

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique
UNIVERSITE Dr MOULAY TAHAR – SAIDA
Faculté des sciences et de technologie
Département de chimie



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de licence

Spécialité : Génie des procédés

Option : Génie des matériaux

Thème

Effet de l'incorporation de briques réfractaires dans le ciment portland

Présenté par :

M^{er} Ajroun Redouane

Encadré par

M^{er} Elaziouti abdelkader Maitre assistant «A» à U.Saida

2013- 2014

TABLE DES MATIERE

Introduction générale

Chapitre I : constructions, fabrication et hydratation du ciment

I-1- Introduction	4
I-1-1-Historique du ciment :	4
I-1-2-Introduction au ciment :	4
I-1-3-Définition du ciment :	5
I-2-Constituants :	5
I-2-1 le clinker :	5
I-2-1-a- C_3S : Silicate tricalcique ($SiO_2 - 3 CaO$) : 50 à 65 % (Alite):	6
I-2-1-b- C_2S : Silicate bicalcique ($SiO_2 - 2 CaO$) : 15 à 20 % (Belite):	6
I-2-1-c- C_3A : Aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3CaO$) : 1 à 13 % (célite):	6
I-2-1-d- C_4AF : Aluminate tétra-calcique ($Al_2O_3 - 3CaO$) : 3 à 14 % (féelite):	6
I-2-2- Le gypse: (sulfate de calcium):	6
I-2-3- Les Ajouts :	7
I-2-3-1-Introduction:	7
I-2-3-2-Les différents types d'ajouts utilisés dans les industries cimentières	7
I-3- fabrication du ciment:	14
I-3-1- Matière première:	14
I-3-1-1- le calcaire:	15
I-3-1-2- Les argiles:	15
I-3-1-3- Minerais de fer:	16
I-3-2- L'extraction et la préparation des matières premières :	16
I-3-3- Préparation de mélange cru :	16

I-3-4- Le séchage et le broyage :	17
I-3-5- Homogénéisation:	17
I-3-5- La cuisson :	17
I-3-7- Du clinker aux ciments :	18
I-3-8- Les expéditions:	19
I-4- Les principales catégories du ciment :	21
I-4-1- Classification des ciments en fonction de leur composition:	21
I-4-2- Spécification chimiques:	21
I-4-3- Spécification mécaniques:	22
I-5- Hydratation du ciment :	23
I-5-1- Définition:	23
I-5-2- Hydratation du C_3S et C_2S : (l'alite et la bélite):	24
I-5-3- Hydratation de C_3A : (la célicité):	24
I-5-3-1- Hydratation C_3A en présence du gypse:	24
I-5-4- Pourcentage d'eau fixé en fonction du temps:	25
I-5-5- Ordre de l'hydratation :	25
I-5-6- Structure et évolution physico-chimique de la pâte de ciment :	26
I-5-7- Influence du rapport Eau/Ciment sur les processus d'hydratation:	27
Chapitre II : Les briques réfractaires	
II-1- Matériaux réfractaires du système silice-alumine :	28
II-2- Briques en général :	30
II-2-1- Principe de la fabrication des briques :	31
II-3- Brique réfractaire :	31
II-3-1- Procédés de fabrication des briques réfractaires :	32
II-3-2- Les matières premières :	33
II-3-2-1- La silice :	33
II-3-2-2- Les kaolins :	34

Chapitre III: Partie expérimental

III-1- Présentation de la cimenterie de Saida:	36
III-2- Problématique :	37
III-2-1- Nature de l'ajout :	37
III-3- préparation des échantillons:	37
III-4- Analyse chimique :	39
III-4- Analyse par fluorescence X :	39
III-4-1-1- Mode opératoire:	39
III-4-1-2- Composition chimique de la brique réfractaire :	40
III-4-1-3- Composition chimique de clinker:	41
III-4-1-4- Composition chimique de ciment fabriqué a la cimenterie de Saida(Témoin) et le ciment élaboré a base de taux d'ajout de brique réfractaire:	41
III-4-2- Caractéristique physico-chimique du ciment confectionné :	42
III-4-2-1- Sur la chaux libre	43
III-4-2-2- Mode opératoire :	43
III-4-2-3- Quantité de la Chaux libre dans les différentes formulations:	44
III-5- Analyse de la finesse de broyage du ciment :	44
III-5-1- Refus :	44
III-5-2- Détermination de la surface spécifique:	45
III-5-2-1- Mode opératoire :	45
III-5-2-2- La surface spécifique des ciments confectionnés et ciment (témoin) :	49
III-6- Essais physico- mécanique :	51
III-6-1- Détermination de la consistance normalisée :	51
III-6-1-1- Principe :	51
III-6-1-2- Mode opératoire :	51
III-6-1-3- Les valeurs de la consistance des ciments confectionnés et le ciment (témoin) :	53
III-6-2- Expansion :	54
III-6-2-1- Mode opératoire :	54
III-6-2-2- L'expansion des ciments confectionnés et ciment(Témoin) :	54

III-6-3- Détermination du temps de prise :.....	56
III-6-3-1- Mode opératoire :	56
III-6-3-2- Le temps de prise des ciments confectionnés et le ciment (Témoin) :	57
III-6-4- Détermination des caractéristiques mécaniques :.....	58
III-6-4-1- Principe :	58
III-6-4-2- Mode opératoire:	58
III-6-5- Résistance mécanique à court terme et à moyen terme:.....	62
III-6-6- Résistance mécanique à long terme:	64

Conclusions générale

Liste des abréviations

Bibliographie

TABLE DES FIGURES

Fig I.1: Le clinker à la sortie du four	5
Fig I.2: Le gypse à l'état naturel.....	6
Fig I.3: Le pouzzolane à l'état naturel	9
Fig I.4 : image optique de laitier de haut fourneau.....	10
Fig I.5: calcaire à l'état naturel.....	15
Fig I.6: Schémas de principe de la fabrication	20
Fig I.7: Structure et évolution physico-chimique de la pâte de ciment	26
Fig I.8: Influence du rapport Eau/Ciment sur les processus d'hydratation	27
Fig II.1: Températures de fusion des composés réfractaires	29
Fig II.2: Diagramme de phase Silice-Alumine	30
Fig II.3 : Schéma de principe pour la fabrication de brique	31
Fig II.4 : structure cristalline de la kaolinite	35
Fig III.1: broyage de mélange	38
Fig III.2 : Diffraction par rayon x (fluorescences x).....	40
Fig III.3: Evolution de la chaux en fonction du taux de brique ajouté	44
Fig III.4: La broyabilité du ciment en fonction du taux de brique ajouté.	45
Fig III.5 : L'appareil Blaine.....	49
Fig III.6 : La surface spécifique en fonction du taux d'ajout de BR.....	11
Fig III.7 : Le refus et la surface spécifique en fonction de chaux libre	11
Fig III.8 : Appareil de Vicat	52
Fig III.9: la consistance en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire.....	53
Fig III.10 : Aiguilles de Chate lier	12
Fig III.11 : l'expansion en fonction du taux d'ajout de brique.	55

Fig III.12 : l'expansion en fonction de la variation de la chaux libre	56
Fig III.13 : le temps de prise en fonction du taux d'ajout de brique	58
Fig III.14 : Machine d'essais de résistance à la flexion	62
Fig III.15 : Machine d'essais de résistance à la compression	62
Fig III.16 : La résistance mécanique à court terme en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire.	63
Fig III.17 : La résistance mécanique à moyen terme en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire.	64
Fig III.18 : La résistance (à la flexion et à la compression) à long terme en fonction du taux d'ajout de brique.....	65

Liste des tableaux

Tableau(I.1) : Composition chimique de tufs volcanique	7
Tableau (I.2) : Composition chimique type de certaines fumées de silice	10
Tableau (I.3) : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.	11
Tableau (I.4) : Composition chimique de certains types des cendres volantes	12
Tableau (I.5) : Caractéristiques chimiques des scories.	12
Tableau (I.6) : Caractéristiques physico-chimiques des calamines.	13
Tableau (I.7) : Caractéristiques physico-chimiques des calamines.	13
Tableau (I.8) : Proportion de chaque matière première dans le cru.	16
Tableau (I.9) : les exigences chimiques des différents types de ciments	22
Tableau (I.10) : Les propriétés mécaniques des différents types de ciment	23
Tableau (III.1): Préparation des échantillons de ciment portland confectionné et le Témoin.....	38
Tableau (III.2): Composition chimique de la brique réfractaire.....	40
Tableau (III.3) : Composition chimique de clinker	41
Tableau (III.3) : Composition chimique de ciment fabriqué a la cimenterie de Saida.....	41
Tableau (III.4) : Composition chimique des quatre formulations.	42
Tableau (III.5) : Quantité de la Chaux libre dans les différentes formulations	44
Tableau (III.6) : Refus des ciments confectionnés et ciment (témoin).....	45
Tableau (III.7) : Surface spécifique des ciments confectionnés et ciment (témoin)	49
Tableau (III.8) : La méthode de calcul de la consistance.	53
Tableau (III.9) : La consistance des ciments confectionnés et ciment Témoin.....	53
Tableau (III.10) : L'expansion des ciments confectionnés et ciment(Témoin).....	55
Tableau (III.11) : Le temps de prise des ciments confectionnés et le ciment (Témoin).....	57
Tableau (III.12) : Résistance mécanique à court terme des ciments confectionnés et le Témoin ...	62
Tableau (III.13) : Résistance mécanique à moyen terme des ciments confectionnés et le Témoin	63
Tableau (III.14) : Résistance mécanique à long terme des ciments confectionnés et le Témoin.	64

Introduction générale

Introduction général#

Les déchets sont l'un des meilleurs indicateurs de la vitalité économique et du mode de vie d'une société.

La croissance de la production et le développement, toujours plus rapide, de biens de consommation ont marqué en profondeur la structure socio-économique des pays industrialisés ; une société de gaspillage est née en l'espace d'un demi-siècle. Les instances politiques essaient de modifier l'approche que l'on a des produits et des déchets en recourant à de nouveaux instruments, basés sur l'incitation financière. Hormis ceux que l'on conserve dans des musées, tous nos biens de consommation finissent leur vie sous la forme de déchets. Il n'y a pas de doute, la propension à la consommation et au gaspillage dépend étroitement du pouvoir d'achat et de la prospérité d'une société.

La protection de l'environnement devient de plus en plus une préoccupation collective. La question des déchets est quotidienne et touche chaque être humain tant sur le plan professionnel que familial. En qualité de consommateur, producteur, usager du ramassage des ordures et trieur de déchets recyclables, citoyen ou contribuable, chacun peut et doit être acteur d'une meilleure gestion des déchets. Dans une vision intégrée de développement durable, la problématique des déchets ne peut pas être traitée comme un objet isolé, ni même se limiter aux seuls aspects de valorisation et d'élimination. Elle doit être placée dans une perspective holistique de gestion des risques et des ressources, qui couvre tout le cycle de vie du déchet, depuis sa génération jusqu'au traitement ultime.

Elle anticipe le déchet dès le stade projet, inclut les stratégies de réduction à la source, de valorisation et d'élimination et vise à la maîtrise des flux tout au long du procédé aboutissant au déchet. On évitera dans la mesure du possible de produire des déchets à la source. Pour ce faire, on doit privilégier les procédés de production générant peu de déchets, fabriquer des biens à longue durée de vie et optimiser les emballages. On doit éviter ou limiter dans la mesure du possible le recours aux substances polluantes, dans les produits comme dans les procédés de recherche et de

Introduction général#

fabrication, afin de faciliter les étapes ultérieures du traitement et de la valorisation des déchets.

La valorisation des déchets dans le domaine de la construction permet d'une part de résoudre les problèmes qui se posent sur le plan écologique et la pollution de l'environnement, et d'autre part l'utilisation rationnelle et économique des matériaux locaux.

L'industrie du ciment, dans la production mondiale est passée de 2 milliard et 131 millions de tonne par an, constitue par : ses tonnages, les quantités d'énergie mécanique et de combustible qu'elle utilise, les capitaux qu'elle immobilise; une des plus importantes branches de l'économie industrielle. Non seulement les activités de la construction et du bâtiment, mais encore une grande part de la production énergétique, de la vie agricole, des transports terrestres, maritimes et aériens dépendent du ciment qui est devenu un produit de base fondamental. Son importance s'accroît à un rythme impressionnant.

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation du cru (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles.

Des sous produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine.

Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus. Du point

Introduction général#

de vue technique, L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu.

En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique .

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

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

L'objectif de ce travail est donc de revaloriser un déchet industriel provenant d'une industrie pétrochimique. Des briques réfractaires issues d'une chaudière située à une entreprise appartenant au groupe SONATRACH d'Oran ont été réutilisées dans la fabrication de ciment. Ce travail se comporte trois chapitres : Le premier traite la fabrication du ciment, ses constituants et son hydratation alors que le deuxième est consacré à la définition des déchets mis en évidence au cours de ce travail. Le troisième chapitre présente la partie expérimentale ainsi que les résultats obtenus. Une conclusion vient clôturer le travail effectué.

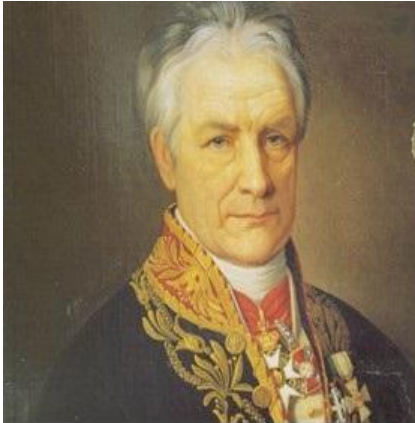
Chapitre

I

I-1-Introduction

I-1-1-Historique du ciment:

Les ciments hydrauliques furent d'abord inventés par les Égyptiens puis améliorés par les civilisations suivantes par l'utilisation de Chaux. Plus tard, les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques, usage repris par les Romains. Jusqu'à l'époque moderne, le ciment est un



liant, souvent une chaux, additionnée d'ajouts, comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile a des propriétés hydrauliques. Il ne prend son acception contemporaine qu'au XIXe siècle, lorsque Louis Vicat identifie le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817 et celle des ciments (qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques).

En 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour ce qu'il appelle commercialement le ciment portland (car la couleur de son ciment ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche).

C'est un produit similaire à celui de Vicat encore que son brevet soit imprécis. Mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents dits ciments portland toujours par Louis Vicat - une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450°C qui permet d'obtenir le clinker - pour voir une réelle fabrication de ces ciments et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé.

La fin des années 80 voit l'arrivée du Béton à Hautes Performances (BHP), d'une résistance à la compression supérieure à 50 MPa. Allié à la précontrainte, ce matériau révolutionne la construction des ouvrages d'art qui deviennent plus fins, plus élancés et plus durables. Au début des années 90, Bouygues, Lafarge et Rhodia explorent le domaine de l'ultra-haute résistance, bien au-delà des 150 MPa. En 1997, ils déposent des brevets pour les Béton Fibré à Ultra-hautes Performances (BEFUP). Derniers progrès en date : les Bétons Auto Plaçant et Auto Nivelant (BAP et BAN); mis en œuvre sans vibration, ils s'imposent progressivement sur tous les chantiers depuis 1998.

I-1-2-Introduction au ciment:

Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Le ciment 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.

I-1-3-Définition du ciment:

Le ciment portland est un ciment artificiel obtenu par la cuisson proche de l'état de fusion de 1450° C calcaire et 20% d'argile mélangés intimement.

Cette matière première chauffées entre 1000 et 1450°c donne lieu a des réactions solide-solide et solide-liquide pour fabriquer du ciment il faut réunir quatre élément principaux : la chaux 65% la silice 20% l'alumine 10% et d'oxyde de fer 5%.

