

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khaider Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : de génie civil et hydraulique
Réf :/2015



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:...../2015

Mémoire de master

2^{ème} année

Option : Conception et Calcul des Structures

THEME

Valorisation des sous-produits locaux dans l'industrie du ciment portland

Étudiant :

MABROUK Amira

Encadreur :

Dr : BOUAZIZ Ahmed

PROMOTION: JUIN 2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier dieu pour m'avoir aidé à l'accomplissement et à l'achèvement de ce mémoire.

Je remercie spécialement mon père **Abdel Aziz** et ma mère **Saadia Fatna**, je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour l'aide et le temps précieux qu'il m'a apporté. Son expérience professionnelle m'a été d'un secours non négligeable. Je remercie aussi mes sœurs.

De même je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à ce jury.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Aussi je tiens à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil pour leurs conseils, soutiens et aides précieuses pendant la durée de mes travaux.

Enfin un remerciement particulier et personnel à l'ensemble de mes enseignants qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et collègues.



Dédicace

*Je remercie tout d'abord « ALLAH » pour
m'avoir donné la capacité de savoir et de
réussir afin de réaliser ce projet.*

*Je dédie ce mémoire à mon père **Abdel Aziz** et ma mère **Saadia Fatna**
pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

A mes sœurs

***Nadjah , Saliha , Malika ,Djihane ,et ma belle Hadjer ,Souhila et
son mari Djamel Saadia et son petit bébé zézou et ma grande-mère***

Aicha Graoui et tous la familles Mabrouk

Tous mes amis et mes chères sirtou

Lakhdari Selma et Gouicem Raouia

*Sans oubliés tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen du
secondaire ou de l'enseignement supérieur*

Mabrouk Amira



RESUME

Le projet de recherche entre dans le cadre de la valorisation des produits locaux en substitution du clinker l'or de l'élaboration des ciments afin de répondre aux exigences de préservation de l'environnement d'une part et d'augmenter la production du ciment portland pour répondre au besoin du marché qui ne cesse pas à réduire.

L'étude en question propose une substitution partielle du clinker par un taux d'ajout croissant en laitier de haut fourneau de 10,20 et 30% et suivre leur incidence de résistance à la compression à 2, 7, 14,28 j, sur des pâtes de ciment d'une part et remplacé 5% de l'ajout en question par un activant chimique (NAOH) d'une autre part.

Mots clés : pate, Ajouts minéraux actifs, réaction pouzzolanique.

المخلص

صناعة الاسمنت هو أمر بالغ الأهمية لتلبية برامج البناء المختلفة التي أطلقتها الجزائر, حاليا لدينا عشرة مصانع الاسمنت البورتلاندي التي تفشل في تلبية الطلب في السوق و ذلك لصعوبة الحصول على الكلنكر .

نقترح في هذه الدراسة إلى استخدام المنتج المحلي خبث الافران العالي مع الكلنكر لزيادة إنتاج الأسمنت البورتلاندي من جهة، ومن جهة أخرى لحماية البيئة من إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون بسبب إنتاج الكلنكر و متابعة مقاومته.

SOMMAIRE

Remerciement.....	
Résumé	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des photos.....	
Introduction générale.....	01
<u>CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAN</u>	
I.1.Introduction.....	02
I.2.LES COMPOSANTS DU CIMENT PORTLAND.....	02
1.2.1 FABRICATION DU CIMENT PORTLAND PAR VOIE SECHE.....	04
1.2.2 LES PHASES MINERALES DU CLINKER.....	06
1.2.3. Composition du clinker.....	10
1.2.4. LE BROYAGE DU CLINKER.....	11
1.2.5. Modes de broyage et systèmes utilisés pour le broyage du clinker.....	12
I.2.5.1.Mode de broyage.....	12
I.2.5.2. Systèmes utilisés pour le broyage du clinker.....	14
1.3. Classification et domaine d’application des ciments.....	16
1.3.1. Types du ciment.....	16
II.Conclusion.....	16
<u>CHAPITRE II: LES AJOUTS</u>	
I. Introduction.....	17
I.1. Le laitier de hauts fourneaux (S).....	17
I.2.L'ajout minéral actif : La pouzzolane.....	17
I.2.1.Types de pouzzolane.....	18
I.2.1.1. Pouzzolane naturelle.....	18
I.2.1.2.Pouzzolane artificielle.....	18
2.2 Effet de La pouzzolane.....	19
2.2.1.A l'état frais.....	19
2.2.2.A l'état durci	19
2.3. Propriété de la pouzzolane.....	20
3.Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W).....	20
4. Les schistes calcinés	20

5. Les Calcaires (L, LL).....	21
6. Les fumées de silice (D).....	21
7. Les sulfates de calcium.....	22
8. Les additifs.....	22
9. Action des additions cimentières.....	22
10. Effet du sable de dune finement broyé.....	24
II. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	25
III. Conclusion.....	25

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

III. Introduction.....	26
III.1. Description du produit.....	26
III.2. Composition.....	26
III.3. Exigences mécaniques et physiques.....	26
III.4. Caractéristiques particulières.....	27
III.5. Domaines d'application.....	28
II. Cas particulier des ciments à base de laitiers de haut Fourneau.....	28
II.1. Fabrication et utilisation.....	28
II.1.2. Interactions entre les laitiers et l'hydroxyde de calcium (CH).....	29
II.1.3. Réactivité des laitiers	29
II. L'influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons.....	30
III.2. Activation du laitier par le ciment Portland.....	32
III.3. L'activation alcaline du laitier.....	33
III.4. L'influence de l'étuvage sur la résistance des bétons au laitier activé.....	34
III.5. L'influence du dosage en ciment sur la résistance du béton au laitier activé.....	35
VI. Conclusion.....	35

CHAPITRE-IV : CARACTERISATION PRELIMINAIRE DES CONSTITUANTS

I. Introduction.....	36
IV. I. matériaux.....	36
IV. I.1. Caractérisation du clinker.....	36
IV. I.1.1. Mesure de la finesse.....	36
IV. I.1.2. Masse volumique absolue.....	39
IV. I.1.3. Masse volumique apparente.....	40

IV.I.1.3.Essais de consistance	41
I.1.3.1.Détermination de la consistance normalisé avec l'appareil de Vicat.....	41
I.1.3.2.Essai de Prise	43
IV.I.2.Caractérisation du laitier granulé du haut fourneau.....	46
IV.I.2.1.Caractérisation du laitier granulé du haut fourneau.....	46
IV.I.2.2.Réactivité du laitier granulé du haut fourneau.....	46
IV.I.3.Caractérisation de la pouzzolane.....	46
IV.1.4.Caractérisation de plâtre.....	47
IV.1.5.Caractérisation de l'eau de gâchage.....	47
II. Caractérisation de la pâte de ciment témoin et substitué.....	48
II.1.Caractérisation de la pâte témoin : (E/C =0.3) pour toute formulation	48
II.2-Caractérisation du mélange clinker-ajout minéral (laitier).....	48
II.2.1.Mélange.....	48
II.2.Caractérisation de la pâte substituée (ajouts activés laitier).....	48
II.2.2.Equipement nécessaire.....	49
II.2.3.Mode opératoire.....	49
II.2.4.Mode de conservation.....	49
<u>CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION</u>	
I. Introduction.....	51
II.2.Réactivité du mélange.....	51
II.2.1. Ajouts non activé.....	51
2.1.2. Discussion des résultats obtenus.....	51
2.1.2 Ajouts activé NAOH.....	54
2. Discussion des résultats obtenus.....	55
2.1.3. Comparaison des résultats.....	57
Conclusion générale.....	58

Liste des Figures :

Figure.....	page
Figure I.1 : Représentation Les constituants des ciments portlands.....	04
Figure I.2 : Schéma de la fabrication du ciment (source Ciments Calcia).....	06
Figure I.3 : Schéma d'un four rotatif de cimenterie.....	06
Figure I.4 : Réactions dans le cru en fonction de la température.....	07
Figure I.5 : Polymorphes du silicate tricalcique (C3S) en fonction de la température.....	07
Figure I.6 : Diagramme de phase CaO-SiO ₂	08
Figure I.7 : Polymorphes du silicate dicalcique (C2S) en fonction de la température	09
Figure I.8 : Diagramme de phase CaO-Al ₂ O ₃	10
Figure I-9 : Nodules de clinker de taille environ 20 mm.....	11
Figure I.10 : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales.....	11
Figure I-11 : Obtention du ciment par broyage du clinker (source : Ciments Calcia).....	12
Figure I.12 : Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet.....	13
Figure I.a : tube-broyeur à boulets à deux compartiments	14
Figure I.b : broyeur vertical à galets.....	14
Figure I.c : broyeur haute pression à rouleaux.....	14
Figure I.d : broyeur horizontal à rouleau	15
Figure I.13 : Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets.....	15
FigureII.01 : Pouzzolane naturelle.....	18
FigureII.02 : Pouzzolane artificielle.....	19
FigureII.03 : Les schistes calcinés (T).....	20
FigureII.04 : Les Calcaires.....	21
Figure II.05 : Les fumées de silice.....	21
Figure II.06 : Les sulfates de calcium.....	22
Figure III.1 : Paramètres influençant la réactivité des laitiers	30
Figure III.2 : L'évolution de la résistance du béton (activé par le clinker).....	32
Figure III.3 : L'évolution de la résistance en compression du béton.....	33
Figure III.4 : Résistance en compression du béton à 28J en fonction des activant utilisés.....	33
Figure III.5 : Résistance en traction par fendage du béton au laitier activé.....	34
Figure III.6 : L'effet de l'étuvage sur l'évolution de la résistance du béton au laitier activé... 35	
FigureIV.01 : Appareil de Blaine.....	36
Figure IV.02 : Balance précise à 0.001 g prés.....	36
Figure IV.03 : Chronomètre précis à0.2s.....	36
Figure IV.04 : Des rondelles de papier.....	36

Liste des Figures :

Figure IV.05 : Thermomètre précis à 0.1	36
Figure IV.06 : Schéma d'une perméabilité de Blaine à mesure manuelle.....	37
Figure IV.07 : La relation entre la densité réelle et la constante de densité (G).....	39
Figure IV.08: La relation entre le degré de température de labo et le constant de température(K).....	39
Figure IV.09 : Equipement nécessaire de l'essai.....	39
Figure IV.10 : conduit de l'essai.....	40
Figure IV.11 : Essai de masse volumique apparente.....	41
Figure IV.12 : Une règle	41
Figure IV.13: Malaxeur.....	42
Figure IV.14: Appareil de consistance Vicat.....	42
Figure IV.15: Balance précise à 0.001 g prés.....	42
Figure IV.16: petite truelle.....	42
Figure IV.17 : Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance.....	42
Figure IV.18 : Détermination du temps de Price.....	44
Figure IV.19: Malaxeur.....	49
Figure IV.20 : Balance.....	49
Figure IV.21 Thermomètre.....	49
FigureIV.22: Appareil de compression.....	49
Figure IV.23: Les moules utiliser 2*2*2 cm.....	49
Figure IV.24 : L'éprouvette avant l'écrasement	50
Figure IV.25 : L'éprouvette après l'écrasement.....	50
Figure V.01 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 2 j.....	51
Figure V.02 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 7 j.....	52
Figure V.03 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 14 j.....	52
Figure V.04 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 28 j.....	53
Figure V.05 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 60 j.....	53
Figure V.06 : Evolution des 04 pâtes de ciment en fonction du temps pour 03 substitutions du laitier non activé.....	54
Figure V.07 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 2 j.....	55
Figure V.08 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 7 j.....	55
Figure V.09 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 14 j.....	56
Figure V.10 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 21 j.....	56

Liste des Tableau:

Tableau.....	page
Tableau 1.1 : Composition chimique des ciments portland.....	04
Tableau 1.2 : Composition typique des ciments portland.....	04
Tableau 1.3: Notation cimentière des différents oxydes.....	06
Tableau 1.4 : Liste des différents types de ciments courants normalisés.....	16
Tableau III.1 : Les exigences en matière de composition des constituants principaux et secondaires, avant ajout de la quantité de sulfate de calcium destiné à réguler la prise.....	26
Tableau III.2 : La classe de résistance d'un ciment exprime la résistance minimale.....	27
Tableau III.3 : Le ciment de haut fourneau CEM III/C est disponible.....	27
Tableau IV.1 : opérations de malaxage sont récapitulées.....	43
Tableau IV .2 : Caractéristiques physiques du clinker.....	45
Tableau. IV .3: Caractéristiques physiques du laitier naturel.....	46
Tableau. IV.4 : Réactivité du laitier granulé du haut fourneau.....	46
Tableau IV .5: Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle.....	47
Tableau IV .6: Réactivité de la pouzzolane naturelle.....	47
Tableau IV.7 : .Caractérisation de gypse.....	47
Tableau IV.8 : Caractérisation de la pâte témoin: CEMI /52.5.....	48
Tableau IV.9 : Caractérisation de la pâte substituée par ajout activés laitier.....	48
Tableau V.1 : Evolution de résistance de la pâte de ciment substitué par le laitier non activé.....	51
Tableau V.2 : : Evolution de résistance de la pâte de ciment substitué par le laitier activé par NAOH.....	54

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour satisfaire les différents programmes de constructions lancés par l'Algérie. Actuellement, nous disposons seulement d'une dizaine d'usines de fabrication de ciment portland qui n'arrivent pas à répondre à la demande du marché. Nous proposons dans cette étude d'utiliser des sous-produits locaux en substitution du clinker afin d'augmenter la production du ciment portland d'une part et d'autre part préserver l'environnement du dégagement du gaz carbonique du fait de la production du clinker. Dans ce contexte l'étude en question vise à mettre la lumière sur une éventuelle substitution du clinker par un produit local (le laitier de haut fourneau) par différentes taux de substitution et suivre leur incidence sur le développement de la résistance à la compression des pâtes de ciment formulées.

Ce mémoire est partagé en 05 chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la production de ciment Portland n'est pas uniquement consommatrice de calcaires, D'argiles, de marnes et de combustibles fossiles, elle produit et libère ces gaz à effets de serre Tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hémioxyde nitreux (N_2O). Le dioxyde de soufre (SO_2), l'acide chlorhydrique (HCl) ainsi que d'autres oxydes d'azote (NO_x) sont également émis lors du processus de fabrication du clinker. Le secteur des matériaux de construction Contribue de façon importante aux émissions de CO_2 , le principal responsable du réchauffement climatique.

Le deuxième chapitre représente les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau.

Dans le troisième chapitre sera consacré l'étude de ciment de haut fourneau CEM III/C est un ciment de teinte gris clair obtenu par la mouture de clinker Portland et de laitier granulé de haut fourneau. Le choix judicieux des proportions des constituants principaux, combiné avec une finesse de mouture adapté.

Ce quatrième chapitre sera consacré à l'étude générale de la caractérisation préliminaire des constituants, La première partie de ce chapitre se concentrera sur la caractérisation de clinker et du laitier.

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENTS PORTLAND

I.1.Introduction :

Aujourd'hui le ciment Portland, aussi appelé CEM I .On peut définir le ciment Portland anhydre est une poudre de synthèse obtenue par combinaison de 95% de clinker et 5% de gypse (CaSO_4). Le clinker est un mélange de calcaire CaCO_3 ($\approx 80\%$) et d'argile ($\approx 20\%$) ayant subi une cuisson à 1450°C au sein d'un long four métallique isolé par des briques réfractaires. Puis broyé pour produire une très fine poudre grisâtre, le ciment portland. En changeant la proportion des matériaux de base et en faisant quelques ajustements lors de la fabrication. On est capable de produire plusieurs types de ciment. [1]

I.2.LES COMPOSANTS DU CIMENT PORTLAND [2] :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par le broyage d'un mélange de clinker et d'environ 4 à 8 % de gypse dont le rôle est de réguler la prise (retardateur de prise).

Pour la production du clinker de ciment Portland, on utilise un mélange de calcaire et d'argile, Soigneusement dosé et homogénéisé qui est ensuite cuit à une température voisine de 1500°C , puis broyé.[2]

Ces poudres sont constituées de sels minéraux instables (en particulier silicates et aluminates De chaux) qui forment avec l'eau une pâte capable par hydratation de faire prise et de durcir Progressivement (d'où le nom de liants hydrauliques).[2]

Sous l'action des hautes températures (1500°C), les matières premières (argile, calcaire et Gypse) se décomposent comme suit :

- De la calcination de l'argile résulteront des oxydes ayant un caractère chimique acide

Tel que les SiO_2 , les Fe_2O_3 et les Al_2O_3 ,

- De celle du calcaire résultera le CaO , ayant un caractère chimique basique.

Pendant la cuisson, les deux types d'oxydes réagissent entre eux, dans leurs états solides, pour Former les minéraux du clinker qui sont :

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (45 à 65%) appelé aussi Alite,

- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (15 à 35%) appelé aussi Bélite,

- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (5 à 15 %) appelé aussi Célide 2,

- L'aluminons ferrite tétra calcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5 à 10%) Célide 1,

Ces éléments assurent l'aptitude des liants hydrauliques à durcir.

Afin de faciliter les références aux composants, les oxydes seront notés par :

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

C = CaO ; S = SiO₂ ; A = Al₂O₃ ; F = Fe₂O₃ ; H = H₂O

Ainsi :

- 3CaO.SiO₂ sera noté C₃S, appelé Alite
- 2CaO.SiO₂ sera noté C₂S, appelé Bélite.
- 3CaO.Al₂O₃ sera noté C₃A, appelé Céliste 2.
- 4CaO . Al₂O₃.Fe₂O₃ sera noté C₄AF, appelé Céliste 1.

La composition minéralogique peut être déterminée avec les équations de Bogue (Bogue, 1952). Généralement, on a les proportions suivantes :

$$C_3S + C_2S = 75\%$$

$$C_3A + C_4AF = 25\%$$

Pour les caractériser, les ciments Portlands seront dénommés selon le composant prédominant:alitique, belitique, aluminotique ou ferritique.

-La chaux (CaO).fournie par la pierre calcaire.

