

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -
معهد التكنولوجيا

Département de Génie de Procédés

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme

De Licence professionnalisant en :

Génie de la Formulation

Thème

Etude de faisabilité d'augmenter la résistance du ciment
(CPJ) de 42.5 à 52.5 à base d'un ajout calcaire de
"Sour El Ghozlane"

Réalisé par : Mostefa daouadji Brahim

Encadré par : M^{me} Chelabi

Tuteur de l'entreprise :

Mamari Fouzia

Société des ciments de Sour El Ghozlane

Année Universitaire : 2017/2018

Remercîments

Je veux adresser mes vœux de remerciements à ma promotrice M^{me} Chelabi, pour leur disponibilité et leur pertinentes orientations ; aussi elles ont été attentives à l'évolution de mes études et ont apporté toute leur contribution pour mener à bien mon travail.

Je remercie sincèrement M^{me} Djazya, M^r abd el Karim, M^r Mahmoud qu'ils sont me dirigés durant le stage pratique au sein de la SCSEG ; aussi ils me ramènent tous les informations nécessaires et intéressantes.

Je tiens à remercier profondément Tous les enseignants de l'institut de technologie qui me donnent le plus possible et plus riche informations pour avoir une bonne compétence durant tous les années universitaires.

ملخص

تعمل مخابر البحث على تطوير وتحسين مكونات اسمنتية جديدة وهذا بهدف تحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية للإسمنت ان ديمومة الاسمنت تتغير مع مكوناته.

يهدف هذا البحث الى دراسة الخواص الفيزيائية والكيميائية وديمومة الاسمنت الذي يحتوي على الكلس مما يسمح لنا معرفة الكمية اللازم اضافتها لتحسين خواص الاسمنت.

اثبت النتائج التأثير الإيجابي لاستعمال الكلس بكمية قليلة (10% من الكلس) على تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية للإسمنت على المدى البعيد.

Résumé

Les laboratoires de recherche travaillent sur le développement de nouveaux constituants cimentaires dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des ciments. La durabilité du ciment change en fonction de sa composition.

Cette étude a pour but d'évaluer les performances des ciments à base d'ajout calcaire, du point de vue résistance mécanique et durabilité. Ceci permettra de sélectionner le bon pourcentage à ajouter pour améliorer les performances du ciment.

Les résultats montrent que les ciments à base de calcaire avec une petite quantité (10 % calcaire), contribue à l'amélioration de la résistance à long terme.

Abstract

The research laboratories work on the development of new cementitious composites with an aim of improving the mechanical and physical properties of cement. The durability of cement changes according to its composition.

The aim of this study is to examine the performances of cements containing limestone and the effects of the slag on from performances of cements containing limestone the mechanical resistances point of view and durability. This will make it possible to select the optimum limston most effective.

The results show that the incorporation of 10 % of limestone in cements containing contributes to the improvement of resistance at long term.

Table des matières

Introduction	01
--------------	----

Chapitre 01

Présentation de la société SCSEG

1. Présentation de la société de ciment de Sour el ghozlane (SCSEG)	02
1.1. Historique	02
1.2. Présentation le lieu de société	02
1.3. Les gisement	03
1.4. L'organisation	03
1.4.1. La direction générale	03
1.4.2. La direction de finance	03
1.4.3. La direction des ressources humaines (DRH)	03
1.4.4. La direction d'exploitation	03
1.4.5. La direction commerciale	03
1.5. L'appréciation des moyens de production	03
1.6. Missions du Groupe GICA	04
1.7. L'organigramme	05

Chapitre 02

Les procédés de fabrication du ciment

1. Historique	07
2. Définition du ciment	07
2.1. La principale catégorie du ciment	08
2.1.1 Classification des ciments en fonction de leurs compositions	08
2.1.2 Classifications des ciments en fonction de leur résistance	08
3. Le procédé de fabrication de ciment au sein de la SCSGE	09

3.1.	Le ciment portland (CPA)	09
3.2.	La fabrication du ciment	09
3.2.1.	Extraction	10
3.2.2.	Préparation du cru	10
3.2.3.	La cuisson	10
3.2.3.1.	Les étapes de clinkérisation	11
3.2.4.	Le refroidissement	13
3.2.5.	Le broyage	13
3.2.6.	L'expédition	14

Chapitre 03

Matériaux et méthodes

1.	Introduction	15
2.	Matériaux utilisées	15
2.1.	Le ciment	15
2.1.1.	Le clinker	15
2.1.2.	Le calcaire	16
2.2.	Le sable	17
2.3.	L'eau	17
3.	Exploitation de l'expérience	18
3.1.	Préparation des mortiers « NF P15-402 »	18
3.2.	Conservation	19
4.	les analyses physico-mécaniques	20
4.1.	Résistance à la traction par flexion	20
4.2.	Essai de la résistance à la compression	21
4.3.	Finesse Blaine (SSB) « NF EN 196-6 »	22

4.4.	Le refus	23
5.	L'analyse chimique	24
5.1.	Indice de la perte au feu	24

Chapitre 04

Analyse des résultats expérimentaux

1.	Exploitation des résultats obtenus	
2.	Effet sur la porosité capillaire	26
3.	Temps de prise	27
4.	Effet sur les résistances mécaniques	29
Conclusion		28
Références Bibliographiques		29
Annexes		31

Liste des tableaux

Tableau 1 : les machines au niveau de la carrière.	04
Tableau 2 : les machines au niveau de l'unité de production.	04
Tableau 3 : les capacités des machines au niveau de l'unité de production.	04
Tableau 4 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197-1.	09
Tableau 5 : composition chimique des clinkers portland.	12
Tableau 6 : Composition minéralogique des clinkers.	12
Tableau 07 : les compositions chimique du clinker utilisé.	15
Tableau 08 : les compositions minéralogiques du clinker utilisé.	16

Liste des figures

Figure 01 :	Four rotatif	10
Figure 02 :	Four rotatif pour l'étape de la cuisson.	12
Figure 03 :	Le refroidisseur	13
Figure 04 :	Silos de stockage	14
Figure 05 :	Silos d'homogénéation.	14
Figure 06 :	Le produit final en sac de SCSEG	14
Figure 07 :	Sachet de sable normalisé utilisé (EN 196-1).	17
Figure 08 :	Le gypse	18
Figure 09 :	Le calcaire	18
Figure 10 :	Le clinker	18
Figure 11 :	Le malaxeur	19
Figure 12 :	Un mortier contient 3 éprouvettes de forme prismatiques 4×4×16 cm.	19
Figure 13 :	Enceinte climatique pour conservation des éprouvettes.	20
Figure 14 :	Essai de la résistance par flexion.	21
Figure 15 :	Essai de la résistance à la compression	22
Figure 17 :	Principe de fonctionnement de la technique de Blaine.	23
Figure 18 :	Tamis pour l'essai de refus.	24
Figure 19 :	principe de fonctionnement de l'essai de temps de prise.	25
Figure 20 :	Evolution du facteur de refus avec le pourcentage de calcaire.	26
Figure 22 :	Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage du calcaire.	28
Figure 23 :	Représentation schématique du phénomène de prise dans le ciment portland.	29
Figure 24 :	Influence du pourcentage de calcaire sur la résistance mécanique.	30

Liste des abréviations

SCSEG : société des ciments de Sour El Ghozlane.

PDG : président directeur général.

DRH : direction des ressources humaines.

CPA : ciment portland sans ajout .

CPJ : ciment portland avec un ajout.

CHF : ciment de haut fourneau.

CPZ : ciment pouzzolanique (à base de pouzzolane).

CLC : ciment aux laitiers et aux cendres.

SSB : surface spécifique Blaine .

CaO : la chaux.

CSH : célicate calcique hydraté.

E.D.T.A : éthylène diamine tétraacetic acid.

E/C : Eau / ciment.

g : gramme.

s : second.

MPA : méga pascale.

t : temps.

T : température.

°C : degré Celsius.

V : volume.

Introduction :

Le ciment est en effet un matériau industriel très répandu, dans le secteur de la construction civile il est un élément nécessaire pour la réalisation des projets de construction dans les domaines industriels, économiques, sociaux.....etc.

Dans le milieu industriel en particulier dans le processus de fabrication du ciment, il y a toujours des problèmes, perte en matière, l'arrive pas à satisfaire les clients grâce un manque dans la production, dommage des équipements grâce à la réactivité des matières utilisées comme la pouzzolane.

Les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des ciments et de réduire la consommation d'énergie et augmenter la quantité de production.