I-2-Constituants

I-2-1 le clinker:

Le clinker est un constituant du ciment artificiel, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 75 % de calcaire et de 25 % de silice : la « farine » ou le « cru ». Cette cuisson, la clinkerisation, se fait à une température d'environ 1 450 °C.



Fig I.1: Le clinker à la sortie du four

I-2-1-a- C_3S : Silicate tricalcique ($SiO_2 - 3 CaO$) : 50 à 65 % (Alite):

C'est élément actif dans le ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement.

I-2-1-b- C_2S : Silicate bicalcique ($SiO_2 - 2 CaO$) : 15 à 20 % (Belite):

Il confère au ciment des Résistances moins élevées que alite .Mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle du silicate tricalcique, car sa dureté est plus grande.

I -2-1-c- C_3A : Aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3CaO$) : 1 à 13 % (célite):

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite , il influence peu sur cette dernière. Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, les sels de candlot, souvent très expansifs.

La réaction d'hydratation est fortement exothermique.

I -2-1-d- C_4AF : Aluminate tétra-calcique ($Al_2O_3 - 3CaO$) : 3 à 14 % (félite):

Il confère au ciment des résistances faibles et peu précises .On peut dire qu'il est inactif sur le plan hydraulique,et il constitue un fondant pendant la cuisson avec la célite . la figure suivante illustre les différents constituants du clinker.

I -2-2- Le gypse (sulfate de calcium):

Le gypse est un sulfate de calcium doublement hydraté $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$. C'est l'ion SO_4^{2-} que joue le rôle de retardateur de prise.



Fig I.2: Le gypse à l'état naturel

I-2-3- Les Ajouts

I-2-3-1- Introduction:

Dans l'industrie cimentaire on peut fabriquer des ciments en utilisant seulement du clinker et du gypse.

La recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland.

Pour augmenter la production du ciment, les industries cimentières utilisent différents types d'ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités.

I -2-3-2- Les différents types d'ajouts utilisés dans les industries cimentières

a-Pouzzolane:

Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition et minéralogique appropriée.

a-1- Origine de la pouzzolane

a-1-1- Pouzzolane naturelle:

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

a-1-2 pouzzolane artificielle:

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

a-1-3- Les ajouts pouzzolaniques d'origine volcanique:

Les cendres volcaniques : elles se rencontrent dans la nature sous forme de pouzzolanes, dans leur composition chimique prédomine la silice et l'alumine ;

Les tufs volcanique : se rencontre sous forme de fragments, sa composition chimique est la suivante :

Tableau(I.1) : Composition chimique de tufs volcanique.

Elément	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	R ₂ O	PAF
Pourcentage (%)	40-75	12-18	1-15	10-12	3-8	8

Il se soumet difficilement au broyage, s'utilise comme un ajout actif lors du broyage et exige une grande dépense d'énergie.

La ponce : Elle représente une variété de verre volcanique de structure très poreuse et cellulaire, elle est légère. Sa composition chimique est la suivante :

a-1-4- Les pouzzolanes naturelles d'origine organique :

Se sont les dépôts d'origines suivantes : marine, squelette siliceux de micro-organismes.

Diatomite : Se sont des roches sédimentaires qui contiennent de 70 % à 98% de silice amorphe soluble.

Tripolis : Sont composés de silice amorphe, peut être friable, poreux ou, farineux ce qui provoque l'augmentation des besoins d'eau du ciment pouzzolanique.

Gliège : Représente une roche argileuse, naturellement cuite, contenant :

50% à 65% de SiO₂.

20% à 25% d'Al₂O₃

a-2- Les propriétés de la pouzzolane :

a-2-1- Les propriétés physiques : Elle est d'aspect rugueux, caverneux, de porosité fermée, sa densité apparente varie de 0.65 à 0.95. La pouzzolane résiste au feu et au choc thermique. Elle fond vers 1140 C°.

a-2-2- Les propriétés chimiques : Elle est constituée de 3 oxydes principaux : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Parfois de la chaux mais pas suffisamment pour donner naissance aux sels insolubles de chaux, de silice d'alumine dont la formation provoquera la prise. Elle n'a pas de propriétés hydrauliques, la pouzzolane est incapable de faire prise seule. La pouzzolane communique à la chaux les propriétés hydraulique.

a-3- L'activité pouzzolanique :

On appelle ajouts minéraux actifs les substances naturelles ou artificielles qui finement broyées, mélangées avec la chaux blanche et gâchée avec l'eau, lui communique les propriétés hydrauliques. Lorsqu'ils sont mélangés à un ciment portland, ils améliorent sa résistance à l'eau.

Les ajouts hydrauliques à l'état pulvérulent mélangés à l'eau ne durcissent pas séparément.

Un ajout minéral est considéré comme actif si la prise de la pâte confectionnée à base de cet ajout et de la chaux blanche en poudre se trouve terminée au plus tard sept jours après le gâchage et assure la résistance à l'eau de l'éprouvette trois jours après la fin de la prise. L'activité pouzzolanique est caractérisée par la quantité de chaux absorbée par un gramme de pouzzolane en 30 jours.



Fig I.3: Le pouzzolane à l'état naturel

b-Fumée de silice:

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium de différents alliages de ferro-silicium ou de zircon. Se sont des particules sphériques, diamètre moyen $< 0,1 \mu\text{m}$. Le tableau suivant représente leur composition :

Tableau (I.2) : Composition chimique type de certaines fumées de silice

composition	Silicium (grise) %	Ferro-silicium (grise) %	Blanche %
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1
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
Pert au feu	2.9	0.6	1.2

c- Le laitier de haut fourneau:

Se sont des particules angulaires broyées à la finesse du ciment portland.

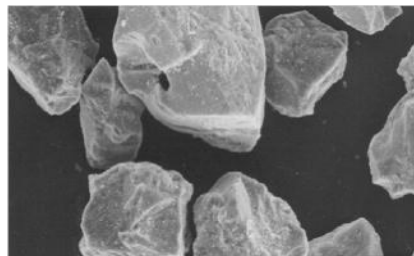


Fig I.4 : image optique de laitier de haut fourneau

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. Le tableau suivant représente leur composition :

Tableau (I.3) : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau.

OXYDES	Laitier français %	Laitier nord USA %	Laitier Algerian %
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7
SO ₃	5	/	0.15

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons:

Broyage poussé

- Chaleur (étuvage, autoclavage)
- Produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude,)

d-Les cendres volantes:

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Ce sont des particules sphériques d'un diamètre entre 1 µm et 100 µm. Le tableau suivant représente leur composition

Chapitre I: Constituants, fabrication et hydratation du ciment

Tableau (I.4) : Composition chimique de certains types des cendres volantes.

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	---	---
Chaux libre	---	---	---	---	28.0

e-La scorie des hauts fourneaux d'El-Hadjar:

Les scories de haut fourneau que nous avons utilisé, contiennent, sous forme vitreuse, principalement des silicates et aluminates de calcium et de magnésium. Le tableau suivant représente leur composition

Tableau (I.5) : Caractéristiques chimiques des scories.

SiO ₂ %	CaO %	Al ₂ O ₃ %	MgO %	MnO %
15.5	36.5	5	2.3	8.4

f- La Calamine:

Elle désigne deux minéraux très semblables, l'hémimorphite et la smithsonite, respectivement un silicate et un carbonate de zinc. Le tableau suivant représente leur Caractéristiques physico-chimiques des calamines.

Tableau (I.6) : Caractéristiques physico-chimiques des calamines.

Classe	Silicates
Système cristallin	Orthorhombique
Formule chimique	$Zn_4 ((OH)_2 Si_2 O_7) \cdot H_2O$
Densité	3.3 à 4.5
Fracture	irrégulière à conchoïdale
Couleur	Allo chromatique
Fluorescence	Aucune

g-Le super plastifiant:

C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Le tableau suivant représente leur Caractéristiques physico-chimiques du super plastifiant.

Tableau (I.7) : Caractéristiques physico-chimiques des calamines.

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Masse volumique à +20°C	$1.23 \text{ g/cm}^3 \pm 0.02$
Teneur en chlorure	< 0.1%
Dosage	Plage d'utilisation : 0.5 % à 4 % du poids de ciment soit 0.41 L à 3.25
conditionnement	Container de 1000 L, fut de 210 L, bidon 10 L en vrac.
Stockage	Conservation : > +5°C

h- les poussières de cimenterie:

L'addition de la poussière comme ajout avec taux de 20% a donné des résultats de compression de 54.85 Mpa à long terme. Ceci a amélioré les propriétés mécanique du produit comparé à celui du ciment aux ajouts pouzzolane de l'unité de Saida qui a une résistance de 51.65Mpa les différentes analyses se contrôle de qualité effectuées sur ce nouveau produit permettent de conclure que le ciment produit avec ajout poussière répond aux normes algériennes.

Du coté économique, la poussière est une matière à prix nul qui contribue à l'économie énergétique vu que cet ajout facilite le broyage. Ce produit assure aussi la protection de l'environnement en exploitant les poussières cimentières au lieu de les rejeter dans l'atmosphère.

i- mélange calcaire/pouzzolane:

Dans cette étude, la pouzzolane a fait réduire le taux de la chaux libre et le SO_3 dans le ciment produit comparé à celui du CPJ de l'unité de Saida.

La résistance mécanique augmente avec l'addition d'une grande quantité de calcaire.

I-3- fabrication du ciment

I-3-1- Matière première:

on peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques renferment chaux, silice, alumine de fer.

En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limités car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des premières faciles à extraite, traiter, et combiner. On peut utiliser aussi comme appoint des sous produits d'autres industries tels le laitier de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques.

On classe habituellement les matières naturelles en:

- Calcaires: plus de 80% de $CaCO_3$.
- Eléments argilo-calcaires: de 40% à 80% de $CaCO_3$.

- Argile: moins de 40% CaCO_3 .

I-3-1-1- le calcaire:

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variables, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues).

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins.

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont:

a-La silice: elle se présente sous plusieurs formes libre et combinée

b- La magnésie: est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté.

Les calcaires ne doivent pas contenir plus de 5% de magnésie

c- Le fer: se rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde Fe_2O_3 ou de pyrite Fe_2S [6].



Fig I.5: calcaire à l'état naturel

I-3-1-2 Les argiles:

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenus par dégradation physique (gel, cristallisation de sels,..) et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques (granites et basaltes) sous l'action physique et chimique des eaux de surface.

Ces résidus détritiques sont déplacés par voie glaciaire, fluviale ou éolienne et se déposent dans les bassins de sédimentation. Le terme argile vient du grec («argos » = blanc), montrant que les potiers de l'Antiquité se sont d'abord intéressés à des glaises blanches ou à des argiles calcaires

cuisant blanc. Ce terme est cependant mal défini techniquement et car il possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner : des minéraux de structures et propriétés particulières ; des roches argileuses composées pour l'essentiel de ces minéraux ; la partie la plus fine ($< 2 \mu\text{m}$) d'une analyse granulométrique d'un sol meuble, bien que des cristaux des minéraux argileux puissent être plus gros que $2 \mu\text{m}$ et que ceux des autres éléments, comme le quartz, puissent être plus petits. Les minéraux argiles sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxydes. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, le préfixe « phyllo » désignant des minéraux qui prennent des formes de feuillets.

I-3-1-3- Minerais de fer:

Le minerai de fer est plus au moins perméable à l'eau. C'est une roche lourde de couleur rouge brique. Il est utilisé comme matière de correction.

I-3-2- L'extraction et la préparation des matières premières:

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

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

I-3-3- Préparation de mélange cru

En fonction des analyses chimiques complètes, et le calcul du mélange, le laboratoire fixe la proportion de chaque matière, généralement on utilise approximativement. Le tableau suivant représente la proportion de chaque matière première.

Tableau (I.8) : Proportion de chaque matière première dans le cru.

Calcaire : 80%	Argile : 17%
Sable : 2%	Minerai de fer : 1%

Ce mélange est ensuite envoyé dans un broyeur ou il sera finement broyé soit à sec s'est le procédé par voie sèche soit en présence de 30 à 40% d'eau c'est le procédé à voie humide .

I-3-4- Le séchage et le broyage :

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économes en énergie et permettent un séchage plus efficace.

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

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

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

I-3-5- Homogénéisation:

Dans tous les cas de figures rare sont les carrières homogènes c'est-à-dire la même teneur de calcaire sur l'ensemble du gisement. Pour cette raison on procède à l'harmonisation qualitative de la matière obtenue. Cette homogénéisation permet d'avoir une stabilité de la cuisson.

I-3-6- La cuisson :

La cuisson se fait à une température voisine de 145°C dans un four rotatif. Ce dernier est un long cylindre tournant de 1,5 à 3 tours/min, il est généralement incliné. La matière chemine lentement et se combine en venant à la rencontre de la source de chaleur.

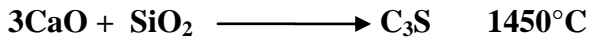
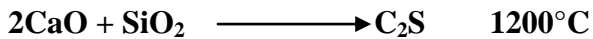
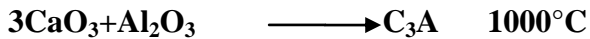
Pour améliorer le bilan thermique, on utilise un échangeur thermique qui préchauffe le cru à environ 800°C.

A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents (température 100°C). Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions se déroule. La décarbonatation du carbonate de calcium (Calcaire) donne la chaux :



Chapitre I: Constituants, fabrication et hydratation du ciment

Les réactions que se qui déroulent lors de la cuisson sont données suivant la température.



Le produit obtenu à la sortie est appelé le *clinker*. Ce dernier est déversé dans les chaînes trainâtes vers les silos de stockage.

Dons, on peut résumer le déroulement de la cuisson en quatre étapes illustrée dans la figure suivante

Stade **I** : Evaporation de l'eau

Stade **II** : préchauffage.

Stade **III** : décarbonatation et calcination : libération de l'anhydride carbonique (CO_2) et volatilisation des alcalins entre 900 et 1100°C.

Stade **IV** : Clinkérisation.

L'opération de clinkérisation est caractérisée par deux points particuliers :

- vers 1340°C et en phase liquide. (C) s'associe à (A+F) pour composer le C_4AF et le C_3A
- vers 1450°C et au sein de la phase liquide des aluminates, (C) s'associe à (s), sans fusion, pour former C_2S qui lui-même se transforme plus ou moins complètement en C_3S suivant composition de la matière crue.

I-3-7- Du clinker aux ciments:

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

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

I-3-8- Les expéditions:

Acheminés vers les silos de stockage par transport pneumatique ou mécanique, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac. Les sacs contiennent généralement 25 ou 50 kg de ciment et l'ensachage atteint fréquemment 100 tonnes par heure. Les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion.

Le ciment livré en vrac constitue 70% de la production. Il est transporté par camion-citerne, par train ou par bateau.