-La silice (SiO₂) et alumine (Al₂O₃).provenant de l'argile ou de schiste.le fer (Fe₂O₃) contenu en faible proportion dans le calcaire et le schiste. Et l'oxyde sulfuré (SO₂) , fourni par le gypse . De plus sous forme d'impuretés, on retrouve de la magnésie (MgO), de la soude (Na₂O) et de la potasse (K₂O). [2]

-Le Na₂O et le K₂O sont communément appelés les alcalis du ciment. Ils sont présents dans le ciment, mais en proportion réduites, ce qui est fort heureux. Car ces produits peuvent réagir chimiquement avec certains granulats et causer ainsi une détérioration du béton. Le (tableau 1.1) donne la proportion approximatives de ces constituants dans les ciments portland.

Aux températures élevées du four rotatif, les matières premières réagissent chimiquement pour engendrer les quatre composants du ciment portland :

-Le silicate bi calcique (C₂S).l'aluminate tricalcique (C₃A) et l'alumino -ferrite tétracalcique (C₄AF). Selon leur proportion (tableau 1.2), ces composants donnent aux divers types de ciment portland leur proportion particulière : chaleurs d'hydratation, temps de prise, résistance, etc. [2,3]

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND



Figure I.1 : Représentation des constituants des ciments portlands [19]

Tableau 1.1 : Composition chimique des ciments portland [2]

CONSTITUANT	FORMULE CHIMIQUE	COMPOSITION(LIMITES)
Chaux	CaO	60-66
Silice	SiO ₂	18-24
Alumine	Al ₂ O ₃	4-8
Fer	Fe ₂ O ₃	1-5
Magnésie	MgO	0.25-4.0
Alcalis	Na ₂ O et K ₂ O	0.1-2.0

Tableau 1.2 : Composition typique des ciments portland [2]

TYPE DE CIMENT	DESCRIPTION	COMPOSITION(en %)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
10	Normal	49	25	11	8
20	Modéré	44	31	5	13
30	Haute résistance initiale	58	14	11	8
40	Faible chaleur d'hydratation	28	46	5	13
50	Résistance aux sulfates	41	38	4	10

1.2.1 FABRICATION DU CIMENT PORTLAND PAR VOIE SECHE :

La fabrication du ciment en voie « sèche » (plus courante) est résumée en **Figure I.1**. Les matières premières sont extraites des carrières et sont concassées puis intimement mélangées par broyage permettant d'obtenir le « cru ». Ce mélange peut être modifié par addition de plusieurs constituants de manière à corriger les éventuelles fluctuations de la composition finale (étape A). Ainsi de faibles proportions de bauxite ou de laitier de hauts fourneaux peuvent pallier le manque d'alumine ou d'oxyde de fer dans le ciment. Une étape de pré

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait de tous les constituants. Le mélange est ensuite finement broyé et séché (étape B) afin de passer à la cuisson (étape C).

Les fours de cimenterie se composent de quatre parties :

- Système de préchauffage du cru ;
- Zone amont du four permettant la décarbonatation ;
- Zone aval du four permettant la réaction de clinkérisation ;
- Un refroidisseur.

Le système de préchauffage et de pré-calcination est assuré par un échangeur à cyclone. Dans la partie supérieure, le cru est déversé et progresse jusqu'à l'entrée du four. La température des gaz provenant du four et parcourant les cyclones permet d'entamer une décarbonatation partielle du cru.

Le four rotatif (Figure I.2) permet d'effectuer la réaction de clinkérisation au cœur de la fabrication du ciment. Il s'agit d'un tube cylindrique de 50 à 90 mètres de long pour un diamètre allant de 3 à 6 mètres. La matière progresse grâce à l'inclinaison et à la rotation du four (1 à 3 tours/minute). En sortie des cyclones, la matière arrive en amont du four. Cette zone permet de porter les matières premières jusqu'à environ 800-900°C, achevant ainsi la décarbonatation du calcaire. La matière progresse alors jusqu'à la zone de clinkérisation correspondant à une température d'environ 1450°C. A cette température les réactions entre la chaux CaO et les oxydes SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ forment des silicates, aluminates et alumine-ferrites de calcium constituant le clinker. A la fin de la cuisson en aval du four, le clinker obtenu sort à une température comprise entre 1200 et 1450°C et tombe dans le refroidisseur. Ce refroidissement à l'air du clinker fige les phases formées à hautes températures (silicates et aluminates de calcium). Le clinker obtenu se présente sous forme de Granules qui après broyage avec 5% de gypse et d'autres constituants en plus petite quantité, permettent d'obtenir le ciment (étape D). Le produit fini est ensuite acheminé vers des silos de stockage. Il quitte l'usine en sac ou en vrac transporté dans des camions citerne par train ou bateau (étape E).

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

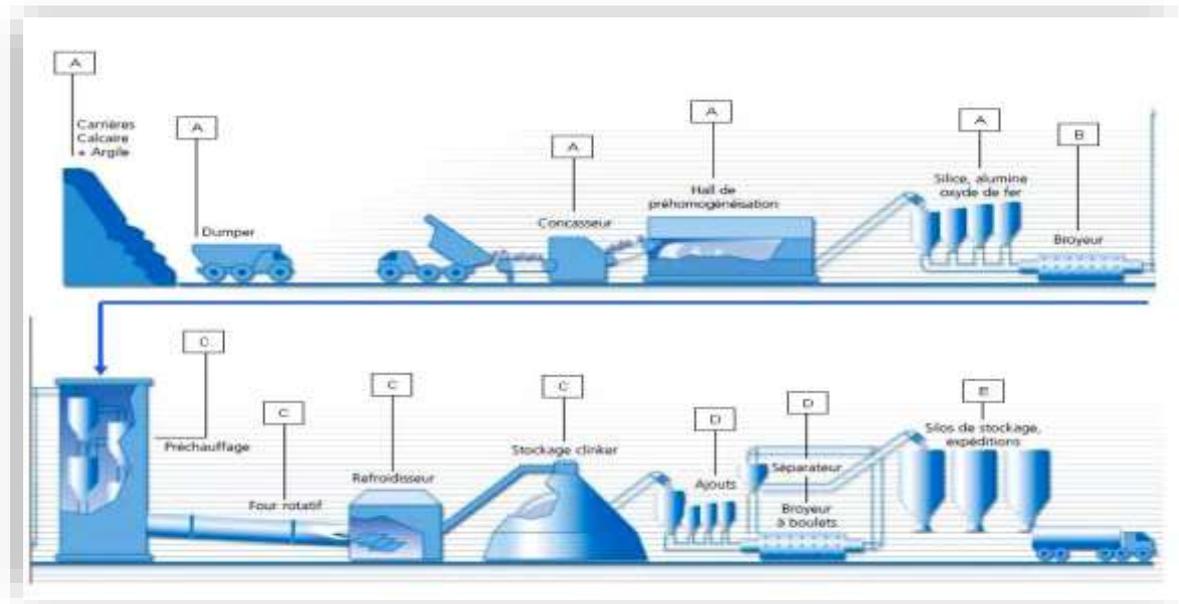


Figure I.2 : Schéma de la fabrication du ciment (source Ciments Calcia). [4]

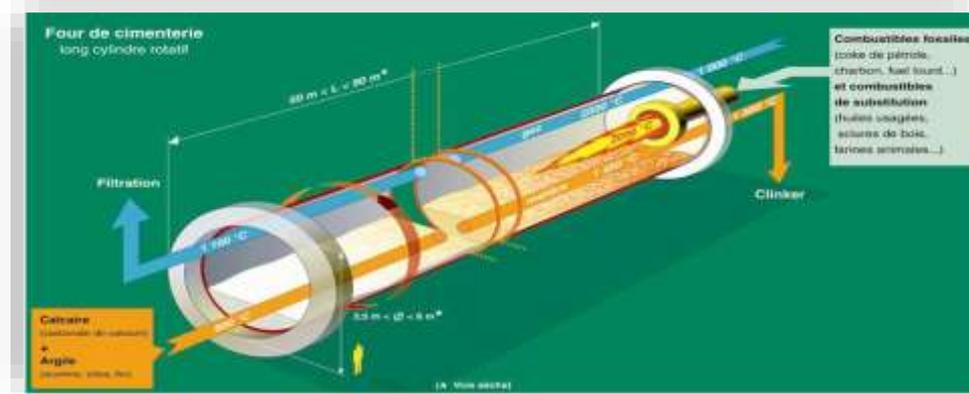


Figure I.3 : Schéma d'un four rotatif de cimenterie. [4]

1.2.2 LES PHASES MINÉRALES DU CLINKER :

Les cimentiers utilisent une abréviation des formules chimiques des différents éléments exprimés sous forme d'oxyde (Tableau 1.3).

Tableau 1.3: Notation cimentière des différents oxydes.

Oxydes majeurs				Oxydes mineurs					C	P	H
C	S	A	F	M	S	N	K	T	C	P	H
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O

Les principales phases présentes dans les ciments anhydres Portland sont [1, 3] :

- L'alite (forme impure de silicate tricalcique : Ca₃SiO₅, noté C₃S),
- La bélite (forme impure de silicate dicalcique : Ca₂SiO₄, noté C₂S),

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

• Les aluminates tricalciques ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, noté C_3A), les alumino-ferrites calciques ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$, noté C_4AF), le gypse (C_2S) et la chaux libre (CaO noté C).

L'ordre d'apparition de ces différents constituants lors de la fabrication est illustré par la **Figure I.4**.

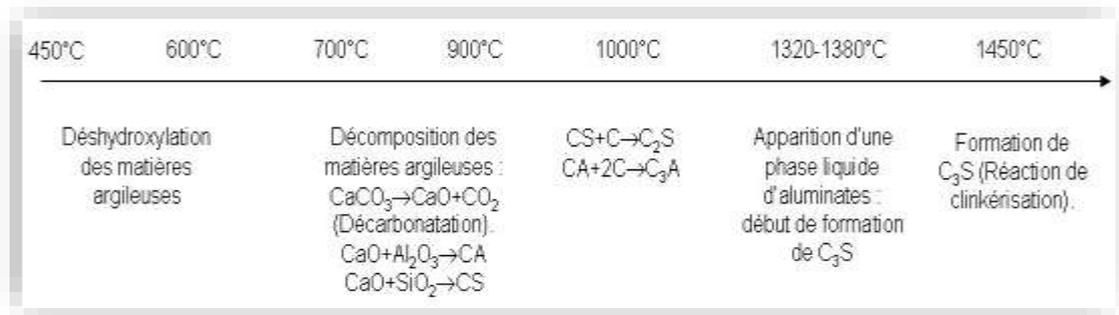


Figure I.4 : Réactions dans le cru en fonction de la température.[4]

La plupart des phases du clinker peuvent se trouver sous la forme de plusieurs polymorphes. Les polymorphes et la teneur des différents éléments mineurs présents dans ces phases dépendent, entre autre, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et du mode de refroidissement du clinker.[4]

➤ L'alite :

L'alite est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure du silicate tricalcique de formule C_3S réagissant très rapidement avec l'eau. L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment durci.

Le silicate tricalcique (C_3S) pur existe sous six formes cristallines entre 20 et 2070°C (**Figure.5**). A température ambiante, il se trouve sous la forme triclinique T_1 . [4,2]

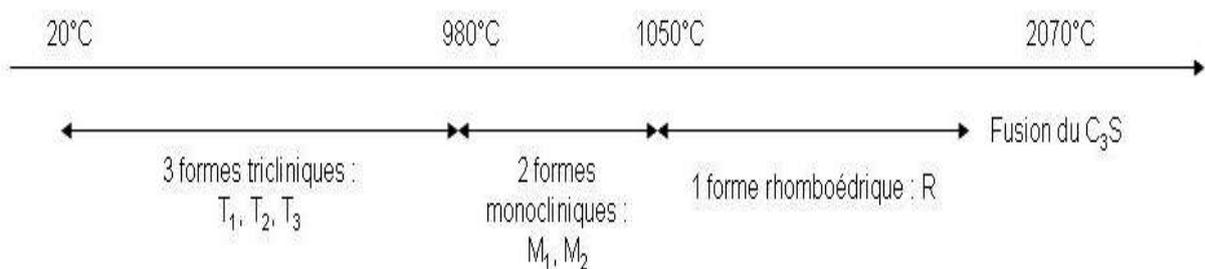


Figure I.5 : Polymorphes du silicate tricalcique (C_3S) en fonction de la température.[4]

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

En plus de la structure C_3S , l'alite contient des traces de Mg, Al ou Fe en substitution ou en insertion dans le réseau cristallin, ce qui améliore la réactivité du produit. Ces impuretés en solution solide dans C_3S stabilisent à température ambiante les formes haute-température, ou font apparaître une autre forme cristallographique M_3 . Dans les clinkers industriels, les formes les plus fréquemment stabilisées sont M_1 et M_3 , ou un mélange des deux.

La formation de l'alite est essentiellement une réaction de dissolution partielle du silicate dicalcique (C_2S) et de la chaux, puis précipitation dans la phase liquide d'aluminates. [4]

Le diagramme de phase CaO-SiO₂ (Figure 5) permet d'observer la formation des silicates de calcium du clinker pour les températures allant de 1250 à 1450°C et pour des compositions en chaux comprises entre 65 et 70% correspondant aux conditions généralement utilisées en cimenterie. La durée de cette réaction est de 10 à 15 minutes ; elle est diminuée quand la finesse des particules de matière première augmente. Cependant, l'alite peut aussi se former par diffusion de CaO dans la bélite par réaction solide-solide avec diffusion de Ca²⁺ et O²⁻ à travers la bélite, selon l'équation suivante :



C'est essentiellement l'alite qui confère la résistance mécanique au ciment, en particulier à court terme. [4]

L'hydratation de l'alite génère l'essentiel des phases faiblement cristallines (C-S H) à l'origine des propriétés de cohésion du ciment.

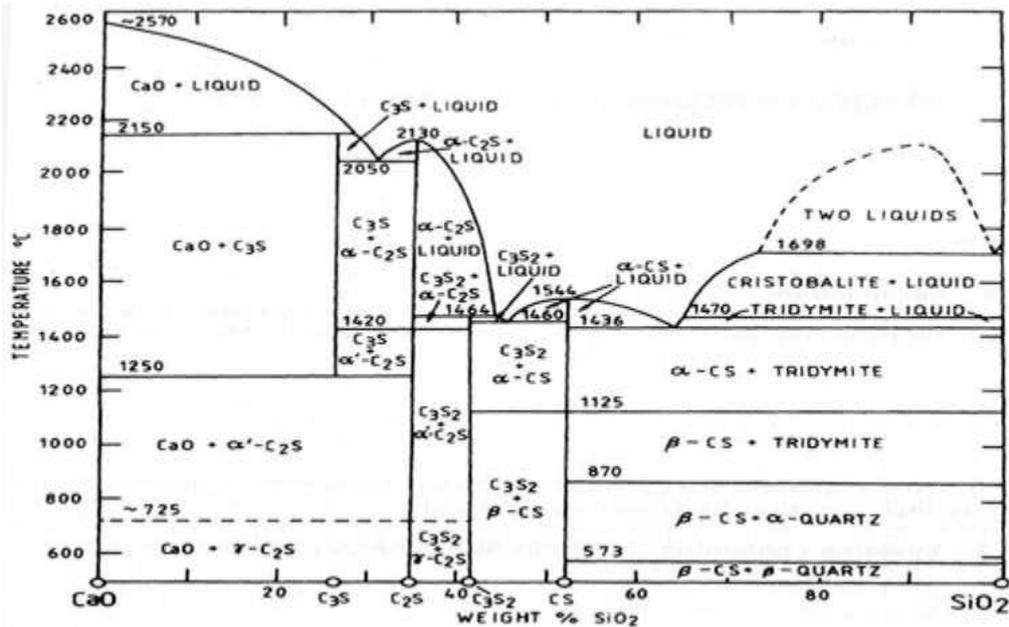


Figure I.6 : Diagramme de phase CaO-SiO₂ [5].

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

➤ La bélite :

La bélite est une forme impure du silicate dicalcique C_2S et constitue 15 à 30% du clinker. Le C_2S peut se présenter sous cinq formes cristallines stables, mais leurs domaines de stabilité diffèrent au chauffage et au refroidissement (**Figure I.6**). Les transformations allotropiques dépendent de la taille des cristaux et de leur vitesse de refroidissement. Les différentes formes du C_2S ont des propriétés physiques et chimiques spécifiques qui donnent lieu à la variation de masse volumique et la variation de la résistance à la compression de leur produit d'hydratation.

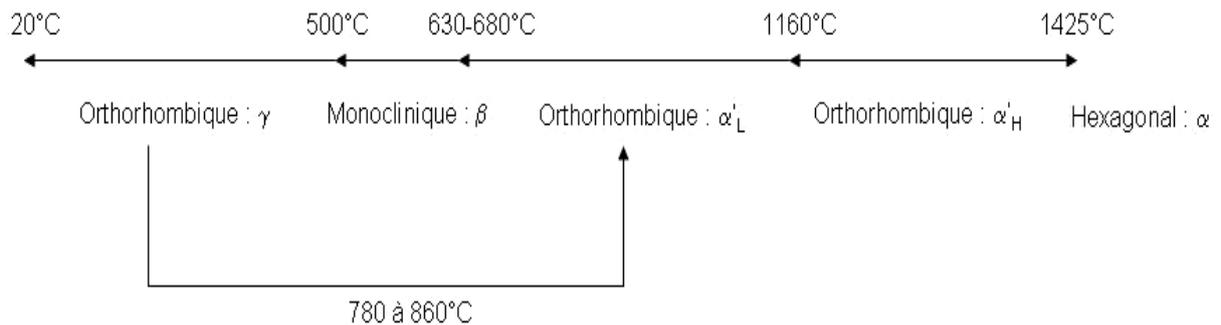


Figure I.7 : Polymorphes du silicate dicalcique (C_2S) en fonction de la température.[4]

Dans les clinkers, la bélite se trouve majoritairement sous forme β . Dans certaines conditions, la forme β peut se transformer en forme inactive. Cette conversion s'accompagne d'une augmentation de volume de 10%, qui conduit à la désintégration du clinker. Pour éviter cette conversion, il faut procéder à un refroidissement rapide du clinker. La bélite réagit lentement avec l'eau et contribue donc à la résistance du ciment à long et très long terme. En quantité importante, elle réduit la chaleur d'hydratation du ciment. [4,6]

➤ Les aluminates tricalciques et les alumino-ferrites calciques :

Les aluminates (C_3A et C_4AF) cristallisent à partir de la phase liquide présente dans le four pour des températures de l'ordre de 1350°C (cf. Figure 7). Ces deux phases enrobent les phases alite et bélite formant ainsi la « phase interstitielle » du clinker (cf. Figure 8).

