tableaux :

Tableau 1-1 Principales catégories de ciment	10
Tableau 1-2 Composition chimique du clinker	11
Tableau 1-3 Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE	13
Tableau 1-4 Compositions minéralogiques moyennes des clinkers	14
Tableau 1-5 Microstructure élémentaire des quatre minéraux	14
Tableau 1-6 Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker...	24
Tableau 1-7 Composition chimique type de certaines fumées de silice	28
Tableau I.8. la composition chimique moyenne du laitier.....	30
Tableau 1-9 Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	31
Tableau 1-10 Composition chimique type de certaines cendres volantes	32
Tableau 1-11 Composition minéralogique de déchets de briques.....	33
Tableau 2-1 la Résistance thermique des Briques creuses	45
Tableau 2-2 propriétés des briques pleines et perforés	45
Tableau 2-3 la Résistance thermique des briques pleines et perforés	45
Tableau 3-1 Composition chimique déchets de briques.....	50
Tableau 3-2 Principaux constituants du cru de clinker.	51
Tableau 3-3 Composition chimique et minéralogique du clinker.	52
Tableau 3-4 Modules caractéristiques du clinker.	52
Tableau 3-5 Composition chimique du gypse.....	52
Tableau 3-6 Compositions pondérales des dis (10) ciments préparés.....	53
Tableau 3-7 Composition chimique des ciments préparés.	53
Tableau 3-8 Masse volumique absolue des ciments.....	55
Tableau 3-9 SSB de défèrent ciment préparé.....	57
Tableau 3-10 Caractéristiques de la granulométrie(Refus 45& 90µm) des différents ciments	59
Tableau 3-11 Composition des mortiers	63
Tableau 4-1 Poids spécifique des ciments préparés.....	73
Tableau 4-2 Surface spécifique des ciments préparés.....	75
Tableau 4-3 Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).....	76
Tableau 4-4 Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).....	77
Tableau 4-5 Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).....	78
Tableau 4-6 Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout de déchets de Briques (sable normalisé).....	80
Tableau 4-7 Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques)...	81
Tableau 4-8 Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques).	82

Tableau 4-9 La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques).....	84
Tableau 4-10 Chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.....	85
Tableau 4-11 Chaleur d'hydratation en fonction du fin de prise.....	86
Tableau 4-12 Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).	87
Tableau 4-13 Caractéristiques de la granulométrie des différents ciments – déchet de briques.....	89

Liste des figures :

Figure 1-1 Fabrication du ciment.....	4
Figure 1-2 Le schéma de la fabrication du ciment.....	5
Figure 1-3 Fabrication du ciment par voie sèche.....	7
Figure 1-4 Fractographie de granules de clinker industriel broyé.....	8
Figure 1-5 Image de clinker en microscope optique (section polie)	12
Figure 1-6 C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O).....	16
Figure 1-7 Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton	16
Figure 1-8 Détermination du temps de début de prise.....	17
Figure 1-9 Détermination du temps de fin de prise.....	18
Figure 1-10 Evolution du temps de prise en fonction de la température.....	18
Figure 1-11 Influence de la température sur la prise des ciments.....	19
Figure 1-12 Influence du E/C sur le temps de prise.....	19
Figure 1-13 Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA	20
Figure 1-14 L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.....	21
Figure 1-15 Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression	22
Figure 1-16 Principe de fonctionnement de Perméabilimètre de Blaine.....	22
Figure 1-17 Influence du E/C sur le retrait plastique des mortier.....	23
Figure 1-18 Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.....	24
Figure 1-19 Résistance du mortier normal.....	25
Figure 1-20. Laitier.....	28
Figure 2-1 constitution d'un tétraèdre et d'un octaèdre.....	38
Figure 2-2. Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type 1:1 (groupe de kaolinite $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).....	38
Figure 2-3 gisement d'argile de B .Amer à Ouargla.....	43
Figure 2-4 Fabrication des produits de terre cuite.....	44
Figure 2-5 Brique pleine et perforée et Brique.....	46
Figure 3-1. Minéralogie (spectre de diffraction des rayons X) de l'argile calcinée.....	51

Figure 3-2 Distillateur (Lafarge laboratoire).....	54
Figure 3-3Flasque Le Chatelier.....	55
Figure 3-4 Le Densimètre de Le Chatelier.....	57
Figure 3-5 Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila)	57
Figure 3-6 Appareil de Vicat manuel.....	60
Figure 3-7 L' appareil de Vicat.....	60
Figure 3-8 les Aiguillé de chatelier	62
Figure 3-9 Le bouilloire de Chatelier.....	62
Figure 3-10 Malaxeur semi-automatique de mortier (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	63
Figure 3-11 Eprouvette Prismatique (4x4x16)cm ³ (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	63
Figure 3-12 Table Vibrante (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	64
Figure 3-13 Table à Choc (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	64
Figure 3-14 La Chambre d'humidité (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	64
Figure 3-15 Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'sila).....	64
Figure 3-16 Machine de Compression (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	65
Figure 3-17 Moules (4x4x16) cm ³ Équipés de plots de Retrait	66
Figure 3-18 Comparateur de Retrait (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	66
Figure 3-19 Maniabilimètre à Mortier (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	68
Figure 3-20 Calorimètre Langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	71
Figure 3-21 Sable Normalisé (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	72
Figure 3-22 Caractéristiques du calorimètre (Laboratoire de Lafarge M'sila).....	72
Figure 4-1 Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (déchets de briques).....	74
Figure 4-2 Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout de (déchets de Briques).....	75
Figure 4-3 Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux d'ajout de (déchets de Briques).....	77
Figure 4-4 Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout de (déchets de Briques).	78
Figure 4-5 Effet du taux d'ajout de déchets de Briques sur l'expansion du ciment.....	79
Figure 4-6 Effet du Taux d'ajout de déchets de Briques sur la Résistance à la compression....	80
Figure 4-7 Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout déchets de Briques	82
Figure 4-8 Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques)	83
Figure 4-9 Effet du taux d'ajout de déchets de Brique sur la chaleur d'hydratation.....	84
Figure 4-10 Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.....	85
Figure 4-11 Effet chaleur d'hydratation en fonction du fin de prise	86
Figure 4-12 Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE).....	88

Figure 4-13 Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE)...	88
Figure 4-14. Courbes granulométriques des grains de ciment (courbe de fréquence).....	89



effet de l'activation mécanique de l'argile cuite sur le comportement mécanique du mortier

Résumé :

Les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout argile cuite dans le ciment.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout argile cuite : [0%, 5%, 10%, 15%, 20] dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout argile cuite dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par argile cuite).

Afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout argile cuite et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.



ملخص

إن تدعيم استعمال الإضافات الإسمنتية هي حاليا جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الاسمنت ، (مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية (المونة والخرسانة وعلاوة على ذلك ، إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية).

الغرض من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية طريقة الاستبدال الجزئي للاسمنت بمادة الطين المحروق المضافة في المونة.

تهتم هذه الدراسة التجريبية إلى تحضير اسمنت ذو إضافات معدنية باستبدال نسبة مئوية معينة من مادة الكلنكر بمادة الطين المحروق : (0 % ، 5 % ، 10 % ، 15 % ، 20 %) .

لقد قمنا في هذه الدراسة بتغيير نسبة مادة الطين المحروق في الاسمنت باستعمال طريقة الاستبدال (التغيير الجزئي لمادة الكلنكر بمادة الطين المحروق)

لدراسة أثره على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة وكذلك المقاومة الميكانيكية للمونة .

إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة والمبللة (التركيب الكيميائي ، زمن السحق ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية ، وزمن الشك) وكذلك مميزات المونة في الحالة الصلدة ، منها التقلص الانتفاخ ، والمقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) ، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي .

ووفقا لنتائج التجارب التي حصل عليها ، يتبين لنا أن كمية مادة الطين المحروق المضاف والتركيب الكيميائي للاسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) للمونة المختبر



Abstract :

The supplementary cementitious materials are currently part of the latest developments in the production of cement, resulting in a significant improvement to the mechanical performances of cementitious materials (mortar).

For ther more, to the existed that it leads to a reduction in cement consumption, the use of additions contributes to solving environmental problems in a simple and economic manner.

This experimental work presents a study of the advantages and the possibility of the partial replacement of cement by calcined clay admixture in mortar.

This experimental study consists to make the cement with mineral admixture while replacing a certain percentage of clinker by calcined clay admixture :
(0%, 5%, 10%, 15% ,20).

In this study, we varied the percentage of the limestone admixture in cement by the substitution method (partial replacement of the clinker by the calcined clay) to study its effect on the physico-chemical properties of cement manufactured with mineral addition and mortar mechanical behavior.

The physico-chemical properties of cement at anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, grinding time, specific weight, fineness, particle size distribution, consistency of the cement paste, setting times, shrinkage and expansion), thus the characteristics of the mortars made at their bases, such as, the mechanical behavior (flexural and compressive strengths) for the mortar were studied.

According to the experimental results obtained, it comes that the quantity of mineral additive (calcined clay) and the chemical composition of cement manufactured are the principal parameters who influence on the variation of the mechanical strengths (flexural and compressive) of the mortars tested.

INTRODUCTION

1. CONTEXTE

Les ajouts pouzzolaniques de remplacement d'origine minérale sont largement exploités pour la fabrication des ciments aux additions minérales dans le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. La réduction de la proportion du clinker dans la fabrication du ciment avec ajout minérale présente les avantages suivants :

- élimination et valorisation d'un déchet industriel (sous produit),
- réduction de la consommation thermique,
- réduction des émissions de CO₂.

Les émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment proviennent de différentes sources :

- CO₂ matière provenant de la décarbonatation (52%) du calcaire (CaCO₃),
- CO₂ thermique (48%) provenant de la combustion lors de la cuisson.

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les principales pouzzolanes sont : les matériaux volcaniques (cendre, scorie . . .), les cendres des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux et les déchets de briques et tuiles cuites (argile calcinée). La chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker réagit avec le matériau pouzzolanique à l'intérieur du matériau cimentaire pour former des nouveaux composés qui participent aux résistances mécaniques du mortier ou du béton.

L'utilisation des sous-produits comme matériau de substitution (remplacement partiel de ciment) a les avantages économiques, environnementaux et techniques importants tels que : la réduction de la quantité de déchets, rendre l'environnement plus propre, réduire le besoin en énergie et amélioration des propriétés des matériaux cimentaires (mortier et béton).

2. OBJECTIFS

L'objectif principal de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence de l'ajout pouzzolanique (déchets de brique cuite) sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments confectionnés ainsi que la résistance mécanique et la microstructure du mortier testé. Cette recherche consiste à faire varier le pourcentage de l'ajout pouzzolanique dans le ciment (effet chimique) par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par l'ajout pouzzolanique d'origine minérale).

Ce travail vise à examiner l'influence de l'ajout pouzzolanique sur la réactivité (cinétique d'hydratation) des ciments préparés à leurs bases ainsi que la réponse mécanique et des mortiers confectionnés à base des ciments aux ajouts minéraux. Ceci dans le but d'améliorer la degré d'hydratation (prise et le durcissement) des ciments aux ajouts minéraux et d'augmenter le taux d'incorporation de l'ajout pouzzolanique dans le ciment pour une meilleure utilisation des additions pouzzolaniques dans l'industrie cimentière.

Cette recherche a pour but d'analyse des propriétés physiques et chimiques de l'ajout pouzzolanique et des ciments préparés à l'état anhydre et à l'état hydraté (composition chimique, poids spécifique, distribution des particules, finesse, consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques des mortiers confectionnés à base de ciments aux ajouts minéraux, telles que, le retrait, le gonflement, la microstructure et les réponses mécaniques des mortiers testés.

3. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Le manuscrit s'articule autour des points suivants :

Le(premier et deuxième chapitre) de ce travail est destiné à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ciment, les ajouts minéraux et les argiles cuité

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés (déchets d'argile cuite, 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 que les futures perspectives en terme d'expérimentation pour une meilleure utilisation de l'addition minérale (ajout pouzzolanique) pour la confection des ciments avec ajouts secondaires.

Chapitre I : Le ciment et les ajouts minéraux

1ère partie : le ciment

I-1 Introduction :

Le ciment (du latin *caementum* , signifiant moellon, pierre de construction) est une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, pour produire du mortier, ou des graviers (granulats), pour produire du béton. Le mot « ciment » peut désigner différents matériaux comme :

Le plâtre

La chaux commune,

La pouzzolane naturelle

Le ciment prompt,

Le ciment Portland ou ciment artificiel

Un ciment artificiel est un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels (de la main de l'homme) de silice, d'alumine, de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau n'a aucune action, ou qu'une action très lente avant la trituration, et qui, réduits en poudre mécaniquement, font prise sous l'action de l'eau, dans un délai qui varie selon leur proportion.

I-2 Historique :

Le ciment aurait été inventé par les Égyptiens et a été amélioré par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, dans la région de Naples, en Italie) est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840. La recherche sur l'hydraulicité des chaux débuta à la fin du XVIIIe siècle pour aboutir vers 1840, à la fabrication des ciments modernes. Elle concernait les chaux grasses, non hydrauliques, qui ne durcissent pas sous l'eau, les chaux hydrauliques qui durcissent même sous l'eau, les chaux éminemment hydrauliques (riches en argiles) qui se solidifient très rapidement, et les chaux limites (trop riches en argiles) qui se solidifient très rapidement puis se décomposent, si elles ne sont pas cuites au degré de fusion pâteuse. En 1796, James Parker découvrit sur l'Île de Sheppey, en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900 °C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptisa commercialement ciment romain. Ce ciment acquit par la suite, de 1820 à 1920 environ, une grande réputation. Il fut fabriqué dans toute l'Europe et servait à faire des moulages au gabarit, ou à fabriquer des pierres artificielles de ciment moulé. Au début du XIXe siècle, toute l'Europe s'active, la France surtout, pour ne rien devoir aux Britanniques ni à la pouzzolane italienne. Et le Français Louis Vicat découvrit en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux - concernant la proportion d'argile et la température de cuisson - et publia ses travaux sans prendre

de brevet. En 1824, le Britannique Joseph Aspdin déposa un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appela commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemblait aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche. C'est un ciment similaire à ceux que décrit Vicat, encore que son brevet soit imprécis. Mais il fallut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits aujourd'hui ciments Portland) toujours par Louis Vicat (société Vicat) - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit $1\,450\text{ °C}$ qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé. La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870, à environ trois minutes actuellement.

I-3 Principe de fabrication ciment portland:

La fabrication de ciment se réduit schématiquement (voir figure 1.1) aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru.
- cuisson.
- broyage et conditionnement.

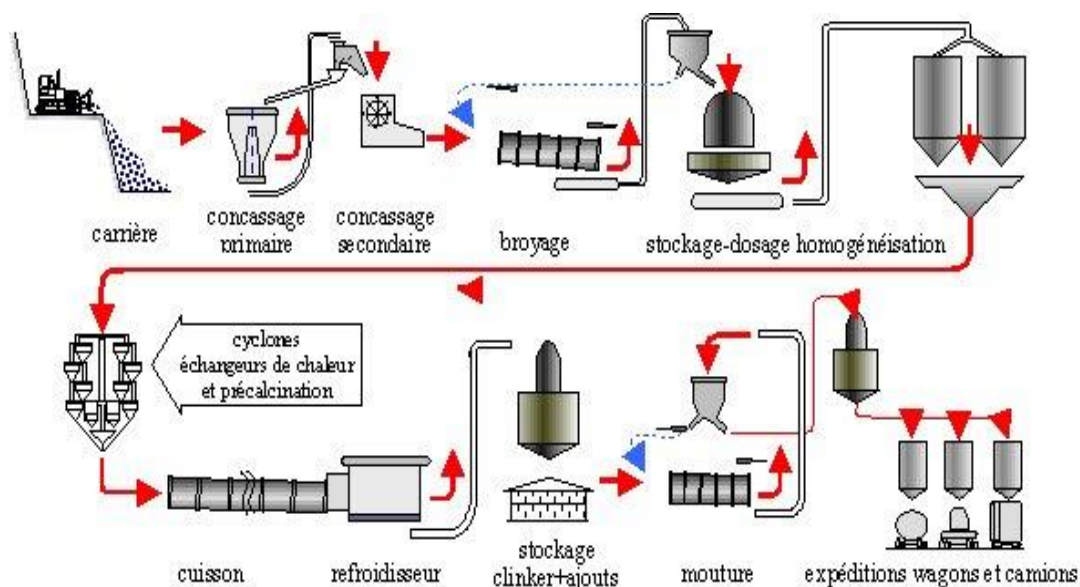


Figure 1-1 Fabrication du ciment.

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment (voir figure 1.1) qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).

- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

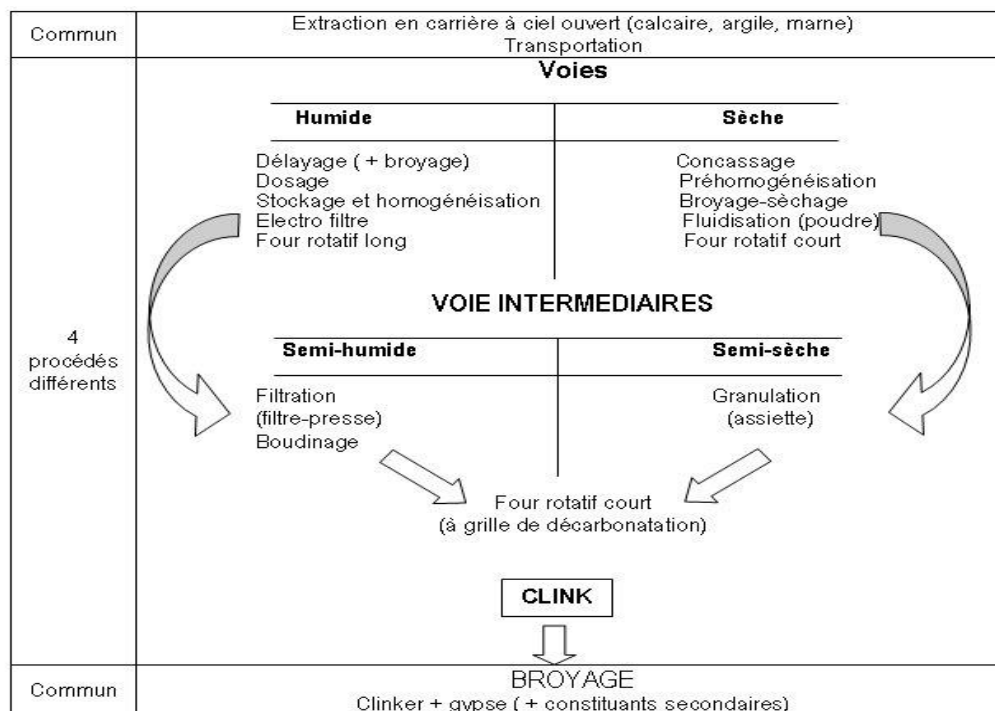


Figure 1-2 Le schéma de la fabrication du ciment.

On distingue deux types de fabrication :

I-3-1 Fabrication par voie humide :

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herse.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru.

Les analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieur du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont :

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges calorifiques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20 t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage.

Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C.

I-3-2 Fabrication par Voie sèche :

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

1-La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

2-Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie.

Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

3- Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une pré homogénéisation puis d'une homogénéisation.

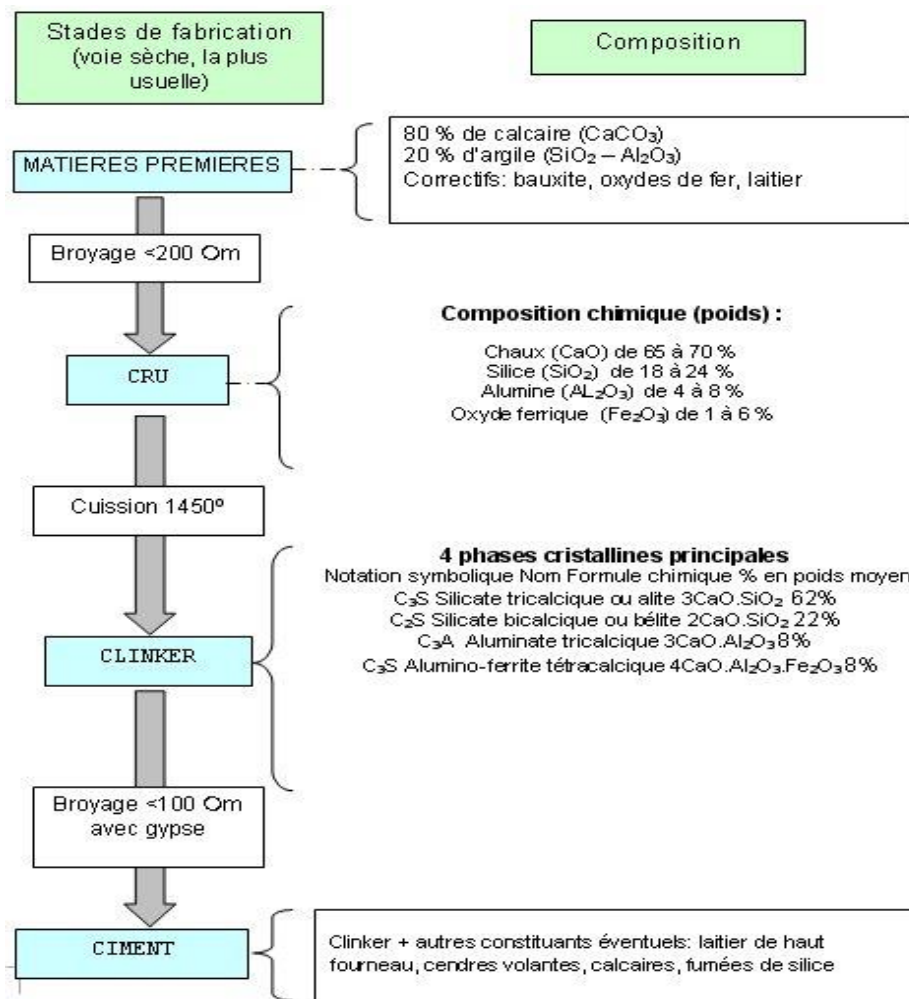


Figure 1-3 Fabrication du ciment par voie sèche.

I-4 Constituants principaux du ciment et les additions :

I-4-1 Constituants du clinker :

I-4-1-1 Préparation de la matière première :

Le mélange de calcaire et d'argile est broyé, en un mélange très fin, qu'on appelle le " cru " des corrections de composition peuvent être effectués en incorporant des ajouts en faible proportion.

Le produit cuit (clinker) est refroidi, puis broyé avec une petite quantité de gypse (additif indispensables destiné à régularisé la prise) dans d'énormes broyeurs à boulets est amené ainsi à une grande finesse de mouture.

Afin de rendre la matière plus réactive (plus grande la surface spécifique, plus la réactivité chimique est importante). Selon le cas, on ajoute ainsi au broyage du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, ou des pouzzolanes et fillers (calcaire ou tuf).

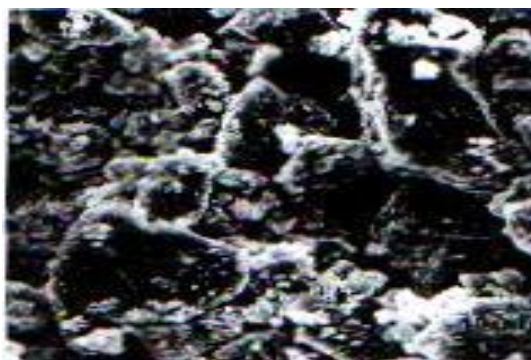
I-4-1-2 Broyabilité du clinker :

Le clinker présente une bonne broyabilité s'il contient plus de C_3S , moins de C_3A et une forte micro-fissuration des grains lors du refroidissement. Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(C_3S + C_2S)/(C_3A + C_4AF)]$ est élevé, plus facile est la broyabilité.

La Figure (1-4) montre clairement l'influence du type de broyeur sur la constitution et la morphologie des grains.



Broyeur à jet : Les grains de clinker se fracturent taille régulière à angle vif et surface lisse



Broyeur à boulets : granularité étendue à contour arrondis et recouvert de fines particules

Figure 1-4 Fractographie de granules de clinker industriel broyé. [01]

I-4-1-3 Qualité du clinker :

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux) m proche de 1.

$$m = \text{CaO} / (2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3) \quad [01].$$

Si $m=1$ toute la chaux est consommée.

L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur, Mais en réalité on prend une quantité de quelque pour cents inférieure à ces valeurs.

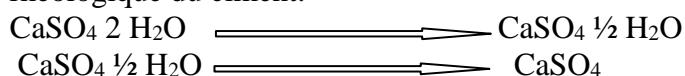
I-4-2 Le Sulfate de Calcium (Le gypse - CaSO_4):

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$). Le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

Le sulfate de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est un régulateur de prise ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication de 3 à 5% de la masse du ciment.

La teneur en SO_3 ne doit pas dépasser 3.5% dans le ciment. Pour chaque nature de clinker, il existe un pourcentage optimal de gypse qui donne à la fois les meilleurs résistances et le retrait minimal.

Pendant le broyage sous l'effet de la température atteinte pendant le broyage et le stockage . Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



I-4-3 Le Calcaire :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, troisièmes par ordre d'abondance après les schistes et les grès, facilement solubles dans l'eau (voir karst), composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 .

- Le filler calcaire en général conduit à une augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment et par conséquence :

À une diminution du début de prise.

À une augmentation des résistances initiales.

- La finesse du filler contrôle ce mécanisme.

- Le filler calcaire va réagir avec les produits d'hydratation du ciment, en se formant des carboaluminates de calcium au lieu de monosulfoaluminate, ce qui permet d'avoir d'ettringite à long terme.

I-4-3-1 Action du calcaire :

- Les particules du calcaire peuvent agir comme des centres de nucléation, en ayant un effet accélérateur de l'hydratation du ciment.

- Pour cela, la finesse des particules de calcaire est essentielle.

- Certains auteurs envisagent la réaction du calcaire avec les composants du ciment.

- En même temps, le clinker est en général broyé à une finesse supérieure, ce qui augmentera la vitesse des réactions.

I-5 Principales Catégories des Ciments:

D'après la norme ENV 197-1 définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CPA - CEM I	95-100	----	0-5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	--- ---
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	0-5 0-5 0-5

	CHF- CEM III/B CLK - CEM III/C			
Ciment pouzzolanique	CPZ- CEM IV/A CEM- CPZ IV/B	65-90 45- 64	10-35 36-55	0-5 0-5
Ciment composé	CLC- CEM V/A CLC- CEM V/B	40-64 20-39	18-30 31-50	0-5 0-5

Tableau 1-1 Principales catégories de ciment .

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit : CEM pour indiquer que le produit est un ciment. Un chiffre romain 1, 2, 3, 4 ou 5 pour indiquer le type de ciment. Pour le ciment 2 ; 3 ; 4 et 5 une lettre A, B, C pour indiquer la proportion des constituants. Le nombre indiquant la classe de résistance 32.5, 42.5, 52.5 suivi le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours) .