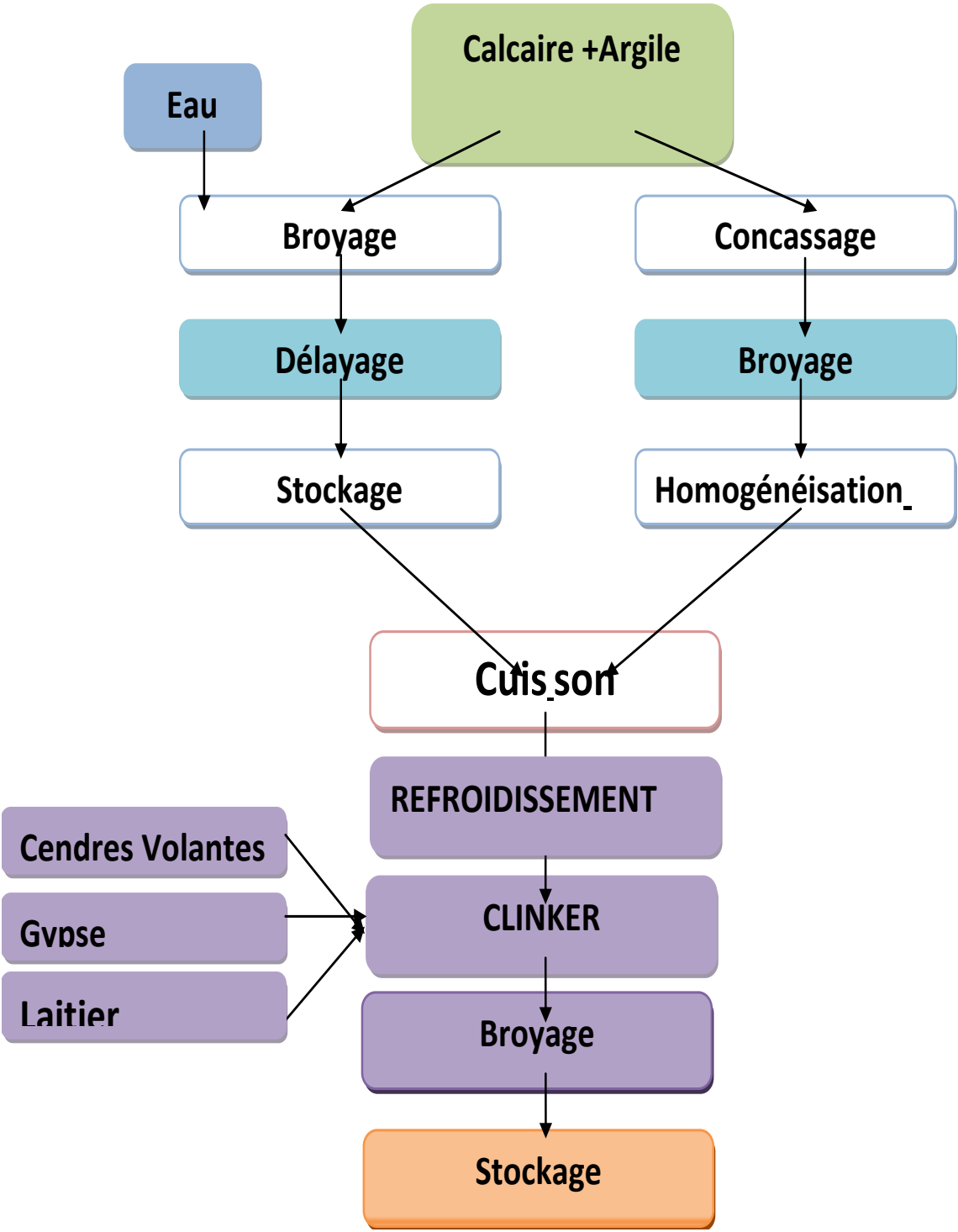


Fig I.6: Schémas de principe de la fabrication

I-4-Les principales catégories du ciment:

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

I-4-1- Classification des ciments en fonction de leur composition:

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- ✓ CEM I: Ciment portland,
- ✓ CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- ✓ CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- ✓ CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),
- ✓ CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).
- ✓ CEM IV : ciment spécial

I-4-2- Spécification chimiques: les exigences chimiques des différents types de ciments sont reportées dans le Tableau (I.9):

Chapitre I: Constituants, fabrication et hydratation du ciment

Tableau (I.9) : présente les exigences chimiques des différents types de ciments

1	2	3	4	5
Propriété	Essai de référence	types de ciments	Classes DE RESISTANCE	Exigence(%)
Perte au feu	N A 235	CPA CEM I CHF CEM II CLK CEM III	Toutes classes	≤5.0
Oxyde de magnésium (M gO)	N A 2185	CPA CEM I	Toutes classes	≤5.0
Résidu insoluble	N A 236	CPA CEM I CHF CEM II CLK CEM III	Toutes classes	≤5.0
Sulfate (SO ₃) limite supérieure	N A 237	CPA CEM I	32.5	≤3.5
		CPA CEM II	32.5 R	
		CPZ CEM IV	42.5 42.5 R	≤4.0
		CLC CEM V	52.5 52.5 R	
CHF CEM III	Toutes classes			
Chlorures	N A 5038	Tous types	Toutes classes sauf	≤0.10
			52.5 R 52.5 R	≤0.05

I-4-3- Spécification mécaniques:

Les propriétés mécaniques des ciments dont les types et Classes de résistance figurent respectivement aux colonnes 3 et 4 du tableau 1 précédent (Tableau I.9) sont données selon des classes appropriées dans le tableau suivant qui représente Les propriétés mécaniques des différents types de ciment.

Tableau (I.10) : Les propriétés mécaniques des différents types de ciment

Classes	Résistances mécaniques (M Pa)				Temps de début de prise (min)	Expansion (mm)
	Résistances au jeune âge		Résistances normal			
	2 jours Li	7 jours Li	2 8jours Li L s			
32.5	-	-			≥90	≥10
32.5	≥13.5	-	≥32.5	≥52.5		
42.5	≥12.5	-			≥60	
42.5 R	≥20	-	≥42.5	≥62.5		
52.5	≥20	-				
52.5 R	≥30	-	≥52.5	-		

I-5- Hydratation du ciment :

I-5-1- Définition:

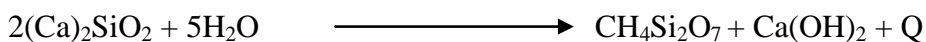
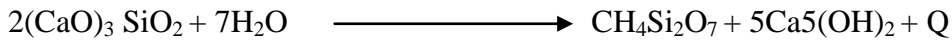
C'est l'action de l'eau sur un corps anhydre ou partiellement anhydre donnant un corps hydraté cristallisé.

L'effet de l'hydratation sur le ciment est d'augmenter la compacité en matière solide, par fixation d'une proportion d'eau croissante. Cette compacité représente un facteur primordial de la résistance mécanique.

L'hydratation du ciment consiste essentiellement en la formation de silicate de calcium hydraté.

I-5-2- Hydratation du C₃S et C₂S : (l'alite et la bélite):

L'hydratation du C₃S est une réaction solide liquide qui présente différentes phases que l'on détecte en mesurant la température de la pâte du ciment car ces réactions chimiques sont exothermiques.



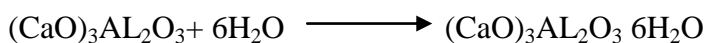
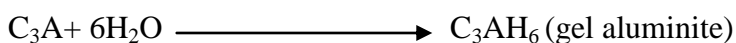
Le produit de la réaction d'hydratation soit (CH₄Si₂O₇) est le composé essentiel qui donne la résistance au ciment. Ce minéral est appelé Tobermorite.

La portlandite Ca(OH)₂ est un élément faible, il se décompose à 400°C environ pour donner naissance à la chaux vive. C'est la raison pour laquelle le ciment portland ne peut pas être utilisé à une température supérieure à 400°C.

Cet hydroxyde de chaux pourra être fixé par les laitiers ou les pouzzolanes donnant un corps hydraulique.

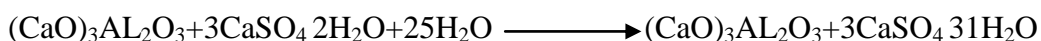
I-5-3- Hydratation de C₃A : (la célicité):

Si on hydrate le C₃A seul, la réaction se fait très rapidement. la réaction du C₃A en présence d'eau :



I-5-3-1- Hydratation C₃A en présence du gypse:

La réaction d'hydratation C₃A en présence du gypse en solution peut s'écrire de la façon suivante :



Le précipité est appelé « gel étringite » se cristallise sous forme d'aiguille. Se fait sur deux étapes

Chapitre I: Constituants, fabrication et hydratation du ciment

1^{ère} étape :

- dissolution du gypse soluble.
- formation des ions Ca^{+2} , SO_4^{-2}

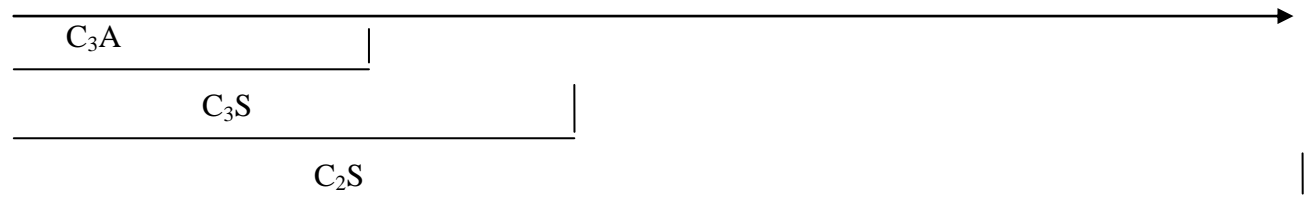
2^{ème} étape :

- réaction des ions Ca^{+2} , SO_4^{-2} avec C_3A pour former un gel appelé : ettringite $(\text{CaO})_3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$.
- ce gel est imperméable. Son rôle est de bloquer soit de retarder la réaction. C'est pour cela que le gypse est appelé retardateur de prise.

I-5-4- Pourcentage d'eau fixé en fonction du temps:

- la célicité : à le pourcentage d'eau le plus élevé, (80% se trouve fixé à 2jours)
- L'alite : 40% de son eau se trouve fixée à 2 jours et 35% à 7 jours.
- la bélite : 10% de son eau se trouve fixée à 2 jours, 15% à 7 jours, 75% à 28jours.

2jours 7jours 28jours 90jours 180jours



I-5-5- Ordre de l'hydratation :

- le C_3A s'hydrate le premier, apporte les résistances à court terme.
- le C_3S s'hydrate le deuxième, apporte les résistances à moyen terme.
- le C_2S s'hydrate le dernier, apporte les résistances à long terme

I-5-6- Structure et évolution physico-chimique de la pâte de ciment (Figure I.7)

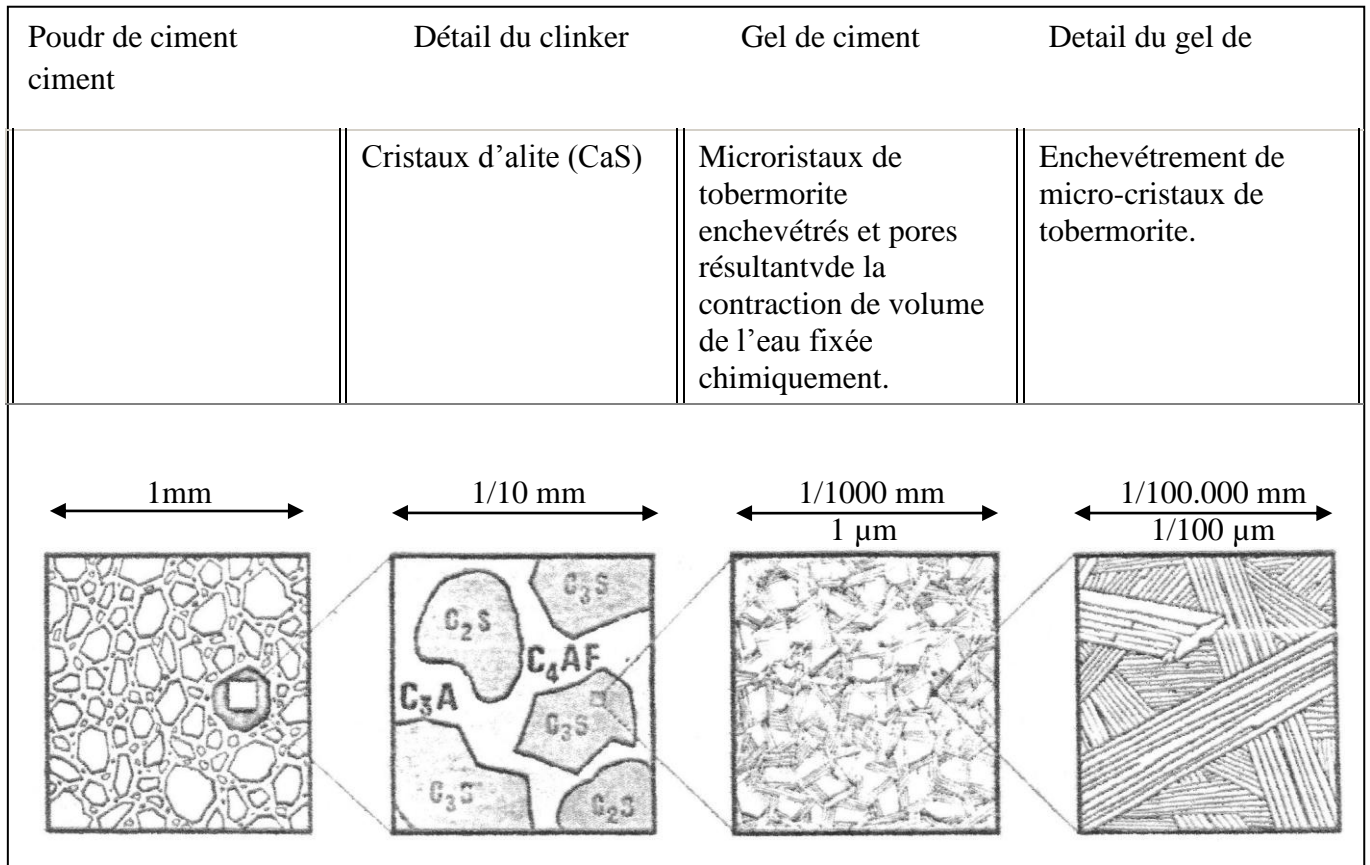


Fig I.7: Structure et évolution physico-chimique de la pâte de ciment

I-5-7- Influence du rapport Eau/Ciment sur les processus d'hydratation:

Nous exposons ici l'importance du rapport eau/Ciment (E/C) sur la structure de pâte ciment soit en illustrant le phénomène par la figure I.8.

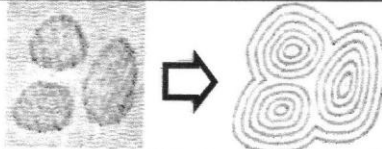
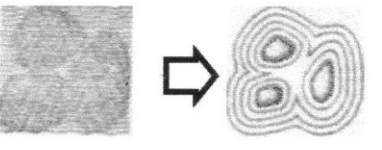
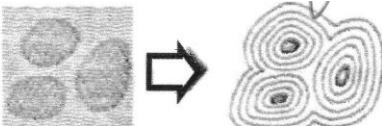
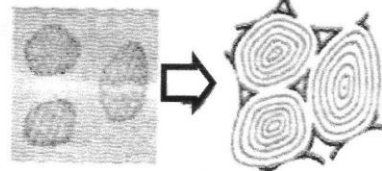
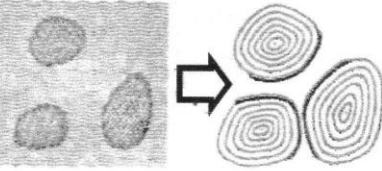
E/C	Structure de pâte de ciment durcie	Illustration
0,25	Hydratation complète : seuls subsistent les pores de gel dispersés dans la masse du gel	
< 0,25	Hydratation incomplète d'où affaiblissement de la résistance par interruption, de la continuité du réseau hydraté	
< 0,25	Hydratation incomplète mais les résistances ne sont pas amoindries	
0,25 à 0,55	Il y a excès d'eau ; des capillaires se forment et se groupent en poches fermées	
> 0,55	Il y a excès d'eau et les capillaires communiquent entre eux Ces capillaires déforment fortement le réseau hydraté et sont donc responsables des chutes de résistance observées lorsque croit le F/C.	