L'aluminate tricalcique constitue 5 à 10% du clinker de ciment CEM I. A l'état pur, le C_3A est cubique, mais peut toutefois être combiné avec le Na_2O , SiO_2 et K_2O (qui se substituent partiellement au CaO). Il peut cristalliser sous forme soit cubique soit orthorhombique. Le

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

C₃A accélère la prise. En quantité importante, il génère une forte chaleur d'hydratation et permet l'obtention de ciment à résistance mécanique initiale élevée. L'hydratation rapide de C₃A est ralentie par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise. [4]

Les aluminoferrites calciques sont des solutions solides de C₂A et C₄F proches du C₄AF, mais sans composition chimique définie. Ils constituent environ 5 à 10% du clinker du ciment CEM I et jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement. Les oxydes de fer confèrent la couleur grise caractéristique de certains ciments.[4]

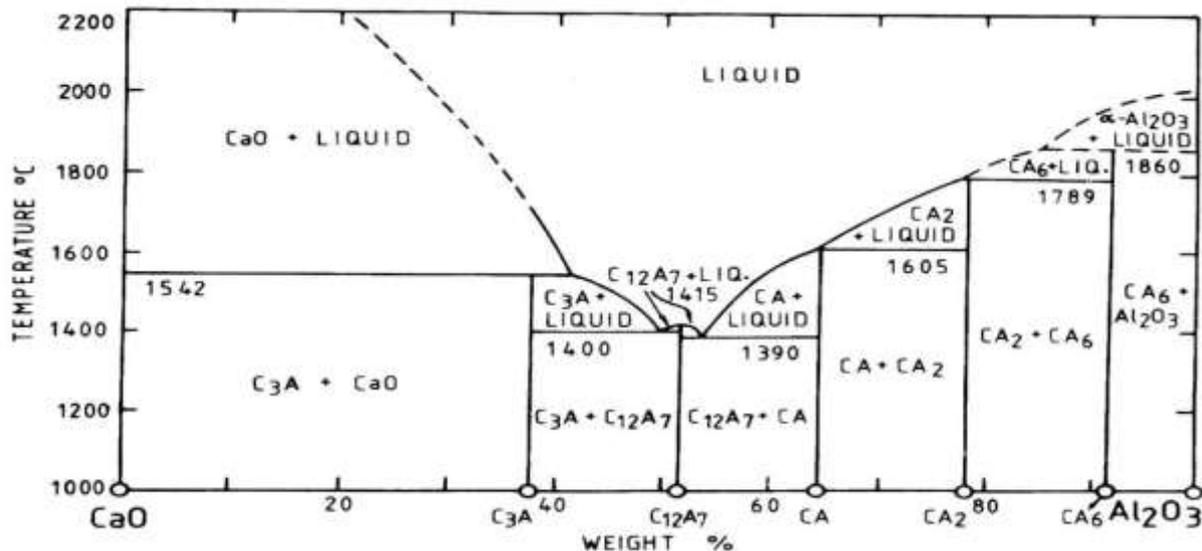


Figure I.8 : Diagramme de phase CaO-Al₂O₃ [1].

La répartition des phases principales du clinker dans le ciment Portland est en moyenne de 60% C₃S, 15% C₂S, 8% C₃A et 8% C₄AF. L'analyse d'une section polie de clinker par microscopie électronique à balayage permet de distinguer les différentes phases du clinker et est présentée en Figure I.8. Les cristaux de forme polygonale correspondent à l'alite (C₃S), les cristaux de bélite (C₂S) sont de forme arrondie.

Enfin, la phase interstitielle enrobant les grains d'alite et de bélite correspond aux aluminates et ferro-aluminates de calcium.[4]

1.2.3. Composition du clinker :

Après son refroidissement, le clinker se présente sous forme de nodules d'une dizaine de millimètre de diamètre (figure I-9).



Figure I-9 : Nodules de clinker de taille environ 20 mm

Ces nodules comportent quatre phases cristallines synthétisées lors de la cuisson, soit deux silicates de calcium, et deux aluminates de calcium. Chaque phase possède ses propres propriétés hydrauliques. Les silicates sont sous forme de cristaux entourés d'une phase interstitielle moins bien cristallisée comportant les deux aluminates.

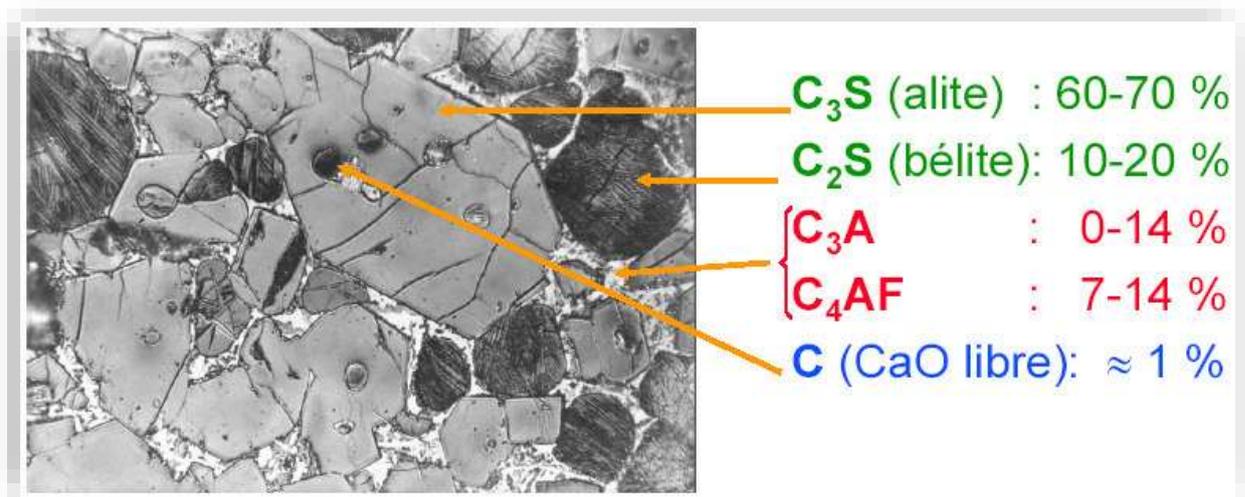


Figure I.10 : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales (source : Ciments Calcia)[6]

➤ **La chaux libre :**

La chaux libre provient de la décarbonatation du calcaire. Elle ne doit pas se trouver à plus de 2% dans le clinker afin d'éviter son expansion en présence d'eau.

1.2.4. LE BROYAGE DU CLINKER :

A la sortie du four, la granulométrie du clinker est trop grossière pour que sa réactivité soit Suffisante. Le broyage du clinker développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui Confère ses principales propriétés rhéologiques. A cette étape, différents minéraux naturels ou Artificiels sont ajoutés simultanément (8) pour ajuster la composition du mélange. Ainsi, 5%

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

De sulfate de calcium sont ajoutés sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou d'hémihydrate ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$) ou d'un mélange des deux. Ce composé sert à réguler la prise du ciment en agissant sur la réaction d'hydratation du C3A.

Le clinker et ses additifs sont réduits finement dans un broyeur à boulets (9). Celui-ci comporte un compartiment dégrossisseur et un compartiment finisseur. Un séparateur à cyclone récupère les plus fines particules afin que le broyage soit plus efficace. Une valeur de surface spécifique courante du ciment après le broyage - mesurée par la méthode de Blaine - est de $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$. Pour atteindre cette surface, appelée finesse, une énergie électrique spécifique de l'ordre de 50 kWh/T doit être fournie. [51,52]

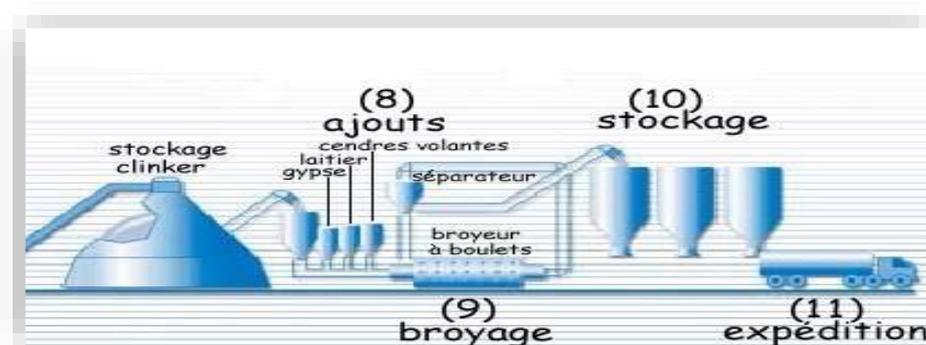


Figure I-11 : Obtention du ciment par broyage du clinker (source : Ciments Calcia).[4]

Le ciment est ensuite stocké en silos (10), puis conditionné pour l'expédition en sacs ou en vrac (dans des conteneurs ou dans des bateaux à cale compartimentée) (11).

1.2.5. Modes de broyage et systèmes utilisés pour le broyage du clinker :

1.2.5.1. Mode de broyage :

Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, fragile et abrasif du clinker [7,8] et sont présentés en **Figure I.9** et **I.12**.

Le mode de broyage par percussion met en jeu l'énergie cinétique du milieu de broyage (parois et projectiles constitués de billes par exemple) ou celle des grains de poudre « en vol » dans l'enceinte du broyeur. L'intensité de l'énergie cinétique du corps broyant sur un grain ou d'un grain projeté sur une paroi conditionne la capacité du choc produit à fragmenter la graine question. Sous les sollicitations imposées par percussion ou par impact, les grains de clinker, fragiles, sont sujets à un mécanisme de fragmentation par rupture globale de leur volume. Cela réduit substantiellement la taille des grains. Ces modes de broyage permettent

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

de produire une distribution granulométrique monomodale avec une population de grains assez large.

Dans le mode par écrasement, les grains sont soumis à des forces normales. Les contraintes sont concentrées dans un volume partiel à la surface de la particule. Ainsi le grain initial s'Arondit, et beaucoup de fines particules sont produites. Les broyeur basé sur l'écrasement compriment les particules entre deux surfaces dont l'écartement mutuel diminue. Toutefois le mode de broyage par frottement de grains de clinker entre eux ou entre deux billes existe aussi dans les broyeur classiquement utilisés (broyeur à boulets). Dans ce cas, la force appliquée est majoritairement tangentielle à la surface de la particule. Cela mène à la production de beaucoup de fines particules due à l'érosion progressive de la surface des grains. De cette manière, la poudre obtenue présente une distribution de grains bimodale, car elle contient des grains de poudre dont la taille est proche des grains initiaux, ainsi que des grains très fins.

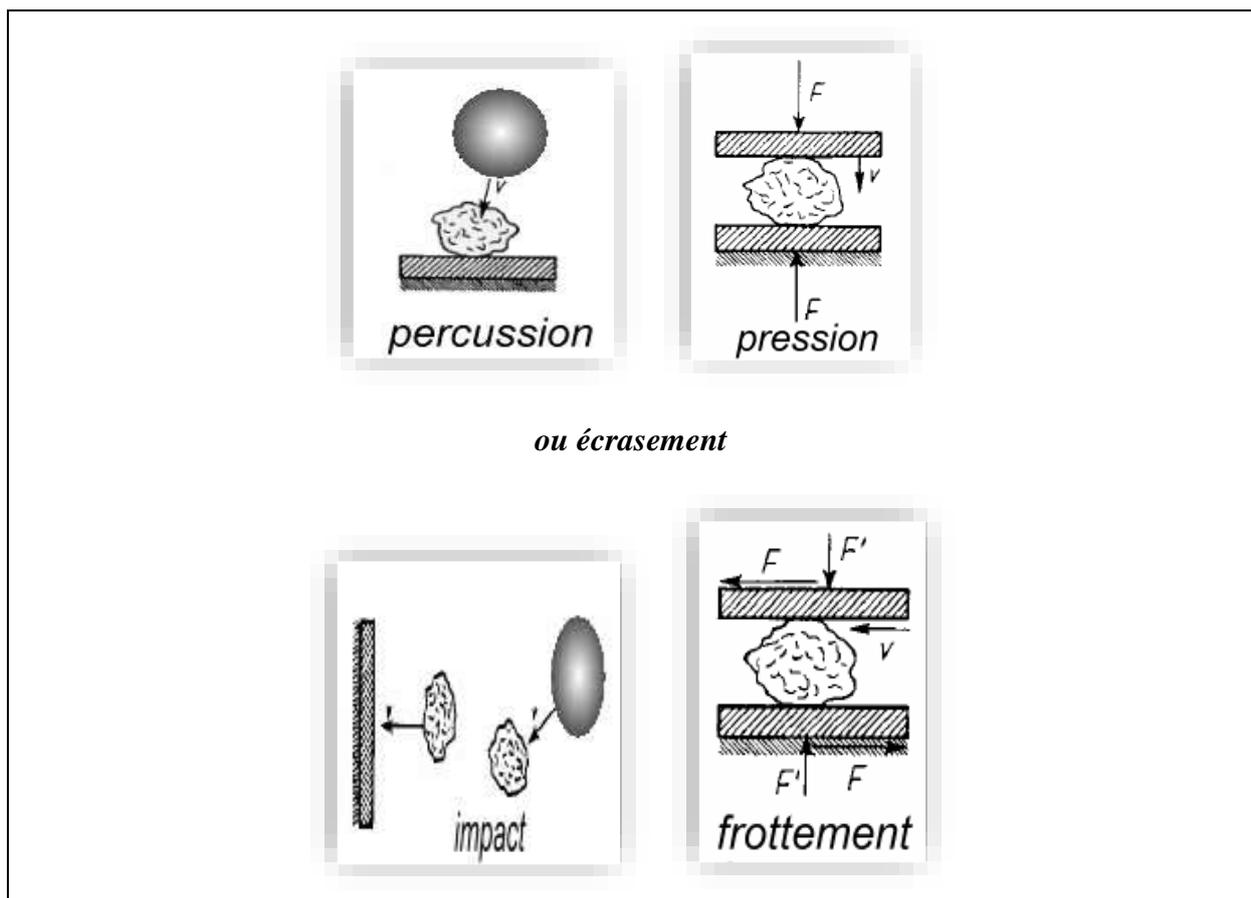
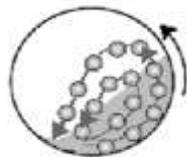


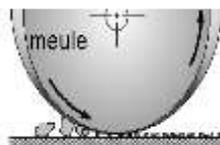
Figure I.12: Modes de broyage d'un grain de poudre dans un broyeur à boulet [7].

I.2.5.2. Systèmes utilisés pour le broyage du clinker :

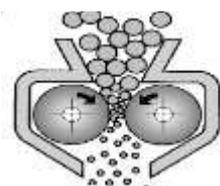
Le clinker étant un matériau de broyabilité médiocre, il faut en tenir compte dans le choix des appareils de broyage et des conditions de broyage à utiliser. Plusieurs types de broyeurs sont employés : le tube-broyeur à boulets (**figureI.a**), le broyeur vertical à galets (**figureI.b**) [Knoflicek et Wentzel 1995], la broyeuse haute pression à rouleaux (**figureI.c**) [Rosemann et Ellerbrock, 1998] et le broyeur horizontal à rouleau (**figureI.d**) [Marchal, 1997]. Chaque type de broyeur assure le broyage des grains de poudre grâce à la combinaison des modes de fragmentation cités dans la partie précédente : la percussion, l'impact, l'écrasement et le frottement. Ainsi le broyeur à boulets utilise les modes d'impact, de percussion et de frottement, les broyeurs à galets utilisent la pression et le frottement, les broyeuses hautes pressions à rouleaux et le broyeur horizontal à rouleau utilisent la pression.



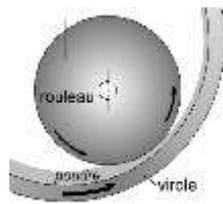
(Figure I.a) : tube-broyeur à boulets à deux compartiments



(Figure I.b) : broyeur vertical à galets



(Figure I.c) : broyeur haute pression à rouleaux



(Figure I.d) : broyeur horizontal à rouleau

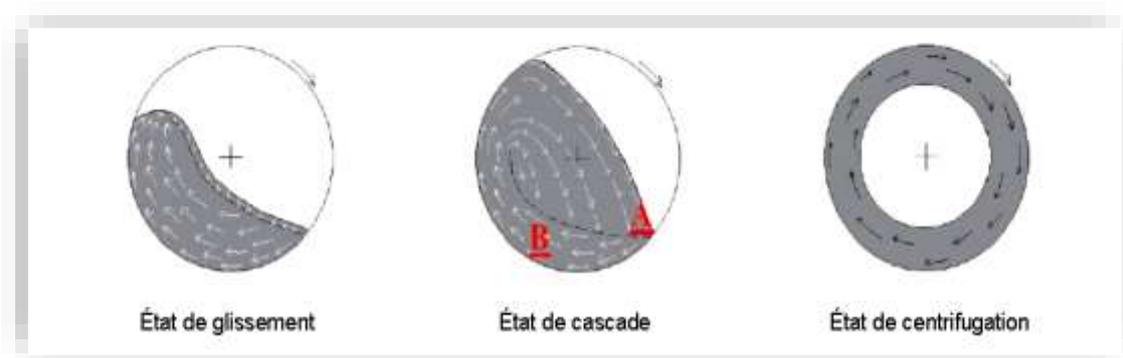


Figure I.13 : Ecoulements possibles dans un broyeur à boulets.[4]

A la sortie du broyeur, le clinker passe au travers d'une grille de décharge empêchant les particules non broyées de sortir. De plus, la poudre obtenue présente 0% de refus au tamis de 90 μ m. Pour optimiser le rendement de l'opération de broyage, la solution mécanique la plus courante est l'adjonction d'un séparateur à air au circuit de broyage. Celui-ci permet d'extraire les particules les plus fines évitant la ré agglomération et facilitant le broyage des particules de taille supérieure. L'énergie économisée peut atteindre 15% [8-9].