Parmi les travaux plus fréquents, la recherche à améliorer la résistance mécanique et la durabilité du ciment portland par l'incorporation des ajouts cimentaires.

L'objectif de notre étude base sur l'effet de l'incorporation d'une addition minérale en particulier le calcaire.

La mise en œuvre de cette étude effectuée au sein de l'entreprise SCSEG « société cimentaire de Sour El Ghozlane » pendant 2 mois des que le 8/4/2018 au niveau de laboratoire contrôle de qualité.

Ce stage me donne une chance d'avoir premièrement plus large le milieu industrielle aussi l'aspect technique dans le travail à l'industrie puis comme étude j'ai pris assez information sur le processus de fabrication du ciment, j'ai eu la touche d'un chimiste lors de la manipulation.

Au niveau de laboratoire puis comme une nouvelle chose pour moi est l'exploitation de laboratoire mécanique et j'ai pris beaucoup d'information sur l'équipement mécanique, compréhension mode de travail et les analyses comment ils sont passé.

Mon stage au niveau de laboratoire d'analyses mécaniques, où le thème traité est l'évolution des facteurs mécanique par rapport au différent pourcentage d'ajout minérale « calcaire » ajouté à diffèrent mortiers des ciments.

Mon travail consiste à valorise ce type d'ajout « le calcaire » par leur incorporation au ciment avec différents pourcents 0, 10, 15,17 (%) ; Le programme expérimental sert à voir l'effet de l'incorporation du calcaire sur les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de nouveau ciment.

I. Présentation de la société de ciment de Sour El Ghozlane (SCSEG) :

I.1. Historique :

La réalisation de cette usine a été confiée à une société danoise FL Smidth, pour le compte de la SNMC (Société Nationale des Matériaux de Construction), les travaux ont débuté le 26 février 1980. La première production du clinker était le 25 septembre 1983 Suivie La première production du ciment s'est réalisée le 20 novembre 1983, et le 26 février 1984 était la date de la réception provisoire et le 26 février 1986 est la réception définitive de la cimenterie. Les capacités de production installées étaient 3000 tonnes de clinker/jour et de 1.000.000 tonnes de ciment/an. Le ciment produit est de type (CPA / CPJ) 42,5 Mpa .

Depuis 1998 la société du ciment de Sour el ghozlane issue du groupe ERCC, c'est transformé en filiale autonome chargé de la recherche, de développement de la production et de la commercialisation du ciment.

I.2. Présentation le lieu de société :

La cimenterie de Sour el ghozlane située à 120 Km au sud-est d'Alger et à 25 Km de Bouira, la société occupe une position géographique stratégique, elle assure ainsi la satisfaction des besoins en ciment de plusieurs wilayas.

Au nord : Alger média Tizi-Ouzou Bejaia.

Au centre : Djelfa Laghouat M'sila.

Au sud : Ghardaïa Tamanrasset Ouargla.

Capital social : 1.900.000.000.00 DA.

Capacité installé : 1.000.000 tonne /ans.

Activité principale : fabrication et commercialisation du ciment portland 42.5.

Partenariat : la société SCSEG est en partenariat depuis 2008 avec une société italienne BUZZI UNICEM (35% du capital).

I.3. Les gisements :

- La société possède une carrière de calcaire d'une superficie de 71 hectares, et qui a une Durée de vie de 50 ans ; quantité annuelle 1.200.000 tonne.
- Une autre carrière d'argile d'une superficie de 36 hectares et qui a une durée de vie de 50 ans ; quantité annuelle 70.000 tonne.
- le gypse : acheté de MEDEA ; quantité 50.000 tonne.
- Sable : acheté de Boussaâda ; quantité 50.000 tonne.

I.4. L'organisation :

L'entreprise comporte 5 directions liées à la direction générale.

I.4.1. La direction générale :

Elle est à la tête de la pyramide qui dirige et prend toutes les décisions nécessaires au développement de la société. Elle est dirigée par un président directeur générale (PDG).

I.4.2. La direction de finance :

Elle est divisée en 3 départements :

- Le département de finance de charge : financer des opérations d'achats de matière première.
- Le département de budget.
- Le département de comptabilité.

I.4.3. La direction des ressources humaines (DRH) :

Elle a pour but le recrutement et le licenciement des travailleurs, le suivi de bon, déroulement et la formation du personnel.

I.4.4. La direction d'exploitation :

Elle se décompose en 3 départements :

Département de production	département de maintenance	département d'approvisionnement.
---------------------------	----------------------------	----------------------------------

I.4.5. La direction commerciale :

Elle a pour but la maîtrise de la commercialisation des ciments et la réalisation des études techniques.

I.5. L'appréciation des moyens de production :

✓ **Carrière :**

- Carrière de calcaire.
- Carrière d'argile.

Tableau 1 : les machines au niveau de la carrière.

Machines	Sondeuses
	Chargeuses
	Dumpers
	Bulldozers

Tableau 2 : les machines au niveau de l'unité de production.

Machines	concasseur
	Silos de pre-homogenation
	doseurs
	Broyeur cru
	Silos d'homogenation
	four

Tableau 3 : les capacités des machines au niveau de l'unité de production.

la machine	Le rendement (tonne par heure)
Broyeur cru	140
Broyeur ciment	100
Four	3000

Pour le chargement de camions, l'usine possède 5 ensacheuses pour sacs de 100 t/h, et 2 gaines pour vrac de 100 t/h ; **la source** (departement de la formation).

I.6. Missions du Groupe GICA :

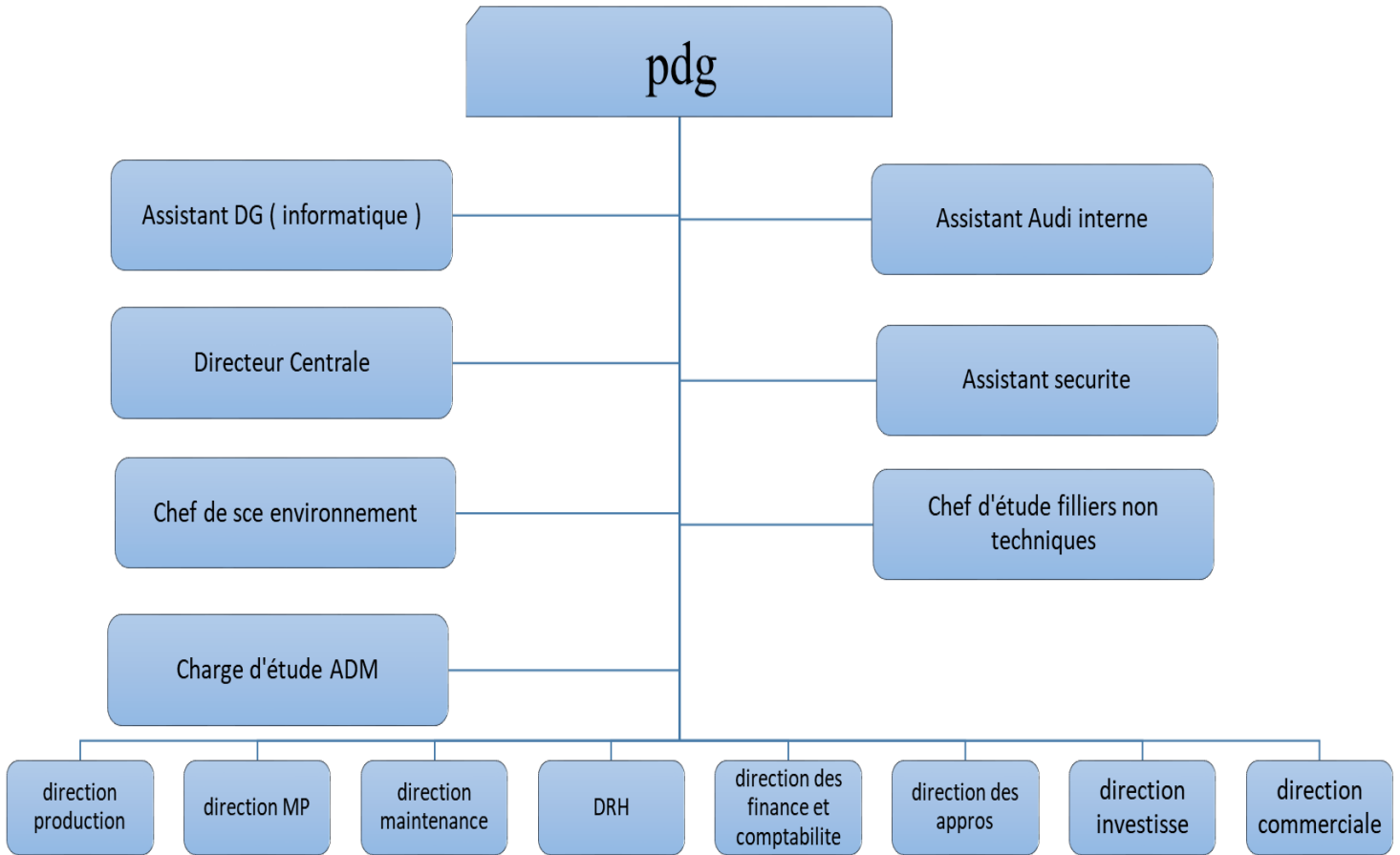
Les domaines et champs d'activité découlant pour l'essentiel des missions et prérogatives du groupe GICA, se résument à ce qui suit :