Fig I.8: Influence du rapport Eau/Ciment sur les processus d'hydratation

Chapitre

II

Chapitre II: le Brique réfractaire

II-1- Matériaux réfractaires du système silice-alumine

A la différence des métaux, de la famille des matériaux cristallins, dans Les matériaux céramiques cohabitent très souvent des phases vitreuses et des phases cristallines. Pendant la cuisson, lorsque la température est suffisamment élevée, la fusion hétérogène des phases vitreuses entraîne un ramollissement progressif du matériau lorsque la température est plus élevée que la température de résistance pyroscopique.

Par cette propriété, les céramiques, d'une façon générale, ont un comportement intermédiaire entre les matériaux cristallins purs, à température de fusion franche et les matériaux non cristallins (par exemple les verres), qui n'ont pas une température de fusion franche, mais dont la viscosité diminue avec l'élévation de la température jusqu'à la fusion complète, en passant par des phases de ramollissement sur une large plage de température.

Plusieurs définitions ont été données du caractère réfractaire d'un matériau céramique:

La plus récente est celle-ci: « un matériau réfractaire est constitué de matières ou produits non métalliques dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum » et il existe un grand nombre de substances réfractaires qui vérifient cette définition (figure I.1).

Les matériaux réfractaires silico-alumineux ne se distinguent pas par des températures de fusion particulièrement élevées, puisque celles-ci sont comprises, selon le diagramme d'équilibre $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (figure 2) entre $1726 \pm 5^\circ\text{C}$ pour SiO_2 et $2054 \pm 6^\circ\text{C}$ pour Al_2O_3 avec un eutectique à $1587 \pm 10^\circ\text{C}$. Dans ce domaine, ils sont largement dépassés par les nitrures, carbures et autres siliciures ainsi que par les oxydes basiques MgO , CaO ou ThiO_2 (figure 1).

Chapitre II: le Brique réfractaire

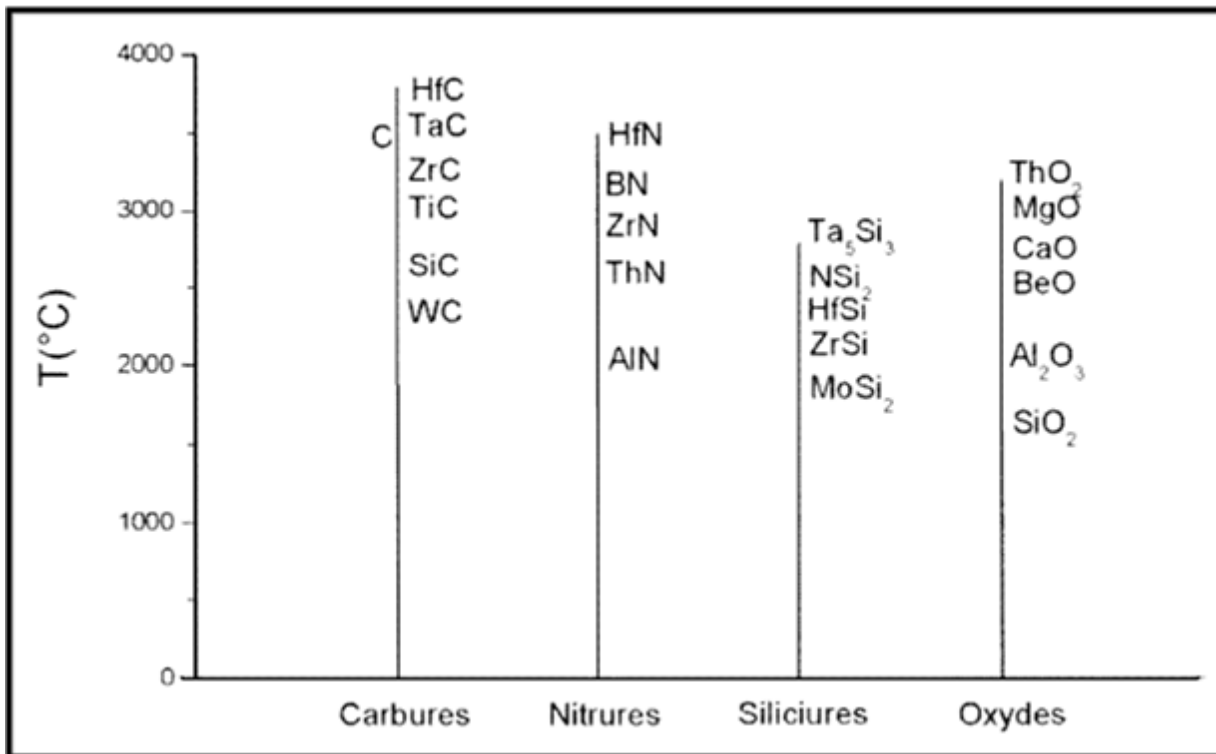


Fig II.1: Températures de fusion des composés réfractaires

Ils ont cependant une résistance pyroscopique suffisamment élevée, pour en faire les matériaux réfractaires les plus utilisés, dans des domaines industriels aussi divers que le revêtement des haut-fourneaux, des fours de transformation de l'acier, des zones de décarbonation des fours tournant de l'industrie des ciments, ainsi que dans les industries du verre, des céramiques, de la métallurgie, des matériaux de construction.

La résistance pyroscopique: indique jusqu'à quelle température on peut utiliser un matériau sans difficultés. La fusion du matériau réfractaire aura lieu à une température beaucoup plus élevée, mais en dessous de cette température, il peut y avoir des déformations (fluage) et un retrait supplémentaire. La résistance pyroscopique tient compte de ces phénomènes.

Chapitre II: le Brique réfractaire

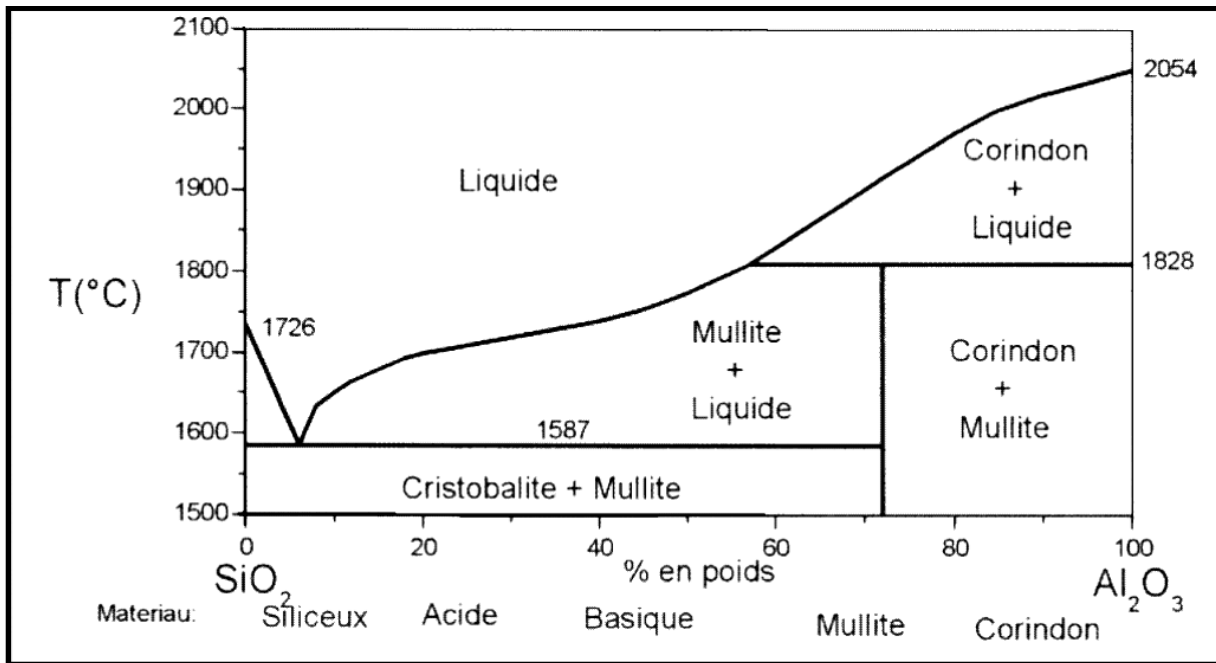


Fig II.2 : Diagramme de phase Silice-Alumine

II-2- Briques en général

On distingue différents types de briques :

- la brique de terre crue, qui peut aussi contenir des fibres (pailles, lin, crin..),
- la brique de terre compressée,
- la brique cuite pleine, matériau traditionnel très ancien, avec une variante appelée brique pleine perforée (les perforations sont perpendiculaires au plan de pose),
- la brique légère et isolante (qui flotte sur l'eau), citée par Strabon, Pline et plusieurs autres auteurs anciens qui évoquent des "terres légères" exploitées à pitanée, en Asie et en Espagne (à Calento) ou des terres dites "farines fossiles" utilisées en Grèce et en Toscane. Le savant italien Fabroni a utilisé une terre silico-magnésienne sans consistance mais qui mélangée à un vingtième environ d'argile plastique produisait des briques aussi résistantes que des briques ordinaires, mais très poreuses, conduisant mal la chaleur ou le froid et flottant sur l'eau
- la brique cuite creuse, inventée au XIX^e siècle, plus légère (et donc moins coûteuse à transporter) et plus isolante, est devenue la plus utilisée, ses perforations sont parallèles au plan de pose de manière à ne pas diminuer sa résistance à la pression,
- la brique non gélive,
- la brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc.

Chapitre II: le Brique réfractaire

La brique pleine peut être laissée apparente, ou être employée comme matériau de parement, tandis que la brique creuse, qui présente l'avantage d'être plus légère et plus isolante, est généralement enduite.

II-2-1- Principe de la fabrication des briques

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000 C°. Par combinaison chimique à partir de 700 C°, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques.

En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous.

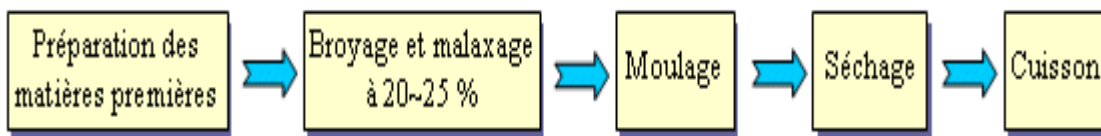


Figure II.3 : Schéma de principe pour la fabrication de brique

II-3- Brique réfractaire

Est une brique qui conserve ses propriétés mécaniques à très haute température. Les produits réfractaires résistent, par nature, aux températures élevées et sont utilisés pour la réalisation et la réparation de fours, de hauts fourneaux, de poches métallurgiques, de chaudières, chaufferies, brûloirs, foyers, feux ouverts, et conduits, de murs périphériques d'installations nécessitant la conservation de chaleur et la résistance aux températures élevées, éventuellement en parement adjacent ou non.

Les briques réfractaires sont de différentes qualités qui répondent aux besoins des industries cimentières, céramiques, sidérurgiques, métallurgiques, de la construction en fumisterie, etc.

Les briques réfractaires riches en silice-alumine et sont caractérisées par la concentration relative (taux) en alumine, oxyde amphotère ayant une réactivité chimique basique à haute température dans ce type de brique. Ce taux varie en proportion inverse avec le taux de la silice dont la réactivité chimique est acide à haute température. Lorsque leur taux en alumine est faible, inférieur à 10%, les

Chapitre II: le Brique réfractaire

briques silico-alumineuse sont dites siliceuses. Lorsque ce taux est compris entre 15% et 35% environ, elles sont dites acides et entre 35% et 55% environ, elles sont dites basiques. Les briques de mullite ont un taux d'alumine variant autour de 71,83%, correspondant a la stoechiométrie de la mullite. Enfin les briques de corindon ont le taux d'alumine le plus élevé (> 85%). Cette différenciation des briques réfractaires silico-alumineuses n'est pas seulement d'ordre chimique mais elle correspond également a des propriétés microstructurales, thermodynamiques et thermochimiques particulières. Par exemple, toute chose étant égale par ailleurs, la réfractarité augmente avec le taux d'alumine pour les briques autres que les briques siliceuses

La qualité des briques réfractaires dépend non seulement de leurs composants principaux, alumine et silice, mais aussi des composés présents en plus faible quantité et considérés comme des impuretés, tels les oxydes métalliques. Ces impuretés jouent un grand rôle dans les qualités des matériaux réfractaires élaborés. Ils peuvent, c'est le cas en particulier des oxydes de fer, abaisser notablement la résistance pyroscopique des produits finis, selon les diagrammes ternaires. Pour cette raison, il est établi des normes ou maxima de concentrations pour certaines impuretés, surtout les oxydes de fer présents dans les matières premières servant à l'élaboration des produits réfractaires. Selon le type de brique, ces maxima peuvent varier de 3 à 5 %; des valeurs légèrement plus élevées peuvent être tolérées pour les briques les plus riches en alumine lorsque les autres impuretés d'oxydes métalliques ont des concentrations négligeables. Il est important de remarquer que les impuretés d'oxydes métalliques complémentaires à l'impureté principale jouent un rôle amplificateur pour la perte des propriétés réfractaires du matériau.

II-3-1- Procédés de fabrication des briques réfractaires

Les différentes opérations des fabrications courantes des produits réfractaires sont après dosage et mélange des matières premières préalablement cuites (chamottes argileuses)

Et des matières premières crues. La pièce est façonnée par pressage à sec en plastique ou coulage en barbotin puis après un séchage elle est cuite. Cette cuisson est l'élément de base de fabrication car elle confère à la pièce sa solidité et ses caractéristiques de texture physique et minéralogique provoquant la liaison céramique.

Les étapes du processus de fabrication sont les suivantes:

- Extraction des matières premières
- Stockage
- Séchage broyage
- Dosage et mélange

Chapitre II: le Brique réfractaire

- Humidification pressage ou coulage
- Séchage
- Cuisson
- Défournement

II-3-2- Les matières premières

Les matières premières à l'origine de l'élaboration des matériaux réfractaires du système silice-alumine sont très fréquentes dans la nature, ce qui explique en partie l'importance de leurs utilisations: parmi elles, se trouvent les argiles et les kaolins, les quartzites (source de silice) et des matières premières riches en alumine telle les sillimanites, andalousites et bauxites. Les matières premières sont rarement pures et à coté des phases principales, par exemple la kaolinite dans les argiles et les kaolins, se trouve d'autres composés dans des pourcentages qui peuvent être élevés, par exemple le quartz et les micas dans les kaolins et les argiles. Les composés de faible concentration, le plus souvent des oxydes métalliques, sont considérés comme des impuretés. La concentration et la nature de ces impuretés jouent un rôle très important sur les propriétés thermodynamiques et microstructurales des matériaux élaborés, et cela d'autant plus que leurs éliminations sélectives ou totales est le plus souvent difficile et onéreuse.

II-3-2-1-La silice

La silice est le composé le plus abondant de l'écorce terrestre. A l'état libre, elle se trouve surtout sous la forme cristallisée qui est le quartz (dans les quartzites), mais elle rentre également dans la composition d'un nombre élevé de composés naturels ou artificiels.

Ainsi, elle est un composé essentiel des kaolins, des micas, des feldspaths à l'état naturels et elle est aussi un constituant de base des matériaux naturels transformés par cuisson pour donner les matériaux réfractaires.