Malgré les procédés mécaniques mis au point pour le broyage du clinker, cette opération présente des rendements très faibles. En effet, une grande quantité de l'énergie est dispersée sous forme de chaleur. En moyenne 2,7% de l'énergie électrique est effectivement utilisée pour fragmenter les particules de clinker [10].

Pour accroître les rendements des broyeurs ou obtenir une poudre plus fine, des moyens chimiques ont été développés. Il s'agit de composés organiques ajoutés dans le milieu de broyage. Ces produits sont appelés agents de mouture et seront décrits dans la suite de ce travail.

CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DE CIMENT PORTLAND

1.3. Classification et domaine d'application des ciments :

1.3.1. Types du ciment :

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- ❖ Résistances mécaniques
- ❖ Résistance à une attaque physique ou chimique
- ❖ Mise en œuvre particulière.

Tableau 1.4 : Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5%
CEM II /A CEM II /B	Ciment portland composé	80 à 94 % 65 à 79 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 % - 21 à 35 %	
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	Laitier - 35 à 65 % - 66 à 80 % - 81 à 95 %	
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	Pouzzolane, - 10 à 35 % cendre ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V / A CEM V / B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	laitier - 18 à 30 % et cendre - 31 à 50 %	

Conclusion :

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

CHAPITRE II : LES AJOUTS

I. Introduction :

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires

Inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau.

Les différentes variétés de ciments industriels se différencient principalement par les additions minérales ajoutées au ciment Portland. Les constituants de ces ciments composés présentent différentes propriétés pouvant être regroupées sous trois classes différentes :

- Les propriétés hydrauliques : par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables et très peu solubles sont formés à partir du constituant.
- Les propriétés pouzzolaniques : à température ordinaire et en présence d'eau et de chaux, le constituant permet d'obtenir des composés hydratés stables.
- Les propriétés physiques : améliorant certaines propriétés de fabrication et/ou finales du ciment (accroissement de l'ouvrabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.).

Le clinker (K) : constituant principal du ciment CEM I (ou Portland) présente des propriétés hydrauliques :

en présence d'eau, il forme une pâte qui fait prise et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même dans l'eau.[11]

I.1. Le laitier de hauts fourneaux (S) :

Est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il s'agit également d'un matériau hydraulique lorsqu'il est activé en milieu aqueux par de la chaux. Néanmoins, on le qualifie de matériau hydraulique latent, puisqu'en présence d'eau uniquement, il ne s'hydrate pas et ne forme donc pas de matériau durci. Le laitier se compose principalement de silice (SiO_2), chaux (CaO), alumine (Al_2O_3) et d'oxydes de magnésium (MgO).

I.2.L'ajout minéral actif : La pouzzolane :

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice(SiO_2) et en alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3).capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage.Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée

dans la composition du ciment Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland. [12]

I.2.1.Types de pouzzolane :

I.2.1.1. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Algérie coté ouest du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618).



FigureII.01 : Pouzzolane naturelle

I.2.1.2.Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi la schiste cuite, et les déchets de l'industrie a base de méta kaolinite.



FigureII.02 : Pouzzolane artificielle

2.2 Effet de La pouzzolane :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

2.2.1.A l'état frais : Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.[13 ;14]

2.2.2.A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.[13,14]

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

2.3. Propriété de la pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. [15]

✓ Propriétés hydrauliques :

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

✓ Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité [15].

3. Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) :

sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées par du charbon. Elles contiennent principalement de la chaux réactive (CaO), de la silice réactive (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).

4. Les schistes calcinés (T) :

acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ 800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bicalcique (C₂S) et de l'aluminate monocalcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaO), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques. [15]



FigureII.03 : Les schistes calcinés (T)

5. Les Calcaires (L, LL) :

sont obtenus après un broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%. Ces additions ne participent pas à la création de résistances mécaniques du ciment durci.[15]



Figure II.04 : Les Calcaires

6. Les fumées de silice (D) :

sont des particules très fines (100 nm de diamètre) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électriques utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice accélèrent les réactions d'hydratation des phases du clinker, diminuent la perméabilité du ciment hydraté et augmentent d'une manière générale les propriétés mécaniques du matériau cimentaire durci. Ce type d'ajout est notamment utilisé dans les bétons dits à hautes performances (BHP).



Figure II.05 : Les fumées de silice

7. Les sulfates de calcium :

sont incorporés au ciment principalement sous forme de gypse. Ils doivent être ajoutés en faibles quantités aux constituants du ciment en vue de réguler la prise lors de son hydratation. Ils sont introduits à hauteur de 5% sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci.



Figure II.06 : Les sulfates de calcium :

8. Les additifs :

Sont des constituants minéraux ou organiques ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés finales du ciment hydraté. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1% en masse de ciment. Pour les additifs organiques, la proportion de l'extrait sec doit être inférieure ou égale à 0,5% en masse de ciment.

9. Action des additions cimentières

(**Guetteala.S**), Depuis 1970, un grand effort de recherches a été fourni sur l'utilisation des ajouts cimentaires en tant que substitution partielle au ciment Portland. Ces ajouts proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries. [37]. Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance. [24]. La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés CSH II. Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique certain et contribuent à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons auxquels elles sont incorporées. [37,20].

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes. [24, 28, 30-32, 39 et 42-45], s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire. L'effet granulaire devient favorable et conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques. Kronlof[40], a montré en étudiant l'effet des agrégats ultrafins sur la résistance du béton, que l'incorporation dans une formulation de béton de trois additions de quartz de finesse différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec le dosage et la finesse du matériau de substitution. Dans le même sens Kwan[41], a montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances, que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant. Un effet physico-chimique engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis(**Guettala.S**). D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace. [44].Lilkov et al [45], a mesuré la quantité d'hydrates formés au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire et a montré que cette quantité est plus importante dans des mélanges cimentaires avec additions de fumée de silice et cendres volantes que dans les mélanges sans additions. Dans le même sens, la quantité de chaleur dégagée au cours des premières 24 heures dans une pâte cimentaire est modifiée par l'incorporation de différents pourcentages de fumée de silice. [38]. Les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions de ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire. Cette nucléation hétérogène qui est un processus physique, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment et dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'addition dans le mélange et de l'affinité de la poudre d'addition (nature) avec les hydrates de ciment. [33]. Un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire, qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit

fortement avec l'effet physico-chimique. L'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. [39]. De même Appa Rao [23], a montré en étudiant le développement des résistances avec l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice, que pour un rapport E/L = 0.5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30% de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier. Benezet et al [27 and 29], a montré en étudiant l'influence de la taille des particules de quartz dans la réaction pouzzolanique, que le quartz cristallisé finement broyé, peut sous certaines conditions réagir avec la portlandite. Les poudres de quartz pouvaient être considérées comme des produits pouzzolaniques puisqu'elles consomment la chaux pour former des hydrates stables. La réaction pouzzolanique se déroule lentement, elle se manifeste essentiellement après 28 jours. [42]. Cyr et al [32], Il en résulte que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique. Son action sur les propriétés du matériau durci peut être quantifiée par la mesure du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie rend difficile toute distinction claire entre ces deux effets et fait qu'ils peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment. [37].

10. Effet du sable de dune finement broyé [37] :

L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune en poudre. En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence de sable de dune en poudre, traduit la réaction pouzzolanique partielle de cet ajout, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte. Et montre aussi que le sable de dune en poudre est constitué de minuscules grains de quartz SiO₂ bien cristallisé du type (Low-Quartz). [21 et 22]. Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

Toutefois, afin d'assurer le développement de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques, techniques et sociales. A la lumière de ce qui a été évoqué

précédemment, et dans le but d'allonger la durée de vie des gisements des matières premières, l'objectif recherché est d'évaluer expérimentalement la contribution combinée des effets physique, physico-chimique et éventuellement chimique de l'ajout du sable de dune en poudre SDP sur les propriétés physiques et mécaniques des pâtes du ciment.

II. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

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 de la crue (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. Dessous 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 CPA. 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.[49]

III. Conclusion :

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

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

III. Introduction :

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du CO₂, les ajouts améliorent les Propriétés du béton. Le laitier du haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité. La présente étude traite l'activation du laitier (classique par la chaux ou la Ca(OH) libérée lors de l'hydratation du ciment Portland) et l'activation alcaline par la soude (NaOH) et le carbonate de sodium Na₂CO₃ sur le comportement mécanique du béton.

III.1. Description du produit :

Le ciment de haut fourneau CEM III/C est un ciment de teinte gris clair obtenu par la mouture de clinker Portland et de laitier granulé de haut fourneau. Le choix judicieux des proportions des constituants principaux, combiné avec une finesse de mouture adapté, résulte dans un ciment de la classe 32,5. Dans sa classe de résistance, ce ciment présente une résistance normale à court terme. Le ciment de haut fourneau CEM III/C répond aux exigences de la norme européenne EN 197-1. Cette norme définit la composition, les spécifications chimiques, mécaniques et physiques ainsi que les critères de conformité des ciments courants. [16]

III.2. Composition :

Les exigences en matière de composition sont exprimées en pourcents de la somme des constituants principaux et secondaires, avant ajout de la quantité de sulfate de calcium destiné à réguler la prise.

Tableau III.1 : Les exigences en matière de composition des constituants principaux et secondaires, avant ajout de la quantité de sulfate de calcium destiné à réguler la prise.

Type de ciment	Constituants principaux (% en masse)		Constituants secondaires (% en masse)
	Clinker Portland (K)	Laitier de haut fourneau (S)	
CEM III/C	5-19	81-95	0-5

III.3. Exigences mécaniques et physiques :

La classe de résistance d'un ciment exprime la résistance minimale qu'il développe après 28 jours sur prismes de mortier normalisé. Dans sa classe de résistance, ce ciment développe une résistance normale à court terme, notée par la lettre N. Le temps de début de prise illustre le délai de mise en œuvre avant durcissement de la pâte de ciment. La conformité à l'exigence de stabilité confirme que la pâte de ciment n'est pas sujette à expansion.

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

Tableau III.2 : La classe de résistance d'un ciment exprime la résistance minimale

Classe de résistance	Résistance à la compression MPA			Temps de début de prise (min.)	Stabilité (mm)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours		
32.5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10

III.4. Caractéristiques particulières :

Le marquage CE atteste la conformité des caractéristiques courantes à la norme EN 197-1. De plus, les normes nationales définissent des caractéristiques particulières dont les appellations complètent la dénomination du ciment. CBR commercialise un seul type de ciment

De haut fourneau:

- CEM III/C 32,5 N HS;
- CEM III/C 32,5 N HSR LA.

Le ciment de haut fourneau CEM III/C est disponible avec les certificats suivants :

Tableau III.3 : Le ciment de haut fourneau CEM III/C

Type de ciment	Certificat		
	CE	KOMO	BENOR
	EN 197-1	NEN 3550	PTV 603
CEM III/C 32,5 N HS	*	*	
CEM III/C 32,5 N HSR LA	*		*

Signification de la dénomination:

Dénomination	Signification	Caractéristique	Norme
HSR	Haute résistance aux sulfates	teneur en laitier ≥ 66 %	NBN B 12 - 108
HS	Haute résistance aux sulfates	teneur en laitier > 65 %	NEN 3550
LA	Teneur limitée en alcalis	Teneur en alcalis exprimée en Na ₂ O-éq ≤ 2,00 %	NBN B 12 - 109

5. Domaines d'application :

Par sa très haute teneur en laitier, ce ciment connaît un lent développement de résistance, et présente donc une chaleur d'hydratation réduite. Cette propriété est recherchée pour les ouvrages massifs (barrages). De même, le délai de prise plus long est un avantage pour les bétons maigres et sable stabilisés. Ce ciment est particulièrement apprécié dans les coulis à la bentonite. Il convient parfaitement aux ouvrages en contact avec les eaux et les sols contenant des sulfates.

Sa teneur limitée en alcalis permet de l'utiliser en combinaison avec tous les granulats traditionnels sans risque de réaction entre les alcalis du ciment et les granulats (RAS).

Le succès des travaux entrepris avec ce ciment reste, bien entendu, conditionné au respect des règles de bonne pratique en matière de préparation, mise en oeuvre et conservation des mortiers et bétons.

II. Cas particulier des ciments à base de laitiers de haut Fourneau :

II.1. Fabrication et utilisation :

L'industrie cimentière est un très gros producteur de CO₂. C'est pourquoi elle a déjà réduit l'émission du CO₂ due à la cuisson du clinker en améliorant le rendement énergétique des fours. La part chimique due à la décarbonatation du calcaire est quant à elle irréductible. Toutefois, il existe une autre voie possible pour réduire les rejets de CO₂ de l'industrie du ciment : elle consiste à remplacer une partie du clinker contenu dans les ciments par des additions, telles que des fillers calcaires, des cendres volantes issues des centrales thermiques et du laitier granulé de haut-fourneau, coproduit de l'industrie sidérurgique. Dans ce qui suit, on s'intéresse uniquement au ciment à base de laitiers de haut fourneau.

Les ciments à base de laitiers de haut fourneau (CHF) sont composés de ciment Portland (de 20 à 64%) additionné de laitiers de haut fourneau. L'addition des laitiers se fait pendant l'opération de broyage. Cette étape consiste à doser les différents constituants, puis à les mélanger et à les broyer de façon à obtenir une poudre homogène et très fine. [17]

Les CHF sont des ciments à faible chaleur d'hydratation, très employés dans les bétons enterrés utilisés pour les :

- travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injection,
- travaux en eaux agressives : eau de mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures,
- ouvrages massifs : fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages.

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

II.1.2. Interactions entre les laitiers et l'hydroxyde de calcium (CH) :

Plusieurs études ont été faites sur l'hydratation des ciments à base de laitiers (Bagel.1998 ; Escalante.2001 ; Jiang.2005 ; Pane et Hansen, 2005 ; Lee 2006 ; Barnett.2006).

Les résultats obtenus montrent, la formation d'une couche de produits d'hydratation autour Des grains de laitiers (Kondo, 1969), la réduction du rapport calcium/silicate (Ca/Si) dans le Gel de C-S-H formés autour des grains de laitiers, probablement la formation d'hydrotalcite (M₄, 066,32AHx) (Mascolo et Marino, 1980) et la diminution des sulfates (S) qui participent à la formation de monosulfoaluminate tétracalcique (Afm) (Gollop et Taylor, 1996).

D'après Taylor (Taylor, 1997), les produits d'hydratation des laitiers sont les mêmes que ceux Issus d'un ciment Portland ordinaire, excepté que, les C-S-H formés autour des grains de Laitiers ont un rapport de Ca/Si (1,55) inférieur à celui obtenu pour un ciment portland Ordinaire (1,7). (Biernacki 2002), ont estimé à environ 1,3 à 1,4, le Rapport Ca/Si dans les C-S-H autour des grains de laitiers.

Une réaction chimique peut avoir lieu entre les grains de laitiers et l'hydroxyde de calcium (CH) issue de l'hydratation du ciment Portland ordinaire (Biernacki. 2002 ; Pane et Hansen, 2005). (Biernacki .2002), ont montré qu'une mole de laitier Consommait 2,6 moles de CH et que la quantité d'eau consommée par un gramme de laitiers Était d'environ 12 grammes. [18]

II.1.3. Réactivité des laitiers :

La réactivité des laitiers est estimée par la dissolution des produits d'hydratation et du ciment Anhydre, la procédure employée est celle basée sur la méthode appelée « éthylène diamine tetra acétique acid » (EDTA), décrite par Luke et Glasser (Luke et Glasser, 1987). Le Pourcentage de laitiers ayant réagi.

D'après Escalante-Garcia et al. (Escalante-Garcia et al., 2001), la réactivité des laitiers dépend de plusieurs paramètres. Elle est une fonction croissante de la température, elle diminue quand le pourcentage de laitiers augmente et augmente en fonction de la quantité d'eau initialement présente dans l'échantillon. Léquoition au-dessous résume les paramètres qui ont un effet direct sur la réactivité. [18 ,49].

$$\%LR = 100 - \frac{W_m + \frac{(P_{ldn})(\%Laitiers)}{100}(W_s) - \frac{(P_{cn})(\%Ciments)}{100}}{(W_s)(\%Laitiers)} \quad (100)$$

Avec :

W_{rn} : la masse de résidu du ciment non dissoute [g]

P_{ldn} : le pourcentage de laitier dissout qui n'a pas réagit

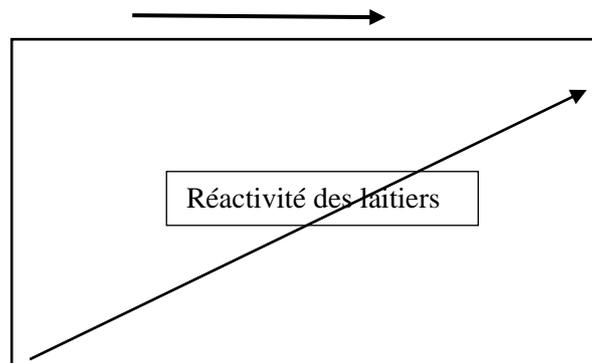
W_s : la masse de l'échantillon (après la perte au feu) [g]

P_{cn} : le résidu de ciment non dissout [g]

% Ciment : le pourcentage du ciment dans la phase solide

% Laitiers : le pourcentage de laitiers dans la phase solide

D'après (Escalante-Garcia .2001), la réactivité des laitiers. Dépend de plusieurs paramètres. Elle est une fonction croissante de la température, elle diminue quand le pourcentage de laitiers augmente et augmente en fonction de la quantité d'eau initialement présente dans l'échantillon. La Figure I-14 résume les paramètres qui ont un effet direct sur la réactivité. [49]



Rapport eau/solide

Surface spécifique

Figure III.1 : Paramètres influençant la réactivité des laitiers (Escalante-Garcia .2001).