I-6 Les Constituants anhydres du ciment (CPA) :

I-6-1 Composition chimique :

Le ciment portland résulte du broyage du clinker qui se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de teinte grise foncée. Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange bien précis de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute 5% de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) destinée à régulariser la prise. [02,03]

Les principaux oxydes (Tableau 1-1) sont en % pondéral d'après l'analyse chimique par fluorescence X d'un clinker de ciment portland, qui consiste à exciter l'échantillon à l'aide d'un tube à RX et d'analyser le spectre (en longueurs d'onde ou en énergie) de rayons X émis. Ce spectre est représentatif de la composition élémentaire de l'échantillon. [01] .

Elément	Fourchette(%)	Moyenne (%)
CaO	62 à 68	66.6
SiO ₂	18 à 24	21.9
Al ₂ O ₃	4 à 8	6.8
Fe ₂ O ₃	2 à 5	2.5
MgO	0 à 5	1
SO ₃	0 à 5	0.8
K ₂ O	0 à 2	0.2
Na ₂ O	0 à 2	0.2
TiO ₂	0 à 2	0.2

Tableau 1-2 Composition chimique du clinker [01].

I-6-2 Performance des ciments :

Pour contrôler la qualité et la régularité de la fabrication du clinker à partir des oxydes dans les cimenteries .Certains modules ou indice chimiques sont nécessaires à calculer.

Module hydraulique de Michaelis (M_h) compris entre (1.7 et 2.3) :

$$M_h = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Module silicique de Kühl compris entre (1.5 et 5)

$$M_h = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Modules alumino -ferrique (M_{af}) de Kühl compris entre (1.5 et 2.5) :

$$M_{af} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Indice d'hydraulicité de Vicat compris entre(0.4 et 0.5):

$$HI = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

Les composés sont exprimés en moles et non en pour-cent.

Indice de saturation en chaux de Kühl compris entre (0.85 et 1) :

$$LSI = \frac{CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,1 \times Al_2O_3 + 0,7 \times Fe_2O_3}$$

Facteur de saturation de Lea Parker compris entre (0.85 et 1):

$$M_{sat}^{(LSF)} = \frac{CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3}$$

C'est le rapport de la chaux (CaO) totale dans le mélange à la chaux susceptible de se combiner avec les autres oxydes (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O) plus le Msat est élevé plus les résistances le sont aussi.

I-6-3 Composition minéralogique :

Les compositions minéralogiques des ciments Portlands est fonction du mélange

(clinker + 5% de gypse) mais aussi de la température de cuisson du clinker et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [01]. Il contient quatre principaux composants:

- Le silicate tricalcique (alite) : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$
- Le silicate bicalcique (bélite) : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$
- L'aluminate tricalcique (célite) : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$
- L'alumino-ferrite tétracalcique (célite) : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{C}_4\text{AF}$

I-6-3-1 Le silicate tricalcique (Alite) C_3S :

- Se forme vers 1400 à 1450 °C, sa densité $d=3.15$
- Il contient, en solution, des impuretés MgO , Al_2O_3 et Fe_2O_3
- Se présente en gros cristaux pseudo-hexagonaux jointifs ou maclés, la taille varie suivant la cuisson de 10 à 50 μm Figure (1-3).

Les réactions d'hydratation du C_3S sont plus rapides que celle de C_2S , et libérant une quantité de chaleur proche du double de celle libérée par C_2S , ce qui donne au ciment une résistance initiale rapide et élevée.

I-6-3-2 Le silicate bicalcique (belite) C_2S :

Il existe plusieurs formes allotropiques, la forme la plus active se trouve dans le ciment portland est la forme β qui possède des propriétés hydrauliques. Se forme entre 1200 à 1300 °C, sa densité $d=3.28$.

Il contient en suspension solide, des impuretés P_2O_5 (anhydride phosphorique) et BaO (oxyde de baryum) Les cristaux ont souvent des formes arrondies de taille de 30 μm en moyenne suivant la cuisson (voir figure 1-5).

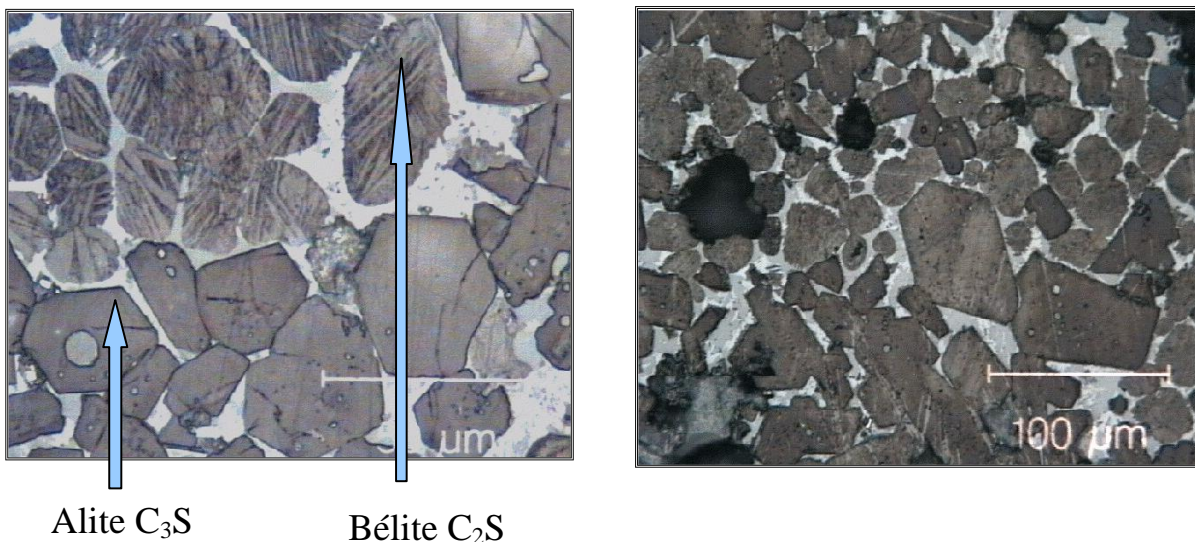


Figure 1-5 Image de clinker en microscope optique (section polie) [04]

I-6-3-3 Les aluminates tricalciques (C_3A):

- Le C_3A à une densité proche de 3,04.
- Il existe plusieurs aluminates parmi lesquels, on peut citer 3 composés présentant des propriétés hydrauliques.

- CA et C12A17 que l'on trouve dans les ciments alumineux.
- L'hydratation des C_3A est très rapide et exothermique (l'ajout du gypse au clinker à pour effet de contrôler sa cinétique d'hydratation)
- Le C_3A contribue à la prise du ciment par contre, il contribue assez peu à la résistance finale. Le C_3A contient des impuretés (Na_2O) et se présente sous plusieurs formes allotropiques dont la réactivité vis-à-vis de l'eau est variable.

I-6-3-4 L'alumino-ferrite tétracalcique :

Il forme un solide de C_2A et C_2F (C_4AF , C_6A_2F), leurs réactions d'hydratation sont voisines de celles du C_3A .

I-6-3-5 La chaux CaO libre :

Elle est cristallisée dans le système cubique, sa densité est de 3.18 sa présence dans le ciment est proscrite ($\leq 2\%$) notant cependant les problèmes posés par son hydratation.



Volume molaire : $56/3.18 = 17.6 \text{ cm}^3$ $74/2.34 = 31.6 \text{ cm}^3$ $100 \Delta V/V = 80\%$ Extinction de la chaux provoque un gonflement important ce qui conduit à des désordres en cas d'hydratation tardive de CaO .

I-6-4 Composition potentielle du ciment (équation de bogue) :

Les Tableaux (1-3) et (1-4) illustrent les compositions minéralogiques des clinkers [1,5].

Le clinker	
Formules chimiques	Formules de Bogue
Le silicate tricalcique ($3CaO, SiO_2$) : C_3S	4.07. CaO – 7.6. SiO_2 - 1.43. Fe_2O_3 - 6.72. Al_2O_3
Le silicate bicalcique ($2CaO, SiO_2$) : C_2S	2.87. SiO_2 – 0.75. C_3S 2.65. Al_2O_3 – 1.69. Fe_2O_3
L'aluminate tricalcique ($3CaO, Al_2O_3$) : C_3A	3.04. Fe_2O_3
L'alumino-ferrite tétracalcique ($4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$) : C_4AF	

Tableau 1-3 Composition potentielle d'après les formules Empiriques de BOGUE [01].

Constituants	Alite	Bélite	Célite	Célite
Notations cimentières simplifiée	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Notations cimentières détaillée	3CaO ,SiO ₂	2CaO,Si O ₂	3CaO,Al ₂ O ₃	4CaO,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃
Teneurs (%)	50-75	07-30	0-16	04-20

Tableau 1-4 Compositions minéralogiques moyennes des clinkers [01].

On peut remarquer que la méthode empirique de Bogue qui se base sur la composition chimique conduit aux mêmes résultats de quelques pour-cent près comparativement aux méthodes modernes comme exprimés aux (Tableaux 1-4) .

La séquence des réactions et les formules sont exprimées comme suit:

- Le C₄AF se forme en premier
- Le C₃A se forme ensuite
- La chaux (CaO) et SiO₂ restant se combinent pour former C₂S et C₃S.

I-6-5 Composition chimique des minéraux :

Le Tableau (1- 5) montre bien la microstructure élémentaire des quatre minéraux selon une analyse par microsonde électronique de casting : analyse élémentaire ponctuelle (les résultats sont donnés sous forme d'oxyde) [01].

Oxyde	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CaO	74.2 ± 0.5	64.2 ± 0.6	57 ± 2.0	50.7 ± 0.5
SiO ₂	24.5 ± 0.3	30.8 ± 0.8	4.4 ± 0.1	3.8 ± 0.2
Al ₂ O ₃	1.6 ± 0.2	2.2 ± 0.4	25.2 ± 0.9	17.4 ± 0.6
Fe ₂ O ₃	0.57 ± 0.07	0.63 ± 0.06	6.9 ± 0.6	18.5 ± 0.7
MgO	0.34 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.66 ± 0.01	1.96 ±
SO ₃	0.30 ± 0.06	1.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.09
K ₂ O	0.03 ± 0.01	0.3 ± 0.05	0.1 ± 0.04	0.09 ±
TiO ₂	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.5 ± 0.1	0.04
				0.03 ±
				0.01
				2 ± 0.2

Tableau 1-5 Microstructure élémentaire des quatre minéraux [01].

I-7 Hydratation du ciment Portland :

I-7-1 Introduction :

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

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [6]:

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

I-7-2 Hydratation des composants du ciment Portland :

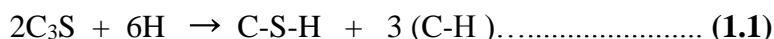
Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul.

La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures. La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment.

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

I-7-2-1 Hydratation du silicate tricalcique C₃S :

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec de l'eau est la suivante:



Où C-S-H représente le 3CaO.2SiO₂. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et (C-H) représente le Ca(OH)₂ (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure 1.6) sont :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés.
- La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g).
- La cohésion des feuillets de C-S-H est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales.

L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium C-H (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.

La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [7]

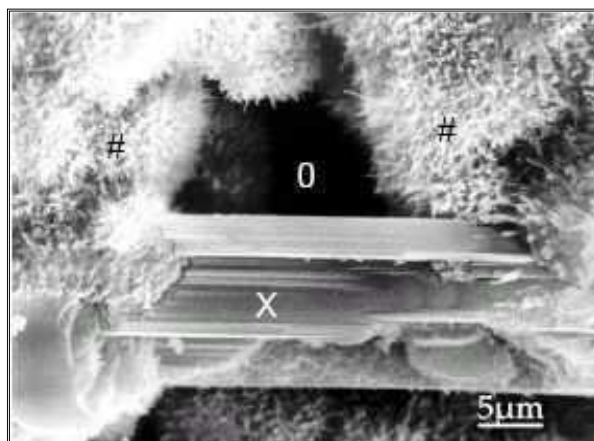


Figure 1-6 C-S-H fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des C-S-H (#), La porosité est repérée par (O) [8]

I-7-2-2 Hydratation du silicate bi calcique C_2S :

Une fois hydraté, C_2S donne aussi des C-S-H. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

I-7-2-3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). En l'absence du gypse, la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 1.7). La réaction est donnée par:

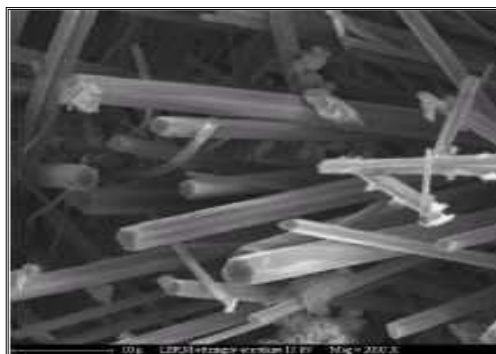
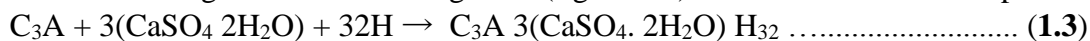
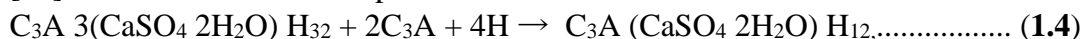


Figure 1-7 Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [9].

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

Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [10]. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [11].

I-7-2-4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF :

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

Dans la première étape de la réaction, le C_4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C_4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate.

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

La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [7]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I-7-2-5 Conclusion :

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

I-8 Les caractéristiques du ciment portland :

I-8-1 La prise (NA230 NF EN 196-3) :

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



Figure 1-8 Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure 1-8).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau (voir figure 1-9).

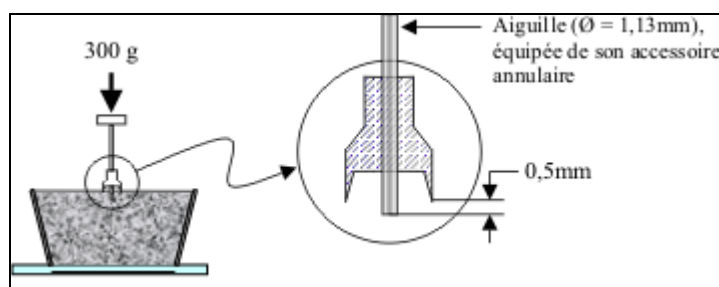


Figure 1-9 Détermination du temps de fin de prise.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels :

la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court, la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (figure 1-10), la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise, l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (figure 1.12).

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de :

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

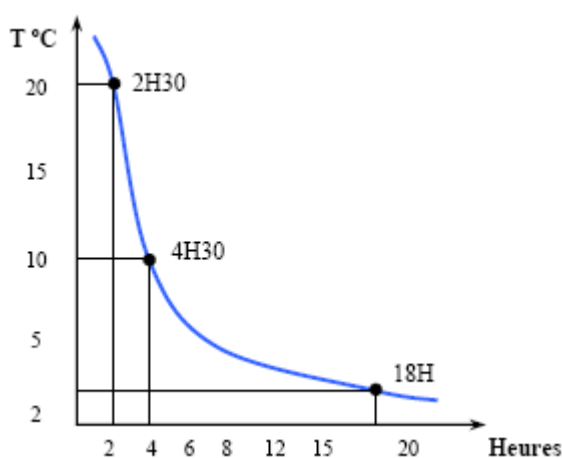


Figure 1-10 Evolution du temps de prise en fonction de la température.

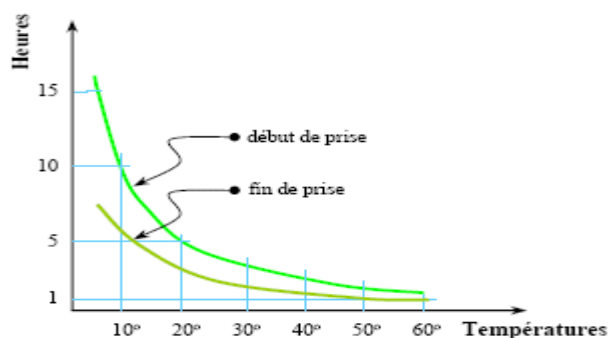


Figure 1-11 Influence de la température sur la prise des ciments.

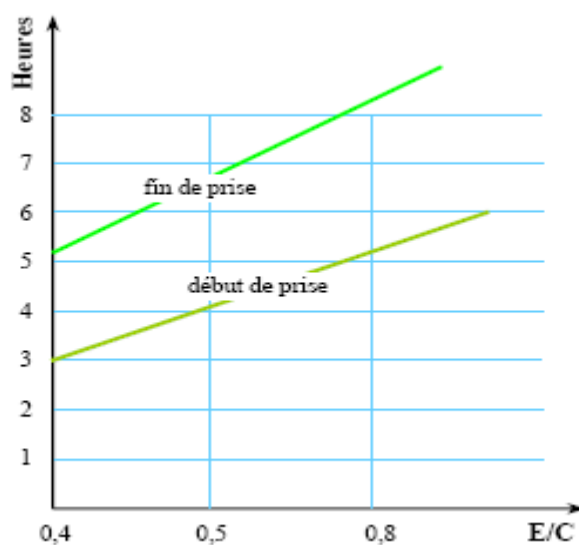


Figure1-12 Influence du E/C sur le temps de prise.

I-8-2 Le durcissement :

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

La prise et durcissement des constituants du clinker :

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

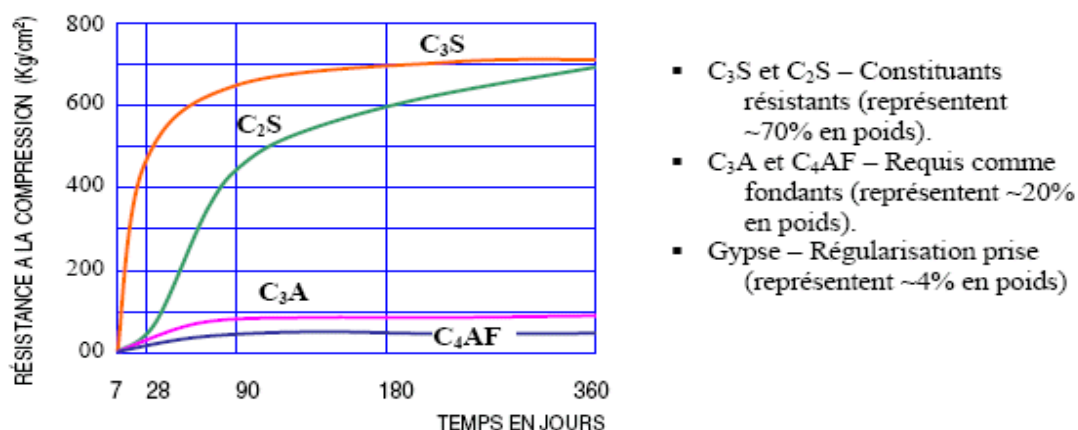


Figure 1-13 Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CPA.

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C₃A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C₃S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca²⁺ en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C₃A) sont rapides.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire (voir fig 1.14) Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

Dans le cas des silicates de calcium C₃S et C₂S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de Ca(OH)₂ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise. Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel.

La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

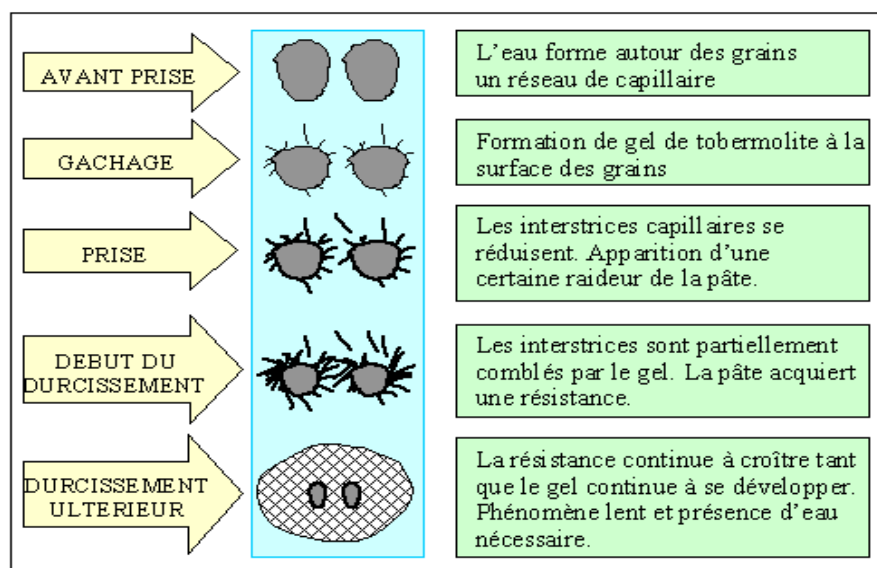
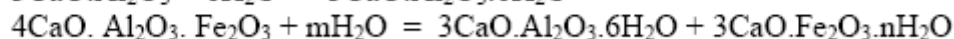
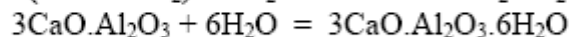
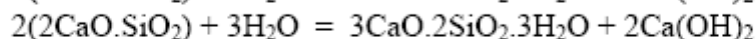
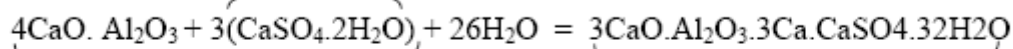


Figure 1-14 L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment.

Quelques réactions chimiques importantes:



GYPSE



CIMENT PORTLAND

HYDROSULFO-ALUMINATE CALCIQUE

Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

I-8-3 La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231 NF EN196-6):

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1-15), par contre plus le ciment est sensible à l'éventellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur figure (1.16).

Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

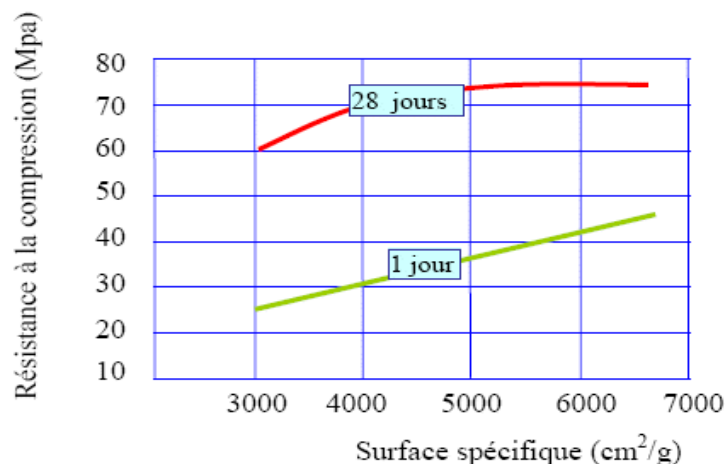


Figure 1-15 Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

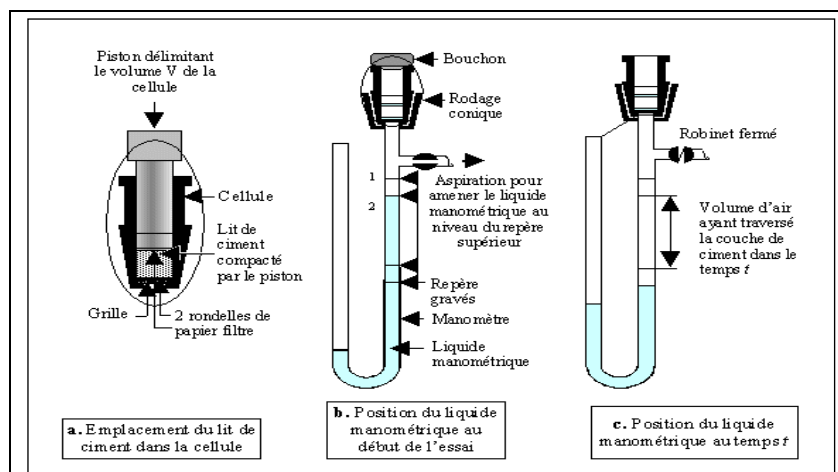


Figure 1-16 Principe de fonctionnement de Perméabilimètre de Blaine.

I-8-4 Le Retrait (NA440 NF P15 433) :

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton. En fait il existe plusieurs types de retrait :

- ▲ Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique. Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage.

- ▲ Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation

(contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe.

⤴ Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:

- ⤴ la nature du ciment .
- ⤴ le dosage en eau (figure 1-17).
- ⤴ la propreté des sables.
- ⤴ la forme et la dimension des granulats.

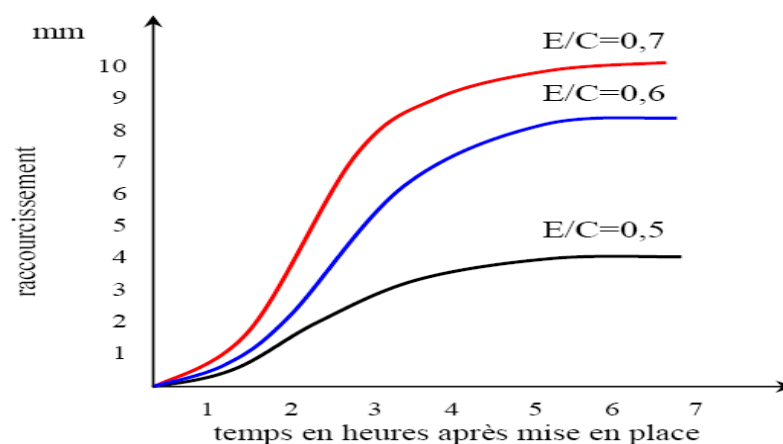


Figure 1-17 Influence du E/C sur le retrait plastique des mortier.

I-8-5 Chaleur d'hydratation (EN196-9 NF P15-436) :

Domaine d'application :

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours.

La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

Principe :

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence. L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K .

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

-la finesse de mouture : plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.

-la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.

-la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte la température extérieure (voir tableau 1-6).

N°	CONSTITUANTS	COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DEGAGEE
1	C_3S	<ul style="list-style-type: none"> Fait prise et durcit rapidement. Haute résistance atteinte à <i>court terme</i> 	120 cal / gr
2	C_2S	<ul style="list-style-type: none"> Réagit lentement Haute résistance atteinte à <i>long terme</i> 	62 cal / gr
3	C_3A	<ul style="list-style-type: none"> Prise de façon très désordonnée et rapide Faible résistance (Pour régulariser la prise du C_3A, il faut ajouter du gypse) 	207 cal / gr
4	C_4AF	Faible résistance	100 cal / gr

Tableau 1-6 Le Comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker.

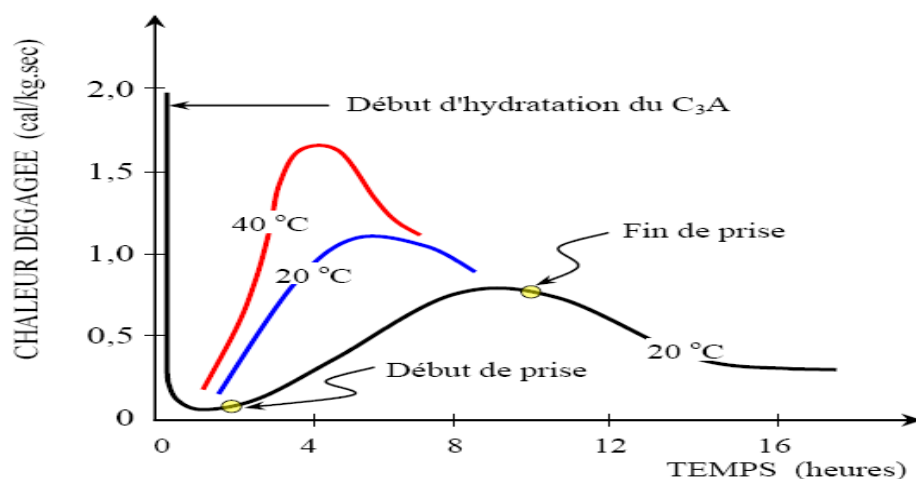


Figure 1-18 Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA .

I-8-6 Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1) :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16)cm³.

La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa (voir Figure 1-19).

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1 .

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

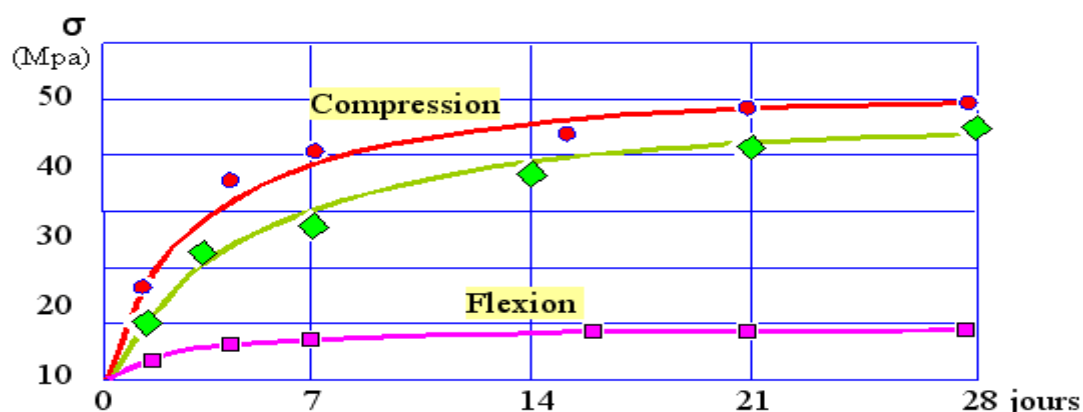


Figure 1-19 Résistance du mortier normal

2ème partie : Les ajouts minéraux

I-9 Généralités :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou pouzzolanique. L'utilisation d'ajout cimentaire (calcaire) dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

I-9-1 Avantages techniques :

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée. L'ajout cimentaire (calcaire) améliore généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, l'ajout cimentaire (calcaire) améliore la résistance à la fissuration.

I-9-2 Avantages économiques :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO₂. Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

I-9-3 Avantages écologiques :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général l'utilisation de calcaire comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie.

Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques de l'ajout cimentaire calcaire sur le ciment.

I-10 Classification des ajouts minéraux :

Selon la norme [EN 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

I-10-1 Les ajouts minéraux actifs :

I-10-1-1 La pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [12].

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

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

-Pouzzolane artificielle :

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

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [12]:

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée , opale , terre de diatomées , zéolites cristallisées.

- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.

- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes .

Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [13] et [14].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique .

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [12] .

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas , activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ▲ ajouts de produits chimiques.
- ▲ broyage à une finesse plus élevée.
- ▲ traitement thermique .

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

a- Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane réagit avec l'eau , en présence d'une quantité suffisante de chaux , pour former des hydrates stables , peu solubles et résistants à long terme .

b- Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique , elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires , ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité .

I-10-1-2 Fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone . Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium).

Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme [15] et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 .

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage . D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau 1-7).

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée.

Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 . La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe –Si à 75% a une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse.

Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.03\mu\text{m}$ et $0.3\mu\text{m}$ (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de $0.1\mu\text{m}$), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron.

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90.0
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Tableau 1-7 Composition chimique type de certaines fumées de silice [15].

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice . Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est (3.1g/cm³). Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise . Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- ⤴ Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie.
- ⤴ Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

I-10-1-3 Le laitier de haut fourneau :

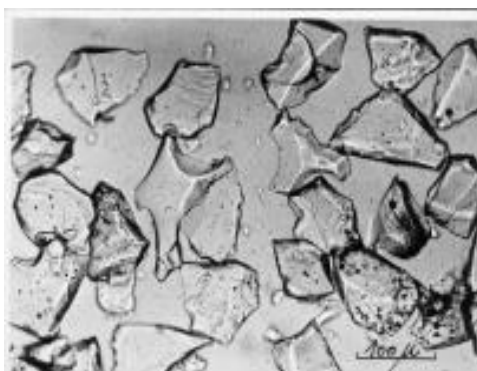


Figure1-20. Laitier.

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 μm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolanique qu'hydrauliques.

I-10-1-3-1 Effet du laitier de haut fourneau :

En général, le laitier s'hydrate de la même manière que les cendres volantes de la classe C. Cependant, son effet sur la résistance commence à se faire sentir à partir de 7 jours, tandis que les cendres de la classe F ne développent des résistances qu'à partir de 4 semaines. Les particules de laitier $<10 \mu\text{m}$ contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28 j), tandis que les particules entre 10 et 45 μm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules $> 45 \mu\text{m}$ ont de la difficulté à s'hydrater.

I-10-1-3-2 Types de laitier (propriétés et mode de fabrication) :

Laitier concasse. C'est un granulat lourds d'aspect anguleux, rugueux, de structure micro alvéolaire de couleur grise il est inattaquable par l'eau, et sa porosité est inférieure à 10% il s'obtient après le coulage des laitiers dans les poches de 1 à 2 m³ qu'on divise dans fausses de 200 à 300 m de longueur, et de 10 à 12 m de largeur, on laisse refroidir après concassage et criblage, on obtient un granulat normalisé et classé.

Laitier granule. C'est un sable vérifié, très poreux, jusqu'à 60%, il a une couleur grise jaunâtre, de granulométrie jusqu'à 2 mm, et de composition chimique. Silice = 29 à 38 %, chaux = 38 à 48 %, alumine = 13 à 20 %, magnésie = 06 %. Pour avoir ce type de laitier, la coulée doit être refroidie brusquement dans courant d'air ou d'eau. On obtient un sable sec et finement moulu, qui constitue la base du ciment de laitier. Cette opération a pour but d'empêcher la cristallisation, et de maintenir le laitier à l'état vitreux.

Laitier expansé. Il a une structure scoriacée alvéolaire ; de teinte grise, après criblage il se présente en trois classes granulaires de densité variable. Il a une composition chimique proche de. Silice = 25 à 40 %, chaux = 38 à 50 %, alumine = 10 à 20 %, soufre = 01 %. Il s'obtient par une puissante injection d'eau, en dessus du laitier en fusion, l'eau vaporise et on obtient des éléments alvéolaires légers.

I-10-1-3-3 Caractéristiques des laitiers :

Activité de laitier. Pour apprécier la qualité du laitier comme adjuvant minéral actifs des liants, on se sert de plusieurs modules. D'abord, on distingue deux catégories de laitier. Laitier acide et basique.

Laitier acide. C'est un laitier qui contient en majeure partie la silice fondue de 50 à 60 %, avec peu d'alumine en présence de 25 à 30 % de chaux. Ce type de laitier subit un refroidissement lent.

Le rapport pondéral. (Silice / chaux) ≤ 1.10 .

Laitier basique. Il est très hydraulique pour certains teneurs en chaux, silice et alumine. Il est obtenu par un refroidissement brusque. Ce type de laitier a un rapport pondéral.

$\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 1.3$ il a une composition chimique proche de.

$\text{CaO} = 40 \text{ à } 55 \%$; $\text{SiO}_2 = 25 \text{ à } 35 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12 \text{ à } 25 \%$; MgO , SO_3 , Fe_2O_3 ; FeO ; soufre, Ces laitiers sont caractérisés par un module de basicité qui répond à la formule.

$$\text{Mb} = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$$

Si $\text{Mb} > 1$, le laitier est acide.

Il y a aussi le module d'activité. $\text{Ma} = (\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3)$.

Si $\text{Ma} = 0.017 \text{ à } 0.25$, le laitier est basique, et si $\text{Ma} = 0.33 \text{ à } 0.40$ le laitier est acide. Notons que l'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation de ces deux modules c'est-à-dire. Plus le module d'activité est grand, plus la vitesse de durcissement du laitier broyé est rapide. Pour synthétiser les qualités que doivent avoir les laitiers on peut dire que.

- Il faut que le laitier soit à la limite de vitrification.
- Il faut qu'il contienne le maximum de chaux et d'alumine.

Il faut que la proportion de chaux, de silice et d'alumine doit composer au moins 90%, et le reste composé d'autres corps tels que l'oxyde de fer, l'anhydride sulfurique et magnésie. La qualité de laitier de haut fourneau peut être déterminée par le coefficient de qualité, qui varie d'un pays à un autre.

□ en USA. $\text{K} = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3)$

□ en URSS. $\text{K} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$ 1.2

□ en RFA. $\text{K} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2)$ 1.6

□ en JAPON. $\text{K} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2)$ 1.4 .

I-10-1-3-4 Composition chimique :

La composition du laitier peut varier dans de grandes limites, suivant la nature du minerai
Généralement.

Constituants	(%)
CaO	30-50
SiO₂	28-38
Al₂O₃	02-25
MgO	02-18
MnO	01-03
S	1-2,5
Fe₂O₃+FeO	1-2,5

Tableau I.8. la composition chimique moyenne du laitier.

I-10-1-3-5 Composition minéralogique :

Si le refroidissement des laitiers est lent, une partie sensible de laitier réussit à se cristalliser sous forme de minéraux stables.

- L'anorthite $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Diopside $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Gehlenite $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- Akermanite $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Merwinite $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Silicate bi calcique sous forme α , α' & β .
- Tri aluminate penta calcique « C_5A_3 »
- Wollastonite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

- Rankinite $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$
- Spénelle $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau 1.8), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Oxydes	Laitier français	Laitier Nord U .S .A	Laitier algérien
SiO_2	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al_2O_3	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe_2O_3	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%	-	0.15

Tableau 1-9 Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [16]

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ⤴ Broyage poussé.
- ⤴ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ⤴ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse)).

I-10-1-4 Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (1-10) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- ⤴ Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille).
- ⤴ Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite).
- ⤴ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo –calcique	Sulfo-calcique
SiO ₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na ₂ O	2.2	0.4	2.2	0.8
SO ₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

Tableau 1-10 Composition chimique type de certaines cendres volantes [17].

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1µm et 100 µm , leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m²/kg . La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable. Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton.

En plus des propriétés décrites , lorsqu 'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité , la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces .

I-10-1-5 les déchet de brique

Les déchets de briques sont des sous produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets

(briques non conformes ou cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions [18].

Par ailleurs des études ont montrée un caractère pouzzolanique de ces déchets, raison pour laquelle nous avons décidé de substitué une partie du clinker par ce sous produits, les déchets ont fait l'objet d'un broyage, pour les transformer en poudre fine.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P.F
Teneurs de déchets de briques	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.00

Tableau 1-11 Composition minéralogique de déchets de briques

Leur composition minéralogique a été déterminée par fluorescence X sur poudre. Les résultats obtenus, présentés en Tableau, mettent en évidence des pourcentages élevés en silice et en alumine.

I-10-2 Principaux ajouts minéraux inertes :

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue la poussière et les fillers calcaires.

I-10-2-1 La poussière :

La poussière est une matière à particules fines , récupérée à la sortie du four , lors de son passage avec la fumée , sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/ g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

I-10-2-2 Fillers calcaires :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée , dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes).

Les fillers se différencient les uns des autres par :

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

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

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- ⤴ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- ⤴ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ⤴ Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- ⤴ Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

I-11 Conclusion :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

Chapitre II : Argile cuite et valorisation des déchets

II-1 Historique :

L'argile appartient aux matériaux les plus anciens travaillés par l'homme. Cette terre, facile à mettre en forme, permet d'obtenir aisément des pots simples, des bols, des coupes, des carreaux, etc. Il suffit d'un peu d'habileté pour façonner des objets plus complexes, comme des pichets avec des anses et un bec, par exemple. L'argile permet de faire aussi des figurines utilisées par les cultes religieux ou pour la magie. La maîtrise de la poterie fut un pas important dans l'évolution de la civilisation néolithique. C'est aux alentours de 6000 ans avant Jésus-Christ que l'on retrouve les premières traces de l'existence de la poterie. Mais on sait que depuis près de 10.000 ans, les hommes exploitent la terre et bâtissent des villes. Depuis l'antiquité, la terre cuite a été utilisée pour la décoration des temples et des palais de la Grèce Antique. Les premières constructions en terre cuite et les premiers traitements datent du début de notre ère : il s'agit des casernes prétorienne de Rome; il faudra attendre le VIII^e siècle en France pour utiliser les premières dalles et carreaux de terre cuite destinés à la construction des sols et des terrasses. Les Grecs définissaient les parquets du nom "d' Apostrotom " : les sols de bois étaient cuits au four et formaient de très belles marqueteries. Les Grecs ont en quelque sorte inventé les premiers dallages au sol ainsi que le carrelage mural. Le carrelage, nommé aussi "Tesselatum" par les Grecs, était constitué de petites dalles carrées : "les Favi" étaient les carreaux hexagonaux et "les trigonas", les dalles triangulaires. De nombreuses autres formes rectangulaires, arrondies ou personnalisées, étaient déjà connues des sculpteurs Grecs et furent utilisées en éléments de décoration.

Les Romains, à leur tour très créatifs, ont apporté les sublimes mosaïques de marbre représentant des scènes de la vie quotidienne ou imaginaires. Ils déclinaient la terre cuite sous de multiples formes en passant par les briques, les tuiles, les contenants en tout genre: flacons de parfum, amphores, cruches à vin, dalles, figurines, sculptures et conduites d'eau chaude pour le chauffage au sol. L'Opus romain est un assemblage complexe de carrés et de rectangles qui rompent ainsi la monotonie d'un sol uniforme. A l'heure actuelle, on utilise encore cette technique d'assemblage qui donne un aspect esthétique remarquable et sophistiqué: on trouve actuellement les opus romains dans des finitions adoucies, brossées et patinées. La variété des formats renforce l'aspect ancien de votre dallage. Chez les Romains, le sol était fait de terre battue, de bois, de mortier de briques rose (dans la maison romaine) ou de mosaïques d'argile, de pâte de verre ou de marbre d'excellente qualité, venant du monde entier, pour embellir sols et murs de fresques très ornementées (dans les Domus) pour les plus fortunés. Ils furent les grands précurseurs des traitements des sols et des murs : pour les sols, ils avaient élaboré de savants mélanges à bases d'huiles végétales et de catalyseurs à base de caséine (blanc d'œuf), des finitions à la cire d'abeille terminaient l'entretien de ceux-ci! Les traitements ont très peu évolué depuis les Romains, jusqu'à il y a environ trente ans. Pour les murs des Thermes entre autre, des fresques représentant souvent des poissons, étaient appliquées "al fresco" (de l'italien fresco = frais) et peintes sur le crépi encore frais. En séchant, la couleur pénètre dans le crépi et forme un revêtement qui résiste à l'eau.

Un principe de construction de la voie romaine est que partout où il y avait des risques de dégradation, à la fois par l'utilisation et par les intempéries, celle-ci était construite de manière à résister à ces risques en toute saison (creusement de l'emprise jusqu'à 60 ou 80 cm de profondeur; dépôt d'un lit constitué d'un mélange étudié de sable, cailloux et pierres concassées, et pose d'une couche de surface de dalles jointives de pierre non gélive).

Les premières dalles de carrelage ont fait leur apparition en France seulement à partir du VIII^e siècle. La première utilisation fut d'orner les édifices religieux (carrelages incrustés d'ornements précieux). L'usage domestique du carrelage est apparu en France à partir du XVIII^e siècle avec la

fabrication des premiers sols en céramique dans les maisons bourgeoises. Il faudra attendre tardivement la fin du XIX^e siècle pour que le carrelage se répande plus généreusement.

Dès l'Antiquité, on en fait un usage très abondant en Mésopotamie et dans l'Egypte des Pharaons, en Afrique et au Moyen-Orient pour les civilisations romaines puis musulmanes, en Asie les Moines Bouddhistes, ou les empereurs de Chine, en Amérique du Nord pour les indiens, au Mexique les Aztèques ou dans les Andes les Mochicas, en Europe au Moyen-âge, etc. Les civilisations les plus diverses ont construit des villes entières en terre.

En dehors des villes, les cultures rurales ont perpétué des traditions d'une grande diversité.

La terre cuite a supplanté la terre crue au cours des siècles et sous toutes les latitudes, grâce à ses qualités de solidité, de résistance aux intempéries, à sa souplesse dans toutes les utilisations et, depuis 150 ans grâce à son industrialisation.

4000 ans avant Jésus-Christ, les céramiques peintes restent le principal support de l'expression artistique. Témoins de l'histoire, elles étaient déposées dans les tombes. Durant toute l'Antiquité, les terres cuites ont fait la réputation de la Grèce archaïque et de la civilisation étrusque ensuite.

Dans l'architecture étrusque, les édifices étaient à la fois protégés et ornés par des éléments de terre cuite polychrome tels que tuiles, antéfixes, acrotères ou plaques de revêtements.

Les amphores, les vases, les cruches étaient en terre cuite peinte, avec une foule de détails réalistes ou pittoresques souvent colorés ou à figurines noires, inspirées de scènes quotidiennes ou empruntées à la légende.

Au XII^e siècle, apparaîtra la couleur; les potiers iraniens élaborèrent une nouvelle technique décorative dite "Hafrang" composée de sept couleurs. Cette recette nous a été transmise par un traité au XIV^e siècle. C'est à cette époque qu'apparaissent les premiers décors au petit feu, nécessitant deux cuissons en atmosphère oxydante.

C'est également au douzième siècle que l'utilisation de carreaux de terre cuite vernissés se répand.

Au cours des treizième et quatorzième siècle, ils sont énormément employés pour décorer les sols et les isoler de l'humidité.

Jusqu'au milieu du treizième siècle, les carreaux ornent les sols des grandes églises, des collégiales, des abbayes et des cathédrales. A partir du milieu du treizième siècle, ils sont utilisés pour les bâtiments conventuels, les églises paroissiales, les bâtiments civils tels que palais et grands châteaux.

A partir du quatorzième siècle, ils deviennent d'usage fréquent dans les châteaux forts et les manoirs. Après la Guerre de Cent Ans, le quinzième siècle se distingue par un "maniérisme" très élaboré dans les décors complexes. Avec les vitraux, les peintures murales et les fresques, les carreaux de pavage sont l'un des éléments de la décoration.

Faits dans un moule, les carreaux séchaient pendant 24 heures. On appliquait ensuite la décoration, puis ils étaient découpés, séchés à nouveau, et cuits au four. Cette décoration des carreaux médiévaux dépendait essentiellement d'une combinaison d'argiles et de glaçure de différentes qualités. Au douzième siècle, les carreaux sont encore unis. Les Cisterciens utilisaient le brun foncé, le noir, le jaune, le brun rouge, le vert clair, le vert foncé et parfois des décors en creux. Les carreaux décoratifs étaient géométriques avec des formes diverses.

Aux treizième, quatorzième et quinzième siècles, les carreaux deviennent bicolores : jaune sur un fond rouge. Les décors nombreux et variés se diversifient : motifs géométriques, végétaux, animaux, personnages, dessins héraldiques...

Au seizième siècle, la Renaissance apporte en Europe un mouvement qui agite le milieu artistique et se manifeste sur toute la décoration (sur les reliures de livres, comme sur les parois peintes): les céramiques et les marbres. La recherche de la beauté pure conduit les artistes à privilégier la courbe, la stylisation et la préciosité de la matière. Ils jouent avec cette terre, matière si malléable, pour raconter des scènes de la vie quotidienne ou religieuse, ou encore s'inspirent de la nature - tel

Bernard Palissy qui trouve sa source d'inspiration dans les fossiles, les animaux, les plantes, etc. Il produit des plats en terre vernissée, surchargés de figurations animales en relief et très colorées.

Au XVIII^e siècle, la technique de cuisson au petit feu est parfaitement maîtrisée. Elle est obtenue par plusieurs cuissons successives permettant de fixer un plus grand nombre de couleurs (en particulier le rose qui n'est pas gardée à une température trop élevée).

Les dix-neuvième et vingtième siècles, avec l'apparition de l'ère industrielle, voient la fabrication des terres cuites révolutionnée. Actuellement, les techniques de chauffage par le sol nécessitent l'utilisation de carrelages. La terre cuite, comme complément indispensable à cette technique, est très appréciée des professionnels ainsi que des utilisateurs pour sa résistance, son confort et ses qualités thermiques.

La terre cuite est également très utilisée pour la fabrication de tuiles, faïtières, arêtières, noues, bardeaux, et tout élément de mise hors d'eau.

Il est à noter que dans tous les pays méditerranéens, la terre cuite sous forme de carrelages fait partie intégrante de l'architecture: l'influence mauresque y est déterminante. Les carreaux s'affichent en façade, en signalétique, en intérieur au sol et sur les murs.

En extérieur, les carreaux aux couleurs variées, très gaies et lumineuses réfléchissent le soleil. En intérieur, ils conservent la fraîcheur et créent le décor.

La terre cuite a été et demeure, à travers les traditions historiques et populaires un des principaux matériaux[19].

II-2 Les argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis la plus haute antiquité. Le mot argile vient du grec "argilos" dérivé de "argos" qui veut dire blanc, ou du latin "argila"; c'est la couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom [19]. Les argiles sont donc des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des matériaux argileux appartiennent au groupe des silico -aluminates phylliteux. Ils sont organisés en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ce type de structure à très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface. A l'état de fines particules, les minéraux argileux sont les constituants de nombreuses formations géologiques et des sols particulièrement recherchés pour certains types de cultures. En outre, les argiles ont un rôle dans le domaine des pesticides. De nos jours, l'utilisation des argiles, notamment celles qui sont riches en SiO₂ (de 45 à 60%) et Al₂O₃ (de 20 à 40%), grâce à sa plasticité, elle connaît un nouvel essor dans la construction, la céramique industrielle et artisanale, l'industrie pharmaceutique et la poterie. Les briques d'aluminosilicates servent au revêtement des hauts fourneaux, des fours d'affinage et de nombreux fours de laboratoire. On élabore aussi, des matériaux céramiques plus durs que la porcelaine et la faïence traditionnelle, ainsi que des couronnes dentaires à base de quartz-alumine. De nombreux travaux réalisés ou en cours, sont relatifs à l'utilisation des minéraux argileux comme la montmorillonite ou les inter -stratifiés riches en smectites, pour la fonderie. De même, les argiles comme la kaolinite et certains mélanges de minéraux argileux, ayant une activité catalytique, favorisent la polymérisation du styrène. La majorité des céramiques sont issues de matières premières-minérales-silico alumineuses compactées et consolidées par frittage. Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physicochimiques sont très variables. Les critères de choix des utilisateurs sont moins liés à la composition chimique globale des matériaux argileux qu'à leur comportement pendant les différentes étapes de la fabrication des produits céramiques.

II- 2 -1 Les grandes familles de minéraux argileux

La structure de base de silicates phylliteux comme de tous les silicates est l'ion SiO_4^{4-} , où le silicium est tétra coordonné par rapport à l'oxygène Figure 1-1.

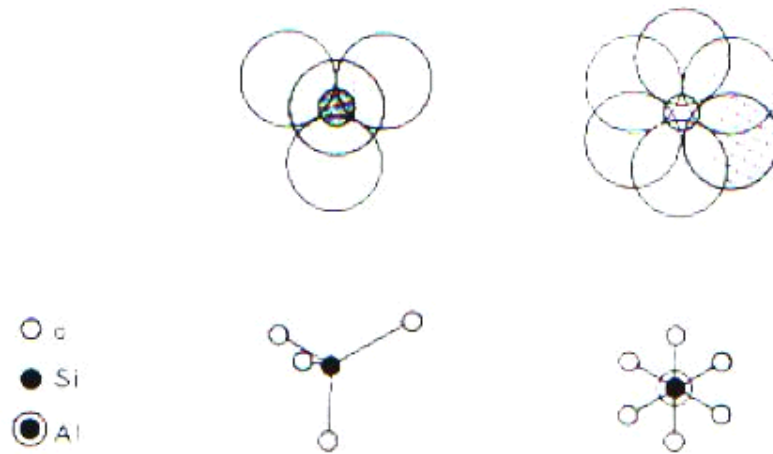


Figure 2-1 constitution d'un tétraèdre et d'un octaèdre [19]

L'ion aluminium Al^{3+} peut être éventuellement tétra coordonné, jouant ainsi le même rôle que SiO_4^{4-} ; mais il est le plus souvent le centre d'un octaèdre et est alors hexa coordonné. Ceci est possible à cause des rayons ioniques $r_{\text{Al}^{3+}}/r_{\text{O}^{2-}}$ qui vaut 0.43. Cette valeur est en effet proche de 0.414 qui est le rapport frontière entre le domaine de la coordinence tétraédrique et celui de la coordinence-octaédrique.

Fréquemment de faible granulométrie, les argiles sont des minéraux mal cristallisés et hydratés, de forme lamellaire ou fibreuse. Ils sont souvent présents en mélanges complexes d'espèces. Les minéraux argileux sont formés par l'empilement de feuillets eux même constitués d'un empilement de couches. L'équidistance réticulaire "d" est la somme des épaisseurs du feuillet et de l'inter feuillet (Figure 2-2).

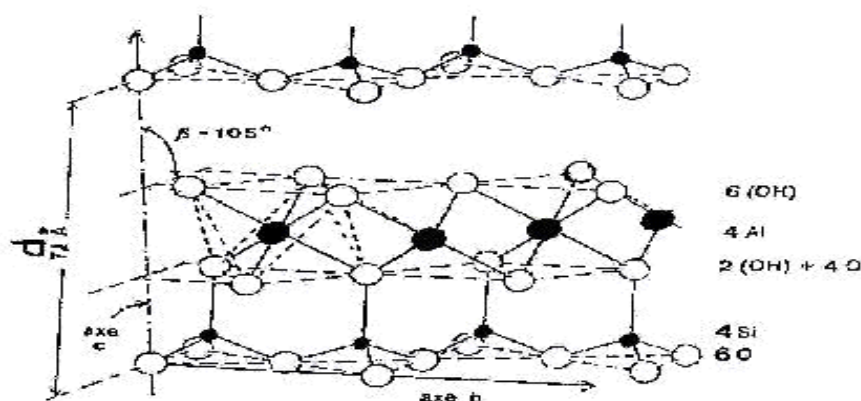


Figure 2-2. Notion de feuillet, inter feuillet (structure) et de distance réticulaire d pour un minéral de type 1:1 (groupe de kaolinite $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). [19]

Selon les critères suivants, il est possible de distinguer les types de minéraux argileux phylliteux par:

- Le nombre de couches d'octaèdres et de tétraèdres dans le feuillet élémentaire (une ou deux).
- L'équidistance entre deux feuillets dans les conditions naturelles.
- La variabilité de l'équidistance entre deux feuillets sous l'action de traitements variés.

II-2 -2 Classification et nomenclature des minéraux argileux

II-2 -2-1 Les types de minéraux argileux

Selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux[19,20]:

- Les minéraux de type 1:1 (ou T-O) à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdre (succession de trois couches d'oxygènes constituent le feuillet). L'équidistance caractéristique est d'environ 7.1 Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite.
- Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques (succession de quatre couches d'oxygènes constituent le feuillet). L'équidistance caractéristique varie de 9.4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et celui des micas.
- Les minéraux de type 2:1:1 (T-O-T-O) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdres (succession de six couches d'oxygènes constituent le feuillet) L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å, à ce type correspond le groupe de la chlorite.