- La conception de la stratégie de développement du groupe en matière industrielle, commerciale, financière et ressources humaines des activités des ciments, granulats et béton prêt à l'emploi.
- L'élaboration et le suivi de plans (d'actions, recherches, et allocations financières...), afférente à la mise en œuvre de cette stratégie et assurer leurs actualisations le cas échéant.
- La gestion et la fructification du portefeuille d'actions et des participations détenues sur les entreprises affiliées.
- La promotion et le développement des activités dans le cadre des partenariats.
- La mise en œuvre de toutes les mesures appropriées, visant l'expansion du groupe.
- L'insertion harmonieuse de son activité dans le cadre de la protection de l'environnement et de la valorisation des ressources nationales.

Il détient à ce titre, une triple vocation : Industrielle, économique et financière, à travers, notamment, le pilotage, le suivi et le contrôle des actions liées, entre autres, aux programmes d'intérêt public, telles que :

- L'approvisionnement régulier en ciment, destiné notamment aux projets structurants, - Le développement durable,
- La participation aux actions de solidarité nationale, en cas de besoin. [1]

I.7. L'organigramme :



1. Historique :

L'utilisation de liants remonte à l'antiquité. Les égyptiens avaient découvert un liant calcique, obtenu par cuisson de roches calcaires. La chaux vive produite était préalablement éteinte par de l'eau. Son durcissement s'effectuait par carbonatation à l'air. Plus tard les romains ont introduit des cendres volcaniques (la pouzzolane) à la chaux vive. Ce matériau durcissait à température ambiante par ajout d'eau. Il souffrit cependant de la concurrence de la chaux et de la brique et resta peu utilisé. C'est seulement au XIX^{ème} siècle qu'apparut le ciment que nous connaissons. Il doit son essor aux travaux de recherche et la mise au point du ciment artificiel par Louis Vicat. Actuellement, le ciment est présent dans la plus part des édifices, c'est le matériau de base pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil. Il est devenu un matériau incontournable dans la construction.

Les premiers ciments hydraulique ont été utilisés par les romains ; ceux-ci notamment découvert que certain roches éruptives réagissent avec l'hydroxyde de calcium en formant un produit insoluble dans l'eau qui constitue un ciment hydraulique. La découverte des ciments hydrauliques utilisées actuellement en construction civile et assez récente puisqu'elle remonte à 150 ans environ. [2]

La production de l'industrie cimentière est directement liée à l'activité du secteur de la construction en général.

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Démarre en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériel nouveaux, comme le four rotatif et le broyeur à boulets. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse, et le temps nécessaire à produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, est passé de quarante heures en 1870.

2. Définition du ciment :

Le ciment (liants) sont des matériaux céramiques qui ont la propriété de durcir sous l'eau et de résister à l'action de l'eau. [3]

C'est un matériau de construction durable, versatile et totalement recyclable, le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite de réaction et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les cimenteries sont de gigantesques usines employant très peu de personnes et la fabrication est asservie par une informatique avancée en particulier ; l'ensemble des paramètres de contrôle est géré en continue, pour assurer une régularité maximale de la production.

Il existe deux grandes familles de Ciments :

- Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice et de chaux et qui utilisée Principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil.
- Les ciments alumineux, qui se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont Développés au début du 20^{ème} siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour

la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière.

Le ciment portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction [4]. On peut théoriquement fabriquer du ciment Portland à partir de matériaux renfermant de la chaux, de la silice, de l'alumine et du fer. Quel que soit son lieu de fabrication, le ciment Portland possède toujours, à quelques exceptions près, la même composition.

Cependant, cette simplicité apparente cache une série de réactions chimiques très complexe que l'on ne sait pas toujours expliquer de façon précise. On peut donc dire que les produits à base de ciment Portland sont le fruit d'une technologie simple et d'une science complexe.

2.1. Les principales catégories du ciment :

Les ciments sont définis par l'association de 2 symboles :

- ✓ l'un précisant la nature des constituants : [CPA, CPj ...]
- ✓ l'autre désignant la classe, c'est à dire la résistance en compression, exprimée en MPa d'un mortier normalisé à 28 jours d'hydratation : **52.5 ; 42.5** [5]

2.1.1. Classification des ciments en fonction de leurs compositions :

Les ciments constitués à base de clinker ; plus de 80 % et des constituant secondaire sont classées en fonction de leur compositions en 5 types par la norme NF P15-301 et ENV 197-1. [6]

- ✓ CPA : ciment portland artificiel.
- ✓ CPJ : ciment portland composée avec un ajout.

Les ciments composés, appelés CPJ, sont produits par les cimentiers en broyant ensemble le clinker, du gypse et l'ajout. L'ajout réduit le coût du ciment. [7]

- ✓ CHF : ciment de haut fourneau.
- ✓ CPZ : ciment pouzzolanique (à base de pouzzolane).
- ✓ CLC : ciment aux laitiers et aux cendres.

2.1.2. Classifications des ciments en fonction de leur résistance :

Trois classes sont définies en fonction de leur résistance normale à 28 jours ; ces classes sont notées classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5.

Les spécifications et valeurs garanties sont notées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197-1.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 197-1			
	2 jours	7 jours	28 jours	
			mini	maxi
32.5		17.5	30 / 32.5	≤ 52.5
42.5	10 / 12.5		40 / 42.5	≤ 62.5
52.5	28 / 30		50 / 52.5	

3. Le procédé de fabrication de ciment au sein de la SCSGE :

3.1. Définition du ciment portland (CPA) :

Le ciment portland est obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile.

En raison de la ressemblance de ce matériau artificiel avec la pierre calcaire de la péninsule Anglaise de Portland, celui-ci prend le nom de ciment Portland.

Le ciment Portland est fabriqué par cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile, le clinker obtenu est finement broyé et additionné d'une petite quantité de gypse (sulfate de calcium). L'ajout d'eau au mélange clinker + gypse (réaction d'hydratation) permet d'obtenir la pâte de ciment, qui rigidifie rapidement par le phénomène de prise. Ainsi, différents composés hydratés, tels les CSH, se forment au cours de l'hydratation, résultant de la réaction de l'eau avec les différentes phases anhydres constitutives du mélange initial. [8]

La production du ciment demande une grande quantité d'énergie (environ 3400 kJ pour 1Kg de clinker) issue de la combustion d'énergie fossile ainsi que de certain déchet. [9]

3.2. La fabrication du ciment :

La fabrication de ciment passe par les opérations suivantes :

- ✓ Extraction et concassage.
- ✓ Préparation du cru.
- ✓ Cuisson ou calcination.
- ✓ Broyage.
- ✓ Expéditions.

3.2.1. Extraction :

Le ciment est obtenu en mélangeant, dans des proportions calculées, les matières premières extraites de carrière ; (argile + calcaire).

L'extraction se fait Par abattage à l'explosif ou par ripage au bulldozer, les matières premières sont extraites des parois rocheuses de la carrière à ciel ouvert. Les blocs sont repris par dumpers ou bande transporteuse vers un atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

Les matières premières sont échantillonnées, La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). [10]

3.2.2. Préparation du cru :

Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns.

Passant à autre étape " pré-homogénéation" permet d'atteindre un dosage parfait de tous les constituants ce que résulte un mélange finement broyer et sécher et bien mélanger à fin de passer à la cuisson. [11]

3.2.3. La cuisson :

La farine cru, résultant du concassage, broyage et homogénéisation de la matière première, est introduite à l'extrémité supérieure d'un four en acier de forme cylindrique ; qui tourne à une vitesse de rotation de 1 tr/min ; avec un pré calcination, un gros brûleur est placé à l'extrémité inférieure du four afin d'avoir le clinker après les réactions de clinkérisation mise en œuvre dans le four rotatif. [12]



Figure 01 : four rotatif.