II.L'INFLUENCE DE L'ACTIVATION DU LAITIER SUR LE COMPORTEMENT

MECANIQUE DES BETONS :

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux

Des usines sidérurgiques. Pour 1m³ du métal en fusion environ 280 à 340kg de laitier est

Produit dans les hauts fourneaux modernes (Malhotra, 1987). En Algérie la production

Annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes, ne trouvant que quelques rares applications.

En cimenterie, seul le laitier granulé est utilisé comme ajout au ciment Portland, obtenu par

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

Un refroidissement rapide, afin de le conserver à l'état vitreux. La structure vitreuse métastable attribue au laitier la faculté de réagir, elle possède une énergie de cristallisation non dissipée de l'ordre de 200 kilo-joule/kg (Venuat, 1989). Le laitier ne possède par lui-même aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour former des composés possédant des valeurs liantes (Zeghichi, 1998).

L'activation classique du laitier consiste à activer le laitier par l'ajout de chaux sous forme de poudre, ou à partir du ciment Portland (activation calcique) ou par l'ajout du gypse (activation sulfatique). Ce type d'activation est connu depuis fort longtemps. A partir des années 70, l'activation alcaline du laitier a bénéficié de plusieurs études et publications, et a connu plusieurs applications en URSS et aux Pays Bas.

L'activation alcaline se réfère principalement à l'activation par :

- Les alcalis caustiques (NaOH, KOH, ...).
- Les sels non siliceux (R_2CO_3, R_2SO_3, \dots).
- Les sels siliceux (R_2O, m) SiO_2 . (Où R représente Na, K et Li) (Zeghichi, 2004).

Le processus de l'activation est influencé par la composition chimique du laitier, l'activant utilisé et la phase vitreuse (teneur en verre). Les activateurs ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions, mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates (Voinovitch et Dron, 1976). Ils ont comme rôle de :

- Accélérer la solubilité des composants du laitier.
- Favoriser la formation de quelques hydrates.
- Favoriser la formation du réseau de la structure des hydrates (Runzhang, 1988).

Les bénéfices qui pouvaient être tirés en utilisant les ciments de laitier sont

Multiplés :

- Ecologiques et environnementaux (utilisation d'un sous-produit et la diminution de l'émission de CO_2).
- Economiques (le coût du laitier est le coût de son transport ; l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment).
- Techniques (amélioration des propriétés mécaniques des bétons, durabilité largement améliorée) (Malhotra, 1987). [47]

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

III.2 Activation du laitier par le ciment Portland : (L.Zeghichi)

L'hydratation du ciment au laitier activé par le ciment Portland (ciment Portland au Laitier) est très complexe parce que les deux composés (clinker et laitier) vont réagir avec l'eau. On considère que le ciment Portland s'hydrate de la même manière qu'un ciment Portland ordinaire pour donner naissance aux composés hydratés suivants : CHS, l'étrangeté Et $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le laitier granulé, finement broyé et mélangé avec l'eau, ne s'hydrate pas, à cause de la formation d'une couche acide autour du grain de laitier empêchant ce dernier de s'hydrater (Lea, 1971). [47]

La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérée pendant l'hydratation du ciment Portland va dissoudre cette couche acide et entre en réaction avec les composants du laitier, pour former. Les produits d'hydratation suivants : CHS, l'aluminate tétracalcique hydraté, l'étrangeté, et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui va disparaître pour les teneurs élevées en laitier.

(L.Zeghichi). L'évolution de la résistance mécanique en compression du béton au laitier, activé par le ciment Portland suivant des proportions variantes de CPA : (20% - 50% - 70% et 100%), est représentée à la Figure III.2.

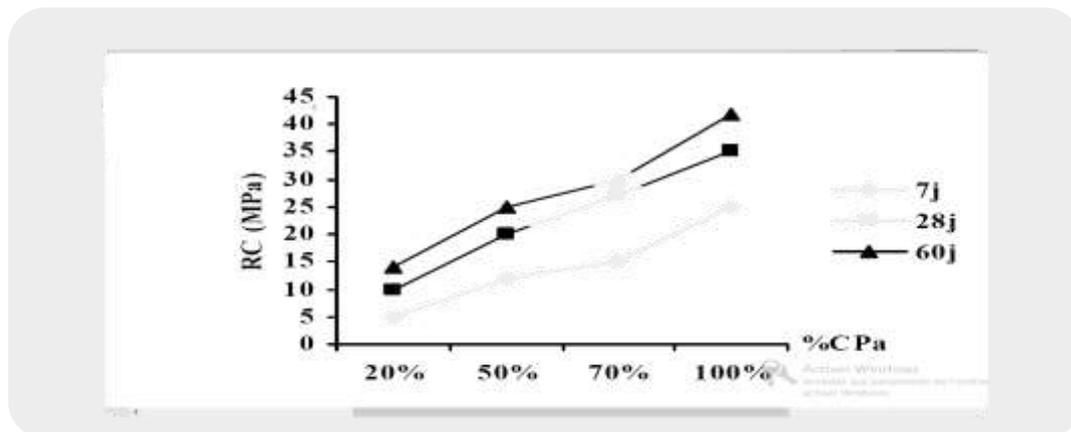


Figure III.2 : L'évolution de la résistance du béton (activé par le clinker). [47]

On remarque l'augmentation de la résistance mécanique aux différents âges de durcissement avec l'augmentation du pourcentage du CPA ajouté au laitier. Pour les pourcentages de 20% la résistance du béton est médiocre, améliorée. Nettement pour les pourcentages de 50% et 70%. A l'âge de 60 jours une légère augmentation de la résistance est remarquée. A long terme la résistance des bétons à base des ciments au Laitier rattrape et dépasse celle des bétons à base des CPA (Bijen, 1996). L'évolution de la résistance est liée au phénomène de l'hydratation : plus la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le CPA est grande, plus les produits d'hydratation du laitier formés sont denses. [47]

III.3.L'activation alcaline du laitier :

Dans cette partie le composant alcalin utilisé est le carbonate de sodium (Na_2CO_3) Et la soude (NaOH) en tant qu'activant du laitier avec une densité de $1,25\text{g/cm}^3$. La Figure 3 Représente l'évolution de la résistance en compression du béton activé par Na_2CO_3 aux Différents âges de durcissement naturel.

D'après la Figure 3, l'activation alcaline du laitier améliore nettement la résistance à Long terme. Les résistances obtenues par activation alcaline sont équivalentes à celles Obtenues à partir d'une activation par le CPA de 70%. [47]

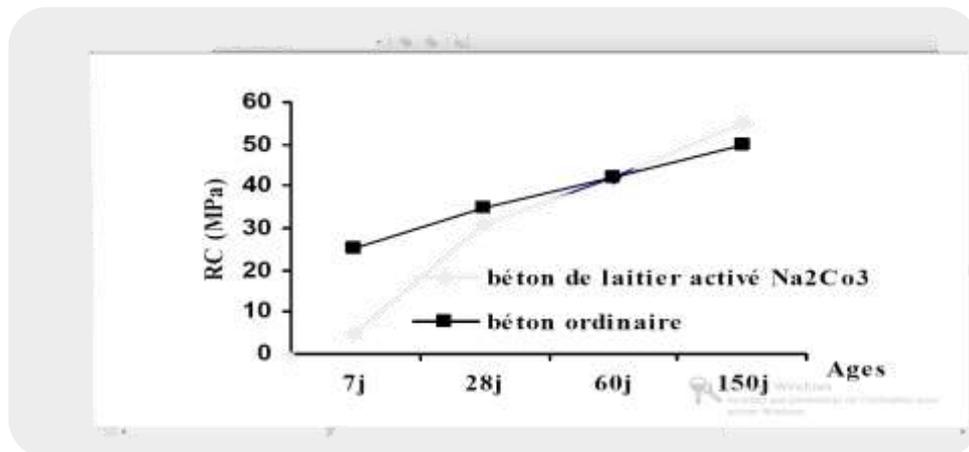


Figure III.3 : L'évolution de la résistance en compression du béton. [47]

L'augmentation de la résistance est due à la formation des silicates de calcium en Grande quantité, ce qui conduit à la réduction de la taille des pores dans la pâte de ciment.

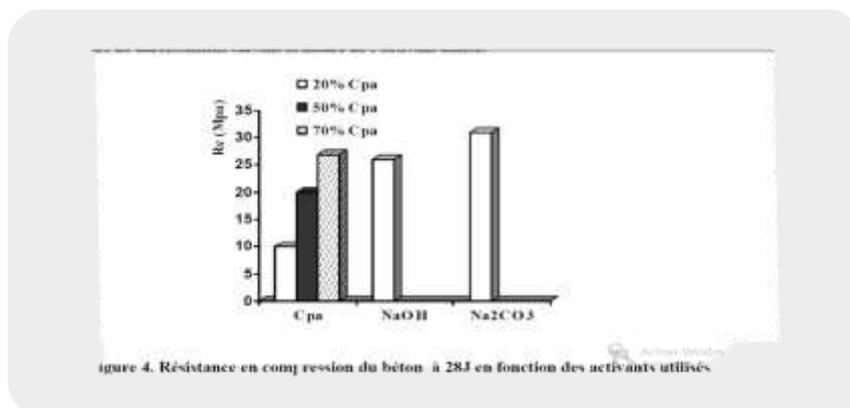


Figure 4. Résistance en compression du béton à 28j en fonction des activateurs utilisés

Figure III.4 : l'évolution de la résistance mécanique en compression à 28 jours de durcissement suivant la nature de l'activant utilisé. [47]

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

De la même manière on a présenté la résistance mécanique en traction par fendage à La Figure 5, afin d'estimer la qualité du béton à base du laitier activé .A partir de cette figure on remarque que les bétons à base de laitier activé présentent Une résistance en traction meilleure par rapport à celle du béton ordinaire ; cela est dû à la Bonne adhérence entre le granulats et la matrice du ciment.

III.4.L'influence de l'étuvage sur la résistance des bétons au laitier activé :

Pendant l'étuvage, le rôle de la vapeur d'eau est de conserver l'eau à l'intérieur du Matériau, ce traitement thermique a pour but d'accélérer le durcissement sans provoquer des Anomalies sur les propriétés du béton.

La Figure 6 représente l'évolution de la résistance d'un béton au laitier activé par Na_2CO_3 après un jour de durcissement par étuvage (2h+12h+2h) et après 28 jours. (Les Éprouvettes sont décoffrées après 1 jour d'étuvage puis gardées dans un milieu humide). [50]

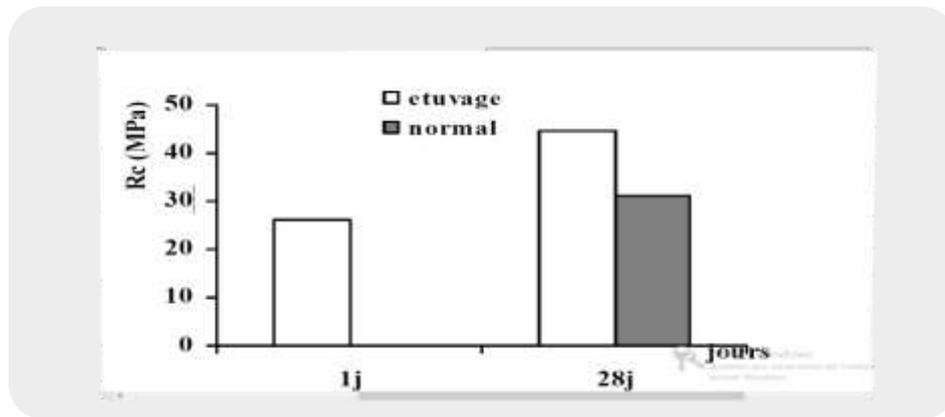


Figure III.5 : L'effet de l'étuvage sur l'évolution de la résistance du béton au laitier activé. [47]

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage, dans le cas du béton au laitier Activé (béton basique), l'étuvage constitue une double activation du laitier, il permet d'avoir Des résistances intéressantes au bout d'un jour de durcissement (Venuat, 1984), ce qui permet De réaliser des éléments structuraux préfabriqués par ce procédé.

Au bout de 28 jours la résistance acquise est plus grande que celle obtenue à partir D'un durcissement naturel.

III.5.L'influence du dosage en ciment sur la résistance du béton au laitier activé(L.Zeghichi) :

Les essais sont effectués après 28jours de durcissement (les éprouvettes sont Étuvées dès l'âge de 1 jour, elles sont décoffrées et gardées humides).

Le dosage en ciment varie de 200kg/m³ à 500kg/m³(L.Zeghichi).

CHAPITRE III : LE CIMENT DE HAUT FOURNEAU

Les résultats obtenus sont représentés à la Figure III.6

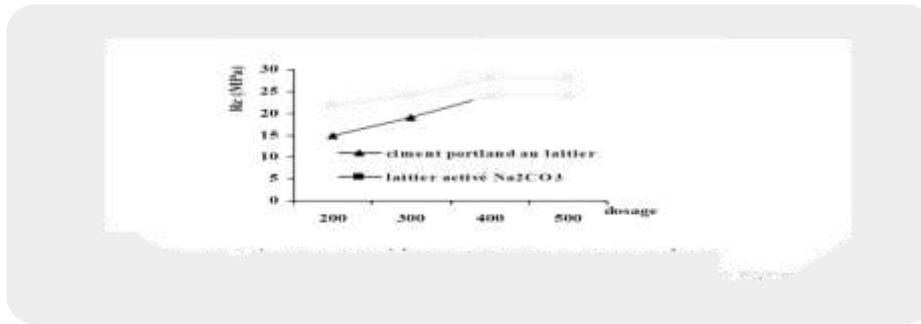


Figure III.6 : L'évolution de la résistance en fonction du dosage en ciment.

La résistance des bétons à la compression augmente intensément quand la dose de Liant par 1m³ de béton atteint 350kg. Toute augmentation au-delà de cette dose ne conduit pas à une élévation significative de la résistance des bétons essayés (**Mezghiche, 1989**). Il reste à noter la grande durabilité des bétons au laitier (bonne résistance aux Milieux agressifs, forte compacité, faible perméabilité,...). Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation du laitier granulé du haut Fourneau d'El-Hadjar (Annaba) ; elle a permis de mieux connaître l'effet positif de l'activation du laitier. Sur le plan économique, le coût du laitier est négligeable, seul le coût Désactivant est considéré. Sur le plan technologique, une amélioration des résistances Mécaniques est constatée : en compression (à long terme) et en traction ce qui permet d'assurer une durabilité aux structures réalisées à partir du laitier activé.

Conclusion :

La combinaison de l'étuvage et l'activation du laitier permet d'obtenir des Résistances notables aux âges précoces, d'où la possibilité de la préfabrication des éléments à Base du laitier activé. L'augmentation du dosage en ciment (>350kg) n'améliore pas la résistance du béton d'une façon considérable.

**CHAPITRE-IV : CARACTERISATION
PRELIMINAIRE DES
CONSTITUANTS**

I. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la confection du béton, la procédure de malaxage, le matériels utilisées, description des divers essais qui seront réalisées dans le cadre de la recherche.

Le programme expérimental est divisé en 2 **phases**:

1-dans le cadre de notre expérimentale nous avons formulé 4 pâtes de ciment à base du clinker avec 4 pourcentage d'ajouts (laitier) par des proportions croissantes (**0, 10 ,20 et 30%**) en masse par rapport au clinker et suivre l'évolution de la résistance à la compression en **2j, 07j, 14j, et 28 j.** pour un rapport E/C=0.30.