La silice cristallisée possède de nombreuses variétés allotropiques: La plus fréquente et la plus stable est le quartz α ou quartz de basse température (quartz low) qui se transforme en fonction de la température en plusieurs variétés allotropiques, d'abord en quartz β ou quartz de haute température (quartz high), puis en d'autres variétés cristallographiques telles la trydimite α et β et surtout la cristobalite α et β .

C'est également l'état d'un matériau réfractaire (température de fusion = 1726°C) qui possède une résistance en charge élevée et constante jusqu'à une température voisine de la température de fusion. Cette propriété est remarquable car un affaissement de 0.5 % pour une charge appliquée de 0.2

Chapitre II: le Brique réfractaire

N/mm² ne se produit que pour des températures comprises entre 1610 et 1640°C. Ceci est considéré comme étant la meilleure résistance en charge pour l'ensemble des produits réfractaires du système silice –alumine et qui n'est égalé que par les produits de corindon (>85% d'alumine).

II-3-2-2- Les kaolins

Son nom est dérivé du nom d'une ville chinoise Kao-ling par comparaison avec les matières premières de cette région de chine employées pour la fabrication de la porcelaine.

C'est l'une des matières premières les plus répandues dans le monde.

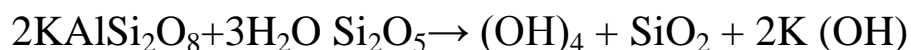
Elle s'utilise en premier lieu dans les céramiques domestiques comme elle est la source principale pour la fabrication de la plupart des matériaux réfractaires. Le garnissage des fours est une autre application du kaolin à cause de sa température relativement élevée.

Les espèces chimiques types qui présentent un intérêt pour les réfractaires sont présentées par la kaolinite alumineuse qui est l'élément fondamental de la plupart des argiles employées dans l'industrie céramique.

Selon la nature des impuretés qu'elle contient, la kaolinite présente des couleurs allant du blanc au gris. Le quartz et le mica sont les principales sources de ces impuretés.

La réfractarité du kaolin est liée directement à la qualité et aux pourcentages des impuretés (donc à sa structure chimique) qui conduit fréquemment à des problèmes industriels.

La kaolinite et autres minéraux réfractaires sont formés par la décomposition des feldspaths par des processus géologiques. Exemple: le feldspath potassique (l'orthoclase) est fréquemment trouvé dans les roches granitiques suivant la relation suivante :



La formule chimique du kaolin est $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ce qui correspond aux teneurs massiques suivantes: 36.53% d' Al_2O_3 , 46.50% de SiO_2 et 13.95% de H_2O ; sa masse molaire est de 258 g.

Ces rapports changent selon le degré de pureté du kaolin. On considère le meilleur type du kaolin celui qui contient 45.5% en pourcentage massique d'alumine, et qui est rare dans la nature.

a- Structure cristalline

La kaolinite se trouve dans la nature sous forme de feuillets constitués par l'association d'une couche octaédrique Al sous-jacente à une couche hexagonale de tétraèdre de Si. Les sommets des octaèdres,

Chapitre II: le Brique réfractaire

qui ne sont pas reliés aux tétraèdres de silicium sont occupés par des ions hydroxydes (OH^-) (Figure 4). Elle cristallise dans le système triclinique, dont les paramètres cristallins sont :
 $a = 5.119 \text{ \AA}$ $b = 8.932 \text{ \AA}$ $c = 7.391 \text{ \AA}$.

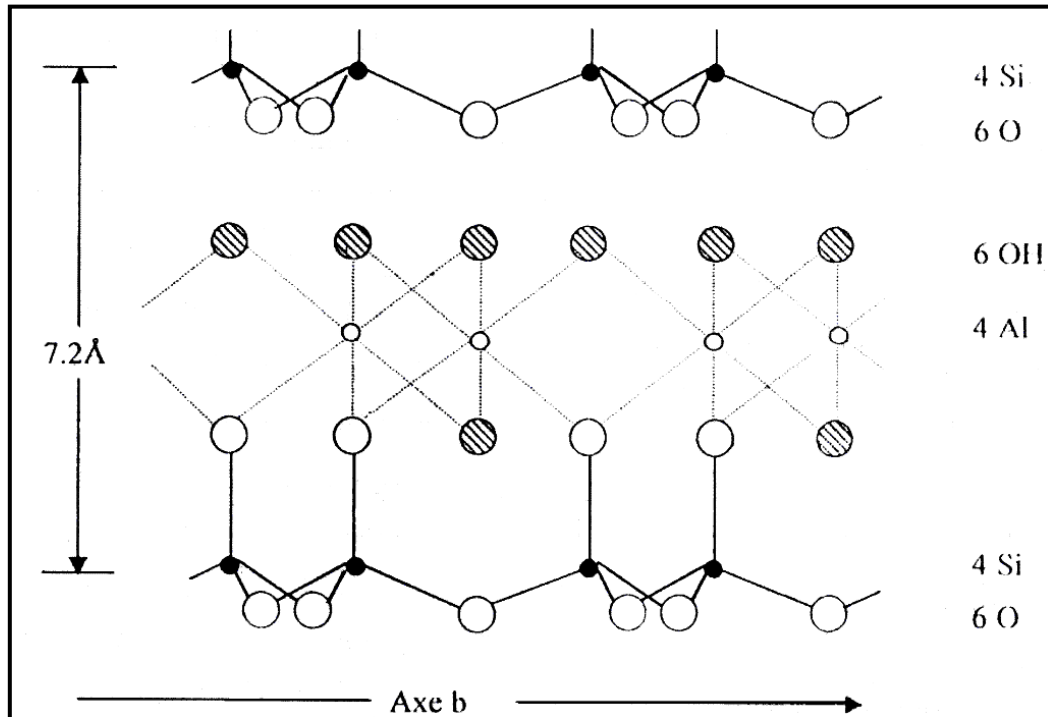


Fig II.4 : structure cristalline de la kaolinite

Chapitre

III

Chapitre III:Partie expérimental

L'étude que nous avons effectuée s'est déroulée en sa totalité dans la cimenterie de Saida

III-1- Présentation de la cimenterie de Saida:

La cimenterie est implantée sur le territoire de la commune d'Oum-Djerane, Daira de HASSASNA, Wilaya de Saïda à une altitude de 1100 M. Elle est située à 20 Kilomètres de la commune de Saida.

Le terrain de l'usine d'une superficie de 31 Hectares 40 ares est à moitié occupé par les installations de production.

Principaux Inputs- Environnement.

La cimenterie de Saida est rattachée à la filiale de S.C.I.S (société de la cimenterie de Saida) du groupe ERCO. Elle est située à Oum Djrane, daïra de Hassasna dans la wilaya de Saida.

L'activité de la S.C.I.S est contrée sur la production du ciment portland composé CPJ 45 (avec ajout) et sa commercialisation.

La capacité nominale de production de la société est de 1500 tonnes/jour de clinker.la provenance des matières premières se fait comme suit :

A- Le calcaire : Le gisement est situé à 2Km de l'unité .l'exploitation se fait par explosif.

Le transport est assuré par des camions jusqu'au concasseur calcaire puis repris par des transporteurs à bondes vers l'halle de stockage.

B- L'argile : Le gisement est situé au sud-ouest de l'unité .l'argile est transportée par camions au concasseur qui se trouve à l'unité puis par des transporteurs à bondes vers l'halle de stockage.

C- Le minerai de fer : Il est transporté par camions à partir de la mine Rouina (W.Chlef). En ce qui concerne les ajouts, les sources d'approvisionnement sont :

D- La pouzzolane : La pouzzolane provient de Rouina (Chlef).

E- Le gypse : Il provient de la carrière d'Oran.

III-2- Problématique :

A l'échelle internationale, la technique cimentière se préoccupe depuis un certain temps de l'utilisation des déchets et sous-produits d'origines divers (mines et carrières, industrie métallurgique, autres industries...) sans que cette utilisation ne doive nécessairement se substituer à celle des matériaux traditionnels. Son développement doit obéir aux objectifs suivants :

- Contribuer à la protection de l'environnement en fournissant un débouché à ces déchets et sous-produits, évitant ainsi leur mise en dépôt.
- Contribuer aux économies des matériaux traditionnels.
- Fournir à la construction routière des matériaux de qualité suffisante et ayant une certaine stabilité intrinsèque.

L'objectif de ce travail est donc :

Etude des effets de l'incorporation de brique réfractaire comme ajout sur les propriétés du ciment.

III-2-1- Nature de l'ajout:

Les déchets sélectionnés pour revalorisation sont les briques réfractaires provenant de l'entreprise de SONATRAC d'Oran.

III-3- préparation des échantillons:

Pour commencer, nous avons préparé différentes formulations comportant clinker, Gypse(g), Brique, pouzzolane et calcaire. Chaque échantillon pèse 1Kg. Le tableau suivant présente les différentes compositions.

Chapitre III:Partie expérimental

Tableau (III.1): Préparation des échantillons de ciment portland confectionné et le Témoin.

Echantillon	Clinker(g)	Gypse(g)	Brique réfractaire(g)	Pouzzolane et calcaire
6% Brique	880	60	60	0
12% Brique	820	60	120	0
16% Brique	740	60	160	0
20% Brique	680	60	200	0
Témoin (T)	680	60	0	200

Chaque échantillon subit par la suite un broyage minutieux en respectant la capacité du broyeur à disque



Fig III.1: broyage de mélange

III-4- Analyse chimique

III-4-1-Analyse par fluorescence X

III-4-1-1-Mode opératoire:

a-principe:

Ce mode opératoire est relatif à la méthode pratique instrumentale d'analyse élémentaire du ciment par spectrophotométrie de fluorescence suivant la norme NA 5044V2005 son domaine d'application est relatif à l'analyse chimique des ciments.

Les éléments : Si, Al, Fe, Ca, Mg, S, K et Na exprimés sous les formes oxydées : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O sont déterminés sur échantillon en solution Solides appelés également perles. Leur confection se fait comme suit :

- broyer 100g de l'échantillon pendant 2mn
- Peser 14 g de l'échantillon broyé avec précision de 0.0001g
- Mettre cette matière dans le broyeur, lui ajouter soit des pastilles de broyage

Soit du TEA (uniquement pour faciliter la tâche)

- Broyer la matière pendant un temps précis (4mn)
- en fin de l'opération du broyage, récupérer toute la matière.
- Introduire la matière broyée dans une pastilleuse pendant 30s sous une force de 20 tonnes.
- Séché la pastille obtenue dans une étuve pendant 15mn.
- Récupérer la pastille ainsi séchée pour analyse par fluorescence X.

b- Détermination de la Perte Au Feu : PAF

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante (air).par calcination

à l'air à 975 ± 25 c° le gaz carbonique, et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés.

- Peser dans un creuset préalablement calciné et taré $1g \pm 0.0$ l'échantillon **P₁**.
- Placer le creuset couvert dans le four électrique dont la température est stabilisée à 975 ± 25 c° .après 5min de chauffage, retirer le couvercle

Chapitre III:Partie expérimental

- et laisser dans le four pendant 10min supplémentaire
- Refroidir le creuset dans le dessiccateur à la température ambiante et peser P_2 .

$$PAF = (P_1 - P_2) \times 100$$



Fig III.2 : Diffraction par rayon x (fluorescences x)

Résultats des analyses:

III-4-1-2- Composition chimique de la brique réfractaire

Après avoir broyé les briques réfractaire, nous avons déterminé leur composition chimique par spectrophotomètre de fluorescence X. Nous avons obtenu les résultats exposés dans le tableau (III.2):

Tableau (III.2): Composition chimique de la brique réfractaire.

<i>Composition chimique%</i>	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PAF
Brique réfractaire	1.42	1.35	30.71	55.2	0.3	00	1.59	1.39	3.85	2.92

Interprétation:

Nous remarquons que les compositions principaux des briques réfractaires sont les alumines et silice, mais aussi des composés présents en plus faible quantité et considérés comme des impuretés.

III-4-1-3- Composition chimique de clinker:

Après avoir broyé le clinker, nous avons déterminé leur composition chimique par spectrophotomètre de fluorescence X. Nous avons obtenu les résultats exposés dans le tableau.

Tableau (III.3) : Composition chimique de clinker.

<i>Composition chimique %</i> matières	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cao	Mg O	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
Clinker	23.17	5,18	2,98	64,83	1,77	0,09	0,187	1,477	0,25

Interprétation:

Nous remarquons que les compositions principales de clinker sont: la chaux et silice,

III-4-1-4-Composition chimique de ciment fabriqué a la cimenterie de Saida(Témoin) et le ciment élaboré a base de taux d'ajout de brique réfractaire:

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout brique réfractaire (0%, 6%, 12%, 16% et 20%). Nous avons déterminé la composition des différents échantillons préparés, Alors que le tableau suivant représente la composition chimique de ciment fabriqué a la cimenterie de Saida.

Tableau (III.3) : Composition chimique de ciment fabriqué a la cimenterie de Saida.

<i>Composition chimique%</i>	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PAF
ciment	0,213	1,6	6,66	21,34	2,27	00	1,232	58,7	3,16	5,46

Chapitre III:Partie expérimental

De la même manière, les compositions chimiques des ciments élaborés à partir d'un déchet de brique réfractaire sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau (III.4) : Composition chimique des quatre formulations.

<i>Composition chimique%</i>	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	PAF
6% BR	0.099	1.18	9.35	25.04	3.35	1.103	55.31	2.91	2.23
12% BR	0.089	1.17	9.6	25.8	2.67	1.156	55.31	3.02	1,31
16% BR	0.110	1.16	9.73	25.96	3.36	1.107	54.04	2.99	2.57
20% BR	0.312	1.12	10.88	26.7	2.84	1.083	53.11	3.03	1.08

Interprétation:

L'incorporation des additions de la brique réfractaire augmente le pourcentage des oxydes (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, et Na₂O) et diminue le taux d'oxyde de chaux (CaO, MgO).

Nous remarquons d'après le tableau que la perte au feu diminue considérablement des l'introduction de l'ajout. En présence 20% de briques, la perte de feu est passée de 5,46 à 1,08.

III-4-2- Caractéristique physico-chimique du ciment confectionné

L'influence du taux d'ajout sur les propriétés physico-chimique du ciment confectionné a été étudiée.

III-4-2-1- Sur la chaux libre

III-4-2-2- Mode opératoire

a- Détermination de la quantité de la chaux libre

La chaux libre dans le ciment ou le clinker se dose par titrage à l'ébullition dans un mélange anhydre glycérine -alcool au moyen d'une solution alcoolique titrée d'acétate d'ammonium (indicateur phénol phtaléine).

- Peser 0.5g+25ml de solvant +quelques gouttes de phénol phtaléine, -fermer l'erlene Meyer avec un bouchon traversé par un tube de verre taillé en biseau à la base, pour condenser la plus grande partie de l'alcool.
- Chauffer sur bain de sable jusqu'à apparition de couleur rose.
- Doser ensuite par l'acétate d'ammonium jusqu'à disparition de la couleur rose.
- Poursuive l'alternance de ces opérations (ébullition et addition d'acétate d'ammonium jusqu'à ce que la coloration rose ne réapparaisse plus après un quart d'heure de chauffage.

$$\text{CaO}^L = V_{\text{Titré}} \times \text{Facteur}$$

b- Détermination du Facteur de chaux libre

- Peser 0.05g de CaCO_3 (après décarbonatation) l'introduire dans un erlene Meyer préalablement séché et ajouter 25ml de solvant (alcool – glycérol - phénol phtaléine),fermer l'erlene Meyer avec le bouchon traversé par un tube de verre pour condensé l'alcool.
Chauffer sur bain de sable jusqu'à apparition de couleur rose.
Doser ensuite par l'acétate d'ammonium jusqu'à disparition de la couleur rose.
- Poursuive l'alternance de ces opérations (ébullition et addition d'acétate d'ammonium) jusqu'à ce que la coloration rose ne réapparaisse plus après un quart d'heure de chauffage.

$$\text{Facteur} = 10 / (V_{(\text{CH}_3\text{COONH}_4)})$$

Résultats:

III-4-2-3- Quantité de la Chaux libre dans les différentes formulations:

Tableau (III.5) : Quantité de la Chaux libre dans les différentes formulations.