II-2 -2-2 Les espèces de minéraux argileux.

selon la nature et donc l'épaisseur de l'inter feuillet on distingue les principales espèces de minéraux argileux suivantes:

- 1:1 (ou T-O) sans inter feuillet, l'équidistance réticulaire est alors de 7.1 Å; exemple la kaolinite. Avec de l'eau comme inter feuillet, l'équidistance réticulaire est de 10.1 Å; C'est le cas de l'halloysite.
- 2:1 (T-O-T) sans inter feuillet, l'équidistance réticulaire varie de 9.2 à 9.3 Å; exemple de la pyrophyrite. Avec un inter feuillet constitué de cations; l'équidistance de base est de 10 Å : exemple de micas. Avec des cations alcalins ou alcalino-terreux fortement solvatés dans l'inter feuillet. l'équidistance réticulaire varie de 14 à 15 Å : C'est le cas des vermiculites et des smectites.
- 2:1:1 (ou T-O-T-O) avec un inter feuillet constitué d'octaèdres de type brucite, l'équidistance réticulaire est de 14.2 Å; exemple des chlorites.

II-2 -3 Argile calcinée

L'argile calcinée ou pouzzolane artificielle est obtenue par calcination de l'argile crue dans des fours à températures variables suivant la destination finale du produit (brique, céramique, ajout minéral pour les ciments ou comme sable dans les mortiers).

II-2-3-1 Mode d'obtention

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le

verre produit lors du refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques. Les fumées de silice, la bauxite calcinée. Les cendres de balles de riz et des argiles calcinées [21, 22,23] dont on décrit le processus d'obtention par calcination. Transformation thermique: un des moyens les plus utilisés pour obtenir de la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) et le moyen adéquat pour suivre l'évolution des transformations au cours de la calcination Et qui met en évidence trois phénomènes

La déshydratation: pic endothermique de faible amplitude vers 100°C , elle ne modifie en rien la structure cristallographique, mais elle permet seulement le départ de l'eau physiosorbée.

La déshydroxylation (phase de désorganisation) : pic endothermique de grande amplitude vers 500°C à 700°C .A ce niveau les hydroxyles sont éliminées de la structure .Il se forme pour le kaolin une phase appelée méta kaolin, pour une argile hétérogène, il se forme une phase différente suivant les minéraux qui la compose. [24,25] .donc la température de décomposition dépend de la nature des minéraux, de la pression de vapeur maintenu pendant la cuisson [26,27]. C'est dans cette phase que l'argile devient amorphe et par conséquent pouzzolanique. La réaction globale de déshydratation pour la kaolinite peut se schématiser comme suit. $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

La recristallisation : pic exothermique vers 900°C à 1200°C. le matériau passe d'une phase amorphe à une phase de recristallisation suivi d'un changement de la nature initiale des minéraux .l'argile dans cette phase devient inerte .le métakaolin subit dans cette phase un réarrangement structurel, elle se transforme en mullite de forme $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [19,20,27].

II-2-3-2 Composition-chimique

$2[\text{SiAl}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$.

$\text{SiO}_2 \sim 46.5\%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 39.5\%$

$\text{H}_2\text{O} \sim 14\%$

La composition chimique d'une kaolinite correspondant à la formule structurale théorique Les kaolinites naturelles ont une composition chimique généralement constante. Cependant, il existe des kaolinites présentant quelques subdivisions isomorphiques .On trouve ainsi des kaolinites contenant du fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 2\%$) au sein des kaolinites naturelles [19] .quelque trace de potassium ($\text{K}_2\text{O} \leq 0.42$) et de manganèse ($\text{MgO} \leq 0.05$) .Pour l'illite on trouve une proportion considérable comparativement à la kaolinite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 17.90\%$) , ($\text{K}_2\text{O} \leq 7.47$) et ($\text{MgO} \leq 3.23$) , les oxydes majeurs restent dans les proportions indiqués aux Tableaux 1-4 et 1-5.

II-2-3-3 Composition-minéralogique

L'analyse minéralogique a pour but l'identification et le dosage des minéraux. Elle apporte des renseignements sur le mode de combinaison des éléments .Si toutes fois la reconnaissance de la composition chimique est aisée .Il n'est pas facile d'identifier les espèces minérales en raison de la complexité de leurs mélanges, on peut trouver plus d'un minéral qui présente une intensité de pic (raie) principale identique à un autre. Voinovich [28] . En effet un minéral peut être caractériser par :

- Sa structure cristalline : qui est un arrangement des atomes dans un réseau géométrique régulier (le kaolin en feuillet à double couche $e = 7 \text{ \AA}$).
- Sa morphologie : qui est la taille et la forme des particules ainsi que les défauts (dislocation, Joints de grains, etc.) qui peuvent être déterminés par le microscope électronique.
- Sa micro- composition élémentaire approchée qui peut être déterminée par le microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X d'après Terrier [28]

II- 2 -4 Domaine d'utilisation

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

II- 2 - 4-1 Matériaux de construction

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques, [29]. Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580°C servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations. [29]. Les argiles fusibles sont réfractaires au dessous de 1350°C servent pour la fabrication des briques, et tuiles. [29].

II- 2 -4-2 Ciment composé CPJ

L'argile peut être utilisée comme ajout pouzzolanique dans la fabrication des ciments avec additions minérales à un taux de substitution de 30% environ [21,26].

II- 2 -4-3 Utilisation générales

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

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines, ...), dégraissage.
- Décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux, ...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les inter stratifiés smectite -kaolinite servent en fonderie comme liant des sables de moulage.
- De nombreux travaux ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques.

On retiendra:

- Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers.
- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et dans leur polymérisation en peptides;
- Les essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une Montmorillonite.
- Les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres Composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux. De L'étude comparative des activités catalytiques de divers minéraux argileux Sur La polymérisation du styrène , il ressort que

la kaolinite, la palygorskite et certains mélanges kaolinite - palygorskite- illite- montmorillonite donnent des résultats satisfaisants.

- Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi -renforteur des gommes naturelles ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement Considérable qui la place au premier rang des consommateurs de kaolins,. En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.
- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaolinitiques;les carreaux de grés céramique pare exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits.

II-2-4-4-Les-méthodes-d'études des minéraux argileux

Les matières argileuses sont caractérisées par la présence d'une proportion fines dont la taille supérieure est généralement fixée à 2 μ m.Cette fraction est constituée par les minéraux argileux, mais on y trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des carbonates.L'analyse des aluminosilicates comme les argiles nécessite l'association de plusieurs techniques, les rapport centésimaux des constituants majeurs (concentration supérieure à 0.1%) tels que SiO₂;Al₂O₃;TiO₂;Fe₂O₃;K₂O.Na₂O peuvent varier dans des proportions considérables ; aussi toute méthode générale d'analyse est difficilement applicable à la grande diversité de produits Les traces ou les faibles quantités inférieure à 0.1% présentes dans ces minéraux (Mn,Cu;Zn); les sulfates et les chlorures),nécessitent des techniques analytiques appropriées ,suffisamment spécifiques et directes pour qu'il y ait le minimum d'interférences dues au nombre important d'oxydes présents dans ces matières.

II- 2 -5 Rôle de l'argile calcinée

La structure amorphe de l'argile calcinée entre 600 et 850°C, lui acquiert des propriétés pouzzolaniques .Un remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagée, car la rend capable de réagir avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment portland pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique. La calcination d'une argile constituée d'un réseau cristallin très désorganisé, conduit à de bonnes performances pouzzolanique [26,27,30] .L'activité pouzzolanique augmente avec l'amorphisation du réseaux minéralogique de l'argile calcinée.

II- 2 -6 Réactivité pouzzolaniques des argiles calcinées

Les argiles calcinées (déchet de briques) se distinguent par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland. [26,30] .Les composés ainsi formés, par exemple, les C-S-H et les hydrates aluminosilicates [23,28] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages. La consommation de l'hydroxyde de calcium par le déchet de briques permet également de supprimer le phénomène des efflorescences. Dans un premier temps

on a choisi de rappeler la définition et les méthodes de mesure de l'activité pouzzolanique Parmi celle-ci :

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

II-3 Introduction

Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc.)

II-3 -1 Brique de terre cuite

Les matériaux de terre cuite ont été utilisés depuis plusieurs siècles , ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, dans le domaine traditionnel industriel. Ils sont fabriqués à partir d'argile devenant souvent rouge à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose à jaune et blanc [31].

II-3 -1-1 L'extraction

L'extraction peut se faire par des engins mécaniques : décapeuse, pelles chargeuses ...etc. La matière première extraite, acheminée à l'usine par camions, voies ferrée, bandes transporteuses.



Figure 2-3 gisement d'argile de B .Amer à Ouargla

II-3 -1-2 Façonnage

Le façonnage des produits (pleins, perforés et creux), est réalisé par deux procédures : étirage et pressage [31] [32] [33] [34] Voir **Figure (2. 3)**.

II-3 -1-3 Séchage

Les produits sont façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30% (les chiffres exprimés en pourcentage par rapport au poids sec). Il est nécessaire avant la cuisson d'éliminer la plus

grande partie de cette eau, par des séchoirs bien réglés **Figure (2 .4)**. L'énergie consommée varie de 3.5×10^6 à 4.10×10^6 J/Kg d'eau évacuée, le séchage d'une tonne de produit nécessite une consommation d'énergie électrique de 6 à 13 Kwh.

II- 3 -1-4 Cuisson

C'est la dernière opération que doit subir le bloc d'argile façonné et séché pour devenir ensuite une brique de terre cuite. C'est donc une phase extrêmement importante qui doit se dérouler très progressivement, c'est à dire. que la fournée est soumise à un échauffement régulièrement croissant jusqu'à la température de cuisson (comprise entre 850° et 1200°C selon l'espèce d'argile utilisée), ensuite elle doit refroidir aussi graduellement.

Il existe une très grande variété de fours, qui peuvent être classer en deux catégories principales :

les fours à fonctionnement discontinu et les fours à fonctionnement continu. Dans le premier cas, le mode opératoire comprend le chargement du four, sa mise à feu, son extinction et refroidissement lorsque la cuisson est terminée. Dans un four du type continu, le feu ne s'éteint jamais, et c'est le chargement qui est introduit et extrait du four suivant un cycle régulier et ininterrompu

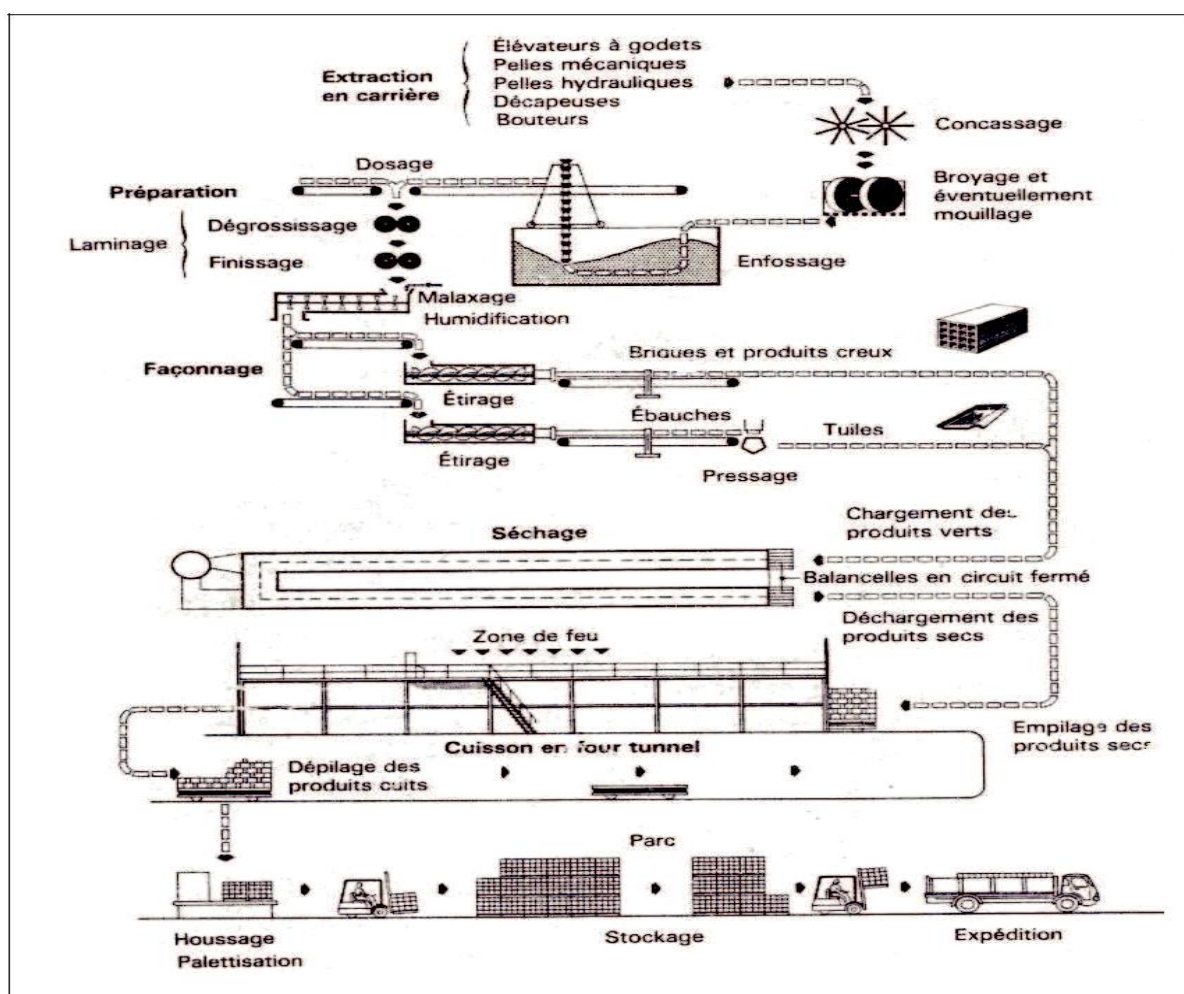


Figure 2-4 Fabrication des produits de terre cuite [31]

Concernent la réaction des matières premières à la cuisson, la chaleur provoque des modifications de masse volumique, de porosité, de dureté, dimensions. Elle provoque également des déshydratations, des décompositions et des combinaisons qui modifient les propriétés comme suit :

- jusqu'à 200° C environ, évacuation de l'eau résiduelle courant le séchage ;
 - de 200 à 450° C, décomposition de matière organique;
 - de 450 à 650° C, décomposition des minéraux argileux avec départ de l'eau de constitution ;
 - de 650 à 750° C, décomposition du carbonate de chaux (cas des argiles calcaires);
- [31] [32] [33].

II-3 -1-6 les propriétés et caractéristiques de brique de terre cuite

Les propriétés et les caractéristiques de brique de terre cuite sont indiquées dans les tableaux suivants :

E : épaisseur en (cm)	5	10	20	25
R ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	0.10	0.20	0.39	0.55

Tableau (2. 1) : la Résistance thermique des Briques creuses [34]

Masse volumique (kg/m^3)	1650-2000
Absorption d'eau	30 - 80 %
Isolation acoustique	41 - 54 dB
Résistance à la compression	12.5 - 40 MPa

Tableau (2. 2) : propriétés des briques pleines et perforés [34]

pleines			
Epaisseur (cm)	5.5	10.5	22
R ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	0.05	0.09	0.20

Tableau (2. 3) : la Résistance thermique des briques pleines et perforés [34]

* la Résistance thermique des briques de terre cuite égale $1.15 (W / m \cdot ^\circ C)$ [34] Briques pleines ou perforées en terre cuite selon la Norme XP P 13-305 . On distingue trois types de produits :

- Brique pleine

Brique ne comportant aucune perforation et dont le format d'appellation le plus courant est 6x11x22 cm **Figure (2. 5).**

- Brique perforée

Brique comportant des perforations perpendiculaires à la face de pose, la somme des sections des perforations étant inférieure ou égale à 50% de la section totale, et de largeur inférieure à 14 cm **Figure (2. 5) .**



Figure 2-5 Brique pleine et perforée et Brique

II-4 La valorisation de déchet

II-4 -1 Des solutions écologiques et pérennes

Si la meilleure des politiques réside dans la réduction des déchets à la source, une quantité énormément élevée de déchets est produite chaque année à travers le monde. Le traitement de certains d'entre eux, dont le réemploi est impossible (pneus, huiles usagées et farines animales), est un enjeu majeur pour la collectivité, les pouvoirs publics et les industriels. Il est indispensable de mettre en place des solutions écologiques et pérennes pour les valoriser sans danger pour l'environnement et les riverains. A titre d'exemple près d'un million de tonnes de déchets par an sont ainsi valorisés par l'industrie cimentière en France.

II-4-1-2 Le rôle actif de l'industrie du ciment et du béton

Grâce à la valorisation des déchets dans les cimenteries et les centrales à béton, ces industries participent depuis de nombreuses années à l'effort collectif pour la préservation des ressources naturelles et le traitement des déchets.

II-4-1-3 Le maintien de la qualité

La valorisation de déchets s'effectue dans des conditions particulièrement strictes. Ne sont ainsi utilisés que des déchets sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé de fabrication et la qualité finale des produits (ciments et bétons).

II-4-1-4 Un double bénéfice pour l'environnement

Les déchets sont utilisés de deux façons: En remplacement partiel des constituants de base (calcaire, argile, sable,...): c'est la valorisation matière.
En remplacement des combustibles fossiles (coke de pétrole, charbon, fioul lourd,...): c'est la valorisation énergétique.

II-5 La valorisation matière

L'industrie du ciment et du béton utilisent depuis longtemps des sous-produits issus d'autres industries comme les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres volantes en remplacement de certains constituants du ciment ou du béton sans en modifier la qualité. Traditionnellement, l'industrie cimentière emploie 80% de calcaire et 20% d'argile pour fabriquer le ciment. Cette argile peut être en partie remplacée par des cendres provenant de centrales thermiques au charbon. Ainsi, ces déchets n'ont pas à être éliminés par d'autres moyens.

II-6 La valorisation énergétique

Depuis une vingtaine d'années, les cimentiers réduisent leur consommation d'énergie d'origine fossile (charbon, fioul lourd, coke de pétrole,...) grâce à l'utilisation de déchets sélectionnés comme combustibles. L'industrie cimentière a été sollicitée par les pouvoirs publics pour la destruction des farines animales en raison de sa capacité à assurer une valorisation totale des déchets.

II-7 Valorisation des déchets en Algérie

La récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir vis à vis l'environnement, les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes/an, soit un kilogramme par habitant par jour, dont près de la moitié peut être récupérée. Environ 45% de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes, il y a 1,8 million de tonnes de papiers, 1,22 millions de tonnes de plastiques, 1,6 millions de tonnes de textiles et 300.000 tonnes de métaux. Ceux-ci pour une valeur approximative de 23 milliards de DA. C'est un véritable gisement. Or, il n'existe que 247 micro entreprises qui opèrent dans la récupération des déchets et qui ne valorisent à peine que 5 ou 6% de ce potentiel dont une partie est exportée. L'Etat mise beaucoup sur le développement d'une industrie de récupération et de recyclage. Elle est au cœur même du programme national de gestion des déchets municipaux (PROGDEM), qui constitue le principal cadre de référence en termes de gestion et de valorisation des déchets ménagers. Il existe deux (02) types de filières: classiques (plastiques, papiers, métaux, textiles, verres, bois et matières organiques) et complexes (pneus usagés, huiles usagées, piles et batteries et autres déchets d'équipements électriques et électroniques).

II-7-1 Des métiers de l'environnement à apprendre

La chaîne de valeur de ces filières comporte quatre niveaux à savoir, les études d'ingénierie, la logistique et transfert, le traitement et la valorisation, et enfin l'élimination. Les quatre niveaux nécessitent une expertise pour laquelle l'Algérie cumule d'immenses retards. Le développement durable pour lequel l'Algérie a pris des engagements internationaux favorise l'émergence de filières très porteuses (énergies renouvelables, la gestion des déchets ménagers, spéciaux ou des eaux usées, et les bâtiments à faible impact énergétique). Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique est ambitieux. Il prévoit une production électrique d'origine renouvelable (photovoltaïque, notamment) de 22.000 MW à l'horizon 2030 (5 MW actuellement). De même qu'on vise le recyclage de 70% des déchets (5% actuellement) en 2020, et à promouvoir la réutilisation des eaux épurées, mais il est nécessaire de réorienter la formation vers les métiers qui sont nécessaires au développement de telles filières. Ces filières nécessitent une expertise qui n'est pas disponible en Algérie. Elle est importée d'Allemagne, de France et de Suisse. Tout est à faire

dans ce domaine (expertise et ingénierie des déchets spéciaux, gestion des stations d'épuration, traitement des eaux usées, en irrigation, système de traçabilité, management environnemental, qualité de l'air, transport) car, ce qui est constaté que les capacités actuelles du pays ne lui permettent pas de tenir ses engagements internationaux.

II-7-2 La part de responsabilité des industriels

Il convient de signaler que l'Algérie dispose de 16 centres de tri opérationnels, 16 autres sont en travaux ou en phase d'études, et 5 en voie de lancement. Des investissements ont été également engagés pour la réalisation de 48 déchetteries dont 13 sont désormais en exploitation, 9 en travaux, 8 en phase d'études et 11 en instance de lancement (choix de sites). Par ailleurs, selon la réglementation en vigueur, tout producteur de déchets est tenu d'en assurer l'élimination dans des conditions à éviter les effets préjudiciables pour l'environnement, à faciliter la récupération des matériaux, le recyclage des matières ou la valorisation énergétique. Aucune étude n'a été engagée pour quantifier les déchets industriels. L'état a pris à sa charge l'élimination des déchets produits avant la promulgation de la nouvelle loi et ce, dans le cadre d'un plan national de gestion des déchets spéciaux (mercure, cyanures). Désormais, les industriels sont tenus de le faire par leurs propres moyens. Des contrats de performances ont été signés avec eux et ils avaient le temps nécessaire pour s'y préparer.

II-7-3 Les déchets inertes

Il est utile de préciser que les déchets sont classés en trois catégories: les déchets dangereux, non dangereux et inertes.

Pour être **inerte**, le déchet doit notamment être exempt de plastiques, plâtres, bois, amiante... Une formation du personnel affecté à la réception des matériaux doit donc être effectuée afin que la gestion du centre de tri et/ou recyclage soit conforme à la réglementation.

II-7-3-1 Matériaux autorisés

Les matériaux stériles issus du site d'extraction.

Les matériaux de type argileux (si l'arrêté l'autorise)

Les matériaux naturels, sables, graviers, blocs rocheux, résultant des travaux publics tels que le terrassement et n'ayant pas fait l'objet d'une quelconque contamination au cours de ces travaux.

Les déchets triés issus du secteur du bâtiment (construction, démolition et réhabilitation), tels que: mortier, béton, béton cellulaire, rebus de ciment, briques (sauf briques réfractaires), tuiles, pierres, blocs, céramiques, carrelages, sanitaires, gravats, verre, déchets de minéraux.

Ces matériaux ne doivent pas contenir de plâtre et ne doivent pas avoir été contaminés par une quelconque activité.

II-7-3-2 Matériaux interdits

Les matériaux provenant d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) sauf s'ils ont fait l'objet d'une autorisation spécifique.

Les terres suspectes ou considérées polluées lors de leur réception sur site.

Les déchets industriels spéciaux et les déchets dangereux, comme par exemple les sous-produits générés par les activités de la métallurgie. Les briques réfractaires. Les déchets industriels banals.

Les matériaux putrescibles et fermentescibles tels que bois, papiers, cartons, déchets verts, ordures ménagères.

Les matières synthétiques tels que caoutchouc, plastiques, résines, ainsi que les métaux, quels qu'ils soient. Les matériaux solubles tels que les plâtres. Les enrobés et produits bitumineux, goudrons, asphalte, y compris ceux résultant du démantèlement d'une chaussée de route. Les déchets non refroidis. Les déchets susceptibles de s'enflammer spontanément et les explosifs.

Les matériaux non pelletables, tels que liquides, effluents, produits de vidange, boues ne résultant pas du criblage mécanique des matériaux extraits du site lui-même.

II-7-3-3 Le recyclage

Il existe trois filières de valorisation pour les matériaux inertes: un réemploi direct sur les chantiers, un acheminement vers des plateformes de recyclage et une utilisation en remblais pour le réaménagement des carrières.

Chapitre III: Matières premières, formulation des Ciments – Mortiers et Mesures Expérimentales

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières, la méthode de formulation des ciments et mortier et description des essais utilisés.

III -1 Matières Premières:

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- déchets de briques.
- Clinker.
- Gypse.

III -1-1 Les déchets de briques :

Les déchets de briques utilisés dans notre étude expérimentale comme ajout Le ciment a été substitué partiellement à différents pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) par rapport au poids massique de clinker par un ajout Les déchets de briques.

III -1-1-1 Composition chimique des déchets de briques :

La composition chimique est indiquée dans le Tableau (4-1). Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge Hammam Saliha. L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé, afin de déterminer sa composition chimique.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P.F
Teneurs de déchets de briques	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.0

Tableau 3-1 Composition chimique déchets de briques

III -1-1-2 Diffraction par rayons x

La technique de Diffraction aux rayons X a pour but la détermination de l'état de cristallisation des matériaux et leur état d'amorphisation après traitement thermique [WILSON, M.J., (1987)]. Le matériau testé doit être finement broyé et tamisé à 80µm. Le matériel utilisé est un Diffractomètre Siemens D 500 (rayonnement λ Cu K α , monochromateur arrière en graphite) piloté par un ordinateur et couplé à un système informatique qui permet l'exploitation automatique des résultats. Le logiciel utilisé pour l'identification des phases cristallines est le DIFFRAC 2001 qui permet d'identifier la phase minérale, sous réserve qu'elle soit bien cristallisée et lorsqu'elle est présente à des teneurs de 2% à 3% en volume. Longueur d'onde du tube utilisé en cuivre est constante et vaut 1.54. L'angle de diffraction donnant le signal maximum est 2θ , il est détecté par le Diffractomètre. On peut calculer la distance interréticulaire d par la formule de Bragg :

$$d = \lambda / 2\sin\theta$$

On peut déterminer la nature des minéraux constituant l'échantillon testé par l'analyse des spectres de la diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse quantitative de l'argile calcinée (déchets de briques).