IV.I.MATERIAUX :

IV.I.1.Caractérisation du clinker :

IV.I.1.1 .Mesure de la finesse :

❖ Equipement nécessaire :



FigureIV.01: Appareil de Blaine



Figure IV.02 : Balance précise à 0.001 g près



Figure IV.03 : Chronomètre précis à 0.2s



Figure IV.04 : Des rondelles de



Figure IV.05 : Thermomètre précis

❖ Principe de l'essai :

Dans l'industrie cimentière, les moyens couramment utilisés pour tester la mouture après le Broyage doivent être rapides et fiables. L'efficacité du broyage est évaluée grâce à une Technique simple permettant de mesurer une valeur de la surface spécifique de la poudre. Ils'agit de la surface spécifique mesurée par la méthode de Blaine, appelée finesse [Blaine, 1943]. Cette technique exploite la perméabilité d'un lit de ciment compacté dans une cellule de mesure, ce lit ayant une porosité constante (**Figure IV.06**)

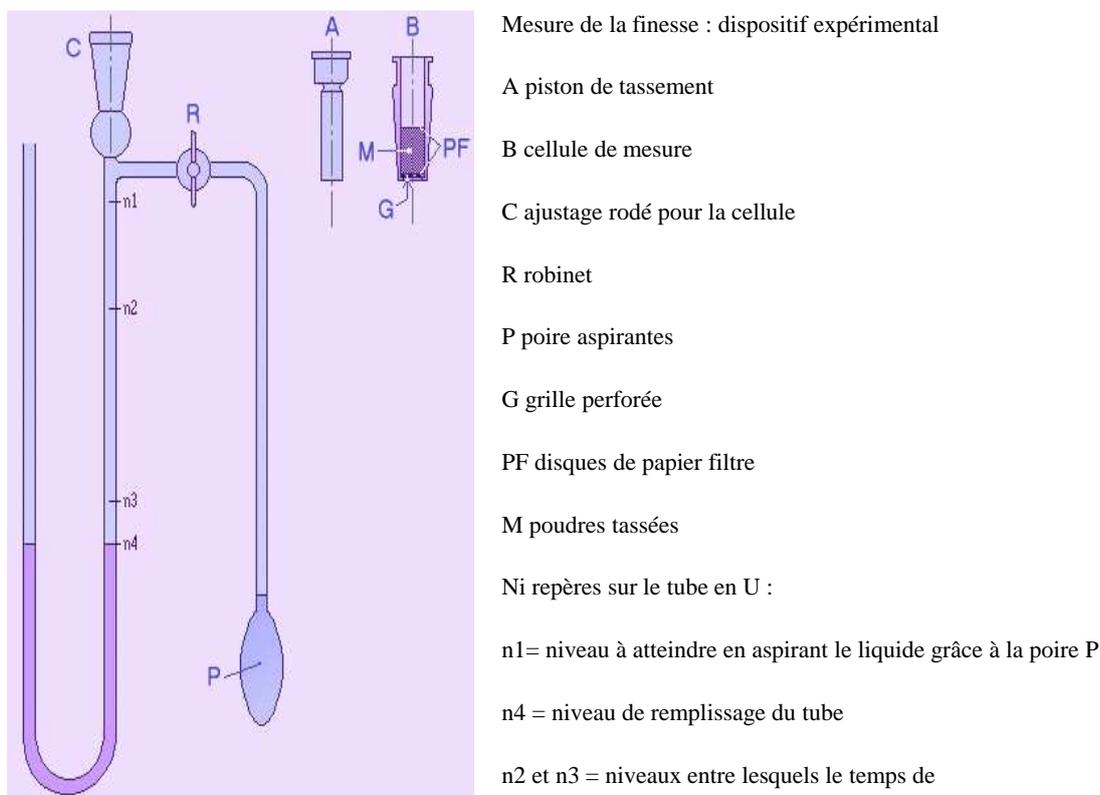


Figure IV.06 : Schéma d'une perméabilité de Blaine à mesure manuelle

Le temps nécessaire à un volume d'air pour passer à travers la couche de poudre est fonction de la surface développée par celle-ci. La surface peut être déterminée grâce à la relation de dessous. La constante d'appareil, K, est mesurée grâce à l'étalonnage de l'appareil, utilisant un échantillon de ciment de finesse connue.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_m = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{\varepsilon^3}}{1-\varepsilon} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1 \cdot \eta}} \\ \varepsilon = 1 - \frac{m}{\rho \times A \times H} \end{array} \right.$$


S_m : finesse (cm^2/g)

K : constante de l'appareil sans dimension

ρ : masse volumique absolue de la poudre (g/cm^3)

ε : porosité du lit de poudre

t : temps d'écoulement du liquide (dibutyl phthalate) entre les deux repères n_2 et n_3 (s)

h : viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

m : masse de poudre tassée dans la cellule de mesure (g)

A : section du lit de poudre (cm^2)

H : hauteur du lit de poudre (cm)

Les mesures effectuées pour l'étude ont utilisé une porosité du lit de poudre $\varepsilon=0,58$. La masse

De poudre ajoutée pour les essais est calculée grâce à la relation (II-3), en fonction des

Paramètres géométriques de la cellule de mesure.

Pour cette méthode de mesure de la surface spécifique, deux finesesses sont distinctes si leurs

Valeurs sont différentes d'au moins $100 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La finesse est tracée en fonction de la durée de broyage, ce qui permet d'évaluer l'évolution

De l'efficacité au cours de l'opération. L'« écart de finesesses » est calculé d'après la formule

La finesse = $\sqrt{T_s \cdot G \cdot K \cdot T}$

T_s : temps moyen.

G : constante de densité.

K : constante de température.

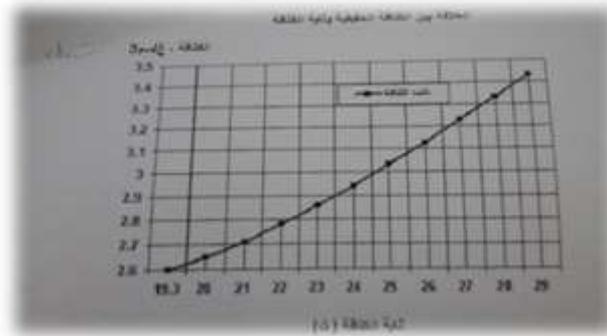


Figure IV.07 : La relation entre la densité réelle et la constante de densité (G)

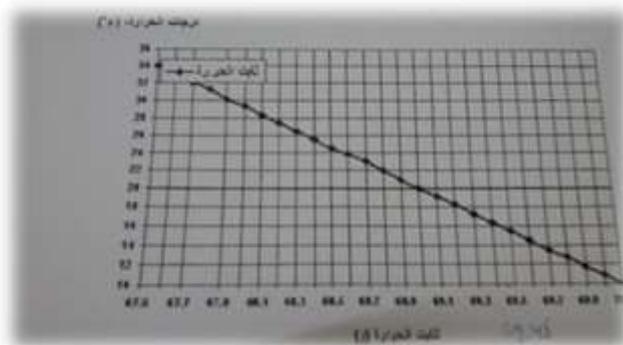


Figure IV.08: La relation entre le degré de température de labo et le constant de température(K)

IV.I.1.2.Masse volumique absolue :

❖ Equipement nécessaire :

- Un pycnomètre d'une contenance minimale 25 cm³
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le clinker, du toluène par exemple(le benzène).
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre précis à 0.1 permettant de connaître la température du laboratoire.



Figure IV.09 : Equipement nécessaire de l'essai

❖ Conduite de l'essai :

-M1=masse de pycnomètre vide.

-M2=masse de pycnomètre rempli d'eau distillée.

-M3=masse de pycnomètre rempli de toluène.

-M4=une masse de clinker

-M5=masse de pycnomètre contenant une masse (M4) de clinker et complété avec du toluène.

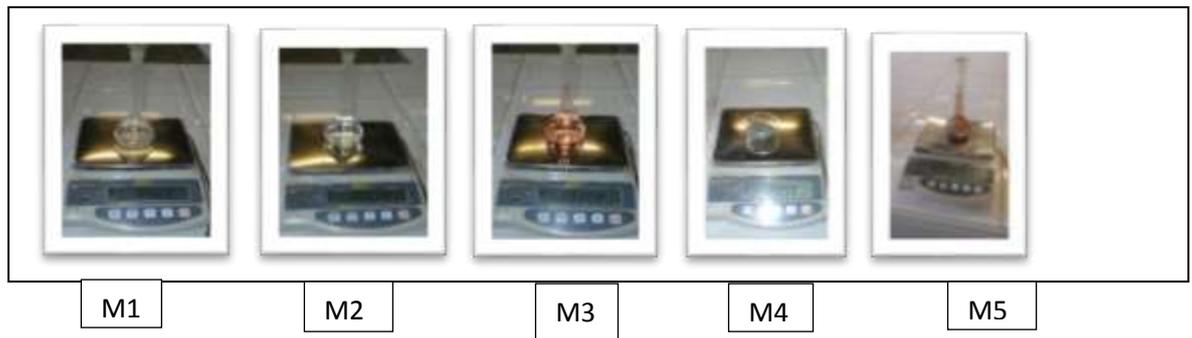


Figure IV.10 : conduite de l'essai

❖ Principe de l'essai :

On opère en comparant la masse (M_c) d'un volume connu de clinker (V_c) à la masse (M_t) d'un même volume d'un liquide dont la masse volumique (ρ_t) est connue. La masse volumique du clinker (ρ_c) :

$$\rho_c = \rho_t \frac{M_c}{M_t}$$

IV.I.1.3.Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut donc préciser: masse volumique apparente à l'état compacté ou masse volumique apparente l'Etat non compacté.



Figure IV.11 : Essai de masse volumique apparente



Figure IV.12 : Une règle

IV.I.1.3.Essais de consistance :

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Deux essais normalisés permettent d'apprécier cette consistance :

- l'essais de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme **EN 196-3**.
- l'essais d'écoulement au cône, conformément à la norme **NF P 18-358**

I.1.3.1.Détermination de la consistance normalisé avec l'appareil de Vicat (EN 196-3) :

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées .L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite "**consistance normalisée**".

- Principe de l'essai :

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante .L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée "**consistance normalisée**".

- Equipement nécessaire :

- Une salle maintenue à **20°C ±2 °C** et à une humidité relative d'au **moins 65%**
- Une malaxeur décrit dans la norme **EN 196-1 (figure 4.1)** .Ce malaxeur est muni d'une cuve de **5 litres** de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente et rapide) : **140 et 285 tr/min**.
- Un appareil de Vicat. L'appareil schématisé sur la **figure 4.2**est pour l'essentiel composé d'un moule tronconique de **40 mm** de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une

CHAPITRE-IV : CARACTERISATION PRELIMINAIRE DES CONSTITUANTS

sonde d'un diamètre $\varnothing=10$ mm .La partie coulissante a une masse totale de 300 g (y compris la sonde amovible).

- Une balance permettant de peser à 1 g près



Figure IV.13: Malaxeur



Figure IV.14: Appareil de consistance Vicat



Figure IV.15: Balance précise à 0.001 g près



Figure IV.16: petite truelle et tube gradué

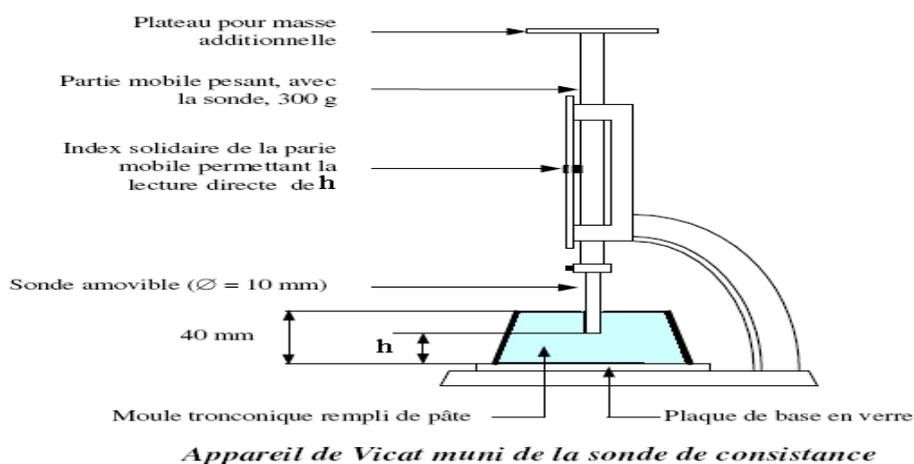


Figure IV.17 : Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance

- **Conduit de l'essai :**

500 g de clinker sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au clinker en un temps compris entre 5 et 10 seconde : par exemple 125 g (auquel cas $E/C=0.25$).

Mettre immédiatement le malaxeur en route à vitesse lente pendant 90 s Arrêter la machine pendant 15 s et ramener ,dans la gâchée, avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au-delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90 s à vitesse se lente.

Tableau IV.1 : opérations de malaxage sont récapitulées

Opérations	Introduction de clinker	Introduction de l'eau		Raclage de la cuve	
Durée des opérations	/	5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat de malaxeur	Arrêt	/	Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

La pâte est alors rapidement introduit dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenance perpendiculaire à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur platine de l'appareil de Vicat.

Quatre minute après le début du malaxage la sonde est amenée à la surface supérieure de la pâte et lâchées sans élan. La sonde d'enfonce alors dans la pâte .quand la sonde s'immobilise ou au plus tard 30 secondes après avoir relâchée. On mesure la distance d entre l'extrémité de la sonde et à fond du moule (**Figure IV.17**). Cette distance d caractérisé la consistance Si $d=6\text{ mm}\pm 1\text{ mm}$, la consistance est la consistance normalisée. Si d n'atteint pas cette valeur, il convient de refaire l'essai avec valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

I.1.3.2.Essai de Prise :

- **Mesure des temps de début et de fin de Prise (EN 196-3) :**

Le début de Price dépend de plusieurs paramètre ; il varié notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture du clinker étudié ; il dépend aussi de la température ambiante et , le cas échéant, des dosage en adjuvant .utilisé à une même température et sans adjuvant deux ciment déférente pourront se distinguer par une plus ou moins grande de rapidité de Price .L'objectif de

l'essai est de définir , pour un ciment donnée, un temps qui soit significatif de cette rapidité de Price.

- **Principe de l'essai :**

L'essai de consistance à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisé : l'appareil utilisé est l'appareil de **Vicat** équipé d'une Aiguille de **1.13 mm** de diamètre .quand, sous l'effet d'une charge de **300 g** l'aiguille s'arrête à une distance **d**, Du fond du moule telle que : **d= 4 mm ± 1 mm** ; On dit que le début de Price est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage est appelé "**Temps de début de Price**"

Le temps de fin de Price est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de **0.5 mm**

- **Equipement nécessaire :**

-salle climatisé .L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de **20°±1 °C** et dont l'humidité relative soit supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra entre deux mesures être entreposé dans de l'eau maintenue à **20°C ±1°C**

-Malaxeur normalisé (Figure IV.13).

-Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13 mm (Figure IV.18).

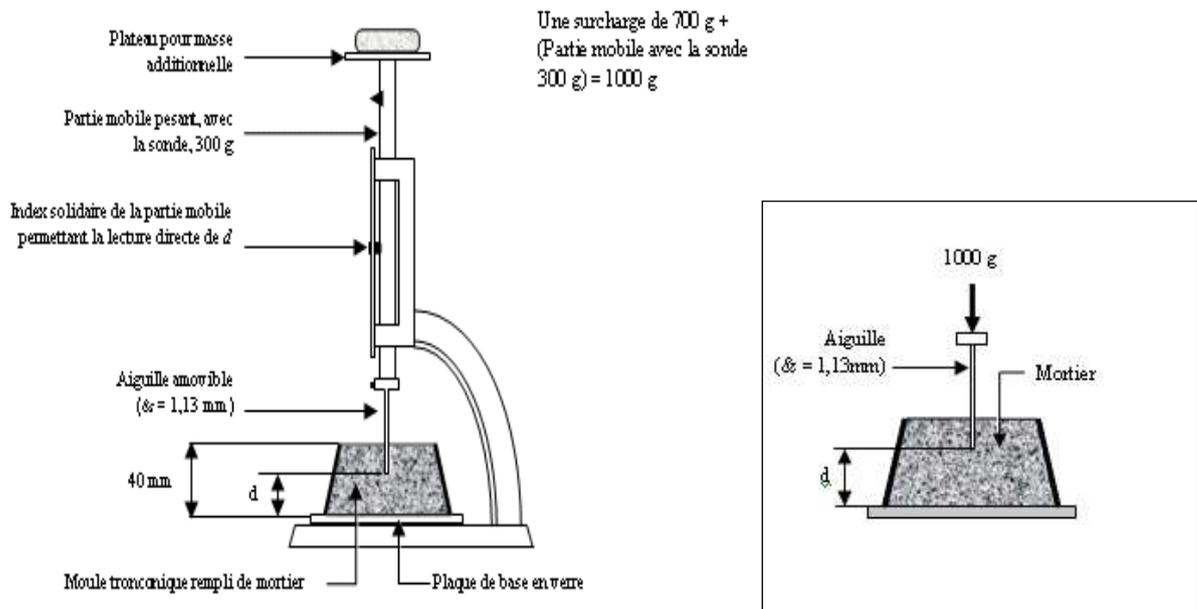


Figure IV.18 : Détermination du temps de Prise

- **Conduite de l'essai :**

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme **EN 196-3**

Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée comme indiqué au l'essai de consistance. Le temps zéro est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au clinker dans la cuve du malaxeur. La pâte, une fois malaxée, est introduite dans le moule tronconique comme indiqué pour l'essai de consistance. L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base (Figure IV.18). Recommencer l'opération à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d=4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Cet instant mesuré à 5 min près est le temps de début de Price pour le clinker concerné.

Retourner le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de Price de façon que les essais de fin de Price soient faits sur la face du moule primitivement en contact avec la plaque de base. Munir l'aiguille d'un accessoire annulaire pour faciliter l'observation précise des faibles pénétrations.

Enregistre à 15 min le temps au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus pour la première fois à 0.5 mm l'éprouvette comme temps de fin de Price du clinker étudié. Ce temps est celui au bout duquel l'accessoire annulaire cesse de laisser une trace sur l'éprouvette.

Le clinker utilisé dans le cadre de la présente étude provient de la cimenterie d'Ain Touta (wilaya de Batna) les caractéristiques récapitulées au tableau suivant :

Tableau IV .2 : Caractéristiques physiques du clinker.

Caractéristique physiques		valeurs
Masse Volumique Apparente (g/cm^3)		1
Masse volumique Absolue (g/cm^3)		3,01
Surface spécifique (BLAINE) (cm^2/g)		5000
Réactivité	Temps de début de prise (heures)	24 min
	Temps de fin de prise (heures)	1 h 45 min
La consistance normalisée		30%

IV.I.2.Caractérisation du laitier granulé du haut fourneau :

IV.I.2.1.Caractérisation du laitier granulé du haut fourneau :

Par le même principe au-dessus de clinker on va mesurer les caractéristiques du laitier.

Le laitier utilisé est un laitier naturel de provenance du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf), Dans notre programme expérimental nous avons utilisés du laitier naturel dont ces caractéristiques sont les suivants :

Tableau. IV .3: Caractéristiques physiques du laitier naturel.

Caractéristique physiques	valeurs
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	0.91
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2.92
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	5000
Consistance normalisé	29%

IV.I.2.2.Réactivité du laitier granulé du haut fourneau :

Tableau. IV.4 : Réactivité du laitier granulé du haut fourneau

Matériaux	Activé par H ₂ O		Activé par CA(OH) ₂ 8% (en masse)	
	Début de prise	Fin de prise	Début de prise	Fin de prise
Réactivité du laitier	3 h et 06 min	/	1 h 34 min	2 h 46 min

IV.I.3.Caractérisation de la pouzzolane:

Par le même principe au-dessus de clinker on va mesurer les caractéristiques de pouzzolane. La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf), Dans notre programme expérimental nous avons utilisés une pouzzolane naturelle dont ces caractéristiques sont les suivants :

CHAPITRE-IV : CARACTERISATION PRELIMINAIRE DES CONSTITUANTS

Tableau IV.5: Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle.