échantillon	Témoin	6%BR	12%BR	16%BR	20%BR
CaO _L %	1,2	1,08	0,96	0,84	0,72

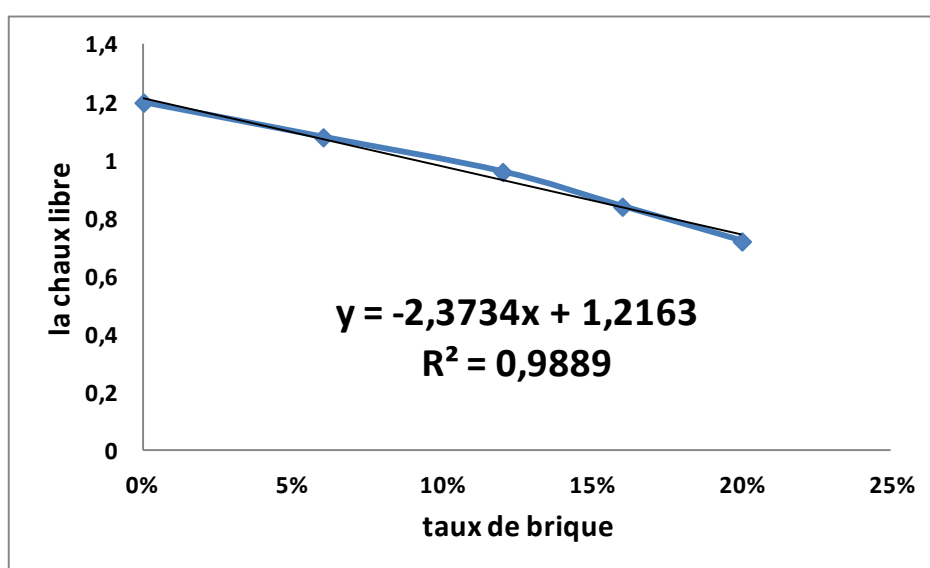


Fig III.3: Evolution de la chaux en fonction du taux de brique ajouté.

Interprétation:

Nous relevons d'après la figure III.3 que la chaux libre diminue quand le taux d'ajout augmente et en comparant avec le ciment (témoin) avec 20% d'ajout pouzzolane présente un taux de chaux liée intéressant. Le tracé de la quantité de chaux libre en fonction du taux ajouté décrit un droit linéaire de facteur de corrélation égale 0.9886 avec une pente égale -2.3734.

III-5- Analyse de la finesse de broyage du ciment

III-5-1- Refus :

- Peser 100 g de matière la verser sur un tamis de 90 microns.
- Laver cette matière avec de l'eau de robinet jusqu'à disparition complète de la poussière.

Chapitre III:Partie expérimental

- Sécher le tout dans une étuve et peser le reste des refus sur une balance.
- -on multiple le résultat par 20.

Tableau (III.6) : Refus des ciments confectionnés et ciment (témoin).

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Refus	20,36	24,24	27,98	25,76	23,48

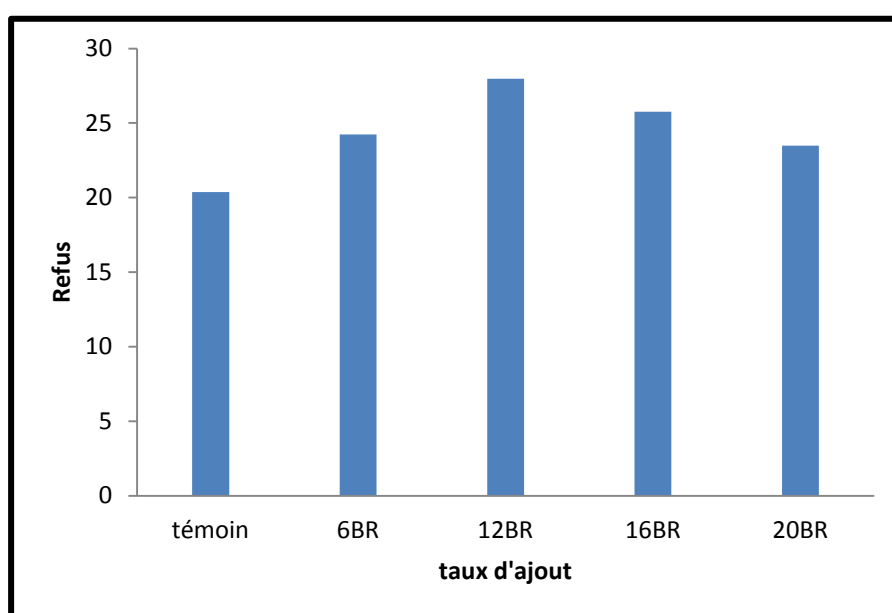


Fig III.4: La broyabilité du ciment en fonction du taux de brique ajouté.

III-5-2- Détermination de la surface spécifique:

III-5-2-1- Mode opératoire

a-Principe:

La finesse du ciment est mesurée sous forme de surface massique en observant le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à des dimensions et une porosité spécifiées.

Dans des conditions normalisées, la surface massique du ciment est proportionnelle à la vitesse ou t est le temps nécessaire à une quantité d'air donnée pour traverser un lit de ciment

Chapitre III:Partie expérimental

compacté. Le nombre et la distribution des dimensions des pores individuels du lit spécifié sont fixés par les dimensions des particules de ciment qui déterminent aussi le temps de passage de l'air.

b-Détermination du poids spécifique ou masse spécifique:

- Prélever un échantillon représentatif de la poudre de ciment environ 200 à 250 g dans une capsule.
- Tamiser l'échantillon à travers 0.05 ou 1 μ afin d'éliminer, les granulats de clinker, papier etc.
- Etuver l'échantillon à la température de 80°C à 100°C pendant 02 heures minimum.
- Refroidir l'échantillon dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante.
- Prendre un densimètre le chate lier propre et sec, le remplir avec le pétrole ou le kérosène au trait de jauge.
- Plonger celui-ci dans le bain thermostatique à la température 20°C \pm 1°C pendant environ 15 mn.
- Jauger le liquide jusqu'au trait marqué O.
- Contrôler après quelques minutes 2/3 mn la jauge.
- Retirer le densimètre et l'essuyer avec un chiffon sec, et le poser sur une feuille de papier.
- Peser avec précision 64 g, et les introduire dans le densimètre sans aucune perte.
- Faire dégager les bulles d'air entraînées par le ciment en agitant doucement le densimètre entre les mains.
- Replonger le densimètre dans le bain thermostatique à la température T = (20°C \pm 1°C) pendant environ 20 mn
- Les particules de ciment ne doivent pas être fixées sur les parois internes du densimètre.
- Lire le volume déplacé à des intervalles de temps, 3 fois quant celui-ci est stable, soit V (cm³).

Le poids spécifique est obtenu :

$$\frac{p}{s} = \frac{M(g)}{V(cm^3)}$$

c- Détermination de la surface spécifique Blaine:

A-Principe :

Le Blaine est un appareil utilisé pour déterminer la surface spécifique des ciments et autres produits en poudres.

Cette méthode permet de déterminer la finesse du ciment, par perméabilité à l'air, en mesurant le temps de passage d'une quantité d'air donnée au travers d'un lit de poudre.

Les opérations à effectuer :

- Peser à 0.01 g près, une masse déterminée de ciment (poids spécifique)
- Placer la grille au fond de la cellule
- Mettre sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'équerre, un disque neuf de papier filtre
- Verser le ciment dans la cellule en utilisant un entonnoir
- Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment
- Placer sur la couche supérieure du ciment un autre disque neuf de papier
- Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule
- Retirer le piston lentement
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur
- Enduire de vaseline la partie sur ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline ; veiller à ne pas altérer le tassement de la couche
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur
- Fermer le robinet
- Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait
- Arrêter le chronomètre quand le niveau atteint le troisième trait
- Noter le temps écoulé ainsi que la température de la pièce

La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S.S.Blaine = (t)_{1/2} \cdot K \cdot \frac{(e^3)^{1/2}}{\rho \cdot (1 - e) \cdot (\eta)^{1/2}}$$

K est la constante de l'appareil

e est la porosité de la couche tassée

t est le temps mesuré en (seconde)

ρ est la masse volumique des grains de ciment en (g/cm³)

η est la viscosité de l'air à la température d'essais en (poises).

d-Détermination du Blaine a l'aide d'un appareil (le perméabilimètre de Blaine) :

Cet appareil permet de déterminer la surface spécifique des ciments et autres produits en poudre.

d-1-Mode de fonctionnement

- Remplir le manomètre jusqu'au niveau M0 avec du dibutyl phtalate
- Actionner l'interrupteur au dos de l'appareil
- Etalonner l'appareil
- Saisir les paramètres du test
- Peser l'échantillon à analyser
- Mettre le ciment dans la cellule et placer celle-ci dans l'appareil.
- La machine effectue la mesure et le calcul automatiquement.

d-2-Appareil de Blaine :

d-2-1-Préparer et programmer un essai :

- Allumer l'appareil.
- sélectionner du menu essai
- valider la ligne « essai »
- saisie la référence de l'essai.
- valider

Chapitre III:Partie expérimental

- choisir l'opérateur
- choisir le type de ciment
- saisir la valeur de la masse volumique, l'appareil indique la valeur de la masse à peser.
- Mettre la masse de ciment à analyser dans la cellule.
- Placer la cellule dans l'appareil.

La machine effectue la mesure, et donne la valeur du Blaine.



Fig III.5 : L'appareil Blaine

Résultats:

III-5-2-2-La surface spécifique des ciments confectionnés et ciment (témoin).

La finesse des ciments obtenus est représentée dans le tableau de surface spécifique des ciments confectionnés et ciment (témoin).

Tableau (III.7) : Surface spécifique des ciments confectionnés et ciment (témoin).

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Surface spécifique (cm ² /g)	3624	3296	3113	3267	3316

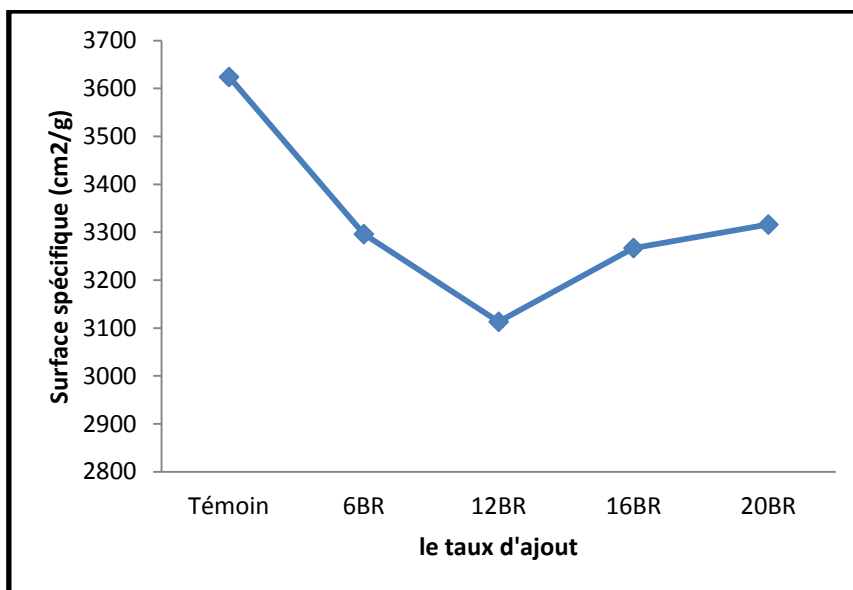


Fig III.6 : La surface spécifique en fonction du taux d'ajout de BR

Interprétation:

La granulométrie des différentes formulations respecte les normes de finesse quelque soit le taux d'ajout incorporé.

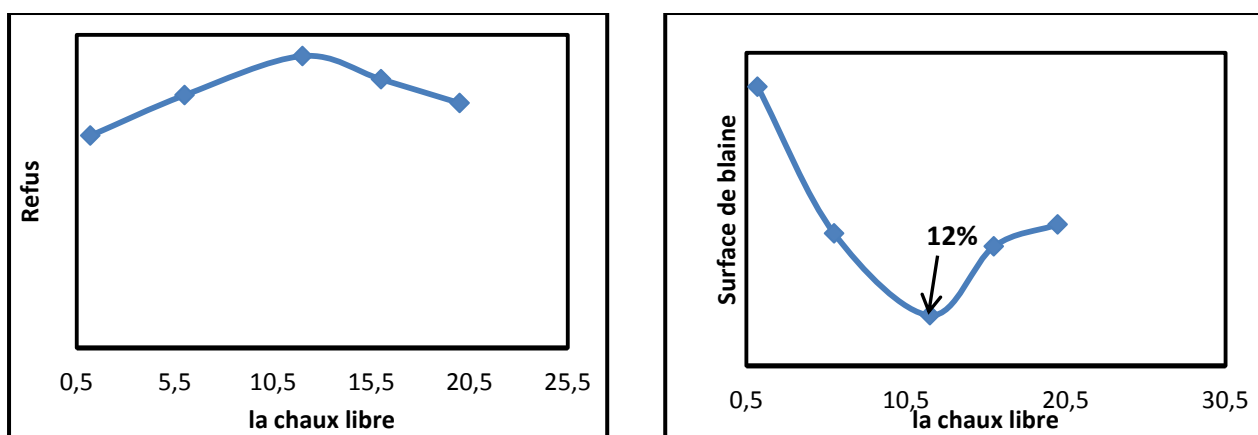


Fig III.7 : Le refus et la surface spécifique en fonction de chaux libre

Interprétation:

Nous pouvons noter une certaine corrélation entre le refus, surface spécifique et la chaux libre pour des taux limité à 12 % de brique.

III-6- Essais physico- mécanique

III-6-1- Détermination de la consistance normalisée :

III-6-1-1- Principe :

La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantité d'eau différente.

III-6-1-2- Mode opératoire

a- Malaxage de la pâte de ciment :

- Peser 500 g de ciment.
- Peser 150 ml d'eau.
- Ajouter le ciment à l'eau (ex 125ml), ceci soigneusement afin d'éviter toute perte d'eau ou de ciment.
- Noter la fin de cette opération comme temps zéro.
- Mettre le malaxeur en route immédiatement et le faire tourner à vitesse lente pendant 90s.
- Arrêter la machine pendant 15s pour gratter les parois du malaxeur avec un instrument convenable et remise dans la gâchée.
- Le temps total de fonctionnement du malaxeur doit être de 3 min.

b- Remplissage du moule :

- Introduire immédiatement la pâte dans le moule.
- Enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec précaution, avec un outil présentant un bord droit, de manière à laisser la pâte remplir le moule avec une surface supérieure lisse.

c- Essai de pénétration :

Régler l'appareil Vicat muni au préalable de la sonde par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base et par ajustement du repère au zéro de l'échelle. Relever la sonde en position d'attente.

- Placer le moule et la plaque de base aussitôt après arasement de la pâte dans l'axe de la sonde de l'appareil vicat.
- Abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.