3.2.3.1. Les étapes de clinkérisation :

- ✓ $T < 200^{\circ}\text{C}$ déshydratation.
- ✓ $T < 800^{\circ}\text{C}$ préchauffage.
- ✓ $800^{\circ}\text{C} < T < 1100^{\circ}\text{C}$ décarbonatation.
- ✓ $1100^{\circ}\text{C} < T < 1300^{\circ}\text{C}$ formation des silicates et des aluminates.
- ✓ $1300^{\circ}\text{C} < T < 1450^{\circ}\text{C}$ fusion partiel des aluminates.

- **Déshydratation :**

- ✓ à 100 C° : évaporation de l'ordre de (eau) ;
- ✓ à 450 C° : départ de l'eau combinée à l'argile.

- **décarbonatation :**

Le calcaire (CaCO₃) est décomposé entre une température de 900 à 1000 °C en oxyde de calcium (CaO) et de gaz carbonique (CO₂). Ce dernier est évacué par la cheminée.



- **phase de transition :**

La chaux (CaO) obtenue réagit avec la silice, activée par la déshydratation de l'argile ou du schiste, et avec l'alumine. Jusqu'à 1200 C°.

Combinaison de CaO avec :

- la silice SiO₂ pour former du silicate bi calcique C₂S.
- L'alumine Al₂O₃ pour former une solution solide d'aluminates de calcium C₃A.

- **phase de cuisson :**

La température de la matière monte jusqu'à 1450 °C.

A partir de 1300 °C, on obtient la formation de C₃S résultant de la combinaison de C₂S et de la chaux résiduelle, au-dessus de 1300 C°, cette réaction est activée par l'apparition de la phase liquide qui contient les aluminates et les ferro-aluminates ; et qui sert à la formation du C₃S par combinaison du C₂S et la Chau libre. [13]

- Les silicates représentent environ 80 % du clinker (C₃S) celui qui sont responsable à la Résistance du ciment à 28 jours.
- Il faut noter que calcioaluminoferrite (C₄AF) n'a pas une composition chimique constante il s'agirait d'un mélange de deux produits C₂F et C₂A en proportion variable.

- **La composition chimique et minéralogique :**

La qualité du ciment portland dépend de sa composition chimique et minéralogique.

La composition chimique est généralement donnée sous forme d'analyse élémentaire en oxydes principaux ; leurs pourcentages massiques sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : composition chimique des clinkers portland.

Clinker	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
% en masse	62-68%	4-8%	2-5%	21-24%

Le clinker Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tri-calcique (C₃S) ; le silicate bi-calcique (C₂S) ; l'aluminate tricalcique (C₃A) et l'aluminoferrite tétra calcique (C₄AF).

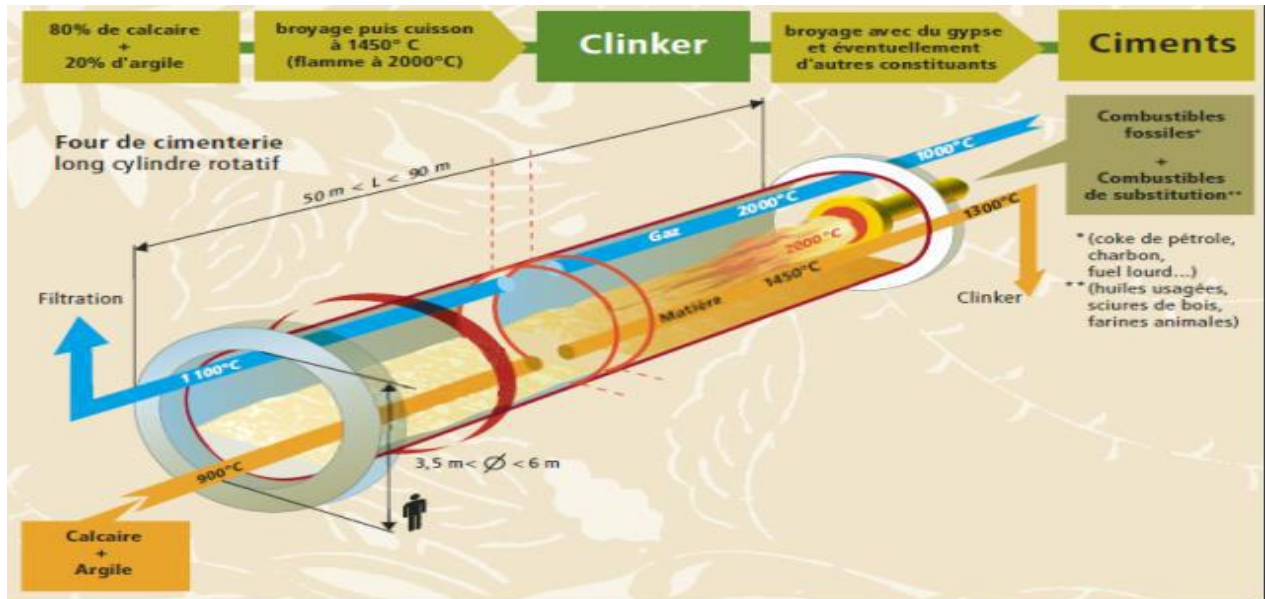


Figure 02 : four rotatif pour l'étape de la cuisson.

- **Calcul de la composition minéralogique du clinker :**

Sur la base de l'analyse chimique, R.H. BOGUE a élaboré une méthode pour calculer les compositions minéralogique du clinker. Les formules servant calculer la teneur en composants qui donne, à titre d'exemple pour un clinker ordinaire. [14]

3.2.4. le refroidissement :

La matière est refroidie brusquement de 1450 °C à environ 100 °C (la trempe) en quelques minutes. On obtient des granules de 5 à 25 mm de diamètre appelée clinker.

- 1450 à 1200 °C : refroidissement.
- 1200 à 80 °C : refroidissement totale et stabilisation de C3S « minéraux de bogue ».



Figure 03 : le refroidisseur.

3.2.5. le broyage :

Le clinker, additionné un peu de gypse (3 à 5 %) qui sert à régulateur de prise avec certains ajouts (calcaire ; pouzzolane) est réduit en poudre fine dans un broyeur à boulet. La finesse de mouture ; elle peut varier de 2700 à 4500 cm^2/g en surface spécifique Blaine.



Figure 04 : Silos de stockage



Figure 05 : silos d'homogénéisation.

3.2.6. l'expédition :

Les ciments quittent l'usine soit en sacs (92.81% de l'expédition) ou en vrac (7.19% de l'expédition).

- les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion. Ils contiennent généralement 50 kg de ciment et l'ensachage atteint fréquemment 100 tonnes par heure.
- Le ciment livré en vrac, il est transporté par camion-citerne.



Figure 06 : Le produit finale en sac de SCSEG

1. Introduction :

Ce travail a donc pour objectif d'étudier et mieux comprendre le comportement différé en nous focalisant sur l'influence des ajouts sur le paramètre physico-mécanique du ciment ; et plus particulièrement la résistance.

Le travail se fait par prendre 4 échantillon la différence dépend du pourcentage de Calcaire ajoutée à chaque échantillon ; avec une gâchée qui comporte : 450 g de ciment, 1350 g de sable et 225 g d'eau. Le rapport E/C est égal à 0.5 (constant).

2. Matériaux utilisées :

2.1. Le ciment :

- Le ciment utilisé dans tous les essais appartient à la classe ‘_CPA CEM I 42.5 ‘ et autre classe ‘ CPJ CEM II 42.5 ‘ de Sour El Ghozlane.

Pour le ciment « CPJ 42.5 » a été préparé :

- Préparation du ciment :
 - Prise de matière dont « clinker » + « gypse » + « calcaire » d'origine l'usine (SCSEG).
 - Tamisage pour avoir poudre fine par un tamis de 21 mm
 - Broyage billes de 30 g de chaque par un broyeur à deux billes.

2.1.1. Le clinker :

Le clinker est une roche artificielle utilisée comme matière première dans la fabrication du ciment Portland.

Il est obtenu par Un mélange de roches calcaires dures ou tendres et d'autres silico-alumineuses sont introduites sous forme de poudre, de pâte ou sous une forme intermédiaire dans une installation de cuisson. Le mélange progressivement déshydraté, décarbonaté et calciné, entre 1200 et 1500°C, en fusion partielle. Cette phase s'appelle clinkérisation.