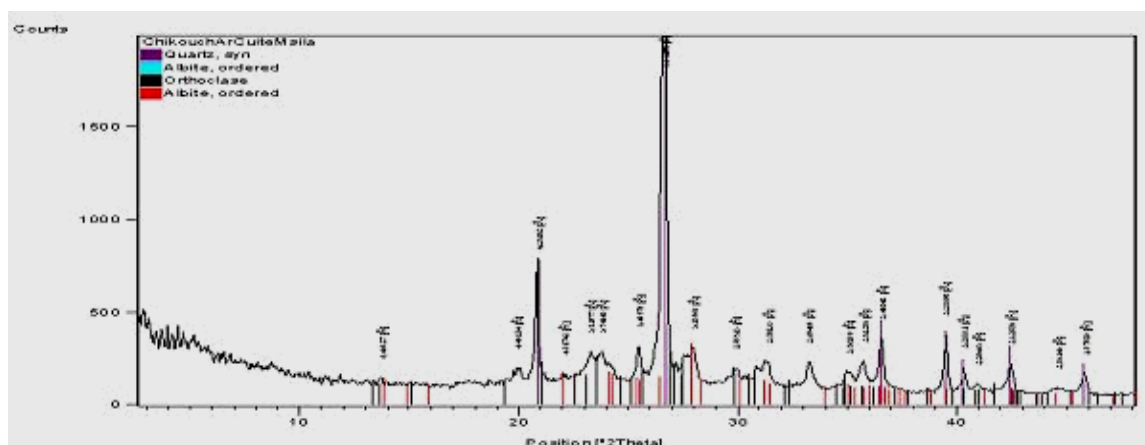


Figure 3-1. Minéralogie (spectre de diffraction des rayons X) de l'argile calcinée

III -1-2 Le clinker :

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C_3S . Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalâa et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau (3-2).

Clinker	Clinker de Hammam Dalaa (H/D)
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Bousâada)
	Minerai de fer
Densité apparente	1,32
Dureté	37

Tableau 3-2 Principaux constituants du cru de clinker

3-2 Principaux constituants du cru de clinker.

III -1-2-1 Composition chimique et minéralogique du clinker :

Les compositions chimique et minéralogique du clinker utilisé sont présentées dans le Tableaux (3-3) L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (Hammam Dalaâ).

Éléments (%)	Clinker
SiO ₂	21,49
Al ₂ O ₃	5,05
Fe ₂ O ₃	3,81
CaO	66,09
MgO	1,8
SO ₃	0,82
K ₂ O	0,71
Na ₂ O	0,11
Chaux libre	1,08
C ₃ S	59,18
C ₂ S	16,99
C ₃ A	6,94
C ₄ AF	11,58

Tableau 3-3 Composition chimique et minéralogique du clinker.

La composition minéralogique du clinker a été déterminée d'après la formule de BOGUE.

III -1-2-2 Modules caractéristiques du clinker :

Modules caractéristiques	M _h	M _s	M _{af}	M _{sat}	H _i
Clinker Lafarge Hammam Dalaâ	2,18	2,42	1,33	0,963	0,39

Tableau 3-4 Modules caractéristiques du clinker.

III -1-3 Le gypse :

III -1-3-1 Composition chimique :

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, CaSO₄. 2H₂O) a été maintenu constant à 5% . dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment. Les compositions chimiques du gypse sont données par le tableau (3-5).

Eléments(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F	CL
Gypse de Biskara	1,98	0,45	0,17	32,08	2,88	39,4	0,1	0	24,12	0,01

Tableau 3-5 Composition chimique du gypse.

Le rôle principale de gypse :

- Contribue la résistance à 02 jours.

- Régulateur de prise.
- Aide de broyage de ciment.

III -4 Formulation des Ciments:

III -4-1 Composition pondérale des différents ciments :

Les différents ingrédients (Clinker, déchets de briques et Gypse) ont été concassés séparée à une dimension inférieure à 100um , Puis mélangés soigneusement à différentes proportions (Tableau 3-6) .

SSB (g/ cm ²)= 3000			
Types de ciments	Clinker (%)	Gypse (%)	déchets de briques (%)
CPA 0	95	5	0
CEM 01	90	5	5
CEM 02	85	5	10
CEM 03	80	5	15
CEM 04	75	5	20

SSB (g/ cm ²)= 3500			
Types de ciments	Clinker (%)	Gypse (%)	déchets de briques (%)
CPA 0	95	5	0
CEM 01	90	5	5
CEM 02	85	5	10
CEM 03	80	5	15
CEM 04	75	5	20

Tableau 3-6 Compositions pondérales des dis (10) ciments préparés.

III -4-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés :

Les résultats de la composition chimique des dis (10) ciments préparés sont présentés dans le Tableau (3-7). L'ajout déchets de briques substitué à divers pourcentages (0% ,5% , 10% , 15% , 20%,). Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout déchets de briques dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par déchets de briques) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion) et la microstructure du mortier ont été étudiées.

L'incorporation des additions déchets de briques dans le clinker à différents pourcentages : (0% ,5%, 10% , 15% , 20% ,) augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O) et diminue le taux d'oxyde (CaO , SO_3).

Eléments %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
CPA	21.31	5.00	3.38	60.94	1.91	2.04	0.54	0.09
CEM 1	26.31	5.95	3.90	56.03	2.02	2.03	0.62	0.14
CEM 2	27.89	6.25	3.98	54.49	1.99	1.93	0.65	0.14
CEM 3	29.20	6.49	4.19	52.91	2.03	1.93	0.65	0.15
CEM 4	31.18	6.91	4.51	50.96	2.04	1.80	0.70	0.15

Tableau 3-7 Composition chimique des ciments préparés.

La composition chimique est un facteur déterminant de la résistance des ciments aux agents agressifs. On voit que le pourcentage en teneur d'anhydride sulfurique (SO_3) est inférieur à 4%. Ceci est conforme à la norme NF EN 197-1.

III -5 Formulation des mortiers normalisés :

le mortier est constitué par le mélange suivant :

- 1350 g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- 450 g du ciment .
- 225 g l'eau de gâchage.
-

III -5-1 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillée préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M'sila) .



Figure 3-2 Distillateur (Lafarge laboratoire)

III -6 Mesures expérimentales:

III -6-1 Essai sur ciment anhydre :

III -6-1-1 Masse volumique absolue :

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des dis (10) types de ciments utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier". Les résultats sont présentés dans le Tableau (3-8).

Conduite de l'essai :

- Peser 64 g de ciment .
 - Introduire le benzène ou kérosène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V_0 .
 - Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) .
 - Attendre 20 minutes et corriger le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
 - Introduire la poudre de ciment dans le Densimètre .
 - Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre .
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit V_1

Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

$$\gamma_c = M / (V_1 - V_0)$$

SSB Visé	Ciment	Densité (g/cm³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	3,15
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	3,10
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	3,09
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	3,05
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	3,02

SSB Visé	Ciment	Densité (g/cm³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	3,15
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	3,11
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	3,08
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	3,06
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	3,00

Tableau 3-8 Masse volumique absolue des ciments.

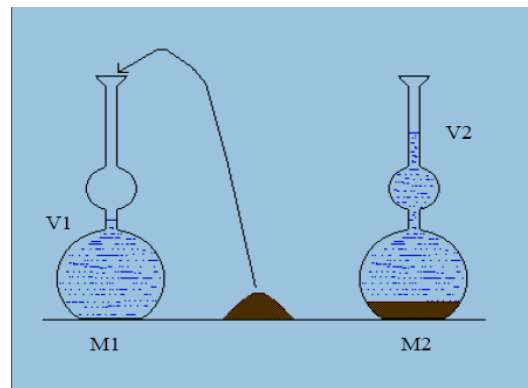


Figure 3-3Flasque Le Chatelier.

III -6-1-2 Mesure de la finesse du ciment (Norme NF P 15-442 -EN-196-6) :

Principe de l'essai :

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifiées. (Figure 4-3).

La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

Conduite de l'essai :

- Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité $e = 0.500$.
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston .
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre .
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide a la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = \frac{K}{\rho} \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{(0,1 \eta)}} (cm^2/g)$$

Avec :

k : constante de l'appareil ($K = 2.106$) .

ρ : Masse volumique du ciment en g/cm^3 .

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise .

t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde .

m : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine .

$$m = \rho c.v.e$$

v = 1.848 volume de la cellule.

e = porosité du ciment dans la cellule.

Figure 3-4 Le Densimètre de Le Chatelier.



SSB Visé	Ciment	SSB (g/cm ³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	3000
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	3020
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	3050
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	3080
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	3100

SSB Visé	Ciment	SSB (g/cm ³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	3500
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	3520
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	3550
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	3570
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	3585

Tableau 3-9 SSB de différent ciment préparé.

III -6-1-3 Analyse granulométrique (Méthode alpine) :

- Objet :

Ce mode opératoire a pour but de décrire le mode d'emploi d'utilisation de la tamiseuse ALPINE référencé M0212.

Nous allons décrire l'appareil et les étapes pour procéder à un tamisage de produits et nous précisons les consignes à respecter.

- Domaine d'application :

Le tamis à air ALPINE est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière.



Figure 3-5 Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila) .

- Mode opératoire :

- Appareillage :

Description :

Le tamis à air ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air. Il consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîner le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis. L'ensemble de l'appareil comprend :

- le tamis Alpine avec manomètre en U.
- le ventilateur.
- le dépoussiéreur (filtre).
- le tambour tamisant.
- un filtre pour recueillir les fines (éventuellement)
- deux tamis : 45 μ m , 90 μ m.

-Détermination du rejet en utilisant un seul tamis :

Voici les étapes à suivre :

- faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- mettre en place le couvercle en plexiglas.
- brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton molleté.
- mettre en route l'aspiration.

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur et l'aspiration de poussière démarrent, le tamisage commence. A travers le plexiglas, on peut observer directement le tamisage. Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique. Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle. L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels. Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière.

- Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement. Couper alors l'aspiration.
- Peser la matière restant sur le tamis.

Soit **P** le poids trouvé en grammes. **Rejet = $P \times 10$ (%)**. (Voir Tableau 3-10)

SSB Visé	Ciment	Refus 45um	Refus 90um
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	14,2	1,5
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	17,3	4,6
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	16,7	4,34
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	16,1	4,08
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	15,5	3,82

SSB Visé	Ciment	Refus 45um	Refus 90um
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	12,8	1,2
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	14,9	3,56
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	14,3	3,3
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	13,7	3,04
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	13,1	2,78

Tableau 3-10 Caractéristiques de la granulométrie(Refus 45& 90µm) des différents ciments.

III -7 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment) :

III -7-1 Essai De Consistance (Norme EN 196-3 2005) :

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau de gâchage optimale qui définit une consistance dite normalisée elle est fonction du rapport E/C.

L'essai a été réalisé avec l'appareil de Vicat selon la norme EN 196-3 (Figures 4-6).

Objectif de l'essai :

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir apprécier cette évolution qui est fonction de la teneur en ajout (calcaire) dans le ciment et la quantité d'eau de gâchage ; il faut partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

Principe de l'essai :

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de ($\varnothing = 10$ mm) sous l'effet d'une charge constante (300g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide. (Figure 4-6).

Conduite de l'essai :

- Verser la quantité d'eau dans la cuve du malaxeur .La température dans la salle doit être de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 50%.

- Verser 500 g de ciment au centre de la cuve en un temps compris entre 5 et 10 secondes. La fin du versement correspond au temps 0.
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s.
- Arrêt du malaxage pendant 30 s, faire le raclage de la pâte.
- Remettre le malaxeur en marche pendant 90s à vitesse lente.
- Introduire la pâte immédiatement dans le moule tronconique de hauteur 40mm et de diamètre 70 et 80 mm posé sur une plaque en verre huilée sans tassement ni vibration excessives.
- Enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va et vient avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule.
- Placer l'ensemble sur la platine de l'appareil de Vicat.
- La sonde de diamètre $\varnothing = 10$ mm est amenée à la surface de la pâte et lâchée sans vitesse initiale. La sonde s'enfonce dans la pâte. Quand elle s'immobilise; ou au plus tard 30s après l'avoir relâchée.
- Mesurer la distance d entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule, cette distance d caractérise la consistance. Si $d = 6\text{mm} \pm 2$; c'est la consistance normalisée Si d est différente de cette valeur, on refait l'essai avec un nouveau rapport E/C jusqu'à l'obtention de la valeur recherchée.

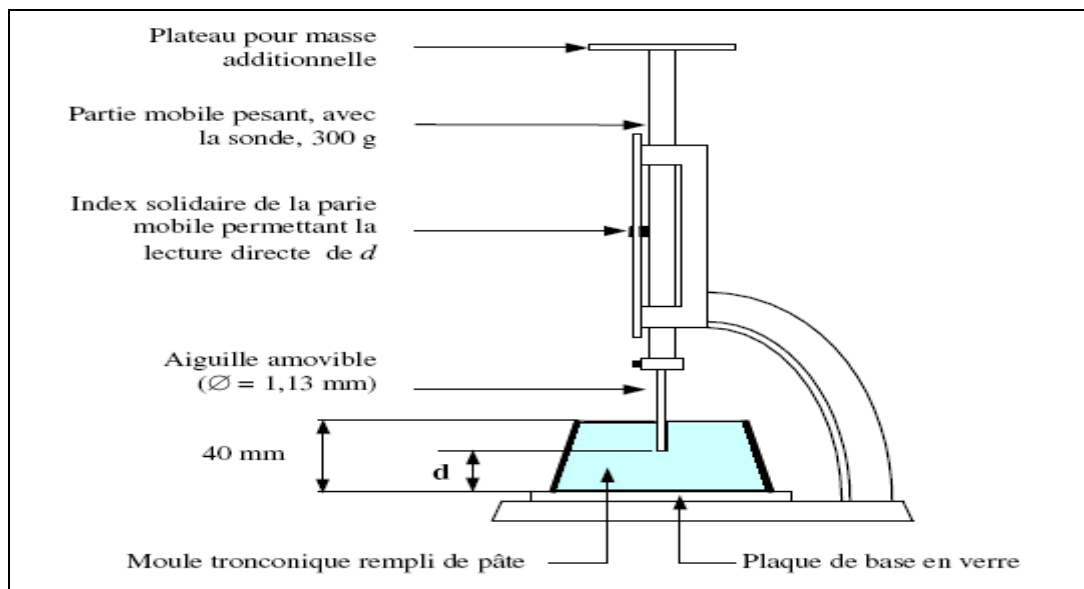


Figure3-6 Appareil de Vicat manuel.

III -7-2 Essai de Prise :

Objectif de l'essai :

Il consiste à déterminer le début et la fin de prise des pâtes pures des ciments étudiées conformément à la norme EN 196-3.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat manuel ou automatique .(**Figure 3-7**)



Prisomètre



Vicat manuel

Figure 3-7 L' appareil de Vicat.

Le Vicat manuel équipée d'une aiguille de 1.13mm de diamètre ; sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'enfonce à une distance d du fond du moule.

Si $d = 6\text{mm} \pm 3$ On dit que c'est le début de prise, le temps est mesuré à partir du temps 0 du début de malaxage. Si l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte vaut $d = 0.5\text{mm}$. On dit que c'est la fin de prise, alors la pâte devient un bloc rigide.

Equipement utilisé :

Une armoire climatique maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure à 90% et l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm.

Conduite de l'essai (Norme EN 196-3) :

Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée comme indiqué au 2-5-2-1. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale.

Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30s d'attente) .

On relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille à la plaque de base.

On recommence l'opération à intervalle de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = (6 \pm 3)$ mm cet instant mesuré à 5 mn près correspond au temps de début de prise. On continue l'opération on faisant tourner le moule sur l'autre face le temps de fin de prise correspond à l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte que de 0.5mm pour la première fois.

III -7-3 Essai de stabilité :

Objectif de l'essai :

L'essai consiste à mesurer l'augmentation de volume provoquée lors de la réaction d'hydratation par la présence de l'oxyde de calcium ou de magnésium contenu dans les ciments étudiés .

Principe de l'essai :

L'essai consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des cinq types de ciment testé.

Equipement nécessaire :

Une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et au moins 90% d'humidité relative. Une bouilloire dans laquelle les éprouvettes sont immergées et la température de l'eau est portée de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $3\text{h} \pm 5\text{mn}$ Deux moules en laiton élastique appelés

"appareil le Chatelier". Ces moules sont fondus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.

Conduite de l'essai :

La pâte de consistance normalisée (voir paragraphe 2-5-2-1) est introduite dans les deux moules en laiton. Conservation des moules pendant 24h dans l'armoire humide . Au bout de ce temps on mesure à 0.5mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles ,Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant $3h \pm 5mn$ à une température d'ébullition. Soit **B** l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit **C** l'écartement après refroidissement à 20°C La stabilité est caractérisée par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

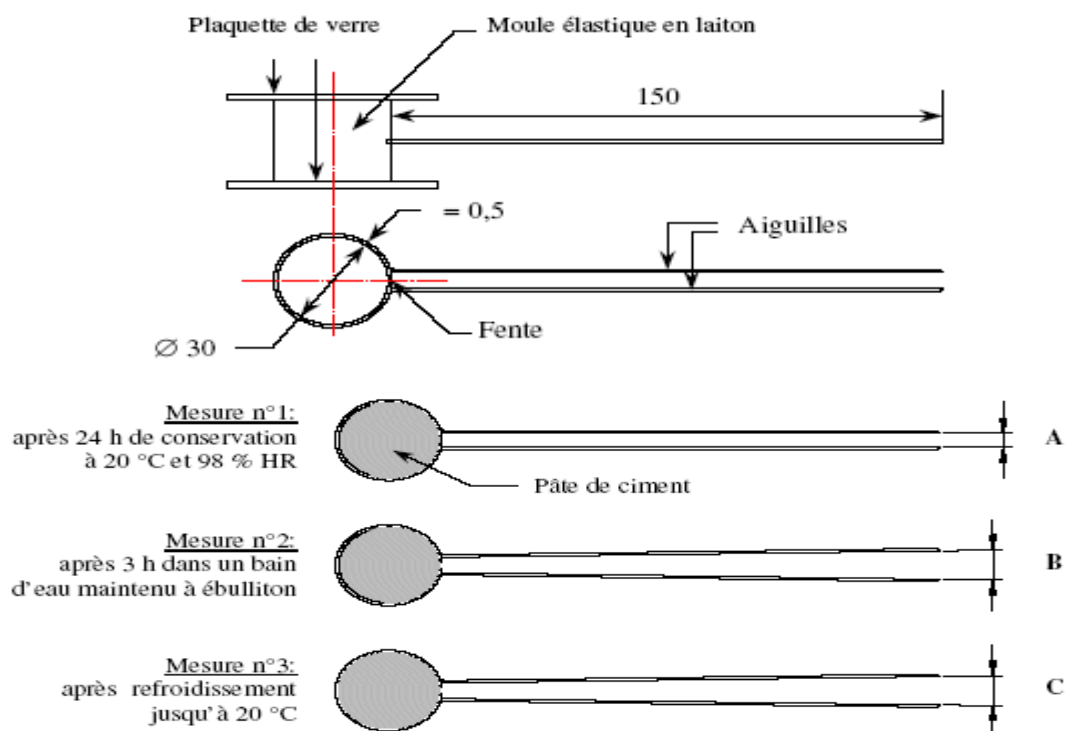


Figure 3-8 les Aiguillé de chatelier .



Figure 3-9 Le bouilloire de Chatelier.

III -8 Essai sur Mortier :

III -8-1 Mortier normalisé :

Dans le but de confirmer l'évolution des résistances mécaniques ,Des éprouvettes contenant un mélange ciment Portland et calcaire ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1 .

L'incorporation de déchets de briques dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres .Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland de (0%, 5%,10%, 15%, 20%) selon la norme EN 196-1 NFP18-508 .

Type de ciment	Constituant du Ciment (%)			Composition des mortiers		
	Clinker (%)	Gypse (%)	déchets de briques (%)	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable normalisé (g)
CPA0 0%	95	5	0	450	225	1350
CEM01 5%	90	5	5	450	225	1350
CEM02 10%	85	5	10	450	225	1350
CEM03 15%	80	5	15	450	225	1350
CEM04 20%	75	5	20	450	225	1350

Tableau 3-11 Composition des mortiers .

IV-8-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques :

Les essais mécaniques ont été préparés des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³ selon la norme EN 196-1 dans une malaxeur semi-automatique. (Voir la Figure 3-10 et Figure 3-11)



Figure 3-10 Malaxeur semi-automatique de mortier
(Laboratoire de Lafarge M'sila)



Figure 3-11 Eprouvette Prismatique (4x4x16)cm³
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

La Méthodes d'essai des ciments et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc (Figure 3-12) , ou table vibrante (Figure 3-13). Les éprouvettes sont au nombre de trois par moule .



Figure 3-12 Table Vibrante
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

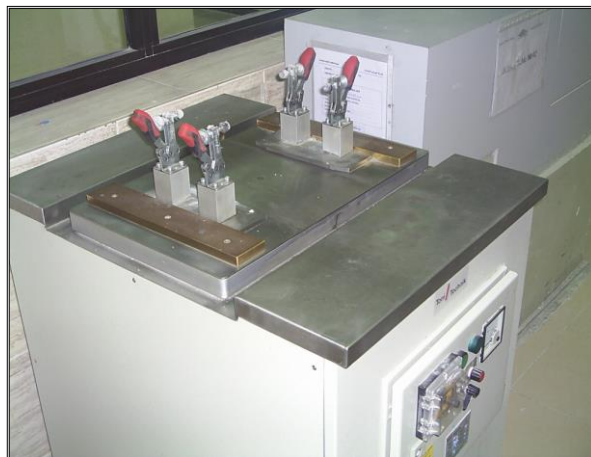


Figure 3-13 Table à Choc
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

Elle sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité de 90% .(Figure 3-14)



Figure 3-14 La Chambre d'humidité
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

Ensuite elles sont démoulées .. Les éprouvettes prismatiques sont plongées sans retard dans des bains d'eau à régulation de température $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.(Figure 3-15)



Figure 3-15 Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'sila)

Avant d'effectuer les essais ,les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité. Les essais sont d'abord effectués en flexion sur une presse permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN asservie en chargement de $50\text{N/s} \pm 10 \text{ N/s}$. Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$. (Voir Figure 4-16) Les essais mécaniques ont lieu sur 4 éprouvettes et sont testés .en flexion et en compression à 2,7, 28 jours.



**Figure 3-16 Machine de Compression
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

III -8-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal :

Objectif de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement.

Principe de l'essai :

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

Équipement nécessaire utilisé :

Il est décrit dans la Norme NF P15-433.

Une salle maintenue à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ Un malaxeur normalisé.

Des moules équipés de plots de retrait en laiton. (Figure 3-17)



Figure 3-17 Moules (4x4x16) cm³ Équipés de plots de Retrait

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 μm . Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible aux variations de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.



**Figure3-18 Comparateur de Retrait
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Conduite de L'essai :

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160 mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t (3, 7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est : $L(t) = L_0 + dl(t)$. La variation de longueur au temps t (3, 7 et 28 jours) est :

$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0)$ La variation relative de la longueur est :

$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [dl(t) - dl(t_0)]/L_0$, $\Delta l(t)$ est la moyenne des trois éprouvettes issues de la même confection du mortier.

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'air,

$\Delta l(t)$ est négatif et on parle de retrait.

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau,

$\Delta l(t)$ est positif et on parle de gonflement.

III -8-4 Mesure de La Maniabilimètre de Mortier :

But de l'essai :

Il s'agit de déterminer le temps d'écoulement des mortier , c'est à dire de définir la maniabilité des mortier . Cette mesure de maniabilité permet :

- d'apprécier la facilité de mise en place dans les ouvrages et de déterminer les quantités d'eau nécessaires.
- d'affiner les compositions de mortier en recherchant la maniabilité maximale pour des teneurs en eau et en ciment données.
- d'évaluer l'efficacité de certains adjuvants, plastifiants réducteurs d'eau en particulier.
- de vérifier sur chantier que la valeur limite définie pour le béton lors de l'étude est bien respectée.

Matériel :

Le maniabilimètre existe en appareil type B : pour $D \leq 12,5$ mm Le moule : Il repose sur le sol par 4 amortisseurs caoutchouc.

La cloison amovible : Elle sépare le moule en deux parties. Elle coulisse verticalement dans des glissières fixées sur la face externe du moule.

Le vibreur Electrique : à moteur asynchrone, fixé sur la face extérieure du moule.

La tige de piquage : Métallique, de 6 mm de diamètre, pesant 200 g, terminée par une calotte hémisphérique. Elle est utilisée lors du remplissage du moule.

Mode opératoire :

- Prélever 1 litre de mortier.
- Remplir le grand compartiment en 4 couches et piquer chaque couche de 6 coups de la tige de piquage, la tige étant tenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison amovible.
- Araser la surface libre à la règle.

Expression des résultats :

- Le temps réel entre la fin du malaxage et le début de l'écoulement sous vibration doit être de 2,50 min.
- Enlever la cloison amovible (la vibreur se met en marche) et déclencher le chronomètre.
- Arrêter le chronomètre lorsque le niveau du mortier atteint le trait - repère de l'appareil.
- Le résultat de la mesure est le temps t mis par le mortier pour arriver au trait – repère.



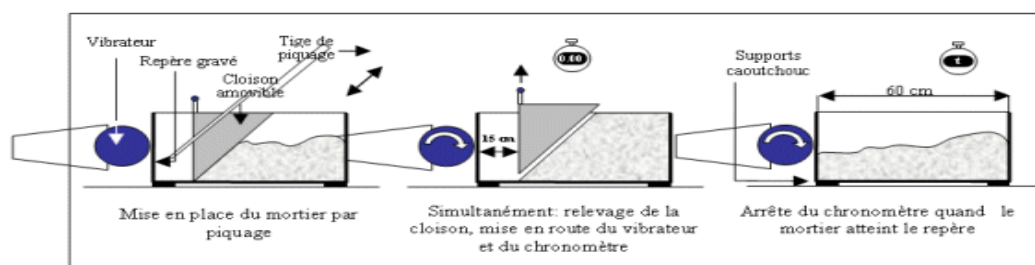


Figure 3-19 Maniabilimètre à Mortier (Laboratoire de Lafarge M'sila).

II-8-5 La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique) :

Principe :

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence.

L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

- Appareillage :

1- Calorimètre :

constitué d'un vase isotherme fermé par un bouchon isolant et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support .

La construction et les caractéristiques du calorimètre utilisé pour l'essai et de celui utilisé comme référence doivent être les suivantes :

a) un vase isotherme :

(par exemple un vase Dewar), fait en verre borosilicate plaqué à l'argent ; de forme cylindrique avec un fond hémisphérique. Ses dimensions intérieures doivent être d'environ 95 mm de diamètre et 280 mm de profondeur ; avec un diamètre extérieur de 120 mm environ. Un disque de caoutchouc d'environ 85 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur, doit être placé au fond du vase afin de servir d'appui au récipient contenant l'échantillon et de répartir uniformément la charge sur la paroi du vase .

b) une enveloppe très rigide :

dont la base est suffisamment large pour assurer une bonne stabilité à l'ensemble (en duralumin de 3 mm d'épaisseur, par exemple).

Le vase doit être séparé de la paroi latérale de l'enveloppe par un espace d'air de 5 mm environ et doit reposer sur un appui de 40 mm à 50 mm d'épaisseur, en matériau de faible conductibilité thermique (polystyrène expansé, par exemple).

Le bord supérieur du vase doit être protégé par un joint de caoutchouc placé à son contact.

Ce joint doit être un anneau, épais d'au moins 5 mm, en matériau de faible conductibilité thermique, fixé à l'enveloppe du calorimètre. L'anneau doit servir à positionner le vase et à fournir une surface d'appui sur le bouchon afin d'assurer l'étanchéité du dispositif de fermeture .

c) Un bouchon isolant :

Constitué de trois parties :

- **la partie inférieure**, plongeant dans le vase et dont le rôle est de limiter au maximum les pertes de chaleur vers le milieu extérieur. Elle doit être de forme cylindrique, de diamètre égal au diamètre intérieur du vase et d'une épaisseur de 50 mm environ. Elle doit être réalisée en polystyrène expansé (classe 20 kg/m³ environ) ou en un autre matériau de caractéristiques thermiques similaires. Sa base peut être protégée par une plaque de plastique (par exemple, en polyméthylméthacrylate) , de 2 mm d'épaisseur environ .