Chapitre III:Partie expérimental

- Lâcher alors rapidement les parties mobiles et laisser la sonde pénétrer verticalement au centre de la pâte. La libération de la sonde doit avoir lieu 4min après l'instant zéro.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30s après la libération de la sonde, selon que l'une ou l'autre de ces deux limites de temps se présente la première.
- Enregistre la lecture de l'échelle, qui indique la distance entre la face inférieure de la sonde et la plaque de base. Conjointement avec la teneur en eau de la pâte exprimée en pourcentage de la masse du ciment.
- Nettoyer la sonde immédiatement après chaque pénétration.
- Répéter l'essai avec des pâtes ayant des teneurs en eau différentes jusqu'à ce qu'il s'en trouve une donnant une distance de $(6 \pm 1 \text{ mm})$ entre la sonde et la plaque de base.
- Enregistrer la teneur en eau de cette pâte exprimée à 0.5% près comme teneur en eau pour l'obtention de la consistance normalisée.



Fig III.8 : Appareil de Vicat

Chapitre III:Partie expérimental

Tableau (III.8) : La méthode de calcule de la consistance.

<i>Essais</i> N°	Volume d'eau (ml)	% d'eau = (volume d'eau ÷ 500) x 100	consistance (mm)
1	120	$(120 \div 500) \times 100 = 24 \%$...
2	125	$(125 \div 500) \times 100 = 25 \%$...
3	130	$(130 \div 500) \times 100 = 26 \%$...

Résultats

III-6-1-3-Les valeurs de la consistance des ciments confectionnés et le ciment (témoin)

Les valeurs de la consistance des ciments confectionnés et le ciment (témoin) exposés dans le tableau

Tableau (III.9) : La consistance des ciments confectionnés et ciment Témoin.

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
consistance	26	23,8	24,8	23,4	27,8

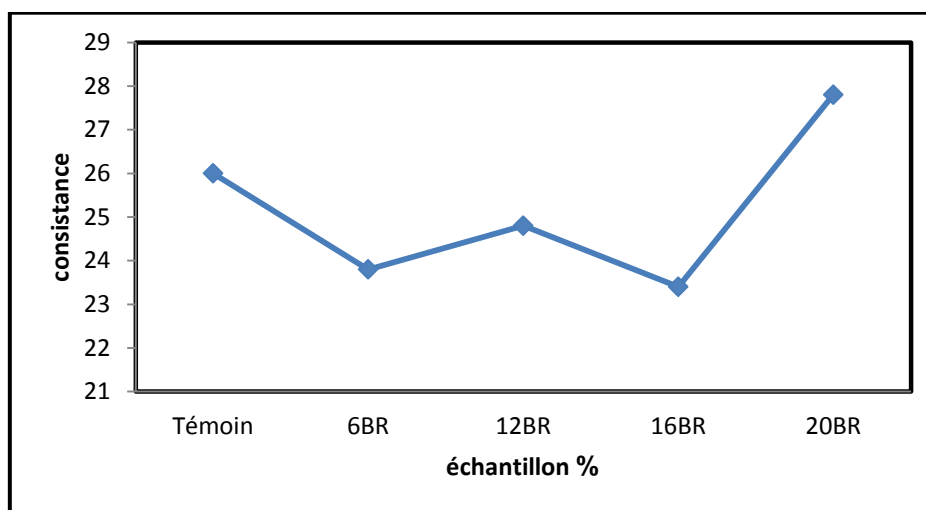


Fig III.9: la consistance en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire

Interprétation

Nous pouvons avancer que il n'y a pas de corrélation entre le taux de brique ajouté et la consistance

III-6-2- Expansion

III-6-2-1- Mode opératoire

Pour chacune des trois éprouvettes, la variation de longueur relative est calculée par différence entre la mesure initiale au démoulage et la mesure finale aux échéances spécifiées.

Cette variation de longueur relative (retrait et gonflement), exprimée en micromètres par mètre, est définie par la formule suivante :

$$EXPANTION = \frac{DL \times 1000}{L}$$

DL : la variation de longueur exprimée en micromètres

L : la longueur de base prise égale à 160mm



Fig III.10 : Aiguilles de Chate lier

Résultats

III-6-2-2-L'expansion des ciments confectionnés et ciment(Témoin).

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant:

Chapitre III:Partie expérimental

Tableau (III.10) : L'expansion des ciments confectionnés et ciment(Témoin).

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Expansion	0,5	1,3	0,9	0,5	00

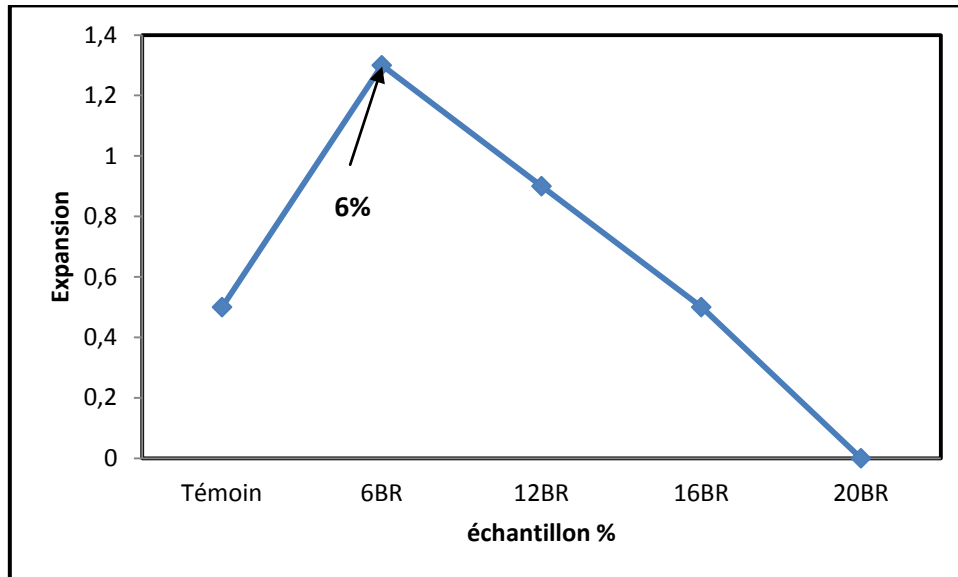


Fig III.11 : l'expansion en fonction du taux d'ajout de brique.

Interprétation:

Nous observons que la valeur maximale de l'expansion est atteinte des l'incorporation de 6 % de briques réfractaires alors qu'en augmentant le taux ajouté, une diminution de l'expansion a été notée.

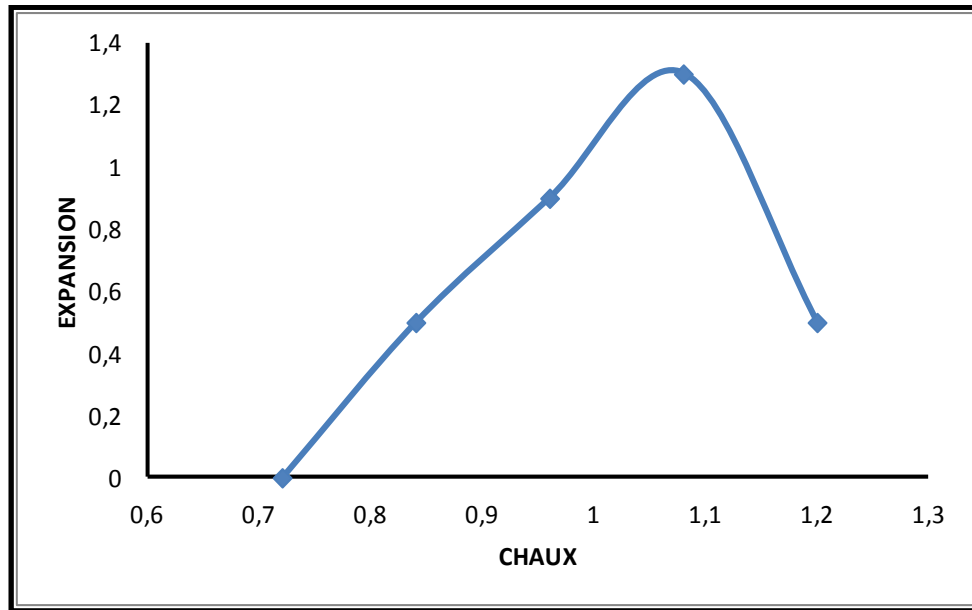


Fig III.12 : l'expansion en fonction de la variation de la chaux libre

Interprétation:

La croissance des valeurs d'expansion des différents échantillons est dépend a la croissance de la chaux libre implique que la chaux libre est le responsable a l'augmentation de l'expansion.

III-6-3-Détermination du temps de prise :

A- Principe

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'au moment ou elle atteint une valeur spécifiée.

III-6-3-1-Mode opératoire

a- Détermination du temps de début de prise :

- Régler l'appareil Vicat muni au préalable de l'aiguille jusqu'à la plaque de base et par ajustement du repère au zéro de l'échelle.
- Remplir un moule Vicat de pâte de consistance.
- Placer le moule rempli ainsi que sa plaque de base dans la salle ou dans l'armoire humide, les placée au dessous de l'aiguille de l'appareil Vicat.
- Abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.
- Lâcher rapidement les parties mobiles et laisser l'aiguille pénétrer verticalement dans la pâte.

Chapitre III:Partie expérimental

- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30s après la libération de l'aiguille, selon que l'une ou l'autre de ces deux limites de temps se présente la première.
- Enregistrer la lecture de l'échelle, qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base.
- Répéter l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions convenablement espacées, à plus de 10 mm du bord du moule, ou l'une de l'autre.
- Conserver l'éprouvette entre les essais de pénétration dans une salle ou une armoire humide.
- Nettoyer l'aiguille de Vicat aussitôt après chaque pénétration.
- Enregistrer le temps de mesure depuis l'instant zéro, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de (4 ± 1) mm comme temps de début de prise du ciment à 5 min près.

b- Détermination du temps de fin de prise :

- Retourner le moule rempli utilisé sur sa plaque de base de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face de l'éprouvette primitivement en contact avec la plaque de base.
- Muni l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation précise de faibles pénétration.
- Conserver l'éprouvette entre les essais de pénétration dans une salle ou une armoire humide.
- Nettoyer l'aiguille de Vicat aussitôt après chaque pénétration. Enregistrer, à 15min près, le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénétra pour la première fois qu'à 0.5 mm dans l'éprouvette comme temps de fin de prise du ciment.

Résultats:

III-6-3-2- Le temps de prise des ciments confectionnés et le ciment (Témoin).

Le tableau et la figure suivants représentent les résultats obtenus :

Tableau (III.11) : Le temps de prise des ciments confectionnés et le ciment (Témoin).

échantillon		Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Le temps De prise (minute)	début	203	90	140	115	201
	fin	297	170	235	195	271

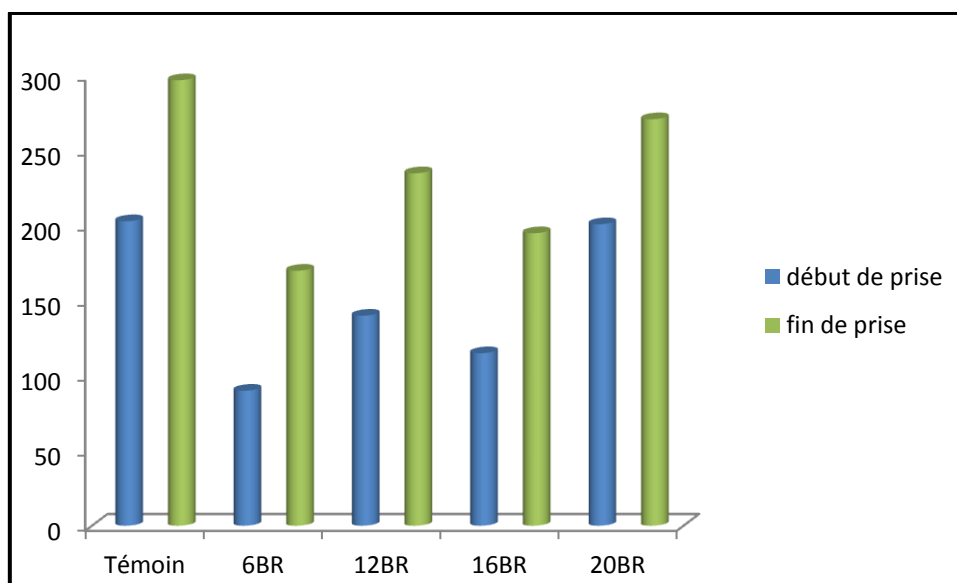


Fig III.13 : le temps de prise en fonction du taux d'ajout de brique

Interprétation

En présence de la brique réfractaires, le temps de début et de fin de prise diminue. On peut dire que le Ceci peut être dû à la porosité de l'ajout et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface. Cette diminution peut être aussi due probablement à l'augmentation de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et la diminution de la chaux (CaO).

III-6-4- Détermination des caractéristiques mécaniques :

III-6-4-1-Principe : La méthode comprend la détermination des résistances à la compression et à la flexion facultative d'éprouvettes de forme prismatique et de dimensions 40 mm X 40 mm X 160 mm.

III-6-4-2-Mode opératoire

a- Constituants du mortier :

450g de ciment dont on veut étudier les propriétés.

225 g d'eau.

1350 g de sable normalisé CEN EN 196-1 (commercialisé en sacs de 1350 g).

b- Malaxage du mortier :

Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment.

Chapitre III:Partie expérimental

Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30s introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30s suivantes). Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer a mélanger pendant 30s supplémentaires.

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

Reprendre ensuite le malaxage a grande vitesse pendant 60s.

c- Moulage des éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être moulées immédiatement après la préparation du mortier. Le moule et sa hausse fermement fixés à la table à chocs, introduire en une ou plusieurs fois, avec une cuillère convenable, la première de deux couches de mortier dans chaque compartiment de moule, directement à partir du récipient de malaxage. Ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs. Introduire la seconde couche de mortier et serrer a nouveau par 60 chocs.

Retirer avec précaution le moule de la table à chocs et ôter la hausse. Enlever immédiatement l'excès de mortier avec la règle métallique plate posée de chant.

d- Conservation des éprouvettes :

d-1- Démoulage des éprouvettes :

Effectuer le démoulage, pour les essais à 24h, au plus tôt 20 min avant l'essai.

Effectuer le démoulage, pour les essais au delà de l'échéance de 24h, entre 20h et 24h après le démoulage.

Marquer convenablement les éprouvettes à conserver dans l'eau, pour l'identification ultérieure, par exemple avec une encre ou un crayon résistant à l'eau.

d-2- Conservation des éprouvettes dans l'eau :

Immerger les éprouvettes marquées, de manière convenable, soit horizontalement, soit verticalement, dans l'eau à ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Lorsque les éprouvettes sont conservées horizontalement, les faces de compression qui étaient verticales au moulage doivent rester verticales et la surface arasée doit être placée vers le haut.

Chapitre III:Partie expérimental

Séparer les éprouvettes de façon telle que l'eau puisse accéder librement aux six cotés des éprouvettes.

d-3- Age des éprouvettes pour les essais de résistance mécanique :

Compter l'âge des éprouvettes à partir au moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai.

Effectuer les essais de résistance a différents âges dans les limites suivantes :

24h ± 15 min

48h ± 30 min

72h ± 45 min

7jour ± 2h

28 jour ± 8h

e- Essai des éprouvettes :

e-1- procédure d'essai :

Les demi- prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayer en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm.

e-2- Résistance à la flexion :

Placer le prisme dans un dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci, appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter sans à-coups à raison de 50 N/s ± 10N/s, jusqu'à rupture.