La matière produite, le clinker Portland, est refroidie rapidement tandis que les fumées sont épurées par les électrofiltres. [15]

2.1.1.1. contrôle qualité du clinker :

- Dosage de l'oxyde de fer : (Fe_2O_3)

- Principe :

Le dosage de Fe_2O_3 est effectué par complexométrie au moyen de l'E.D.T.A à PH=1.5 en présence de l'acide salicylique comme indicateur à 50°C.

- Matériels utilisés :

- Fiolle 100ml.
- Bécher de 600 ml.
- Agitateur électrique.
- Plaque chauffante.
- Thermomètre.

- Calcule et expression des résultats :

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = V \text{ E.D.T.A (écoulé)} * T \text{ E.D.T.A} * 1.4286$$

- Dosage de l'oxyde d'aluminium : (Al_2O_3)

- Principe

Le dosage de l'alumine est effectué par complexometrie au moyen de l'E.D.T.A à PH=3.2, l'indicateur étant composé de complexonate de cuivre et de pyridil-azo-naphtol «PAN».

- Matériels utilisés :

Bécher de 600ml.

Agitateur électrique.

Bec maker.

- Calcule et expression des résultats :

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = V \text{ E.D.T.A (écoulé)} * T \text{ E.D.T.A} * 0.9107.$$

- Détermination de la CAO :

- Principe

Le dosage de la chaux est effectué par complexometrie au moyen de l'E.D.T.A, après un masquage des ions gênants, en présence du noir bleu au chrome comme indicateur à PH=12,5.

- Matériels utilisés :

Fiolle de 100ml.

Bécher de 600ml.

Agitateur électrique.

- Calcule et expression des résultats :

$$\% \text{CaO} = V_{\text{E.D.T.A (écoulé)}} * T_{\text{E.D.T.A}}$$

Détermination de la silice : SiO_2

- principe :

Peser P=1g de matière préalablement séchée à 110°C, introduire dans une capsule en porcelaine. Ajouter 2ml d'eau distillée et 5ml d'acide perchlorique HClO_4 . Mélanger avec une barette en verre jusqu'à obtention d'une coloration blanche.

Sécher au bain de sable jusqu'à la disparition des fumées blanches. Laisser refroidir puis ajouter 50ml d'eau distillée et 10ml de HCl 1/1.

Filter le contenu de la capsule en porcelaine sur un papier filtre rapide, dans une fiole de 500ml jusqu' 'a la disparition des chlorures (Essai par nitrates d'argent)

- Calcule et expression des résultats :

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{P_2 - P_1}{P} * 100$$

P_2 : Poids du creuset.

P_1 : Poids total du creuset après calcination.

P : Prise d'essai.

Tableau 07 : les compositions chimique du clinker utilisé.

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	PF
%	20	5	2	58-67	1.5

Tableau 08 : les compositions minéralogiques du clinker utilisé.

C₂S	C₄AF	C₃A	C₃S
35%	18%	14%	65%

Selon ces valeurs obtenues dans le tableau précédent on calcule des modules qui sont le résultat de nombreuses études sur les mécanismes de formation et de réaction du clinker du type portland.

L'ensemble de ces indices donne une idée sur la qualité du clinker obtenu.

Module hydraulique : (MH)

- MH est généralement compris entre 1,7 et 2,3.

Module silicique : (MS)

- MS est généralement compris entre 1,5 et 5.

Module aluminoferrique (A/F) : (MAF)

- MAF est généralement compris entre 1,5 et 2,5.

Facteur de saturation de chaux : (LSF)

- Ce module représente le rapport de la chaux présente dans le mélange et la quantité de chaux qui peut être lié dans le clinker.

LSF est généralement compris entre 0,85 et 1.

2.1.2. Le calcaire :

Le calcaire ($CaCO_3$) est un ajout inerte ; il ne donne aucun changement sur le comportement chimique du ciment ; il a but que d'augmentation la quantité de fabrication.

Il appartient de fillers qui sont des farines de roche obtenues par broyage les roches dures comme le quartz.

Le rôle principale de l'ajout calcaire est de charges minérale aussi il représente une certain activité physico-chimique ; il accélère l'hydratation du clinker, cet effet n'est cependant notable qu'au jeune Age ; les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de compose appelés carbo-aluminates ayant un certain pouvoir liant. [16]

2.1.2.1. Contrôle de qualité du calcaire.

Le mode opératoire :

- On pèse 0.5 g calcaire ; puis on ajoute 25 ml *HCl* de 0.5 N.
- On le place sur le bec pendant 3 min à ébullition ; on laisse le refroidir puis on rajoute 4-5 gouttes d'indicateur (phénol phtaléine) et on le titre avec NaOH de 0.25 N.

$$(N_s * V(HCl)) - (N_b * V(NaOH)) * 5.005$$

$$T_{(CaCO_3)} = \frac{\quad}{0.5} \quad . \quad \text{avec } N_s = 0.4847$$

$N_b = 0.2550$

$$T_{(CaCO_3)} = 92 \% .$$

2.2. Le sable :

Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé.

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.



Figure 07 : sachet de sable normalisé utilisé (EN 196-1).

2.3. L'eau

L'eau utilisée est l'eau potable du robinet.



Figure 08 : le gypse.



Figure 09 : le calcaire.



Figure 10 : le clinker.

3. Exploitation de l'expérience :

3.1. Matériels :

- Une Balance.
- Un Malaxeur.
- Une Machine vicat.
- Un Tamis.
- Encenite climatique.
- Un chronomètre des rondelles de papier filtre.
- Creuset en platine.
- Le cuve.
- Four à moufle.

3.2. Méthodes :

Préparation des mortiers selon la norme « NF P15-402 »

La mise en œuvre se fait par Préparation de 4 mortiers où ils ont diffèrent pourcentage de calcaire avec une quantité constante de gypse :

- Le mortier vaut un mélange de 450 g de ciment + 1350 sable + 225 d'eau
 - 1^{ere} mortier : (mortier temoin)
 - 450 g de ciment vaut 427.5 g clinker + 22.5 g gypse (sans calcaire) .
 - 2^{eme} mortier :
 - 450 g de ciment vaut 382.5 g clinker + 22.5 g gypse + 45 g calcaire .
 - 3^{eme} mortier :
 - 450 g de ciment vaut 360 g clinker + 22.5 g gypse + 67.5 g calcaire .
 - 4^{eme} mortier :
 - 450 g de ciment vaut 351 g clinker + 22.5 g gypse + 76.5 g calcaire .
- Puisque les différent constituant du mélange sont pesés on les malaxe Pour avoir la pâte du mortier, le malaxage se fait selon la norme « NF P18-403 ».



Figure 11 : le malaxeur



Figure 12 : un mortier contient 3 éprouvettes de Forme prismatiques 4×4×16 cm.



Figure 13 : Enceinte climatique pour la conservation des éprouvettes

3.3. Conservation :

Les éprouvettes sont conservées à ces conditions :

- La température de la salle est de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- humidité relative est de $90 \% \pm 5 \%$.

Pour la pâte du ciment garde sa forme, les réactions se font règlementaire dans ces conditions de températures et l'humidité pour éviter d'avoir des fissures et influencer négativement pour les analyses.

4. Les analyses physico-mécaniques :

4.1. Résistance à la traction par flexion :

Les essais sont conduits conformément à la norme NF P18-407 [17]. Les éprouvettes soumises en cet essai sont des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points.



Figure 14 : Essai de la résistance par flexion.

Essai de la résistance à la compression :

La résistance des matériaux est une discipline particulière de la mécanique des milieux continus permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux.

Pour l'étude du comportement de notre ciment il suffit d'étudier la résistance en compression.

La mesure de la résistance en compression se fait pour 2/7/28 jours mais on prend compte que de 28 jours en raison les réactions d'hydratation sont terminées à cet Age [18]

La détermination de la résistance à la compression du mortier a été effectuée selon la norme NF P18-406. [19]

Les résultats obtenus à différents échéances représentent la moyenne de trois échantillon

Les mesures se font sur des éprouvettes de mortiers normal 4x4x16 cm démoulées à un jour et conservées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai.



Figure 15 : Essai de la résistance à la compression.

4.2.Finesse Blaine (SSB) « NF EN 196-6 » :

La notion de finesse de mouture est liée à la notion de "surface spécifique Blaine" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité.