Caractéristique physiques	valeurs
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	0.89
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2.75
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	5000
Consistance normalisé	42%

Tableau IV.6: Réactivité de la pouzzolane naturelle.

Matériaux	Activé par H ₂ O		Activé par CA(OH) ₂ 8% (en masse)	
	Début de prise	Fin de prise	Début de prise	Fin de prise
Réactivité de Pouzzolane	RAS après 24h	/	1h et 57 min	6 h 10 min

IV.1.4. Caractérisation de plâtre :

Nous avons utilisé un gypse commercialisé ayant la caractéristique physique suivante :

Tableau IV.7 : .Caractérisation de Plâtre

caractéristique physiques	valeurs
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	0.69
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	2.50
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	4502

IV.1.5. Caractérisation de l'eau de gâchage :

L'eau de gâchage pour les bétons confectionnées, comme tous les pâtes, doit être potable, dépourvue des sels minéraux. L'eau utilisée (l'eau de robinet).

II. Caractérisation de la pâte de ciment témoin et substitué :

II.1. Caractérisation de la pâte témoin : (E/C =0.3) pour toute formulation :

Tableau IV.8 : Caractérisation de la pâte témoin:

Mélange	Mabs g/cm ³	Map g/cm ³	Finesse gr/cm ₂	
Pâte témoin	3.01	1	5000	
Réactivité	Début de Prise	44 min	Fin de prise	1 h 52 min

II.2- Caractérisation du mélange clinker-ajout minéral (laitier) :

II.2.1. Mélange :

dans le cadre de la présente étude en premier lieu nous avons élaboré des pâtes de ciments a base du clinker broyé a une finesse de **5000gr/cm²** avec ajout du laitier naturelle par des proportion de **10%,20% et 30%** de la masse du clinker et par après nous avons reformuler les mêmes pâtes mais avec une quantité de **5%** de **NAOH** en substitution du laitier.

Le système de codification est le suivant :

-**PT** : pâte témoin à 95% du clinker et 5% du gypse.

-**PS10** : pâte substitué à 85% du clinker +10%laitier +5% du plâtre.

-**PS20** : pâte substitué à 75% du clinker +20%laitier +5% du plâtre.

-**PS30** : pâte substitué à 65% du clinker +30%laitier +5% du plâtre.

-**PSA10** : pâte substitué activé à 85% du clinker +10%laitier (activé par 5% de sa masse en NAOH +5% du plâtre.

-**PSA20** : pâte substitué activé à 20% CAD 85% du clinker +20%laitier (activé par 5% de sa masse en NAOH +5% du gypse.

-**PSA30** : pâte substitué activé à 30% CAD 75% du clinker +30%laitier (activé par 5% de sa masse en NAOH +5% du plâtre .Dans le cadre de la présente étude les formulations sont élaborés pour un même rapport E/C =0.3

II.2. Caractérisation de la pâte substituée (ajouts activés laitier) :

Tableau IV.9 : Caractérisation de la pâte substituée par ajout laitier activés

Mélange	Mabs g/cm ³	Mapp g/cm ³	Finesse
PS10	2.92	1	5000
PS20	2.91	1	5000
PS30	2.89	1	5000

II.2.2.Equipement nécessaire :



Figure IV.19:Malaxeur



Figure IV.20 :
Balance



Figure IV.21 :
Chronomètre



FigureIV.22:Appareil de compression

II.2.3.Mode opératoire :

Les pâtes sont formulées conformément à la norme **EN 191.3**

les mélanges sont formulés dans le malaxeur de la consistance normaliser le mélange est mis en rotation pendant **90 minutes à vitesse lente** puis Arrêter la machine pendant **15 s** et ramener, dans la gâchées avec une petites truelle, la pâte adhérente à la cuve et se trouvent ou de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de **90s à vitesse rapide**.

- Moules :

Les mélanges sont conserver dans des moules de dimensions **de 2*2*2cm** voir les photos ci-joint pour le suivie de la résistance à la compression.



Figure IV.23: Les moules utiliser 2*2*2 cm

II.2.4.Mode de conservation :

-La première série de de formulation sont conservé dans une cure de **20°C** et une humidité de **100%**(dans l'eau) pour toutes les éprouvettes pour le suivie de la résistance à la compression en **2 j, 7j, 14j ,28 j, 60j** dans laquelle l'ajout est n'est activé.



Figure IV.24 : L'éprouvette du laitier avant l'écrasement



Figure IV.25 : L'éprouvette du laitier après l'écrasement

-La deuxième série de formulation sont conservé dans une cure de **20°C** et une humidité de **100%**(dans l'eau) pour le suivie de la résistance à la compression en **2j, 7j, 14j, 28 j** dans laquelle l'ajout (laitier) est activé par **5%** de sa masse en **NAOH**.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISSCUSSION

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Introduction :

Après avoir examiné les propriétés des différents matériaux, ce chapitre est consacré à présenter les différents résultats obtenus à partir des essais appliqués au laboratoire et la discussion

II.2. Réactivité du mélange (essais mécaniques) :

II.2.1. Ajouts non activé :

Les résultats obtenus par l'ajout non activé après l'écrasement de l'éprouvette:

Tableau V.1 : Evolution de résistance de la pâte de ciment substitué par le laitier non activé

RC (MPa) Age Jours	PT	PT10	PT20	PT30
2	26.66	26.60	23.33	18.33
7	40	34.16	27.5	25.83
14	47.5	42.5	34.15	33.75
28	50.83	43.33	32.32	34.11

2.1.2. Discussion des résultats obtenus :

- La résistance de 2 jours :

RC MPA



Figure V.01 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 2 j

Suite aux résultats obtenus nous avons constaté que l'augmentation du taux de substitution est inversement à la résistance à la compression e 2 j ou une substitution du clinker par 30% de laitier provoque un chute de résistance à la compression aux alentours de 31% par rapport à la

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

pâte témoin suite au caractère laitier de l'ajout en question .Toute fois nous signalons que l'ajout de **10%** de laitier n'a pas influe sur RC

- **La résistance de 7 jours :**

RC MPA

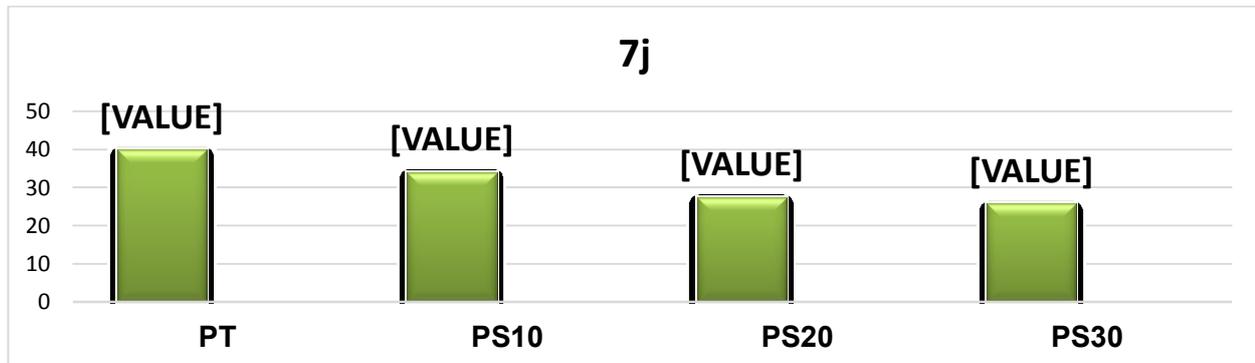


Figure V.02 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 7 j

Il s'est avéré que l'évolution de la résistance à 7 j à la même tendance celle de 2j mais à part l'augmentation de la résistance pour un taux de substitution de **20%** ce qui ne reflète pas les travaux ultérieur par contre cette dernière décroît à **35%**.

- **La résistance de 14 jours :**

RC MPA

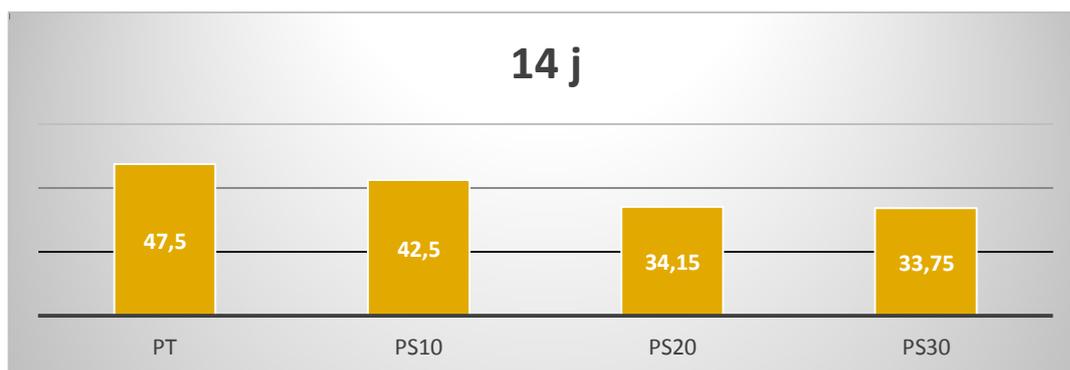


Figure V.03 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 14 j

L'examen de résistance à la compression à 14 j montre l'ajout du laitier pour le différent pourcentage à réduite la résistance à la compression des pâtes substitués en par rapport à une pâte témoin est ce tributaire de la réactivité latente de l'ajout.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

- La résistance de 28 jours :

RC MPA

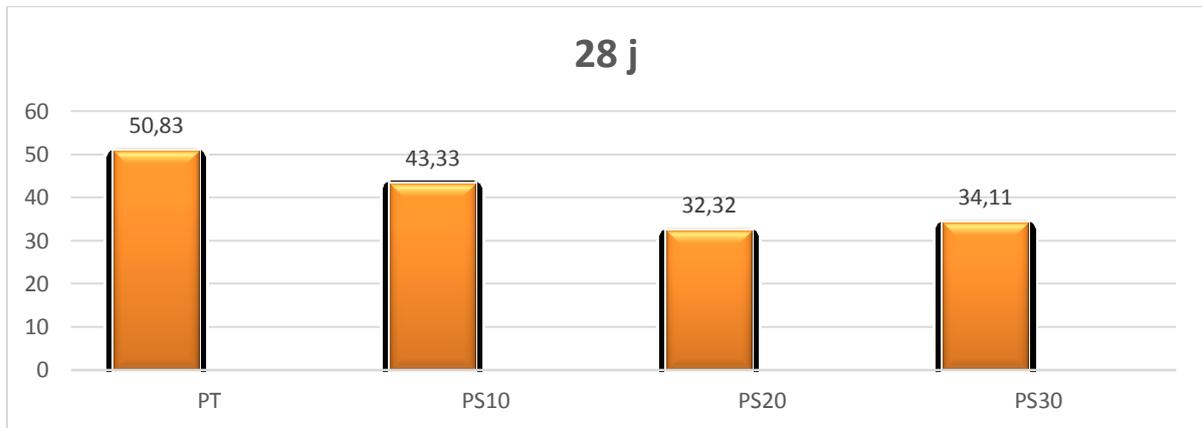


Figure V.04 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 28 j

Quel que soit le temps de substitution pendant le premier **28j** la résistance à la compression d'une pâte substituée **10%,20%,30%** est inférieure à celle témoin. Ou nous avons constaté une diminution de **15%,33%,37%** par rapport pâte témoin.

- La résistance de 60 jours :

RC MPA



Figure V.05 : Evolution de RC en fonction de % du laitier en 60 j

A l'âge de **60 j** la résistance à la compression du **PS30** dépasse celle d'une pâte témoin soit une augmentation de **9.73 MPA** mais la résistance à la compression du **PS10 et PS 20** reste toujours inférieure à celle témoin.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

➤ **récapitulatif :**

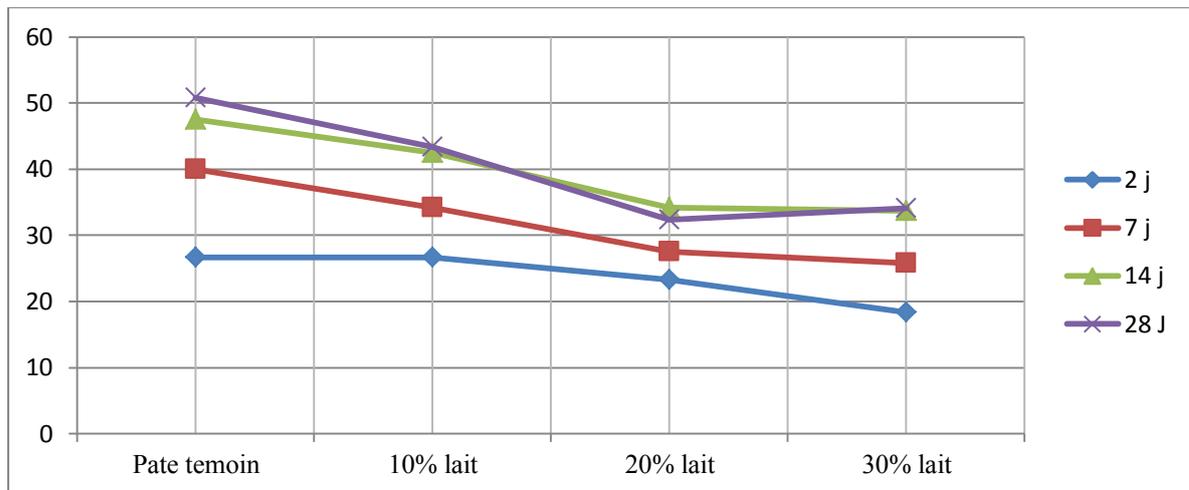


Figure V.06 : Evolution des 04 pâtes de ciment en fonction du temps pour 03 substitutions du laitier non activé

Conclusion :

Suite aux résultats trouvés nous signalons que substitution partiel du clinker par un laitier provoque une diminution directement proportionnelle au pourcentage du taux d'ajout sur la résistance à la compression des pâtes substitués quel que soit l'âge de cure est ceci est tributaire de la réactivité latente du laitier par rapport au clinker.

2.1.2 Ajouts activé NAOH:

Dans le cadre de cette partie nous avons reformulé les mêmes pates mais une partie de 5% de l'ajout (Laitier) est remplacé par sa masse en NAOH

1. Tableau Récapitulatif des Résistance en MPA :

Tableau V.2 : Evolution de résistance de la pâte de ciment substitué par le laitier activé par 5% NAOH

RC (MPa) Age Jours	PT	PSA10	PSA20	PSA30
2	26.66	40	36.01	32.08
7	40	35.41	29.81	32.01
14	47.5	48.33	40	42.5
21	50.83	62.5	61.45	60.41

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

2. Discussion des résultats obtenus :

- La résistance à la compression en 2 j ajout activé par 5% NAOH :

RC en MPA

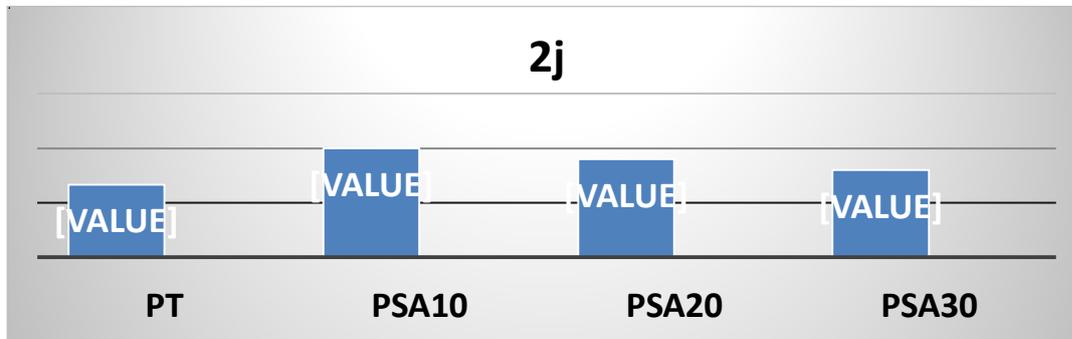


Figure V.07 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 2 j

L'introduction de la activation du laitier par 5% de sa masse en NAOH toutes pâte substitué développe un résistance à la compression supérieur à celle témoin ou un augmentation de 13% D'une Pâte substitué par 10% de NAOH comparé à une pâte témoin.

- La résistance à la compression en 7 j ajout activé par 5% NAOH :

RC MPA

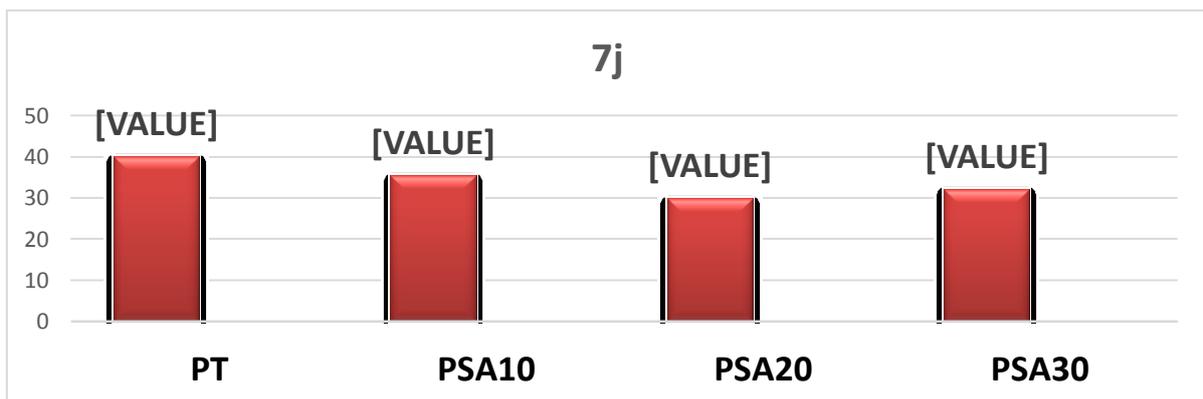


Figure V.08 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 7 j

La pâte substituée ne représente pas le même comportement avant.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

- **La résistance à la compression en 14j ajout activé par 5% NAOH :**

RC en MPA

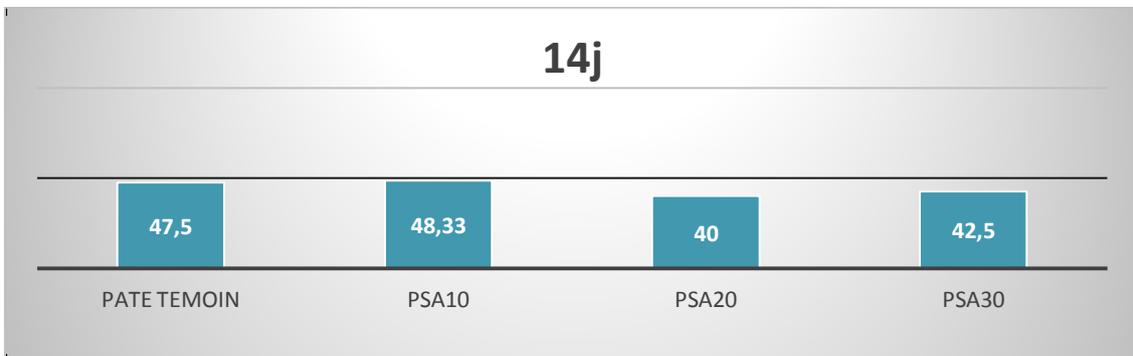


Figure V.09 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 14 j

La substitution de clinker par 10% de laitier ne diminue pas de la résistance de la pâte témoin. Par contre, il a été observé une diminution dans le temps de substitution 20 et 30%.