- **la partie centrale**, qui sert à assurer l'étanchéité du calorimètre tout en contribuant à la réduction des pertes de chaleur, doit être composée d'un disque de caoutchouc mousse de 120 mm de diamètre

- **la partie supérieure**, qui a pour but d'assurer la mise en place correcte et constante du bouchon sur le vase Dewar doit être constituée d'une enveloppe rigide contenant un dispositif de fermeture rapide de manière à comprimer la partie centrale en caoutchouc mousse pour assurer l'étanchéité du bouchon .

d) caractéristiques de performance :

Le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre ne doit pas dépasser 100 J.h-1.K-1 pour un échauffement de 20 K. Le ré-étalonnage est nécessaire :

- au moins tous les quatre ans ou après 200 essais ;

- en cas de détérioration du calorimètre ou d'un composant isolant.

Afin d'éviter de dégrader l'isolation du calorimètre, la température du mortier soumis à l'essai ne doit pas dépasser 75 °C.

2- Calorimètre de référence :

de même construction et caractéristiques que le calorimètre d'essai . Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (et considéré comme inerte).

3. Thermomètres à résistance de platine :

pour le calorimètre de référence et chaque calorimètre d'essai, dont la graduation doit couvrir, au moins, l'échelle de 19 °C à 75 °C. Si les conducteurs de la résistance électrique sont en cuivre, ils ne doivent pas avoir, dans la partie qui traverse le bouchon, une section supérieure à 0,25 mm².

S'ils sont en un autre métal, la résistance thermique totale par centimètre de conducteur doit être supérieure à 0,10 K.mW-1 (résistance thermique équivalant à celle d'un conducteur en cuivre de 0,25 mm² de section et de 1 cm de longueur).

La puissance calorifique dissipée par le thermomètre ne doit pas dépasser 3 mW. L'alimentation en courant continu, qui constitue un apport d'énergie, doit être évitée si la puissance calorifique dissipée excède 0,2 mW. Il est recommandé de s'assurer de la précision de l'ensemble du dispositif de mesure et d'enregistrement de la température.

La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de $\pm 0,3$ °C. Lorsque le calorimètre est étalonné *in situ* avec les conducteurs utilisés pour les essais de chaleur d'hydratation, la section totale des conducteurs sera au maximum de 0,80 mm² (quatre fils de 0,5 mm de diamètre), mais doit être telle que le coefficient de déperdition thermique du calorimètre soit inférieur à 100 J.h-1.K-1 pour un échauffement de 20 K .

La gaine de protection de ces conducteurs doit être fabriquée en matériau de faible conductibilité thermique.

4. Boîte à mortier :

Consistant en un récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'un volume d'environ 800 cm³, conçu pour contenir l'échantillon de mortier à essayer. La boîte à mortier, perdue après chaque essai, doit être étanche à la vapeur d'eau. Ceci doit être vérifié pendant l'utilisation en pesant la boîte à mortier après chaque essai. Elle doit être en fer-blanc contre-soudé électriquement et avoir une épaisseur nominale de 0,3 mm, un diamètre d'environ 80 mm et une hauteur d'environ 165 mm. Sa hauteur doit réserver un espace libre d'environ 10 mm entre le sommet de la boîte à mortier et le bouchon. Le couvercle de la boîte à mortier doit être muni, en son centre, d'un étui pour thermomètre en forme de tube cylindrique fermé à sa base. Le diamètre intérieur de l'étui doit être légèrement supérieur à celui du thermomètre.

Sa longueur doit être comprise entre 100 mm et 120 mm environ afin de lui permettre d'atteindre le coeur de l'échantillon.

5. Appareil d'enregistrement de la température :

capable d'enregistrer les mesures prises par chaque thermomètre.

Malaxeur à mortier :_ Conforme à l' EN 196-1.

6. Détermination de la chaleur d'hydratation :

Laboratoire :

La température du laboratoire où le mortier est gâché doit être maintenue à $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. La salle d'essais où la calorimétrie a lieu doit être maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.

La température affichée par le calorimètre de référence doit être considérée comme étant la température ambiante et doit être maintenue à $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$. La distance entre chacun des calorimètres doit être d'environ 12 cm. La vitesse de l'air de ventilation autour des calorimètres doit être inférieure à 0,5 m.s⁻¹. Lorsque plusieurs essais sont effectués simultanément, on doit compter au moins un calorimètre de référence pour six calorimètres d'essai ; lorsque plusieurs calorimètres d'essai sont utilisés avec un calorimètre de référence, un agencement hexagonal doit être organisé avec le calorimètre de référence au centre.

Mode opératoire :

a- Composition du mortier :

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de $(1\,575 \pm 1)$ g. Chaque gâchée de mortier doit être constituée de $(360,0 \pm 0,5)$ g de ciment ; $(1\,080 \pm 1)$ g de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et $(180,0 \pm 0,5)$ g d'eau distillée. Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1 575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues.

b- Malaxage :

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais. Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court. C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans l'EN 196-1 a été raccourci.

C- Mise en place de l'échantillon d'essai :

Aussitôt après le malaxage, peser ($1\,575 \pm 1$) g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à $\pm 0,5$ g. Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité. Remplir l'étui pour thermomètre de ($2,5 \pm 0,5$) cm³ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

Peser la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle. Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon. Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture. Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic. Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6min.

En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g. En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

d- Mesure de l'échauffement :

Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps.

La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence.

Faire au moins un relevé au cours des 30 premières minutes, suivi par des relevés effectués au moins toutes les :

1 h pendant les premières 24 h.

4 h au cours du deuxième jour.

6 h jusqu'à la fin de la période d'essai.

La fréquence de ces mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié.

Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes.

À chaque relevé de température déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai, ht , comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai, T_s , et celle de l'échantillon inerte, Tr_0 , placé dans le calorimètre de référence.



Figure 3-20 Calorimètre Langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila).



Figure 3-21 Sable Normalisé (Laboratoire de Lafarge M'sila).

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- La nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- La température extérieure.

Détermination de la chaleur d'hydratation : CEM III/A 42,5 -01

Caractéristiques du calorimètre :

Paramètres de l'essai	
Nom de l'essai	CHF 40%
Date de l'essai	23/05/12
Numéro de l'essai	
Voie d'essais	2
Temp. de référence (°C)	19.70
Observations	
<div> <div>Caractéristiques du calorimètre :</div> <div> Numéro 16 Coefficient de déperdition thermique (J/h.°C) : $67.30 + T (^{\circ}C) \times 0.162$ Capacité thermique à vide (J) 663.00 Capacité thermique totale (J) 2 487.20 </div> </div> <div> <div>Caractéristiques de l'éprouvette :</div> <div> Nature du ciment 0 Masse du ciment (g) : 360.00 Masse de l'eau (g) : 180.00 Masse du sable (g) : 1 080.00 Masse de la boîte (g) : 134.80 Masse des accessoires (g) 44.60 Température de gâchage (°C) 22.00 </div> </div>	
<div> Echelles du 705 Maximum voie 100.00 Unités >C </div>	
<div> <div>Annuler</div> <div>OK</div> </div>	

Figure 3-22 Caractéristiques du calorimètre (Laboratoire de Lafarge M'sila).

Chapitre V: Résultats Expérimentaux et Interprétation

VI -1 Introduction :

Dans ce chapitre; on présente les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur les différents composants du ciment anhydre, les mortiers , suivi par des discussions et interprétations basés sur la littérature.

VI -2 Influence du Taux d'ajout de déchets de briques Sur le Poids Spécifique du Ciment :

Les résultats du Tableau (4-1) et la Figure (4-1) présentent l'effet de l'addition de déchets de briques sur le poids spécifique du ciment ou densité du ciment. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une réduction du poids spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de l'argile cuité dans le ciment.
- l'augmentation des temps (début et fin) de prise

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout de l'argile cuité incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment. Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par l'argile cuité (taux de substitution de l'argile cuité) et la faible densité de l'ajout.

SSB Visé	Ciment	Densité (g/cm ³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	3,15
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	3,10
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	3,09
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	3,05
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	3,02

SSB Visé	Ciment	Densité (g/cm ³)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	3,15
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	3,11
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	3,08
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	3,06
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	3,00

Tableau 4-1 Poids spécifique des ciments préparés

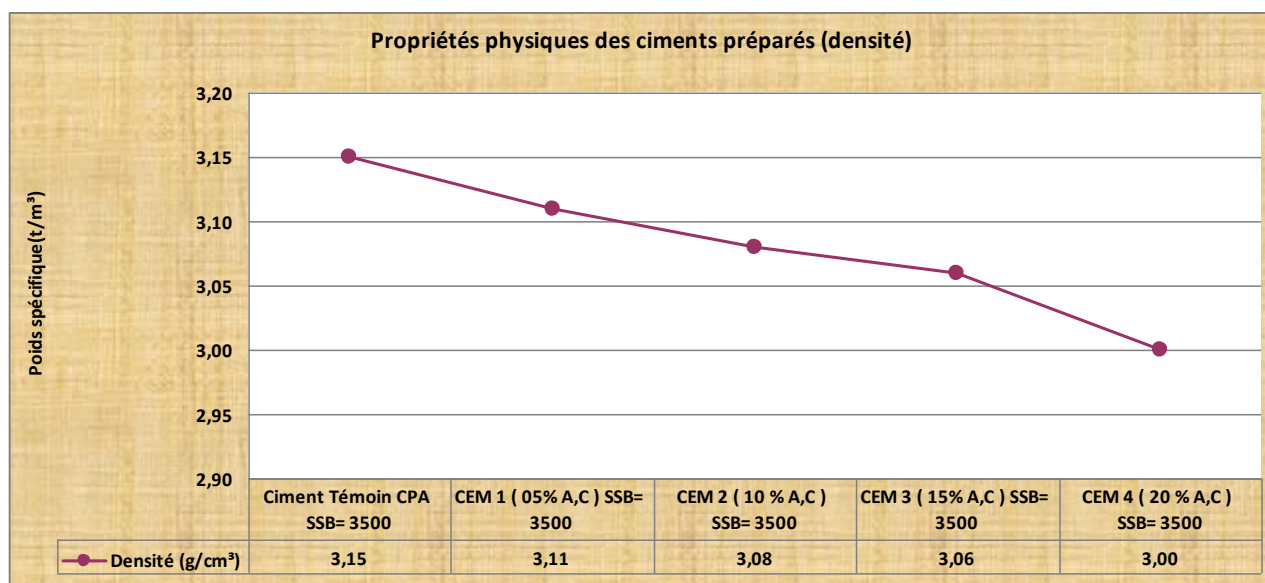
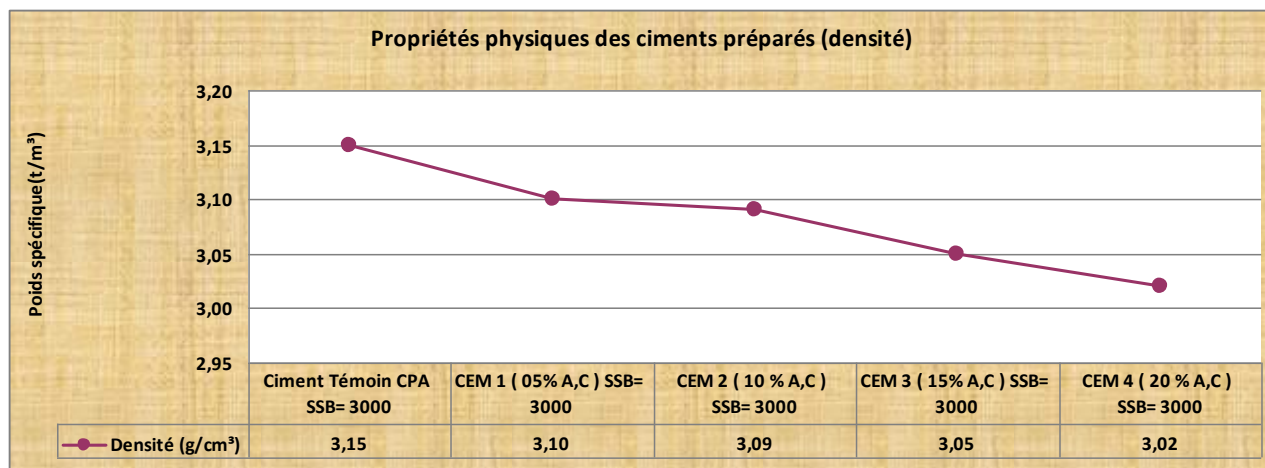


Figure 4-1 Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (déchets de briques).

VI -3 Influence du Taux d'ajout de déchets de briques Sur la Surface Spécifique du Ciment :

Les résultats du Tableau (4-2) et la Figure (4-2) présentent l'effet d'ajout de déchets de Briques sur la surface spécifique du ciment. Les Conclusions suivantes peuvent être tirées :

-Une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de déchets de Briques dans le ciment. Selon les résultats obtenus, voir tableau (4-2), on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout de déchets de Briques incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le surface spécifique (Blaine) de ciment.

SSB Visé	Ciment	SSB (g/cm²)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	3000
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	3020
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	3050
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	3080
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	3100

SSB Visé	Ciment	SSB (g/cm ²)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	3500
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	3520
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	3550
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	3570
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	3585

Tableau 4-2 Surface spécifique des ciments préparés.

Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par de déchets de Briques (taux de substitution de déchets de Briques) et la densité de l'ajout. (Densité de déchets de Briques = 2.8)

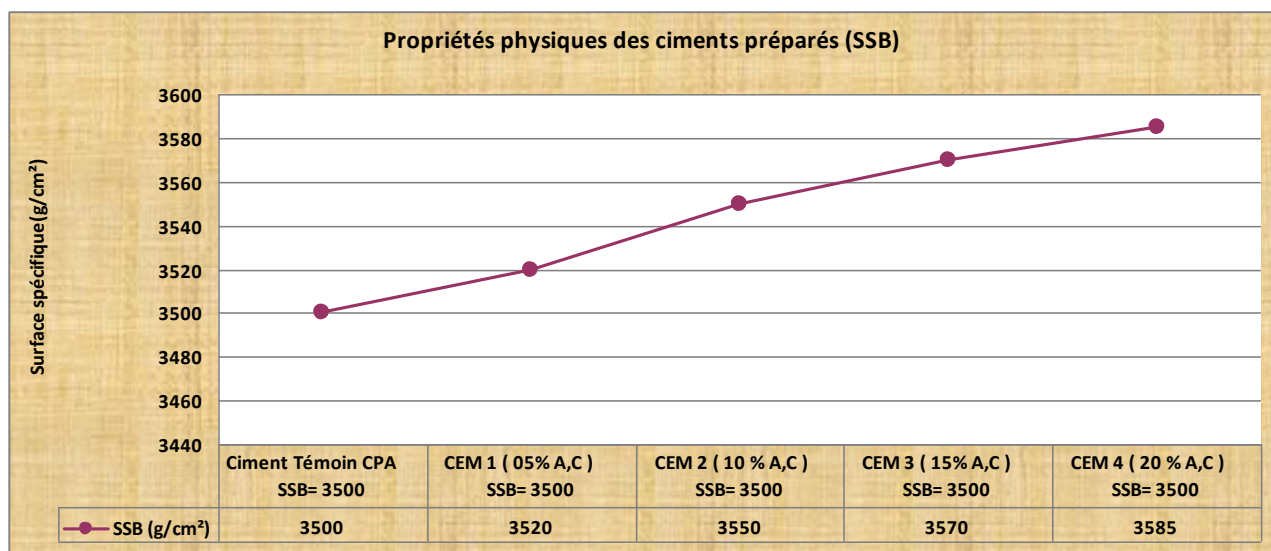
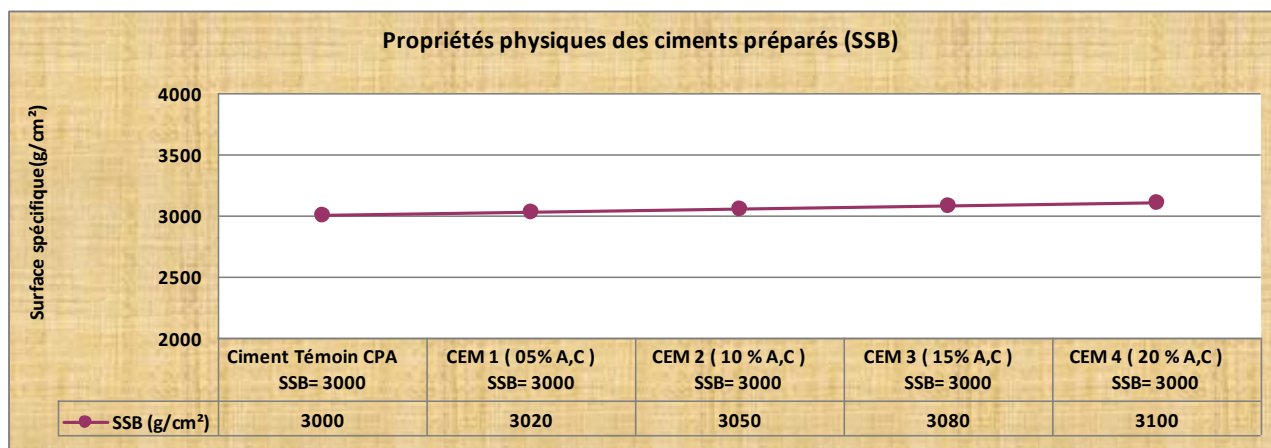


Figure 4-2 Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout de (déchets de Briques).

VI -4 Influence du Taux d'ajout de déchets de Briques Sur la Pâte de Ciment :

VI -4-1 Influence du taux d'ajout de déchets de Briques Sur la Consistance Normale :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-3 et Figures 4-3) présentent l'effet du taux d'ajout de (déchets de Briques) sur la consistance normale de ciment.

La demande de l'eau des pâtes de ciments préparées avec les différents pourcentages de l'argile cuite (substitution partielle de : 0%, 5%, 10%, 15% et 20%) est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat. L'influence de la quantité de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) sur la pâte de ciment est exprimée par les variations du rapport de demande en eau pour obtenir une consistance normale. Selon les résultats obtenus (Figures 3-3 et 3-4), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout de l'argile cuite (déchet de briques) incorporé dans le ciment a un double effet :

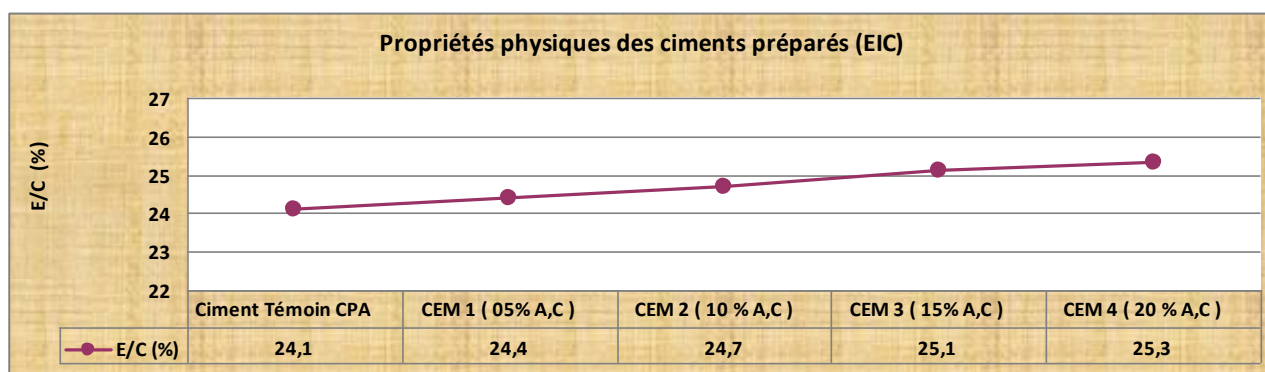
- Augmentation de la quantité de l'eau requise pour avoir une consistance normale de la pâte de ciment.
- Augmentation des temps de début et fin de prise.

On note également que l'addition progressive de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) influence sensiblement la demande de l'eau, ceci à comme conséquence une augmentation de la quantité de l'eau en fonction du pourcentage de l'addition minérale utilisée .Ceci peut être dû à la porosité de l'ajout de l'argile cuite et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface

SSB Visé	Ciment	E/C (%)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	24,1
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	24,4
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	24,7
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	25,1
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	25,3

SSB Visé	Ciment	E/C (%)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	24,1
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	24,6
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	24,9
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	25,4
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	25,8

Tableau 4-3 Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale).



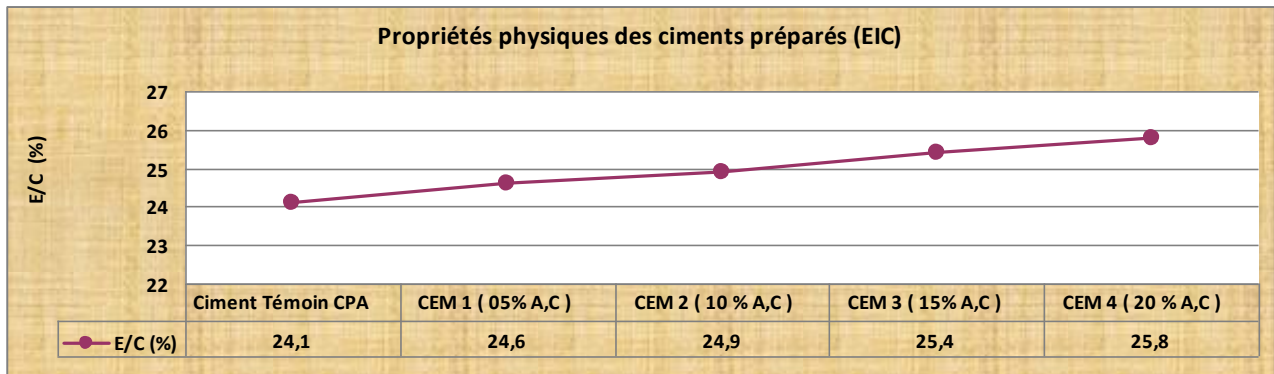


Figure 4-3 Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux d'ajout de (déchets de Briques).

VI -4-2 Influence du Taux d'ajout de déchets de Briques sur le Temps de Prise :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-4 et Figures 4-4) présentent l'effet du taux d'ajout de (déchets de Briques) sur le temps de prise de la pâte de ciment.

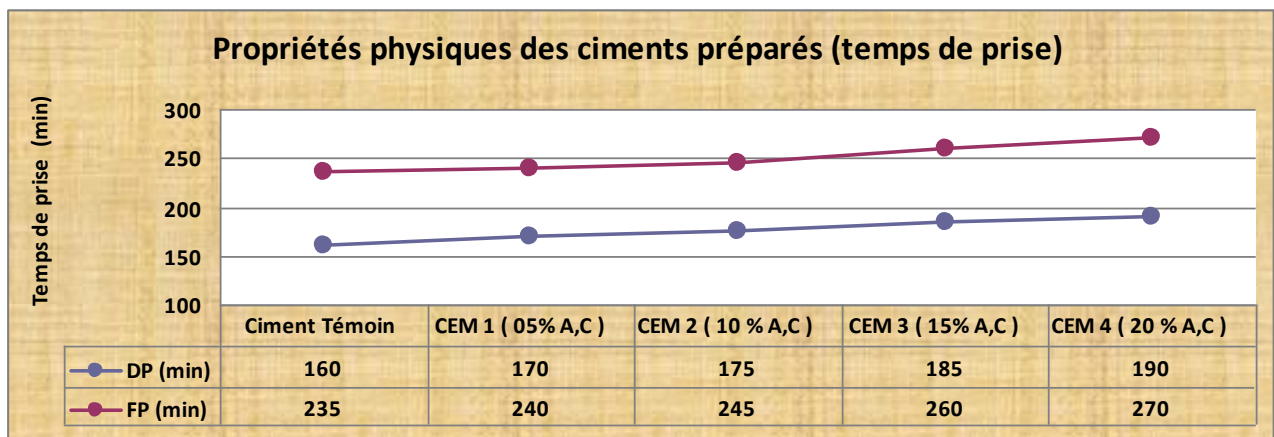
L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat automatique. Selon les résultats obtenus (Figures 4-4), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout de (déchets de Briques) incorporé dans le ciment a l'effet suivant:

- augmentation des temps de début et fin de prise.

SSB Visé	Ciment	DP (min)	FP (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	160	235
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	170	240
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	175	245
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	185	260
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	190	270

SSB Visé	Ciment	DP (min)	FP (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	150	220
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	170	250
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	180	260
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	195	275
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	200	280

Tableau 4-4 Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise).



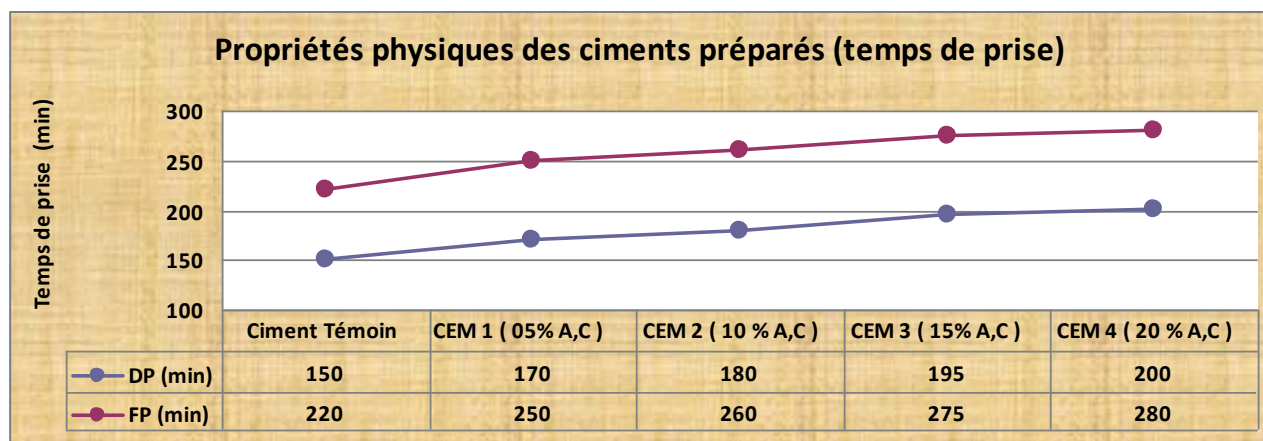


Figure 4-4 Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout de (déchets de Briques).

VI -4-3 Influence du Taux d'ajout de déchets de Briques Sur la Stabilité du Ciment :

Les résultats du (Tableau 4-5 et la Figure 4-5) indiquent que l'expansion à chaud (hydratation accéléré par traitement thermique à 100c°) augmente avec l'augmentation du taux de déchets de Briques d'une façon relativement linéaire et n'a pas d'effet significatif sur la stabilité du ciment et reste inférieure à la limite maximale imposée par la norme EN 196-3 qui est de 10 mm.

Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tel que le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée.