Cette aire est d'autant plus grande que les grains sont plus petits, donc que la finesse de mouture est grande.

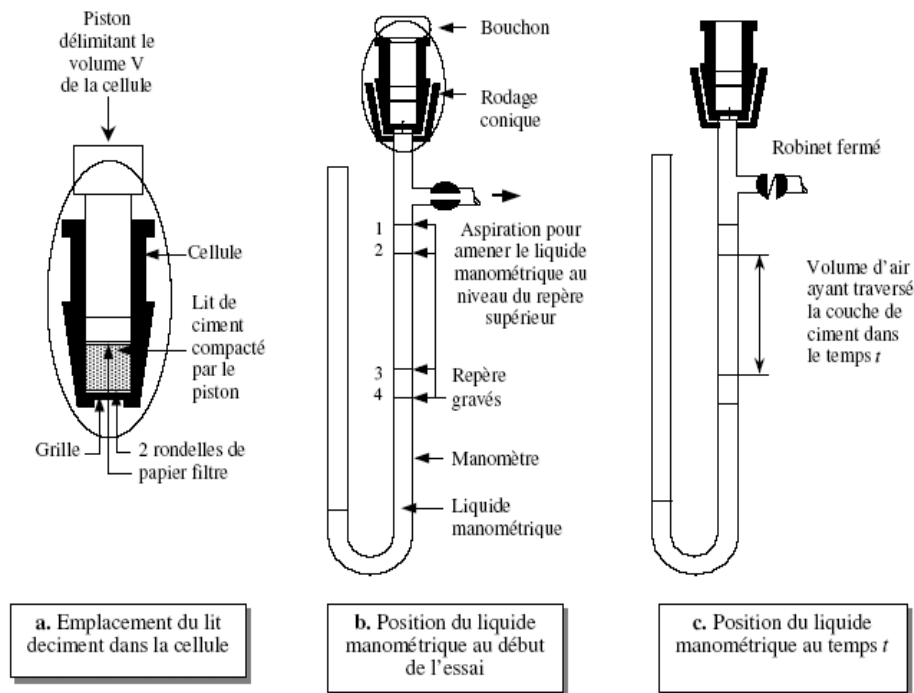


Figure 17 : Principe de fonctionnement de la technique de Blaine.

4.4. Le refus :

- A l'aide d'une balance on pèse 5 g de ciment puis on le met dans un tamis 45 mm ; le processus se fait par voie humide ; on place le tamis sous le robinet d'eau on mélange à certain moment pour que les petits grains descendent de tamis ; on met le tamis dans une cuve pour chauffer pendant 1 h.
- La quantité qui reste-t-on le pèse et on doit trouver 25 % pour dire que l'échantillon est acceptable.



Figure 18 : Tamis pour l'essai de refus.

4.5. Le temps de prise :

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

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 $d = 4\text{ mm}$ ($\pm 1\text{ mm}$) on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

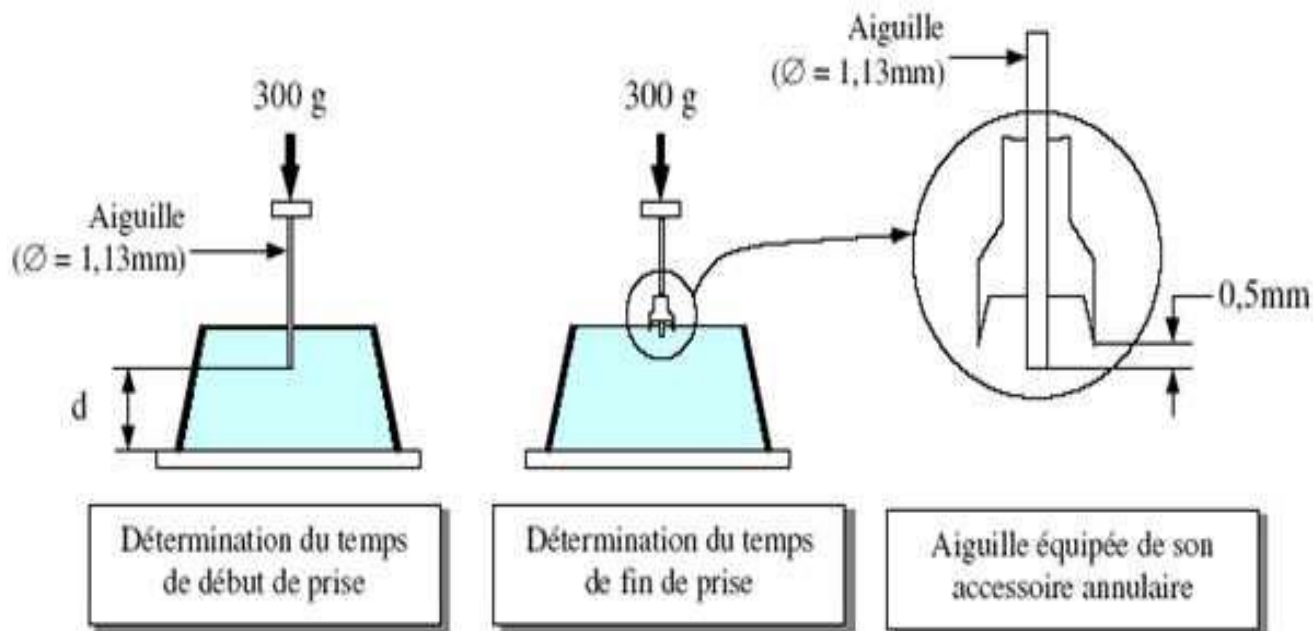


Figure 19 : principe de fonctionnement de l'essai de temps de prise.

5. L'analyses chimique :

5.1. Indice de la perte au feu :

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante par calcination de l'échantillon à l'air à une température de $(950 \pm 25)^\circ\text{C}$, le dioxyde de carbone et l'eau sont chassés et les éléments oxydables éventuellement présents sont oxydés jusqu'à un certain point. Une correction pour l'influence de cette oxydation sur la perte au feu est décrite.

5.1.1. Calcul et expression des résultats :

Calculer la perte au feu **paff** observée, en pourcentage, par la formule :

$$\mathbf{paff} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100$$

Où :

$$m_1 = 1.0234$$

$$m_2 = 1.0001$$

$$\mathbf{paff} = 2 \%$$

1. Exploitation des résultats obtenus :

Les résultats des essais physiques-chimique ; détermination de So_3 , la perte de feu, surface spécifique du Blaine, les résistances par flexion / compression sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

➤ % de calcaire dans le mortier vaut 0 % :

	Les Essais physiques			Les essais mécaniques							
	paff	ssb	Refus	flexion			compression			temps de prise	
				2 jrs	7 jrs	28 jrs	2 jrs	7 jrs	28 jrs	debut	fin
Eprouvette 01	1.00	3654	18	4.67	6.11	4.75	22.9	40.20	35.75	180	360
Eprouvette 02	1.09	3625	18.45	4.04	5.98	4.93	21.35	38.85	54.05		
Eprouvette 03	0.93	3563	19.3	4.24	5.43	5.59	20.95	39.08	56.25		

➤ % de calcaire dans le mortier vaut 10 % :

	Les essais physiques			Les essais mécaniques							
	paff	ssb	refus	flexion			compression			temps de prise	
				2 jrs	7 jrs	28 jrs	2 jrs	7 jrs	28 jrs	debut	fin
Eprouvette 01	5.10	3814	21.1	4.97	7.01	7.20	24.2 5	44.50	49.95	170	370
Eprouvette 02	5.46	3831	16	5.23	6.2	5.79	24.2 5	40.50	49.1		
Eprouvette 03	4.80	3852	16.2	5.19	6.49	6.87	21.2 0	37.75	50.2		

➤ % de calcaire dans le mortier vaut 15 % :

	Les essais physiques			Les essais mécaniques							
	paff	ssb	refus	flexion			compression			temps de prise	
				2 jrs	7 jrs	28 jrs	2 jrs	7 jrs	28 jrs	debut	fin
Eprouvette 01	7.44	4067	22.5	4.73	5.92	4.20	22.35	36.60	43.75	170	300
Eprouvette 02	7.38	3862	20.33	4.66	4.84	7.35	20.5	35.85	43.65		
Eprouvette 03	7.25	3949	25.13	4.04	4.92	6.26	21.10	36.5	42.7		

➤ % de calcaire dans le mortier vaut 17 % :

	Les essais physiques			Les essais mécaniques							
	paff	ssb	refus	flexion			compression			temps de prise	
				2 jrs	7 jrs	28 jrs	2 jrs	7 jrs	28 jrs	debut	fin
Eprouvette 01	5.65	3960	27.6	4.56	6.01	7.23	22.956	39.50	47.1	190	350
Eprouvette 02	5.46	3828	29.6	5.02	6.75	6.56	26.25	41.10	48.45		
Eprouvette 03	5.41	3768	36.13	5.34	6.2	7.07	24.50	38.1	49.5		

2. Effet sur la porosité capillaire :

Pour le ciment ajouté par 15 % / 17 % de calcaire la répartition est comparable à celle du témoin une nouvelle porosité se développe ; elle est acceptable pour 15 % parce que le refus ne dépasse pas 25 % mais pour le 17 % c'est refusable.