- **La résistance à la compression en 21j ajout activé par 5% NAOH :**

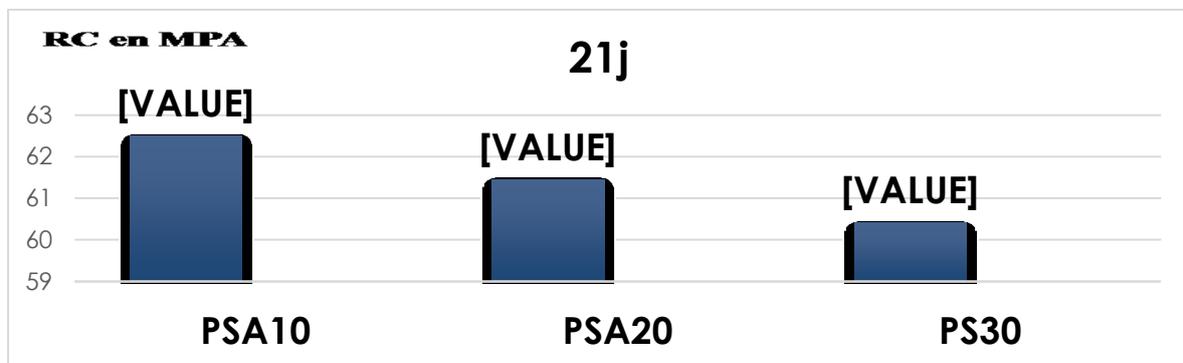


Figure V.10 : Evolution de RC en fonction de % du laitier activé par NAOH à 21 j

Les histogrammes montrent qu'il existe une augmentation de la résistance moyenne à la compression lorsque le ciment est substitué par le laitier activé par l'introduction de 5% de NAOH: le meilleur résultat a été obtenu avec la proportion suivante :

10% laitier (5% NAOH) ; 85% clinker ; 5% gypse .

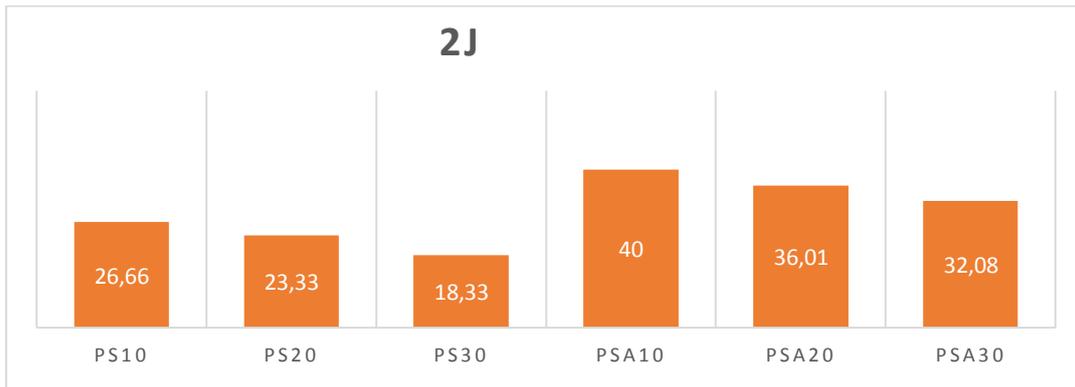
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

2.1.3. Comparaison des résultats :

Dans ce qui suit nous allons faire une comparaison entre la résistance à la compression trouvée dans le cas où l'ajout en question est non activé à celle activé.

A 2 jours :

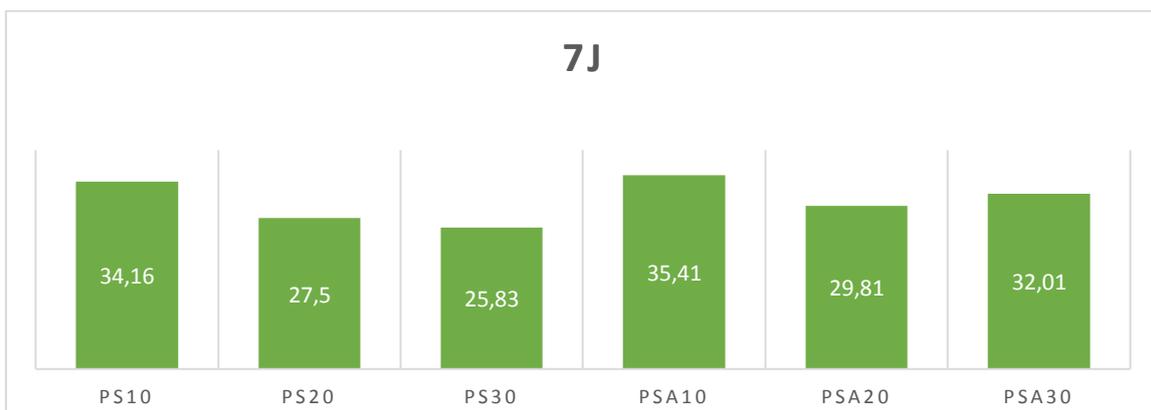
RC en MPA



L'examen de la courbe de résistance à la compression montre qu'une augmentation de **34%** a lieu pour une pâte substituée par **10%** en laitier activé (**PSA10**) par **NAOH** et ce pendant **2 j** comparable par rapport à la même pâte dans laquelle le même pourcentage d'ajout est non activé (**PS10**), a signalé que cette augmentation tend vers **43%** pour une pâte substituée à **30%** d'ajout.

A 7 jours :

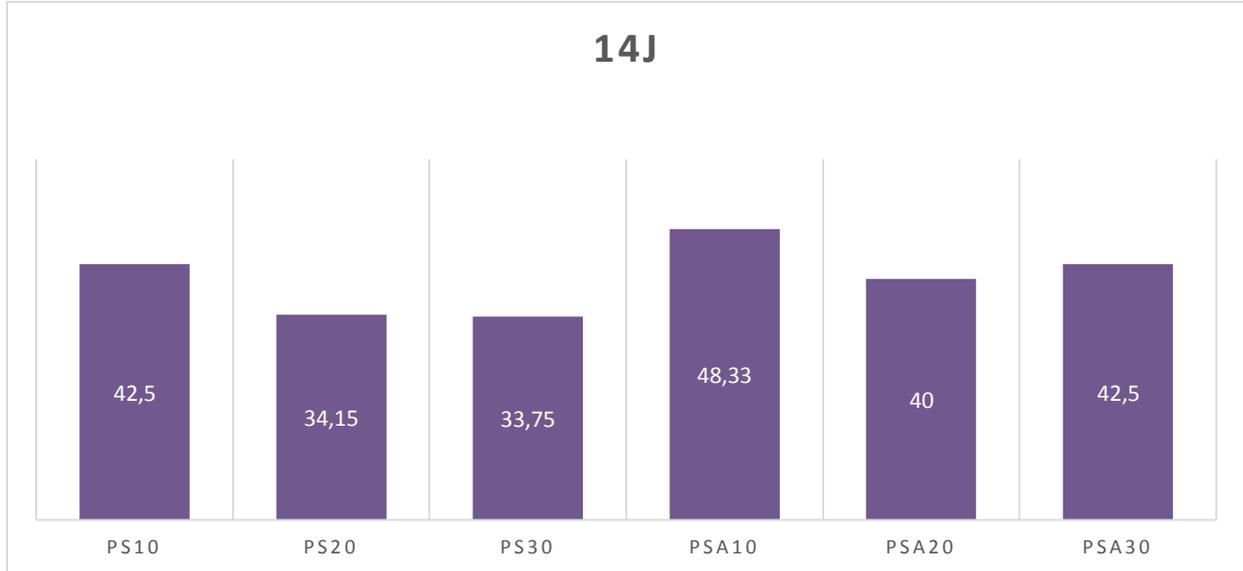
RC en MPA



A l'âge de **7 j** il s'est avéré que l'augmentation de la résistance ne dépasse pas **20%** pour une **PSA30** par rapport au **PS30** malgré que les résultats trouvés à **2 j** montrent une augmentation de **43%**.

A 14 jours :

RC en MPA



L'examen des tableaux cité ci-dessus montre qu'à l'âge de **14 j** toutes pâtes substituées par le laitier activé présente une résistance à la compression supérieure à celle substitué et non activé par **NAOH** quel que soit le taux de substitution.

III.Conclusion :

L'ajout du laitier en substitution du clinker par des pourcentages croissants de **10%, 20%, 30%** conduit à une diminution de la résistance à la compression à court et moyen terme à cause de la propriété hydraulique latente du laitier, mais à long terme nous signalons un dépassement de résistance à la compression des pâtes substitués (âge **60 j**).

CONCLUSION GENERALE

L'étude en question vise la Valorisation des sous-produits locaux dans l'industrie du ciment portland.

Après avoir passé par une partie bibliographique dans laquelle nous avons élaboré une base scientifiques concernant le sujet de recherche.

Nous avons passé à un programme expérimental qui a pour objet et substitué par un taux croissant d'ajout soit 10%,20% et 30 % du laitier.

Suite aux travaux de recherche effectuée on peut conclure ce qui L'ajout du laitier en substitution du clinker par des pourcentages croissants de 10%, 20%, 30% permet de conduire à une diminution de la résistance à la compression à court et moyen terme à cause de la propriété hydraulique latente du laitier ,mais à long terme nous signalons un dépassement de résistance à la compression des pates substitués(âge 60 j) par ailleurs une fois le laitier est active par le NAOH le déficit de résistance peut être rattrapé et ce à court terme.

Bibliographié :

- [1] H.F.W. Taylor, (1998),Cement chemistry. Thomas Telford publishing.
- [2] Denis Tremblay ,(1994),Livre : de ciment portland.Denis Tremblay.
- [3] Eyrolles, 1993,Ciments Français, La fabrication des ciments..
- [4] Cyril Guérandel(2009), Matériaux cimentaires et adjuvants organiques : état de l'art de la lixiviation.thèse de doctorat.
- [5] Taylor, J.R., and Dinsdale, A.T., Calphad, 1990. **14**(1): p. 71-88.
- [6] C. Guerandel, E. Moudilou, and S. (2006),Tusseau-Nenez and M. N. De Noirfontaine, Modélisation thermodynamique du diagramme de phases du système CaO-SiO₂-Al₂O₃. rapport de fin d'étude.ESIREM/CTG-Italcementi Group.
- [7] H. Rumpf, Aufber. Techn., 1973. **2**: p. 59-71.
- [8] A. A. Griffith, (1921)The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc, **163-198**.
- [9] H. Dombrowe, B. Hoffman, and W. Scheibe,(1982) Mode of action and possibilities for use of grinding aids. ZKG International, p. 571-580.
- [10] P. Blazy, J. Yvon, and E. A. Jdid, Fragmentation(1992) : Généralité, Théorie. Techniques de l'ingénieur..
- [11] M. S. BOUGLADA. (2007-2008),Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier Mémoire de Magister. Université de M'sila.
- [12] A.MEBROUKI (2003)«influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem .
- [13] A. ALI AICHOUBA. (2005)Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire. Thèse de magister. IGCM ORAN.
- [14] S. MANSOUR, M. GHRICI, M . KENAI.(2005) Effets de la combinaison de la pouzzolane et du calcaire sur les propriétés des mortiers et bétons. Congre international sur la Réhabilitation des Constructions et Développement Durable.
- [15] B. C. BENI-REMOUR. (1993)Matériaux pouzzolainique: étude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane. Mémoire de fin d'étude ingénieur - IGCM ORAN.
- [16] Tf-ciment_de_haut_fourneau_gris_cem.pdf.

- [17] Saint Nazaire ,(2007),ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DU RETRAIT ENDOGENE AU TRES JEUNE AGE DES PATES DE CIMENT AVEC ET SANS INCLUSIONS.Thèse de Doctorat.
- [18] Acker P., Retraits et fissurations du béton. Documents scientifiques et techniques, Association Française Pour la Construction (AFPC), 1992, 42 p.
- [19] **Cimbéton ,2006**, CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS, «Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » G 11 Collection technique Cimbéton . <http://www.infociment.fr>
- [20] Aïtcin P.C. (2001), Bétons Hautes Performances, édition Eyrolles, Paris, 683
- [21] Arroudj K., Oudjit M.N. (2002), Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments, 2^{ème} Colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 décembre, 119-127.
- [22] Arroudj K., Oudjit M.N., Lanez M. and Carayon M.T. (2004), Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des CSH de seconde génération. 1^{ère} séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes, 18-19 septembre - Hôtel Hilton Alger, 1-8.
- [23] Appa Rao G. (2001), Development of strength with age of mortars containing silica fume. Cement and Concrete Research, vol.31 (81), p.1141-1146.
- [24] Bessa A. (2004), Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers. Thèse de Doctorat de l'université de Cergy pontoise.
- [25] Bouchouika A. (2002), Etude physico-chimique et mécanique des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux. Mémoire de Magister. ENTP.
- [26] Bogue R.H. (1955), Chemistry of Portland cement. (New York, Reinhold).
- [27] Benezet J.C. and Benhassaine A. (1999), The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. Powder Technology, vol.103, p.26-29.
- [28] Benezet J.C. (1997), Réactivité pouzzolanique dans le système quartz-oxyde de calcium-eau. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II.
- [29] Benezet J.C., Benhassaine A. (1999), Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 219, pp. 17-28.
- [30] Cyr M. (1999), Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices. Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse.

- [31] Cyr M., Lawrence P., Ringot E. (2006), Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*, vol.36, p.264-277.
- [32] Cyr, M.; Lawrence, P.; Ringot, E. and Carlesgibergues, A. (2000), Variability of efficiency factors characterising mineral admixtures. *Materials and Structures*, 33(7), p. 466–472.
- [33] Cheng-Yi Huang and Feldman R.F. (1985), Hydration reactions in Portland cement silica fume blends. *Cement and Concrete Research*, vol.15 (4), p.585-592.
- [34] De Larrard F. (1988), Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances. Thèse de Doctorat de l'ENPC, rapport de recherche LPC n°149, France.
- [35] Guettala S., Mezghiche B. (2006), [L'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances mécaniques et de durabilité des pâtes.](#) Séminaire International sur la Normalisation et Qualité dans la Construction, 18-19 Novembre, 128-138, Tlemcen.
- [36] Guettala S., Mezghiche B. and Belounnar B. (2007 a), L'influence de la teneur du ciment en sable de dune finement broyé, sur les caractéristiques du béton. Séminaire National sur la Gestion Intégrée des Déchets - Thème III, 29 et 30 Mai, 195-202, ENSET d'Oran.
- [37] Guettala S., Mezghiche B. and Chebili R. (2007 b), Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete. *World Journal of Engineering* 4 (1) 45-53. CANADA.
- [38] Jiang S. et Van Damme H. (1996), Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C_3S . Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Oriéans.
- [39] Kara Ali R. (2002), Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires. Thèse de Doctorat de l'université de Cergy pontoise.
- [40] Kronlof A. (1994), Effect of very fine aggregate on concrete strength. *Materials and Structures*, vol.27 (1), p.15-25.
- [41] Kwan A. K. H. (2000), Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidates concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.27 (4), p.620-627.

- [42] Lawrence P., Cyr M., Ringot E. (2003), Minéral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, vol.33 (12), p.1939-1947.
- [43] Lawrence P. (2000), Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires. Thèse de Doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse.
- [44] Lawrence P., Cyr M., Ringot E. (2005), Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research*, vol.35, p.1092-1105.
- [45] Lilkov V., Dimitrova E., Petrov O. (1997), Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: The first 24 hours. *Cement and Concrete Research*, vol.27 (4), p.577-588.
- [46] Menendez G., Bonavetti V. and Irassar E.F. (2003), Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites* 25.
- [47] L. Zeghichi, B. Mezghiche1, A. Merzougui,(2006-2007) L'INFLUENCE DE L'ACTIVATION DU LAITIER SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS.
- [48] Pascal P. (1965), Nouveau traité de chimie minérale (Silicium). Tome VIII, 2^{ème} fascicule. Paris, Masson, pp.2-90 et 423-445.
- [49] Mme Ginette Arliguie Professeur, UPS(2012) ,Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.Talouse.
- [50] Mio, H., Kano, J., Saito, F., Kaneko, K., (2012).Effects of rotational direction and rotation-torevolution-speed ratio in planetary ball milling, *Materials science and engineering AStructural Materials Properties Microstructure and Processing*, A332, pp 75-80.
- [51] D'APRES PIERRE CASSAT (2013).« MECANISME DE FIXATION DES ALCANOLAMINES SUR LES PHASES MINERALES DU CLINKER »,