Conserver les demi- prismes humides jusqu'au moment des essais en compression.

Calculer la résistance à la flexion R en N/mm² au moyen de la formule :

$$R_F = \frac{1.5 \times F_f \times L}{B^3}$$

Chapitre III:Partie expérimental

R_f : la résistance à la Flexion, en newtons par millimètre carre.

B : le coté de la section carrée du prisme, en millimètres. (4 cm)

F_f : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

L : la distance entre les appuis, en millimètres. (10 cm)

e-3- Résistance à la compression :

Centrer chaque demi prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte à faux par rapport aux plateaux ou aux plaques auxiliaires d'environ 10 mm.

Augmenter la charge sans à coups a la vitesse de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ durant toute la durée d'application de la charge jusqu'à la rupture.

Calculer la résistance à la compression R en N/mm^2 au moyen de la formule :

$$\mathbf{R_C = F_C / 1600}$$

Où :

R_C : la résistance à la compression, en newtons par millimètre carré.

F_C : la charge maximale à la rupture, en newtons.

1600 =40 mm x 40 mm est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètres carrés.



Fig III.14 : Machine d'essais de résistance à la flexion



Fig III.15 : Machine d'essais de résistance à la compression

Résultat

III-6-5-Résistance mécanique à court terme et à moyen terme:

On étudie l'influence de l'incorporation de brique réfractaire sur la résistance à la flexion des mortiers à l'âge de 2 et 7 jours. On constate aussi comme dans le cas de la résistance à la compression.

Tableau (III.12) : Résistance mécanique à court terme des ciments confectionnés et Témoin.

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Compression Mpa	19,02	19,47	18,47	16,32	15,76
Flexion Mpa	4,3	4,98	4,2	3,83	3,8

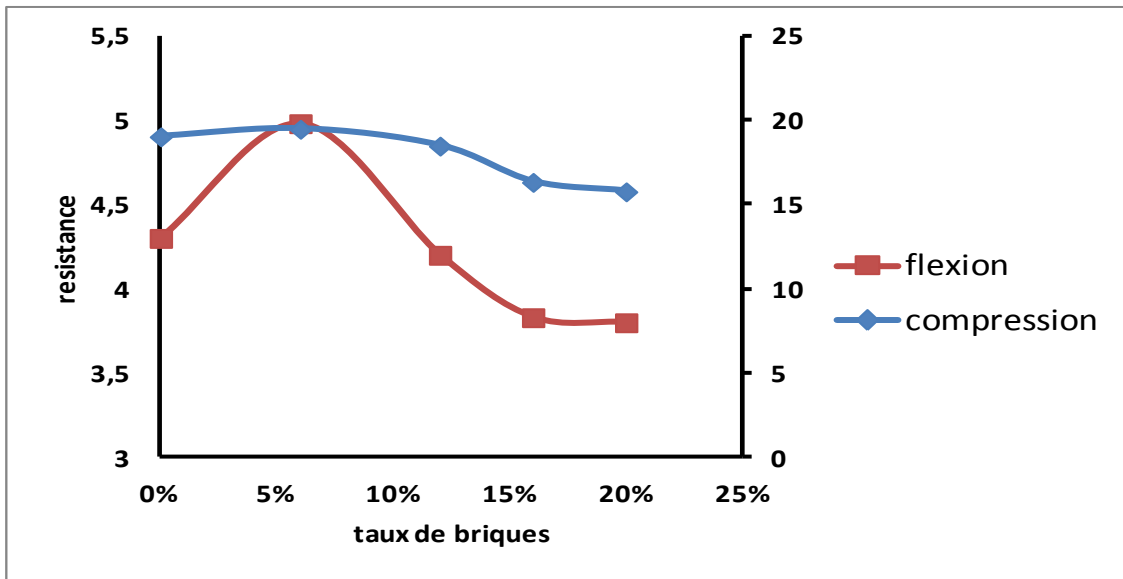


Fig III.16 : La résistance mécanique à court terme en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire.

Tableau (III.13) : Résistance mécanique à moyen terme des ciments confectionnés et Témoin.

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Compression Mpa	33,01	33,54	29,76	27,34	26,82
Flexion Mpa	6,24	6,9	5,84	5,37	5,33

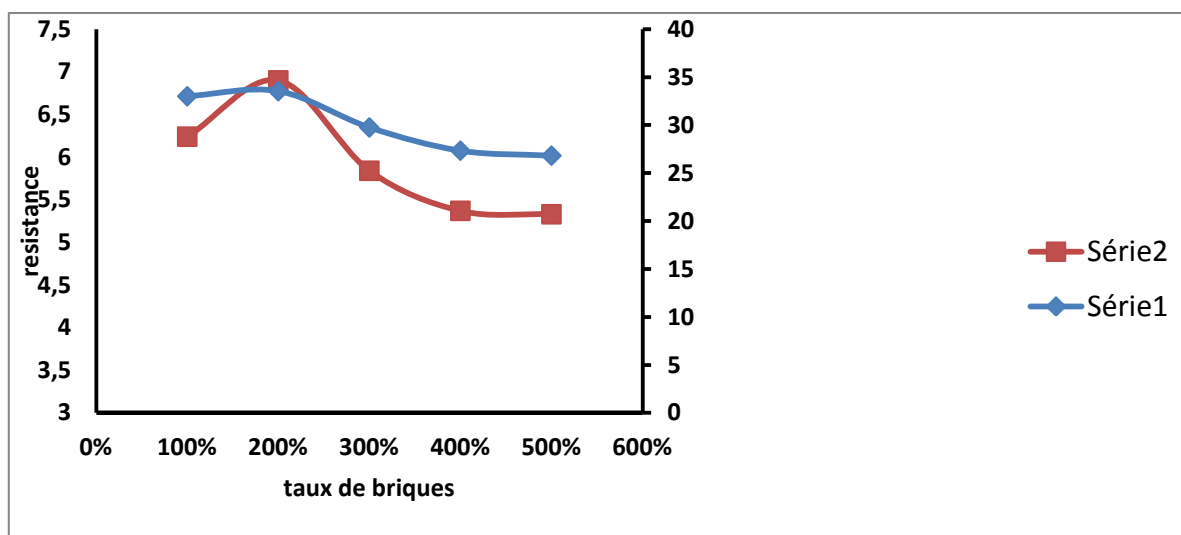


Fig III.17 : La résistance mécanique à moyen terme en fonction du taux d'ajout de brique réfractaire.

Interprétation:

On remarque une faible résistance à court terme et moyenne à moyen terme.

L'augmentation de teneur d'ajout démunie la résistance à la compression et a la flexion. Nous constatons que l'ajout influence essentiellement sur la Résistance à la flexion.

III-6-6-Résistance mécanique à long terme:

Tableau (III.14): Résistance mécanique à long terme des ciments confectionnés et le Témoin.

échantillon	Témoin	6BR	12BR	16BR	20BR
Compression Mpa	44,68	37,33	37,31	33,53	32,69
Flexion Mpa	7,44	7,22	6,46	6,57	6,55

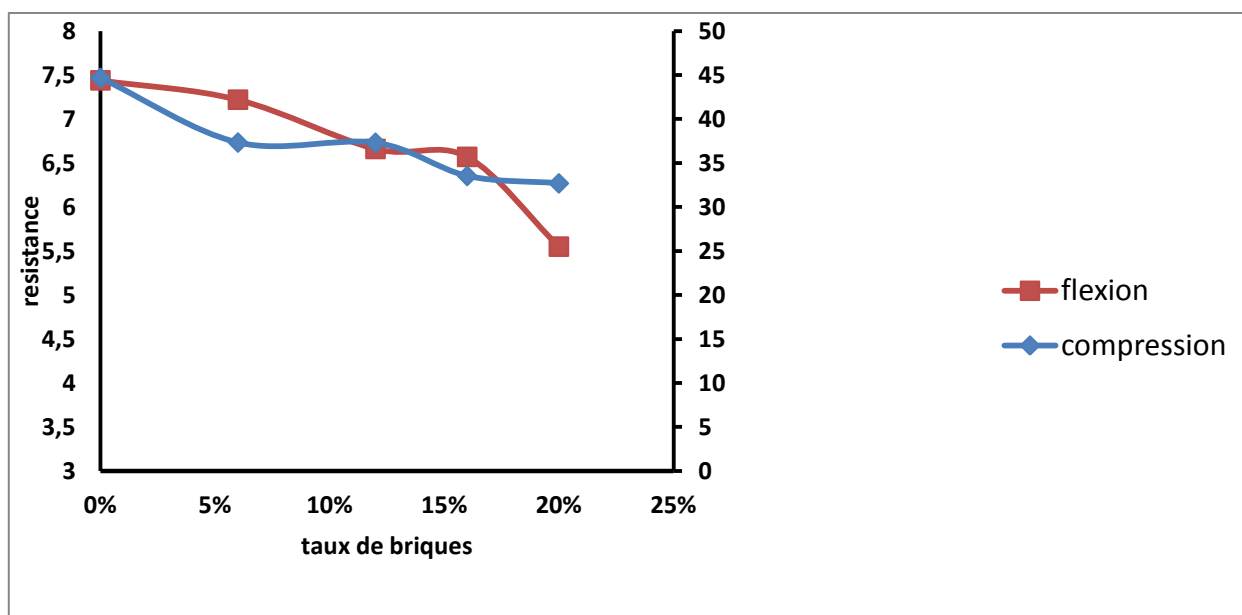


Fig III.18 : La résistance (à la flexion et à la compression) à long terme en fonction du taux d'ajout de brique

Interprétation:

Les résistances mécaniques (compression et flexion) augmentent en fonction de l'âge de durcissement. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du minéral C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique).

Les valeurs de la résistance (flexion et compression) du ciment portland fabriqué à la cimenterie reste supérieures à celles des ciments confectionnées ne au moins les valeurs obtenus respectent les normes internationales.

Conclusion générale

Conclusion générale

Optimisation des déchets industriels, comme ajout cimentaires, représente une chance énorme pour l'industrie du ciment et pour sa volonté de réduire son impact sur l'environnement.

Nous avons étudié la possibilité de la valorisation des déchets des briques réfractaires comme ajouts dans le ciment.

Nous pouvons classer les briques utilisées dans la rubrique des briques silico-alumineuse acide vu le taux élevé de l'alumine trouvé égale à 30.71 et taux élevé de silice égale à 55.2

L'incorporation des additions de brique augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , et Na_2O) et diminue le taux d'oxyde de chaux (CaO , MgO).

Nous remarquons que la perte au feu diminue considérablement des l'introduction de l'ajout. En présence 20% de briques, la perte au feu est passée de 5,46 à 1,08.

La chaux libre diminue quand le taux d'ajout augmente et en comparant avec le ciment (témoin) avec 20% d'ajout pouzzolane. Le ciment confectionné présente un taux de chaux liée intéressant. Le tracé de la quantité de chaux libre en fonction du taux ajouté décrit un droit linéaire.

La granulométrie des différentes formulations respecte les normes de finesse quelque soit le taux d'ajout incorporé.

Nous observons que la valeur maximale de l'expansion est atteinte des l'incorporation de 6 % de briques réfractaires alors qu'en augmentant le taux ajouté, une diminution de l'expansion a été notée.

La croissance des valeurs d'expansion des différents échantillons dépend de la croissance de la chaux libre ce qui implique que la chaux libre est le responsable de l'augmentation de l'expansion

En présence de briques, le temps de début et de fin de prise diminue. On peut dire que ceci peut être dû à la porosité de l'ajout et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface. Cette diminution peut être aussi due probablement à l'augmentation de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et la diminution de la chaux (CaO).

Conclusion générale

On remarque une faible résistance à court terme et moyenne à moyen terme. L'augmentation de teneur d'ajout démunie la résistance à la compression et à la flexion. Nous constatons que l'ajout influe essentiellement sur la résistance à la flexion à l'âge de 2 jours et 7 jours. Cette diminution de la résistance est considérable surtout au jeune âge et diminue lorsque le pourcentage de l'ajout augmente.

Les résistances mécaniques (compression et flexion) augmentent en fonction de l'âge de durcissement. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du minéral C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique). Ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à moyen terme.

Les résistances mécaniques (compression et flexion) augmentent en fonction de l'âge de durcissement. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du minéral C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique).

La valeur de la résistance (flexion et compression) du ciment portland fabriqué à l'âge de 28 jours de la cimenterie est supérieure à des valeurs de ciment confectionné à partir de brique réfractaire mais ces valeurs respectent toujours les normes internationales.

Liste des abréviations

LISTE DES ABREVIATIONS

Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante
BR	-	Brique réfractaire
S.C.I.S	-	Société du ciment de Saïda
Témoin	-	Ciment portland pouzzolanique
PAF	-	Pert au feu
CPJ	-	Ciment portland avec ajout
CPA	-	Ciment portland artificiel
H ₂ O	H	Eau
CaO	C	Chaux
SiO ₂	S	Silice
Al ₂ O ₃	A	Alumine
Fe ₂ O ₃	F	Oxyde ferrique
Na ₂ O, K ₂ O	N, K	Alcalis
MgO	M	Magnésie
CaSO ₄	Cs	Sulfate de Calcium (Anhydrite)
CaSO ₄ . 2H ₂ O	Cs H ₂	Sulfate de calcium (Gypse)
3CaO. Al ₂ O ₃	C3A	Aluminate tricalcique
4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Aluminoferrite tétracalcique
3CaO. SiO ₂	C ₃ S	Silicate tricalcique
2CaO. SiO ₂	C ₂ S	Silicate bicalcique
CaO _L	-	Chaux libre
MgO		Périclase
3CaO. 2SiO ₂ . 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃	Silicate de calcium hydraté (Tobermorite)
4CaO. Al ₂ O ₃ . 13H ₂ O	C ₄ AH ₁₃	Aluminate de calcium hydraté
3CaO. Al ₂ O ₃ . 6H ₂ O	C ₃ AH ₆	
3CaO. Al ₂ O ₃ . CaSO ₄ . 31H ₂ O	C ₃ ACs ₃ H ₃₁	Sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite)
Ca(OH) ₂	CH	Chaux hydratée

Bibliographie

[1] - www.cusstr.ch « gestion des déchets »

[2]- Rekrak Hadj benjadi, Larbaoui Mouhamed « valorisation des déchets de briques dans l'industrie cimentière » mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en chimie industriel. Option: génie de l'environnement 2010/2011

[3]- infociments.fr

[4]- Moulay Nabila Mokhtari Asma « Optimisation de l'ajout pouzzolane dans le ciment » Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de licence Spécialité : Génie des procédés Option : Génie des matériaux 2012/2013

[5]- Belil Djilali « conception d'un liant hydraulique composé de déchet verre » mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en chimie industriel. Option: génie de l'environnement

[6]- Samar Madjid centre de formation des ciments d'Algérie

[7]- Merah Mostefa, Kaoudj Nabil « étude physico-chimiques des métaux lourds par hydratation du ciment » Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de licence. Spécialité : Génie des procédés. Option : gestion et valorisation des Déchets 2012/2013.

[8]- Kerrouzi Ismail, Soufari Abdel Wahab « l'influence de l'ajout de pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments » » Université des sciences et de la technologie d'Oran.

[9]- Lalmi Khier « étude par diffraction X des matériaux à base de kaolin de KT2 et de kaolin de KT2 et DD » mémoire pour obtenir le diplôme de Magister en Physique. Université de Constantine

[10]- kaoudji nabile et boubekeri zoubir «influence du mélange calcaires pouzzolane sur les propriétés du ciment produit par la cimenterie de Saida » mémoire de projet de fin d'études DEUA option analyse université de Saida.