D'autre vue dans le ciment à 10 % elle diminue par rapport au témoin mais une valeur négligeable aussi il répond à la norme (refus \leq 25 %).

Pour le ciment fillérisé par 10 % de calcaire la répartition est comparable à celle du 15/17 %. Elle peut être liée à la formation de nouvelles espèces hydratées avec le C3S. Ces résultats de porosités sont donnés une idée sur un effet négatif d'ajouter une grande quantité du calcaire. Ce dernier a une activité chimique avec celui qui est responsable à la résistance du ciment C3S.

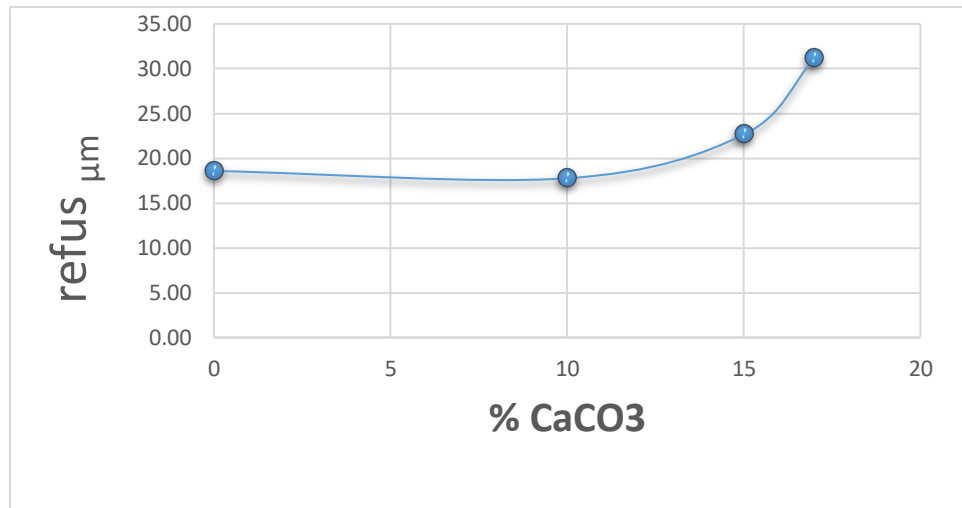


Figure 20 : Evolution du facteur de refus avec le pourcentage de calcaire.

3. Temps de prise :

- On constate d'après que le temps de début de prise et fin de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage de calcaire .
- le cas où on a rajouté 10 % du calcaire, le temps de fin de prise donne une bonne augmentation par rapport les autres essais.

Cette courbe représente 3 parties qui sont :

- ✓ La période dormante.
- ✓ Le début de prise.
- ✓ La fin de prise.

La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de calcaire est due à l'effet combiné l'augmentation du taux d'hydratation et l'augmentation de la fraction solide.

La poudre de pierre de chaux ne participe pas à la réaction chimique, mais elle agit en tant qu'accélérateur pendant l'hydratation du ciment.

La prise du ciment résulte en fait de l'hydratation du constituant majoritaire du clinker, l'alite (C3S), qui conduit à la formation des CSH. La précipitation de portlandite . [20]

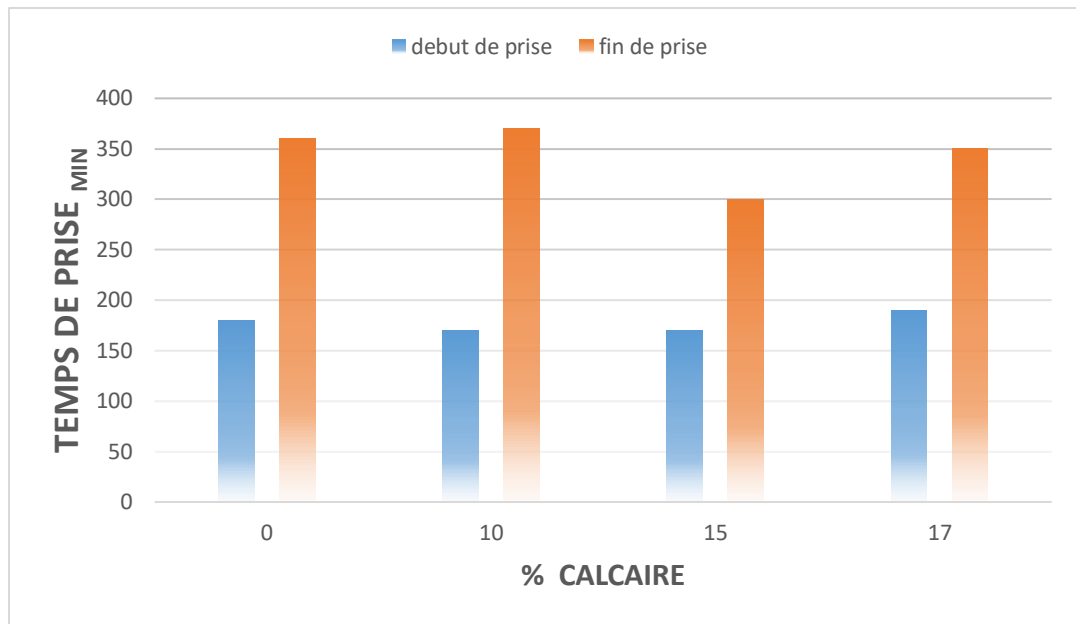


Figure 22 : Evolution du temps de prise en fonction du pourcentage du calcaire.

4. Effet sur les résistances mécaniques :

Les performances d'un ciment riche en C3S pour des pourcentages de l'ajout « calcaire » supérieur à 10 % l'on remarque une diminution des résistances, au-delà de 10 % de calcaire le liant retrouve ces performances optimales, une grande valeur de la résistance grâce à l'activité chimique du calcaire.