SSB Visé	Ciment	Expansion (mm)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	1
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	1,5
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	1,5
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	2
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	2

SSB Visé	Ciment	Expansion (mm)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	1
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	1,5
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	2
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	2
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	2

Tableau 4-5 Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier).

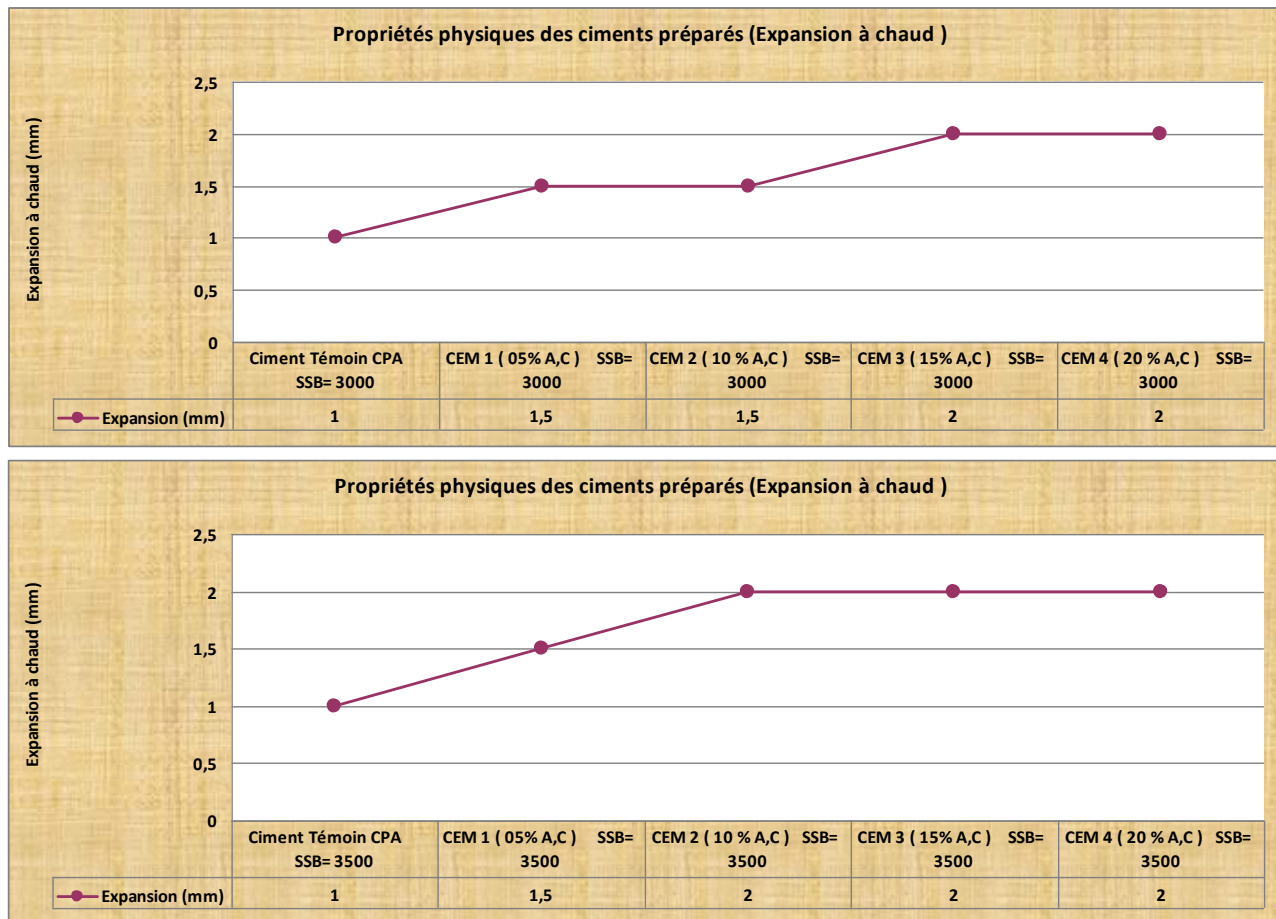


Figure 4-5 Effet du taux d'ajout de déchets de Briques sur l'expansion du ciment.

VI -5 Influence du Taux d'ajout de déchets de Briques Sur Le Mortier à base de sable Normalisé :

VI -5-1 Résistance à la Compression:

Le Tableau (4-6) et la Figure (4-6) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages du taux d'ajout (de déchets de Briques) par substitution (remplacement partiel du ciment par le de déchets de Briques) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents âges. On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge 7 et 28 jours (à court et moyen terme). Cette diminution de la résistance est considérable surtout au jeune âge et augmente lorsque le pourcentage de l'ajout augmente. Le remplacement du ciment par 5,10 et15, 20% de déchet de briques diminue la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation du minéral C3S (silicate tricalcique) et C 2 S (silicate bicalcique) moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme. A long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte – granulat.

SSB Visé	Ciment	Rc 02j (MPa)	Rc 07j (MPa)	Rc 14j (MPa)	Rc 28j (Mpa)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	26,20	39,90	45,50	56,50
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	22,80	39,10	44,50	54,40
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	21,40	37,70	43,10	53,00
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	19,70	36,00	41,40	51,30
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	18,80	35,10	40,50	50,40

SSB Visé	Ciment	Rc 02j (MPa)	Rc 07j (MPa)	Rc 14j (MPa)	Rc 28j (Mpa)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	27,50	43,80	49,20	59,10
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	23,60	39,90	45,30	55,20
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	22,70	39,00	44,40	54,30
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	20,20	36,50	41,90	51,80
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	20,70	37,00	42,40	52,30

Tableau 4-6 Evolution des Résistances à la Compression du Mortier en fonction du taux d'ajout de déchets de Briques (sable normalisé).

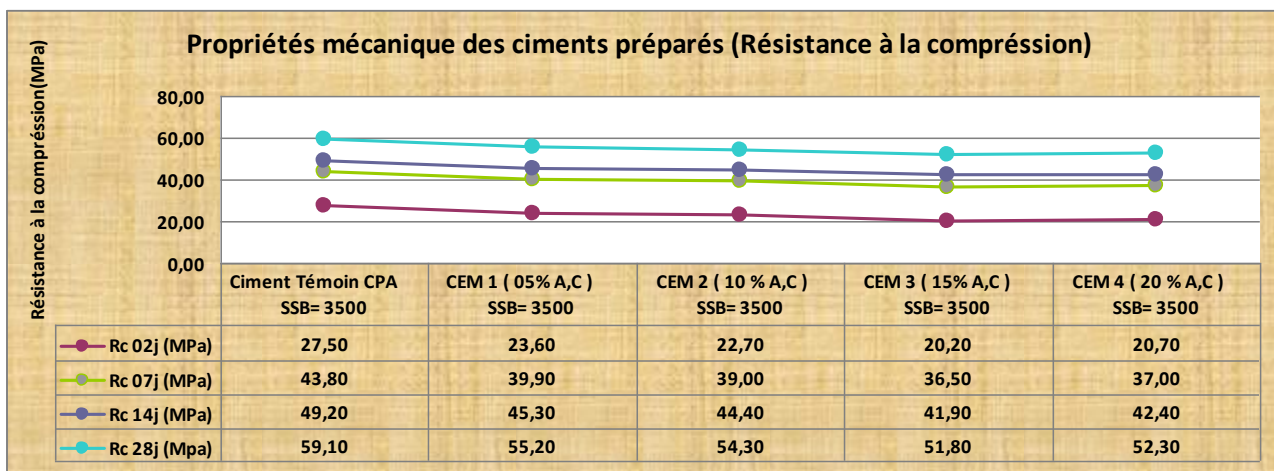
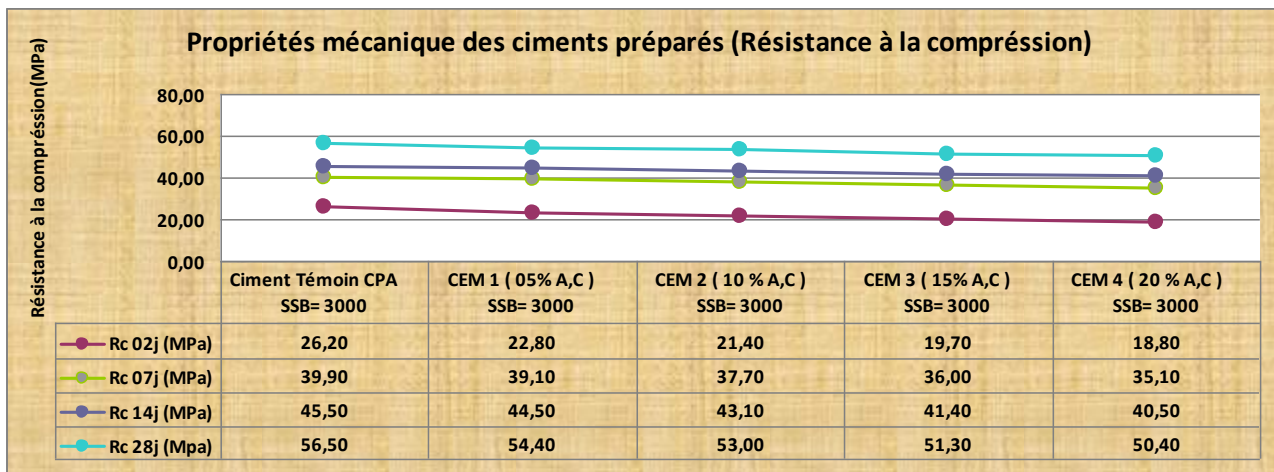


Figure 4-6 Effet du Taux d'ajout de déchets de Briques sur la Résistance à la compression.

VI -6 Effet du Taux d'ajout de déchets de Briques (effet chimique) Sur Le Retrait et Le Gonflement :

La variation du retrait et du gonflement du mortier normal en fonction de l'ajout de déchets de Briques sont représentées dans les Tableaux (4-7 et 4-8) et le Figure(4-7 et 4-8). D'après les résultats obtenus, on peut affirmer que tous les ciments étudiés provoquent un faible retrait et gonflement sur les mortiers étudiés. On remarque aussi que les retraits à 28 jours sont inférieurs aux valeurs fixées par la norme NF P 15-433 qui sont pour les ciments CPA –CEM I et CPJ-CEM II

≤ 800 µm/m pour la classe 32.5

≤ 1000 µm/m pour la classe 42.5

Les principales remarques relatives au retrait et gonflement observées pour les différents ciments étudiés sont:

-Le retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau des pores capillaires des amas d'hydrates formés et à la dessiccation. En effet d'après J.AMBROISE et al (1994) le diamètre des pores d'un mortier mixte (ciment argile cuité) donne de très petites valeurs de l'ordre de 0.01 µm. Au début les capillaires sont saturés en eau, le phénomène d'hydratation consomme l'eau présente dans les gros capillaires en provoquant un assèchement (la cinétique de la réaction devient très rapidement à l'intérieur de la pâte du ciment hydraté). Cela conduit à la formation de ménisques ou se développent des résistances d'attractions provoquant-le-retrait.

Les retraits des ciments avec ajouts de l'argile cuité sont supérieurs à ceux du ciment Portland (sans ajout). Ceci peut s'expliquer par la diminution du nombre et du diamètre des pores de la pâte du ciment hydraté, ainsi qu'à la formation d'un C-S-H secondaire.

on remarque que la vitesse de retrait est lente jusqu'à 7 jours et rapide entre l'âge de 7 à 28 jours. Cette cinétique de retrait est due à l'hydratation tardive de l'ajout pouzzolanique.

Le gonflement observé sur les éprouvettes contenant comme ajout de l'argile cuité (déchet de briques) est supérieur au gonflement dû au ciment Portland, ceci est dû à la consommation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et à la combinaison de l'oxyde de magnésium et à l'épuisement de la chaux libre pendant les réactions d'hydratation avec l'ajout incorporé dans le ciment à long terme (formation-du-deuxième(C-S-H))

SSB Visé	Ciment	Retrait 03j (µm/m)	Retrait 07j (µm/m)	Retrait 28j (µm/m)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	81,5	195,5	552,2
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	98,5	202,2	565,5
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	102,2	221,2	575,5
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	122,5	252,5	582,5
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	159,5	261,5	591,5

SSB Visé	Ciment	Retrait 03j (µm/m)	Retrait 07j (µm/m)	Retrait 28j (µm/m)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	92,5	185,5	565
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	101,2	191,1	571,2
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	112,2	200	575,5
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	125,5	212,2	578,5
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	162,2	242,2	605,2

Tableau 4-7 Retrait du Mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques).

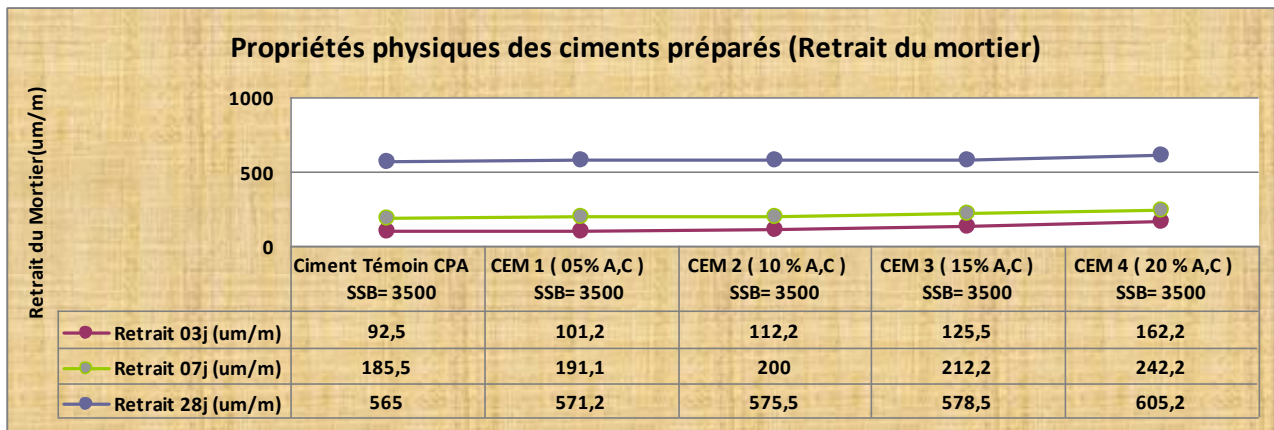
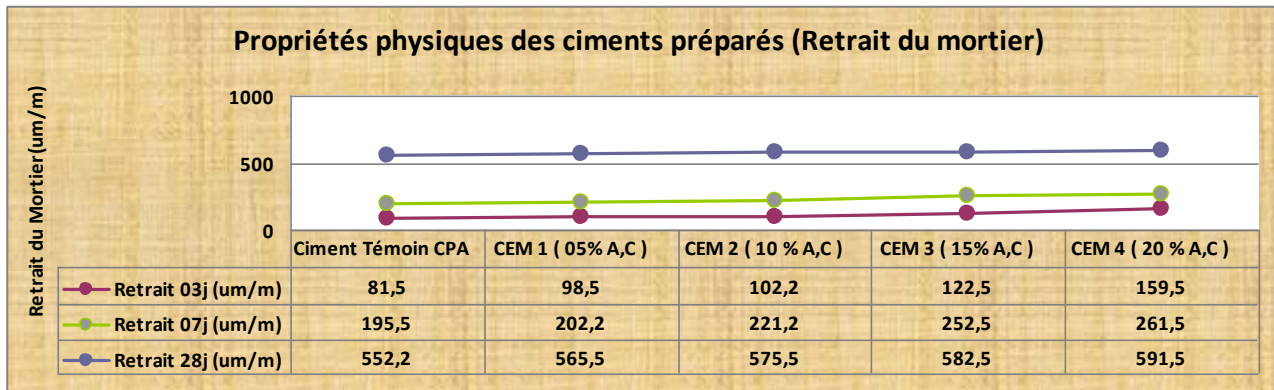


Figure 4-7 Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout déchets de Briques

SSB Visé	Ciment	Gonflement 03j (um/m)	Gonflement 07j (um/m)	Gonflement 28j (um/m)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	18,5	38,5	72,5
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	28,5	45,2	80,2
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	33,5	53,5	85,5
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	42,5	59,5	88,5
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	45,8	63,5	91,2

SSB Visé	Ciment	Gonflement 03j (um/m)	Gonflement 07j (um/m)	Gonflement 28j (um/m)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	22,2	42,2	75,5
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	32,2	45,2	79,8
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	44,2	52,2	85,7
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	45,8	58,5	89,8
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	52,5	92,2	95,2

Tableau 4-8 Gonflement du mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques).

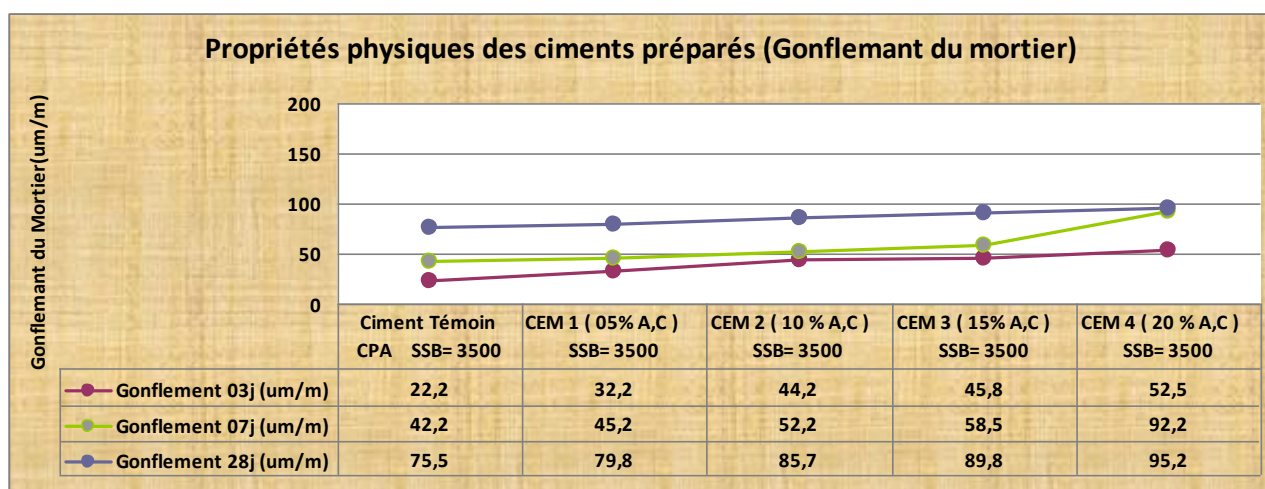
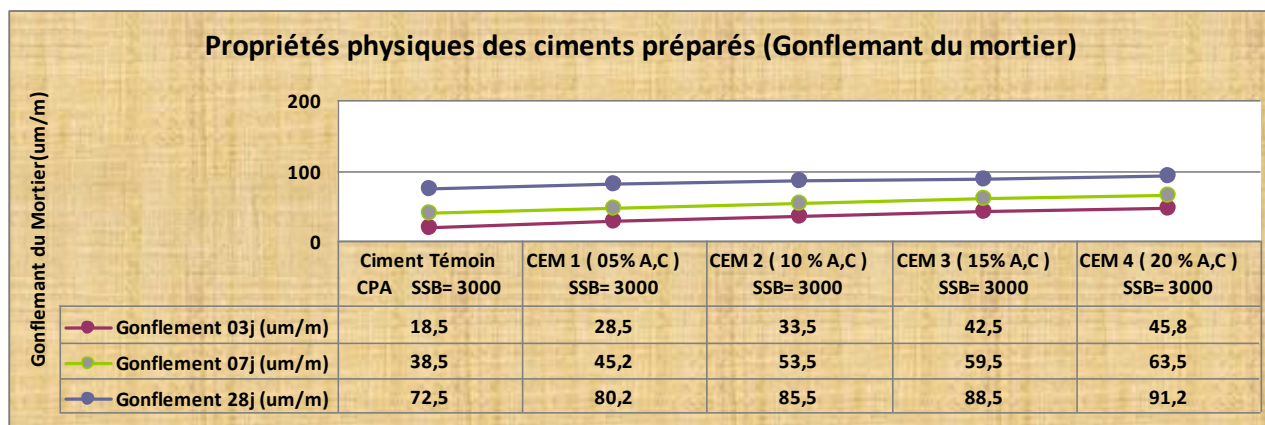


Figure 4-8 Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques) .

V-7 Effet du Taux d'ajout de déchets de Briques (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-9 et Figure 4-9) présentent l'effet du taux d'ajout (déchets de Briques) sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalisé.

L'essai consiste à suivre le dégagement de chaleur de mortier en utilisant l'appareil de langavant (semi adiabatique). On note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (déchets de Briques) incorporé dans le ciment a un effet :

- diminuer le taux de dégagement de chaleur d'hydratation.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- la nature et taux d'ajout utilisé dans le ciment dans notre cas les déchets de Briques
- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- la température extérieure.

SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	285,5
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	240,4
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	238,0
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	232,0
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	228,5
SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	292,5
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	262,2
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	260,0
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	258,0
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	255,0

Tableau 4-9 La chaleur d'hydratation de mortier normal en fonction du taux d'ajout (déchets de Briques).

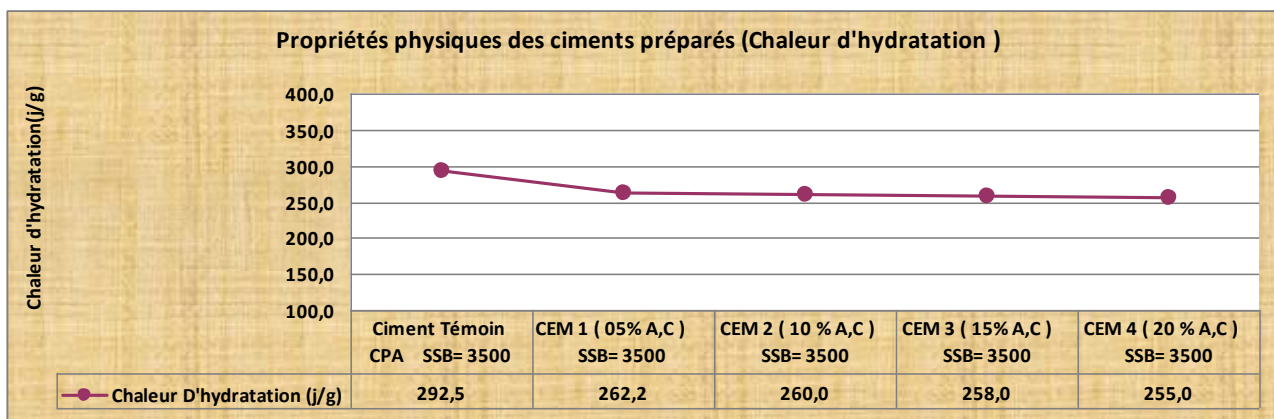
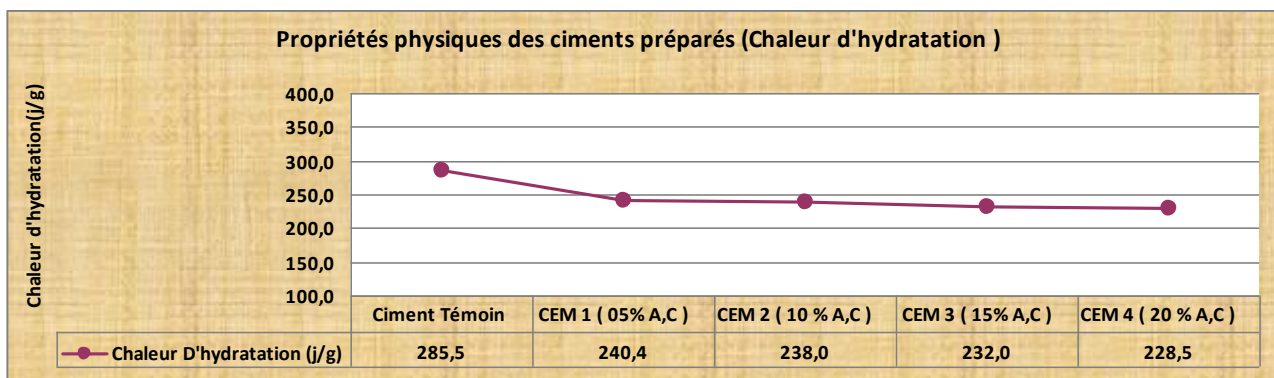


Figure 4-9 Effet du taux d'ajout de déchets de Brique sur la chaleur d'hydratation.

V-7-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise :

On remarque que la chaleur d'hydratation diminue par rapport à l'augmentation du taux d'ajout de déchets de Brique et le temps de prise augment. (figure 4-10 et 4-11) .

La chaleur d'hydratation des ciments à faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 j/g selon la Norme NA 442 donc les ciments du taux d'ajout de déchets de Brique (0%, 5% ,10% ,15% , 20%) c'est un ciment à faible chaleur d'hydratation .

SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)	début de prise (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	285,5	160
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	240,4	170
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	238,0	175
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	232,0	185
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	228,5	190

SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)	début de prise (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	292,5	150
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	262,2	170
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	260,0	180
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	258,0	195
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	255,0	200

Tableau 4-10 Chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.

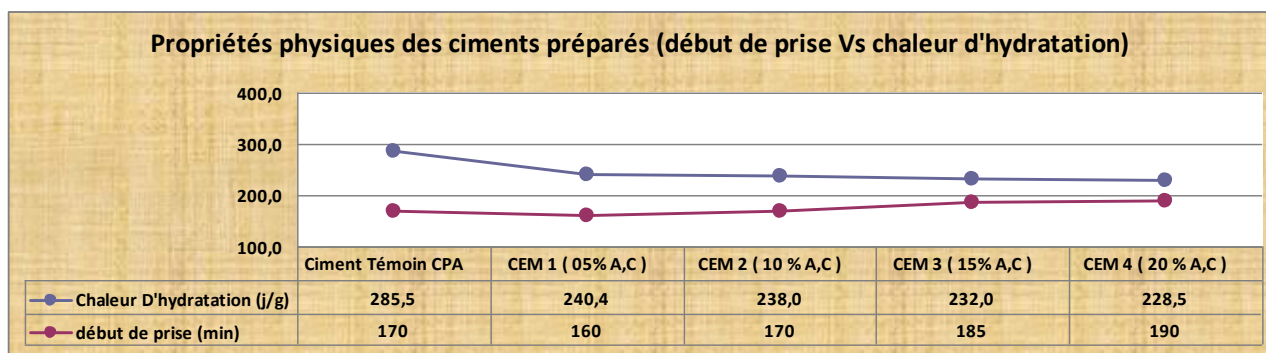
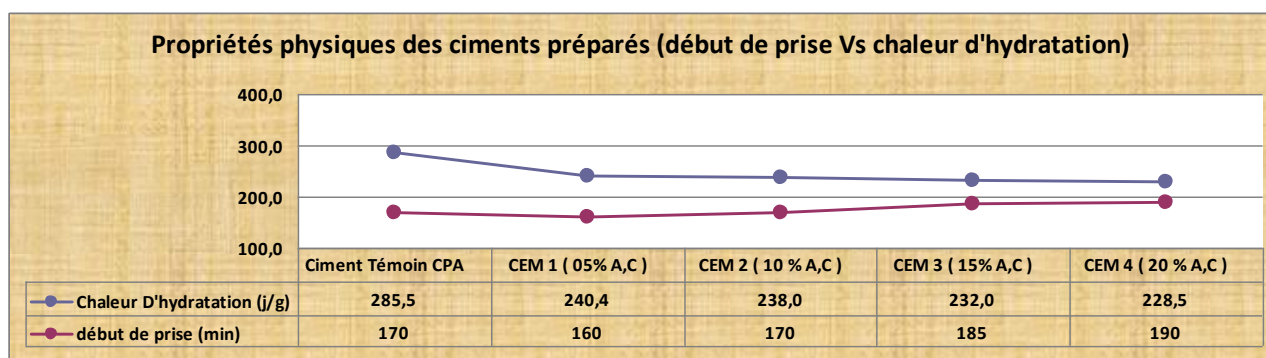


Figure 4-10 Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise

SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)	Fin de prise (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	285,5	265
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	240,4	235
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	238,0	245
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	232,0	260
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	228,5	270

SSB Visé	Ciment	Chaleur D'hydratation (j/g)	Fin de prise (min)
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	292,5	220
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	262,2	250
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	260,0	260
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	258,0	275
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	255,0	280

Tableau 4-11 Chaleur d'hydratation en fonction du fin de prise.