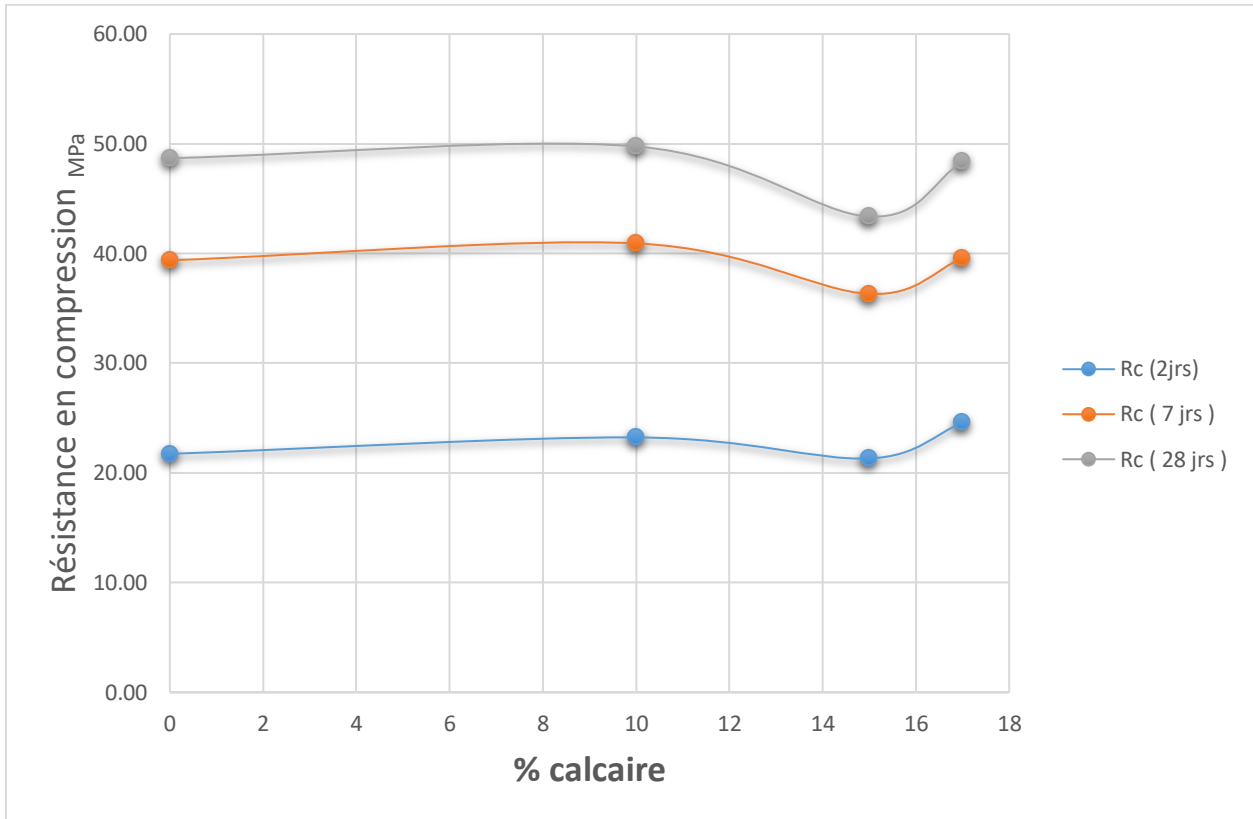


Figure 24 : Influence du pourcentage de calcaire sur la résistance mécanique.

En compression simple, le gain précoce de résistances pour 10 % de l'ajout « calcaire » correspond à un effet physique d'amélioration de la compacité par comblement de la porosité.

A partir de 10 % les molécules de C_3S seront saturés où l'activité chimique sera complète, dépassant de 10 % le liant sera en excès de chaux grâce à l'ajout calcaire ce dernier est l'ensemble de la chaux et le CO_2 , la résistance diminue à la présence de la chaux libre.

D'après ces résultats obtenus On peut tirer les conclusions suivantes :

✓ Le calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment, néanmoins un Pourcentage de 10 % est optimal pour aboutir à des performances maximales (résistances et durabilité) du ciment composé. Au-delà de ce pourcentage, son effet est néfaste.

✓ La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de Calcaire est dû à l'effet combiné de l'augmentation du taux d'hydrations et de l'augmentation de la fraction solide un pourcentage optimal de 10 % de calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment.

Conclusion générale

Dans la technologie de la construction le calcaire intervient de façon prédominante. Il constitue l'élément majeur des composants du ciment, il intervient comme filler dans les bétons et mortiers.

Nous avons montré que, pour des pourcentages importants ($\% \text{CaCO}_3 \geq 10$), l'activité chimique est favorable au développement des propriétés mécaniques des pâtes pures et des mortiers.

Le filler calcaire accélère la dissolution du C3S, les hydrates formés sont de natures différentes :

- nouveaux hydrates silicatés calciques
- carboaluminates et silicates calciques carbonatés.

Nous avons montré que, pour des pourcentages importants ($\% \text{CaCO}_3 \geq 10$), l'activité chimique est favorable au développement des propriétés mécaniques des pâtes pures et des mortiers.

Dans un deuxième temps le calcaire à un effet physique de qui s'exprime principalement par une modification de la compacité des grains, le résultat est une augmentation proportionnelle dans la résistance en compression.

A cause de la réactivité chimique du calcaire avec le C3S, on ne peut pas rajouter une grande quantité du calcaire ($\% \text{CaCO}_3 \geq 10$) au-delà il va jouer un rôle négatif sur la pâte du ciment et diminuer sa résistance mécanique.

Références bibliographiques

[1] **site internet** <https://www.gica.dz> .

[2], [3] **Jean P. Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz**, Introduction à la science des matériaux Volume 1 of *Traité des matériaux*, PPUR presses polytechniques, 1999, no 126 pages 499.

[4], [5] **IDRISSI Meryem**, Etude de l'inclusion du Fer dans les ciments Sulfo-alumineux et valorisation du caoutchouc dans leurs mortiers, thèse de doctorat, 2012, UNIVERSITÉ MOHAMMED V – AGDAL FACULTÉ DES SCIENCES Rabat

[6] **Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité- partie 1 : ciments courants**", 1996, 27 p.

[7] **Sophie Husson**, Etude physico-chimique et mécaniques des interactions ciment-fillers, thèse de doctorat, *Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité- partie 1 : ciments courants*", 1996, 27 p. 1991, l'institut nationale polytechnique et de l'école nationale supérieur des mines de SAINT-ETIENNE, page 12.

[8] **Hélène VIALLISTERRISSE**, Inter action des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles, thèse de doctorat, 2000, Université de Bourgogne.

[9] **François de Larrard**, *Construire en béton: l'essentiel sur les matériaux* Collection du Laboratoire central des ponts et chaussées, ISSN 1636-8584, Presses des Ponts, 2002, no 26 pages 197.

[10] **Toufik BOUBEKEUR**, Evaluation des Performances Des Ciments Portland au Calcaire - Exemple de la cimenterie de Chlef-, Mémoire de Magister, 2009, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[11] **Pierre CASSAT**, Détermination des mécanismes d'action des deux agents de mouture du ciment par Désorption Laser couplée à la spectrométrie de Masse à Transformée de Fourier, thèse de doctorat, 1998, L'université de METZ.

[12] , [13] **SALHI KAMEL**, Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton, Mémoire de magister, 2007, UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA.

[14] **YAHIA Mohamed**, Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment, Mémoire de magister, 2016, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

[15] **Jean P. Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz** , Introduction à la science des matériaux Volume 1 of Traité des matériaux , PPUR presses polytechniques, 1999 , no 127 pages 499.

[16] **François de Larrard**, Construire en béton: l'essentiel sur les matériaux Collection du Laboratoire central des ponts et chaussées, ISSN 1636-8584, Presses des Ponts, 2002, no 30 pages 197.

[17] Béton-Résistance à la traction par flexion, Décembre 1981 .

[18] **Sophie Trachte**, Matériau, matière d'architecture soutenable: Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable, Presses univ. de Louvain, 2012, no 70 pages 538.

[19] Bétons : Essai de compression, Décembre 1981.

[20] **AHMED GMIRA**, Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment, thèse de doctorat, 2003, l'UNIVERSITÉ D'ORLÉANS.

Annexes

Annexe 01 :

Calcul des caractéristiques complémentaires du ciment :

Module hydraulique :

$$\text{Module hydraulique (HM)} = \frac{C_aO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Module silicique :

$$\text{Module silicique (SR)} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Module aluminoferrique (A/F) :

$$\text{Module aluminoferrique} \left(\frac{A}{F} \text{ or AR} \right) = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Facteur de saturation de chaux (LSF) :

$$\text{Facteur de saturation de chaux (LSF)} = \frac{C_aO}{2,8 \times SiO_2 + 1,65 \times Al_2O_3 + 0,35 \times Fe_2O_3}$$

Annexe 02 :

Calcul de la finesse du ciment :

La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e) \cdot \sqrt{\eta}}$$

Avec :

S : Surface spécifique (cm²/g).

k : Constante de l'appareil.

e : Porosité de la couche tassée

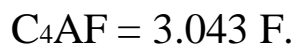
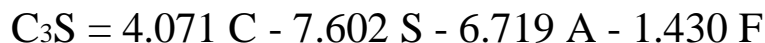
t : Temps mesuré en secondes.

ρ : Masse volumique (g/cm³).

η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

Annexe 03 :

Calcule de la composition minéralogique du clinker à l'aide des formules du BOGUE :



Le sens de ces abréviations :

- ✓ C₃S = 3CaO, SiO₂ “ Silicate tricalcique ‘Alite’ ”
- ✓ C₂S = 2CaO, SiO₂ “Silicate bicalcique ‘Bélite’ ”
- ✓ C₃A = 3CaO, Al₂O₃ “Aluminate tricalcique ‘célite’ ”
- ✓ C₄AF = 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ “aluminoferrete”

NOTATION DE BOGUE :

- ✓ Notation utilisée par les cimentiers où :

CAO= C.

SiO₂ = S.

Al₂O₃ = A.

Fe₂O₃ = F.

$S_{O_3} = S$.

Composition du mortier normalisé :

Mortier normalisé :

- ✓ 450 g de ciment
- ✓ 900 g de sable normalisé**
- ✓ 225 g d'eau.

le rapport E/C = 0,5.

E/L signifie rapport eau sur liant avec ou sans filler.