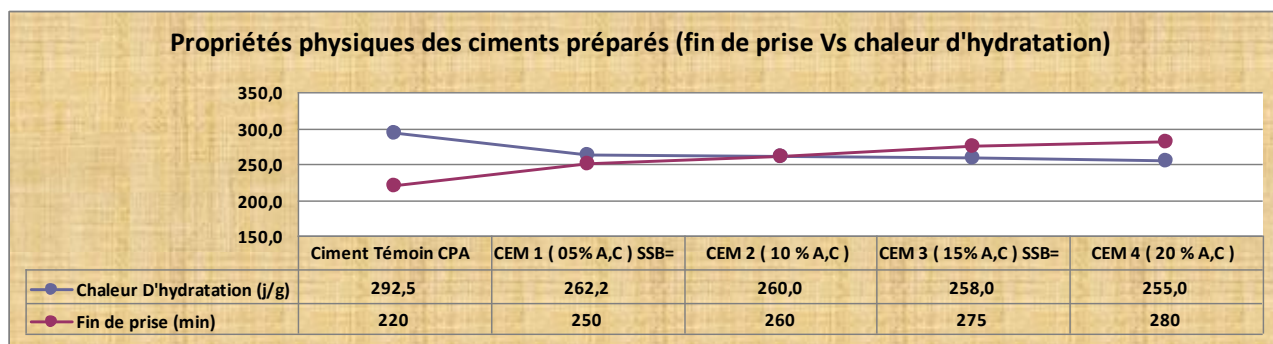
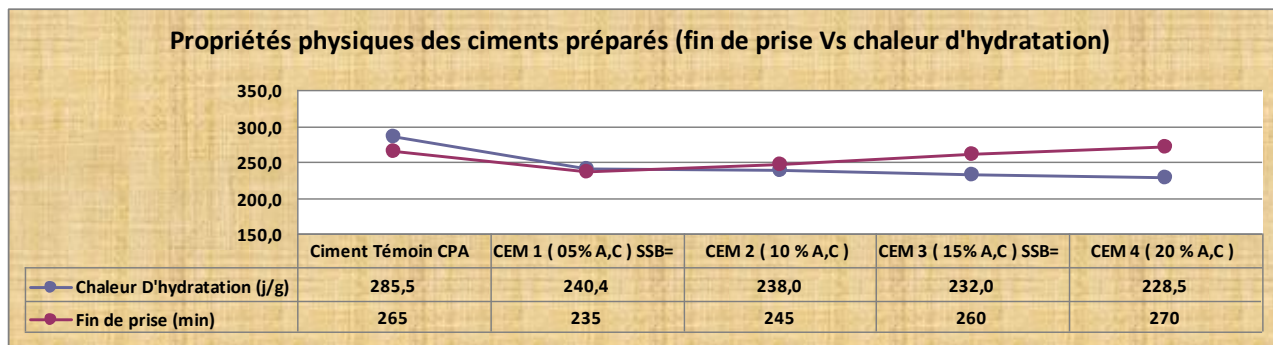


Figure 4-11 Effet chaleur d'hydratation en fonction du fin de prise

V-8 Granulométrie à Méthode Alpine :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableau 4-12 et Figures 4-12) présentent l'effet du taux d'ajout (de déchets de Brique) sur l'analyse granulométrique à 45 μm et 90 μm . L'augmentation de taux d'ajout de déchets de Brique dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment .

SSB Visé	Ciment	Refus 45um	Refus 90um
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3000	14,2	1,5
SSB 3000	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3000	17,3	4,6
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3000	16,7	4,34
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3000	16,1	4,08
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3000	15,5	3,82

SSB Visé	Ciment	Refus 45um	Refus 90um
Ciment Témoin CPA	Ciment Témoin CPA SSB= 3500	12,8	1,2
SSB 3500	CEM 1 (05% A,C) SSB= 3500	14,9	3,56
	CEM 2 (10 % A,C) SSB= 3500	14,3	3,3
	CEM 3 (15% A,C) SSB= 3500	13,7	3,04
	CEM 4 (20 % A,C) SSB= 3500	13,1	2,78

Tableau 4-12 Analyse granulométrique de ciment préparé (ALPINE).

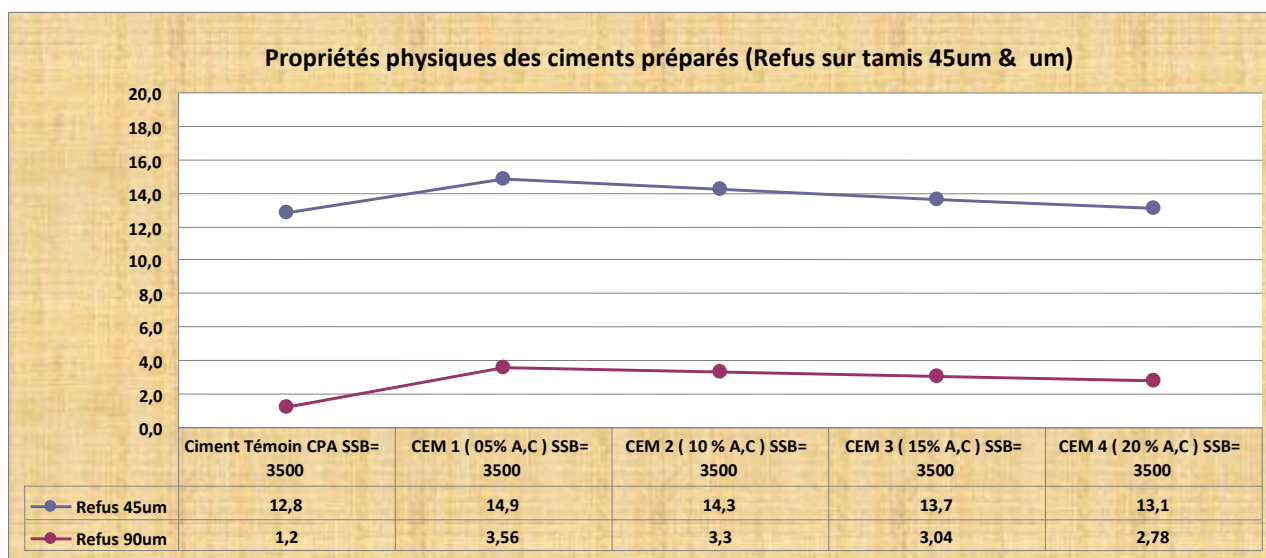
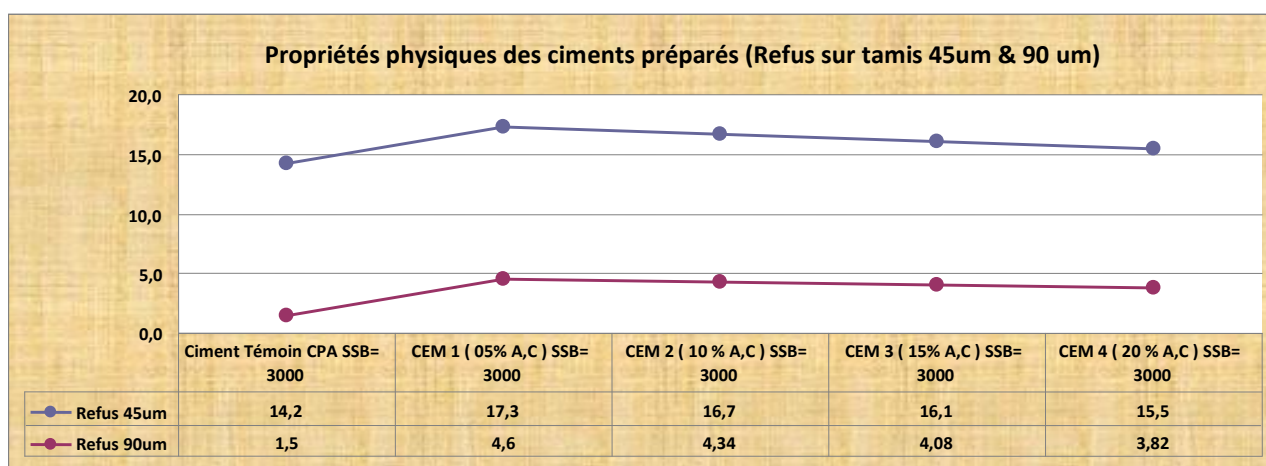


Figure 4-12 Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE)

V-9 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

Selon la Figures (4-13), on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse avec l'augmentation du taux d'ajout de déchets de Brique.

L'augmentation du taux d'ajout de déchets de Brique augmente la surface spécifique et diminue la granulométrie de ciment.

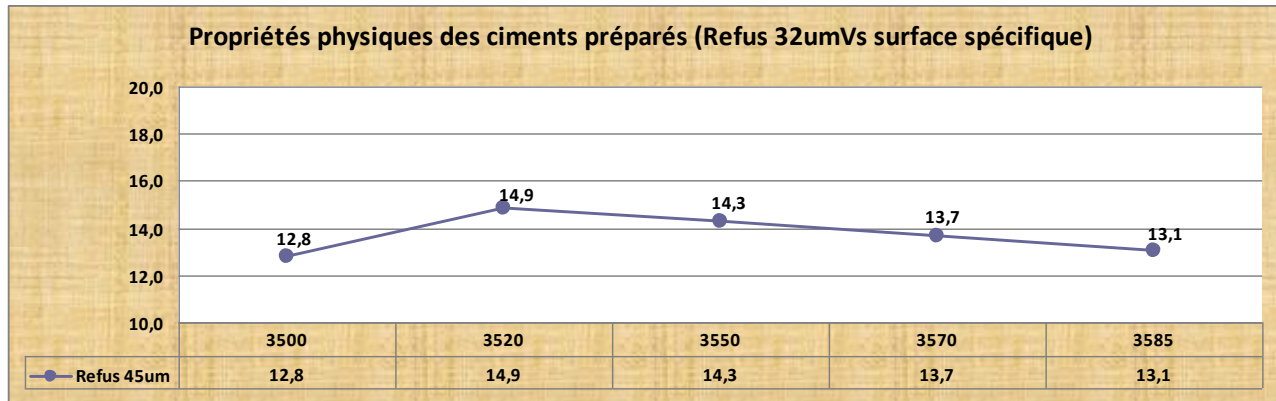


Figure 4-13 Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE).

V-10 GRANULOMETRIE A LASER

Les courbes granulométriques des cinq types de ciment préparés avec et sans constituants secondaires sont représentées sur les Figures 4-14 et 4-15 .On remarque que le diamètre médian $D(0.50)$ du ciment-déchet de briques dans les teneurs suivantes (00,-05 ,10,15 et 20%) est inférieur à $28\mu\text{m}$, par contre le $D(0.90)$ pour les ciments contenant le déchet de briques est inférieur à $78\mu\text{m}$ Trois paramètres principaux qui caractérisent la distribution de la taille des grains (Tableau 4-13) sont :

- Temps de broyage
- Poids spécifique
- Finesse de Blaine (surface spécifique).

la distribution des dimensions des particules obtenues par le Granulométrie à laser des ciments utilisés dans notre travail varie entre $0,05\mu\text{m}$ à $258\mu\text{m}$ pour le plus gros grain. Un ciment qui peut donner d'excellentes résistances mécaniques doit avoir un $D(0.50)$ égale ou se rapproche de $10\mu\text{m}$.

Nom de l'échantillon	D(v,0.10) μm	D(v,0.50) μm	D(v,0.90) μm
CEM I	2,92	19,51	63,58
CEM II-1	3,04	22,48	70,27
CEM II-2	3,16	26,52	76,91
CEM II-3	3,08	24,05	72,96
CEM II-4	3,36	28,36	78,67

Tableau 4-14. Caractéristiques de la granulométrie des différents ciments –déchet de briques

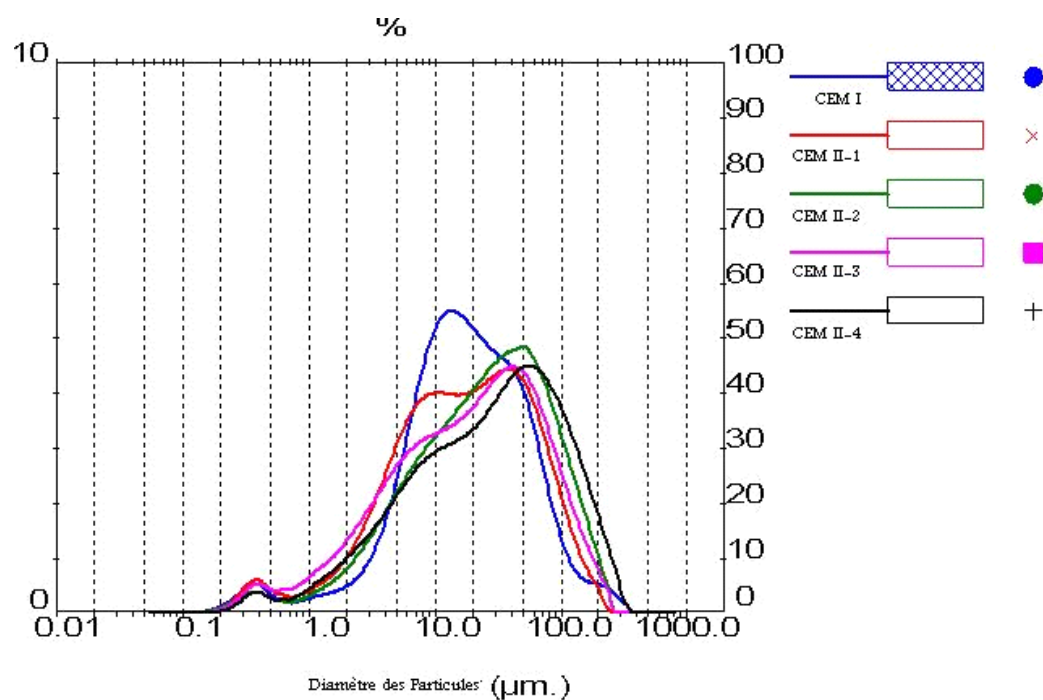


Figure 4-14. Courbes granulométriques des grains de ciment (courbe de fréquence)

CONCLUSION GENERALE

Nous venons de mettre en évidence, à partir des essais mécaniques couplés aux résultats obtenus par la diffraction aux rayons X (D.R.X) que le développement des résistances mécaniques des mortiers contenant les ajouts de 5% à 20% de déchet de briques en substitution de ciment Portland, ne semble pas être dû complètement à la structure minéralogique des déchets de briques. Le développement des résistances mécaniques à 90 jours semble être relié à l'état d'endommagement du réseau cristallin c'est-à-dire au degré d'hydroxylation du réseau et par conséquent à l'état amorphe de la structure. Ainsi on peut dire

- L'argile cuité est un matériau à caractère pouzzolanique, car il n'entre en réaction avec les composants du ciment Portland qu'après l'hydratation et la formation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- La température de cuisson à une grande influence sur la réactivité pouzzolanique des argiles calcinées. En effet les indices d'activités pouzzolaniques du déchet de briques ne sont pas très élevés, ce qui confirme la faible pouzzolanicité, car il a une structure partiellement amorphe. On constate que l'argile cuité (déchet de briques) en tant qu'addition minérale améliorent les performances mécaniques des mortiers, elles ont été cuité au four de l'usine de la briqueterie pour une température variant entre 900 à 950°C. La structure partiellement amorphe (structure recristallisée) du déchet de briques est due à une mauvaise calcination. Plusieurs chercheurs ont étudiés l'effet de la température et l'activité pouzzolanique dans les différentes zones de température pour l'activité maximale données dans la littérature et ils ont conclu que l'activité pouzzolanique peut être améliorée si ces argiles sont calcinées entre 650 – 800 °C.

Le développement de la résistance des mortiers contenant les déchets de briques est fonction de :

- La composition minéralogique du clinker, un bon clinker contient un taux élevé de C3S.
- La finesse du ciment, plus elle est élevée plus l'activation est meilleure.
- La composition chimique et surtout minéralogique de l'argile calcinée.
- L'état de vitrification (amorphisation) de la structure de l'argile cuité. Plus la structure est amorphe, plus la résistance est meilleure.

Les travaux réalisés par différents chercheurs, sur les ciments –argiles cuité ont montré qu'il est possible d'activer ces ciments par étuvage (traitement thermique). L'activation thermique induit une forte accélération de l'hydratation des ciments -argiles cuité à court terme et une réduction de l'accroissement de résistance à long terme.

- Les résistances à la compression aux premiers jours sont moins élevées pour les ciments aux pouzzolanes, mais les rattrapent souvent à long terme à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, c'est-à-dire après 28 jours de durcissement.

Le mortier utilisant du ciment aux pouzzolanes (déchet de briques) présentent de nombreuses caractéristiques favorables par rapport au ciment Portland sans ajout:

- Résistance à la compression à long terme supérieure à celle du ciment Portland sans ajout jusqu'à 10%.
- Densité plus élevée par rapport au ciment Portland.

- Chaleur d'hydratation moins intense qu'un ciment Portland. Il en résulte que le risque de fissuration est moindre.
- Le seul inconvénient est la faible résistance aux jeunes âges.
- Les mortiers contenant du ciment et de l'argile calcinée sont plus visqueux et maniabiles que les mortiers contenant uniquement du ciment portland lorsqu'ils sont formulés avec un ratio eau/liant identique.
- L'hydratation provoque l'apparition de porosité fermée (absence de connexion des pores, favorable à la résistance mécanique et à la durabilité due à la formation d'une plus grande quantité de C-S-H.
- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire suivant la teneur en argile calcinée pour obtenir une consistance normale de la pâte.
- Le retrait et le gonflement du mortier sont inférieurs aux limites imposées par la norme NF P 15-433.
- L'incorporation progressive de l'argile cuité dans le ciment augmente les résistances à long terme jusqu'à certain pourcentage dans notre cas 10%.
- Les résistances du ciment -argile calcinée augmentent à long terme (au delà de 28 jours).
- Les résistances à la flexion des mortiers mixtes (ciments -argiles calcinées) sont comparables pour tous les types avec celle du ciment Portland.

La chaux hydratée (portlandite) formée lors de l'hydratation des composés du ciment réagit avec l'ajout pouzzolanique (déchet de briques) pour donner les silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté (deuxième C-S-H) responsables de cette augmentation de résistance. On peut dire que l'argile cuité apparaît comme un matériau important, couramment utilisé dans le monde, il a fait ses preuves dans le monde dans de grands projets réalisés tel que le barrage de Jupia en Brésil. Donc le doute ne subsiste plus, quand à ses performances et ses avantages qu'elle présente si elle est cuité à une température proche de 800°C. Sa valorisation permet :

- L'obtention d'une grande variété de ciments.
- Des économies d'énergie importantes pendant la phase de broyage.
- La préservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

ANNEXE

Les Certificats de :

- 1- Appareil de chaleur d'hydratation –Calorimètre de langavant .
 - 2- Machine à la flexion et Compression.
 - 3- Malaxeur.
 - 4- Appareil (table) à choc.
 - 5- Armoire humide.
 - 6- Balance.
 - 7- Prisometre vicat automatique.
 - 8- Vicat manuel.
 - 9- Sable normalisé.
 - 10- Fiche de stage dans laboratoire Lafarge M'sila .
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01]-**BARRON J. SAUTEREY R.** Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [02]- **MASSAZZA F.** Chimie des additions pouzzolaniques et des ciments mélangés. II Cemento,
- [03]- **SOROKA I,** Concrete in hot environment, Ed. E and FN SPON, London, 1993.
- [04]-**CAMILLE DEFOSSE,** Chimie du ciment, valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruvelles, site "CHIM 315 Partie 32004".
- [05]- **PELRIER R, PASQUET A.** bulletin de liaison des laboratoires routiers spécial O. LCPC, juin 1970.
- [6]- **L. PLISKIN** : « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.
- [7] **Kiran Pokkuluri** « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [8]- **M. Regourd, H. Hornain,** « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [9]-**E. Guillon,** « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [10]-**Y. Older** , « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea’s - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.
- [11]- **R. Gané** « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [12]- **M Venuat** – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [13]- **R. SERSALE,** “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Partis 1980.
- [14]- **H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi,** «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.
- [15]- **P.C. AITCIN, C. jolicoeur et J. macgregor,** « superplasticizers : how they word and why they accasionnelly don’t », concrete international, pp 45-52 – Mai 1994.

- [16]- **P.C. AITCIN** «les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton » . Revue des matériaux de construction, pp 185-194 - Mai 1968.
- [17]- **P.C. AITCIN, C., F. Autefage, A. carles-Macgreues., A. Vaquier.,** « comparative study of the cementitious of différent fly ashe », pp 91-114 - 1994.
- [18] **HARBI.R., 2009.** Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques. Mémoire de Magister, Université 08Mai 45, Guelma, Algérie.
- [19] **SIMONE CAILLÈRE** .Minéralogie des argiles P355.
- [20] **JEAN-PIERRE MAGNAN.** Mécanique des sols et des roches.2000. vol 1.
- [21] **MESSI. A.** Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborées à partir de latérites actives.
- [22] **SADR-MONTAZI A.** Conception de nouveaux ciments composés. Thèse .Lyon: INSA de Lyon1988,p256.
- [23] **AMBROISE J.** Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques. Thèse . Lyon :INSA de Lyon, 1984,165p
- [24] **BRINDLEY G.W, NAKAHIRA M.** The kaolinite - mullite reaction series: I Survey of outstanding problems .II The high temperature phase .Journal of American ceramic society,1959,vol.42,p311-324
- [25] **HORVATH I, KRANZ G.A** .Thermoanalytical study of high temperature dehydration of kaolinites with various structural arrangements.Silikaty, 1980,vol 24.p149-156
- [26] **GNIEWEK J.** Réactivité des montmorillonites calcinées .Utilisation dans le génie civil. Thèse .Lyon: INSA de Lyon, 1987,184p.
- [27] **BICH.CHRISTEL,** Contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin: évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique . Thèse, MEGA de Lyon , 2005, p264
- [28] **BARRON J. SAUTEREY R.** Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [29] **A KOMAR.** Matériaux et éléments de construction, Editions Mir Moscou 1976, p540.
- [30] **KAKALI G, PERRAKIT, TSIVILLIS, et al.** Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. Applied Clay Science, 2001, vol 20, p73-80
- [31] **L. ALVISET.** Matériaux de Terre Cuite "Techniques de l'Ingénieur" 1994.
- [32] **A. KOMAR.** Matériaux et Élément de Construction, Edition MIR 1978.
- [33] **E OLIVER** .Technologie des Matériaux de Construction, Edition ISBN 1976
- [34] **R. Delebecque.** Éléments de Construction "Bâtiment", Edition Delagrave1990.
-



effet de l'activation mécanique de l'argile cuite sur le comportement mécanique du mortier

Résumé :

Les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du clinker par l'ajout argile cuite dans le ciment.

Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout argile cuite : [0%, 5%, 10%, 15%, 20] dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout argile cuite dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par argile cuite).

Afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment, chaleur d'hydratation et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout argile cuite et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.



ملخص

إن تدعيم استعمال الإضافات الإسمنتية هي حاليا جزء من التطورات الأخيرة في إنتاج الاسمنت ، (مما أدى إلى تحسن كبير للخصائص الميكانيكية للمواد الإسمنتية (المونة والخرسانة وعلاوة على ذلك ، إن استعمالها يؤدي إلى انخفاض في استهلاك مادة الكلنكر ويساهم في حل المشاكل البيئية بطريقة بسيطة واقتصادية).

الغرض من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية طريقة الاستبدال الجزئي للاسمنت بمادة الطين المحروق المضافة في المونة.

تهتم هذه الدراسة التجريبية إلى تحضير اسمنت ذو إضافات معدنية باستبدال نسبة مئوية معينة من مادة الكلنكر بمادة الطين المحروق : (0 % ، 5 % ، 10 % ، 15 % ، 20 %) .

لقد قمنا في هذه الدراسة بتغيير نسبة مادة الطين المحروق في الاسمنت باستعمال طريقة الاستبدال (التغيير الجزئي لمادة الكلنكر بمادة الطين المحروق)

لدراسة أثره على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة وكذلك المقاومة الميكانيكية للمونة .

إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للاسمنت المحضر بالمادة المعدنية المضافة في الحالة الجافة والمبللة (التركيب الكيميائي ، زمن السحق ، الوزن النوعي ، النعومة ، التوزيع الحبيبي ، القوام القياسي للعجينة الإسمنتية ، وزمن الشك) وكذلك مميزات المونة في الحالة الصلدة ، منها التقلص الانتفاخ ، والمقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) ، تم تحديدهم خلال هذا العمل التجريبي .

ووفقا لنتائج التجارب التي حصل عليها ، يتبين لنا أن كمية مادة الطين المحروق المضاف والتركيب الكيميائي للاسمنت المصنع هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على تغيير المقاومة الميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء) للمونة المختبر



Abstract :

The supplementary cementitious materials are currently part of the latest developments in the production of cement, resulting in a significant improvement to the mechanical performances of cementitious materials (mortar).

For ther more, to the existed that it leads to a reduction in cement consumption, the use of additions contributes to solving environmental problems in a simple and economic manner.

This experimental work presents a study of the advantages and the possibility of the partial replacement of cement by calcined clay admixture in mortar.

This experimental study consists to make the cement with mineral admixture while replacing a certain percentage of clinker by calcined clay admixture :
(0%, 5%, 10%, 15% ,20).

In this study, we varied the percentage of the limestone admixture in cement by the substitution method (partial replacement of the clinker by the calcined clay) to study its effect on the physico-chemical properties of cement manufactured with mineral addition and mortar mechanical behavior.

The physico-chemical properties of cement at anhydrous state and the hydrated state (chemical composition, grinding time, specific weight, fineness, particle size distribution, consistency of the cement paste, setting times, shrinkage and expansion), thus the characteristics of the mortars made at their bases, such as, the mechanical behavior (flexural and compressive strengths) for the mortar were studied.

According to the experimental results obtained, it comes that the quantity of mineral additive (calcined clay) and the chemical composition of cement manufactured are the principal parameters who influence on the variation of the mechanical strengths (flexural and compressive) of the mortars tested.